

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

ШЕВЧУК ВІТАЛІЙ ВАДИМОВИЧ

УДК: 621.319.3

ДИСЕРТАЦІЯ

**МЕТОДИ І ЗАСОБИ ВИЗНАЧЕННЯ НАЯВНОСТІ СПОТВОРЕННЯ ЯКОСТІ
ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ**

141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

14 Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

_____ Шевчук В.В.

Науковий керівник:

Волошко Анатолій Васильович , доктор технічних наук, професор

Київ – 2024

АНОТАЦІЯ

Шевчук В.В. Методи і засоби визначення наявності спотворення якості електроенергії в системах електропостачання. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 14 Електрична інженерія за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2024.

Проблема забезпечення якості електроенергії стає все більш актуальною з впровадженням різноманітних відновлюваних джерел енергії, потужних нелінійних споживачів та децентралізацією систем електропостачання. Ці зміни ускладнюють завдання забезпечення стійкого електропостачання, що призводить до значних втрат від погіршення якості електроенергії.

На тлі змін у господарському механізмі енергетики проблема зниження втрат електроенергії в електричних мережах залишається актуальною, ставши важливим завданням для забезпечення фінансової стабільності енергопостачальних організацій. Рівень втрат електроенергії в електричних мережах є ключовим показником економічності їхньої діяльності та ефективності систем обліку електроенергії.

Цей показник вказує на проблеми, які потребують термінового вирішення у сфері розвитку, реконструкції та технічного оновлення електричних мереж, вдосконалення методів їхньої експлуатації та управління, підвищення точності обліку електроенергії та ефективності збору коштів за спожиту електроенергію.

Дисертація спрямована на розробку та вдосконалення методів визначення якості електроенергії в сучасних системах електропостачання. Дослідження охоплює аналіз параметрів якості електроенергії, таких як провали та перевищення напруги, гармоніки, флікер, асиметрія напруги та інші, які впливають на ефективність та безпеку електричних систем.

Робота розглядає існуючі методи визначення якості електроенергії, включаючи стандарти, локальні методики, та системи моніторингу. Основним аспектом є

використання моделі просторового вектора для аналізу та моніторингу якості електроенергії в трифазних системах, а також виявлення провалів напруги.

Дисертація досліджує різні методи визначення наявності спотворень якості електроенергії та їх застосування у реальних умовах. Особлива увага приділяється аналізу результатів та порівнянню методів для визначення їхніх переваг та обмежень.

Висновки дослідження визначають значення роботи для розвитку електроенергетики та покращення якості електропостачання, забезпечуючи надійність та ефективність електричних систем у різних галузях виробництва та споживання електроенергії.

Ключові слова: Якість електроенергії, короткі замикання, провали та перевищення напруги, спотворення ЯЕЕ, ідентифікація, класифікація, режими електроспоживання, графіки електричних навантажень, перехідні процеси в системах електроспоживання, відхилення напруги, Smart Grid, системи електропостачання, метод Кларка, фазовий кут, нульова послідовність.

Список публікацій:

За результатами досліджень опубліковано 10 наукових праць, у тому числі 4 статті у наукових фахових виданнях, 1 стаття у виданні, яке увійшло до міжнародних наукових баз (Scopus), 1 розділ колективної монографії, 4 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

[1] Волошко А.В. Застосування теорії подібності для контролю електроспоживання промислових підприємств / А.В. Волошко, Я.С. Бедерак, В.В. Шевчук // Енергетика: економіка, технології, екологія : науковий журнал. – 2020. – № 4 (62). – С. 78-83. – Бібліогр.: 4 назв. ISSN 1813-5420.

[2] Волошко А.В. Перевірка подібності та однотипності добових графіків електричного навантаження промислових підприємств / А.В. Волошко, Я.С. Бедерак, В.В. Шевчук // Енергетика: економіка, технології, екологія : науковий журнал. – 2021. – № 3. – С. 57-63. – Бібліогр.: 6 назв. ISSN 1813-5420.

[3] Волошко А.В. Провали напруги в електричних мережах та визначення їхніх характеристик / А.В. Волошко, В.В. Шевчук // Вісник ВПІ, вип. 5 – 2023 – С. 12-17. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-170-5-12-17>.

[4] Джеря Т.Е. Forecasting electricity consumption using neural networks. / Т.Е. Джеря, В.В. Шевчук // Системи управління, навігації та зв'язку – Зб. наукових праць – 2023 – Том 2 № 72 – НУ «Полтавська політехніка ім. І. Кондратюка» – С. 42-44. ISSN 2073-7394

[5] Волошко А.В. Ідентифікація та класифікація однофазних провалів напруги за методологією просторового вектору кутової частоти. / А.В. Волошко, В.В. Шевчук // Енергетика: економіка, технології, екологія: науковий журнал. – 2023 – № 4 – С. 145-149. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2023.290944>

[6] Dzheria, T., Shevchuk, V., & Voloshko, A. V. (2022). Power Quality Monitoring System for electrical networks. In Studies in systems, decision and control (pp. 215–234). https://doi.org/10.1007/978-3-031-17554-1_10

[7] Волошко А.В., Джеря Т.Е., Шевчук В.В. (2022). Problems of determining the presence of distortions of electric power quality. Зб. наукових праць "InterConf," (№ 106) з матеріалами 5-ої Міжнародної науково-практичної конференції "Recent scientific investigation" (26-28 квітня 2022 року), Oslo, Norway, с. 369-376.

[8] Волошко А.В., Джеря Т.Е., Шевчук В.В. (2022). The formation of the vector of classification features of electric power quality distortions. Зб. наукових праць "InterConf," (№ 107) з матеріалами 12-ої Міжнародної науково-практичної конференції "Science and Practice: Implementation to Modern Society" (6-8 травня 2022 року), Manchester, Great Britain, с. 510-516.

[9] Шевчук В.В., Джеря Т.Е. (2022). Зниження впливу нелінійних навантажень на показники якості електричної енергії: основні способи управління параметрами енергетичних систем. Зб. наукових праць НН ІЕЕ, КПІ імені Ігоря Сікорського «Енергетика. Екологія. Людина». Київ, с. 11-17.

[10] Шевчук В.В. (2023). Механізм зменшення збитків від наявності провалів напруги за допомогою моделі просторового вектора. Міжнародний електронний науково-практичний журнал «WayScience» ISSN 2664-4819. Конференція 14-15 вересня 2023, вихід збірника тез доповідей 22.09.2023 р.

SUMMARY

Shevchuk V. Methods and means of determining the presence of power quality distortion in power supply systems. Qualifying scientific work, the manuscript.

PhD thesis in the field of knowledge 14 Electrical engineering in specialty 141 Electric power, electrical engineering and electromechanics. – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2024.

The problem of ensuring the quality of electricity is becoming more and more urgent with the introduction of various renewable energy sources, powerful non-linear consumers and decentralization of power supply systems. These changes complicate the task of ensuring stable electricity supply, which leads to significant losses from the deterioration of electricity quality.

Against the background of changes in the economic mechanism of the energy industry, the problem of reducing electricity losses in electrical networks remains relevant, becoming an important task for ensuring the financial stability of energy supply organizations. The level of electricity losses in electrical networks is a key indicator of the economy of their activity and the efficiency of electricity metering systems.

This indicator indicates problems that require urgent solutions in the field of development, reconstruction and technical renewal of electric networks, improvement of their operation and management methods, improvement of the accuracy of electricity accounting and efficiency of collection of funds for consumed electricity.

The dissertation is aimed at the development and improvement of methods for determining the quality of electricity in modern power supply systems. The study covers the analysis of power quality parameters such as voltage dips and overshoots, harmonics, flicker, voltage asymmetry and others that affect the efficiency and safety of electrical systems.

The work considers the existing methods of determining the quality of electricity, including standards, local methods, and monitoring systems. The main aspect is the use of the spatial vector model for the analysis and monitoring of the quality of electricity in three-phase systems, as well as the detection of voltage dips.

The research involves the use of sensors and analytical software to effectively monitor and analyze power quality. The relationship between voltage dips and power consumption, the use of real-time power measurements to detect and estimate distortions is also considered.

The dissertation examines various methods of determining the presence of power quality distortions and their application in real conditions. Special attention is paid to analyzing the results and comparing the methods to determine their advantages and limitations.

The findings of the study determine the importance of the work for the development of the electric power industry and the improvement of the quality of power supply, ensuring the reliability and efficiency of electrical systems in various branches of electricity production and consumption.

Keywords: Power quality, short circuits, voltage dips and overshoots, NEE distortion, identification, classification, power consumption modes, electric load graphs, transient processes in power consumption systems, voltage deviations, Smart Grid, power supply systems, Clark's method, phase angle, zero sequence.

List of publications:

Based on the results of the research, 10 scientific works were published, including 4 articles in specialized scientific publications, 1 article in a publication included in international scientific bases (Scopus), 1 chapter of a collective monograph, 4 theses of reports in collections of conference material.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	9
ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1.	15
СПОТВОРЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ТА ЇХ ВПЛИВ НА РОБОТУ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ	15
1.1 Якість електроенергії	15
1.2 Основні методи та засоби визначень спотворень якості електричної енергії	21
1.3 Формування вектору ознак класифікації спотворень якості електричної енергії	26
1.4 Провали напруги в електричній мережі.....	32
1.5 Аналіз сучасних методів визначення характеристик провалів напруги	36
Висновки до розділу 1.....	41
РОЗДІЛ 2	42
ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОВАЛІВ НАПРУГИ ТА ДОДАТКОВИХ, ПОВ'ЯЗАНИХ ІЗ СТИБКОМ ФАЗОВОГО КУТА	42
2.1 Характеристики провалів напруги – тривалість та глибина. Їх вплив на роботу чутливого обладнання.....	42
2.1.1 Обчислення глибини та тривалості провалу напруги в СКЗ	43
2.1.2 Вплив глибини та тривалості провалів напруги на чутливе обладнання.....	44
2.2 Додаткові характеристики провалів напруги та необхідність їх визначення	47
2.2.1 Стрибки фазового кута, пов'язані з провалами напруги.....	48
2.2.2 Визначення фазового кута.....	50
2.3 Модифікація методу визначення характеристик динамічної поведінки вектору напруг	52
Висновки до розділу 2.....	60
РОЗДІЛ 3.	62
ІДЕНТИФІКАЦІЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ ТИПІВ ПРОВАЛУ НАПРУГИ.....	62
3.1 Вейвлет-перетворення просторового вектора: новий трифазний підхід.....	62
3.2 Визначення характерних ознак наявності провалів напруги.....	74
3.3 Розробка методу ідентифікації типів провалу напруги на основі застосування методології просторового вектору в комплексній площині	75
3.4 Розробка методу класифікації провалів напруги шляхом визначення характеристик просторового вектору та напруги нульової послідовності	79

Висновки до розділу 3.....	85
РОЗДІЛ 4.	86
ТЕСТУВАННЯ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ НА НЕСПРИЙНЯТЛИВІСТЬ ДО ПРОВАЛІВ НАПРУГИ, КОРОТКОЧАСНИХ ПЕРЕРИВАНЬ ТА ЗМІН НАПРУГИ	86
4.1 Вплив точки початку провалу на чутливість електрообладнання	87
4.2 Дослідження стійкості електромагнітного реле до провалів напруги, стрибку фазового кута та точок початку та закінчення провалів	89
4.2.1 Механізм реагування електромагнітного реле на провал напруги	91
4.2.2 Чутливість до зміни частоти, наявності гармонійних спотворень, змін номінального значення напруги	95
4.2.3 Симетрія чверті циклу щодо точки на хвилі	97
4.3 Співвідношення X/R і вибір автоматичного вимикача	98
4.4 Розрахунок короткого замикання імпедансним методом	104
Висновки до розділу 4.....	106
ВИСНОВКИ.....	108
Перелік літературних джерел.....	110

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ЯЕЕ – якість електричної енергії

СКЗ – середньоквадратичне значення

ЕМР – електромагнітне реле

ЕМВ – електромагнітне випромінювання

ОЕС – об'єднана енергетична система

ШПФ – швидке перетворення Фур'є

ДПФ – дискретне перетворення Фур'є

ВСТУП

Актуальність теми. Якість електроенергії має вирішальне значення для безперебійної роботи сучасних електричних систем та електроніки. Зростання електричного навантаження та поширення електронних пристроїв призводять до збільшення спотворень у напрузі та струмі, що може спричинити серйозні проблеми в роботі обладнання та підвищити ризик виникнення аварійних ситуацій.

Для забезпечення надійності та стабільності електропостачання необхідно розробляти та вдосконалювати методи та засоби визначення наявності та корекції спотворень якості електроенергії.

Аналіз та класифікація провалів напруги є необхідним для ідентифікації відмов та вчасної реакції на них. Розробка систем моніторингу, зокрема на основі моделей просторового вектору, дозволяє забезпечити постійний контроль за параметрами електроенергії та вчасно реагувати на будь-які аномалії.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі електропостачання КПІ ім. Ігоря Сікорського в рамках програми Міністерства освіти і науки України за наступними пріоритетними напрямками розвитку науки і техніки:

- забезпечення енергоефективності та стійкості електропостачання;
- підвищення якості електроенергії та зменшення впливу спотворень на електричні мережі;
- розвиток нових технологій та методів контролю якості електроенергії.

Метою дисертаційної роботи є забезпечення якості електричної енергії в системах електропостачання шляхом розробки та вдосконалення методів визначення спотворень якості електричної енергії і створення системи їх моніторингу в реальному часі.

Поставлена мета вимагає розв'язання таких задач:

- проаналізувати сучасний стан методів та засобів оцінювання параметрів якості електричної енергії в електричних мережах;
- проаналізувати існуючі стандарти та методичні матеріали на предмет випробування на несприйнятливість до провалів напруги, короточасних переривань та змінень напруги;
- розробити метод визначення динамічної поведінки векторів напруги електричної мережі під час її провалів та просідань;
- розробити метод ідентифікації та класифікації провалів напруги в електричних мережах на основі використання методології просторового вектору на напруги нульової послідовності.

Об'єкт дослідження – процеси оцінювання та моніторингу якості електричної енергії в системах електропостачання.

Предмет дослідження – методи і засоби визначення наявності спотворення якості електроенергії в системах електропостачання.

Інформаційною основою для дослідження є наукові праці вітчизняних та зарубіжних учених з вирішення проблем ефективного керування режимами розподільних мереж, статті, монографічні джерела, в яких вивчалася дана проблематика, інтернет-джерела та електронні публікації.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Модифіковано метод визначення характеристик динамічної поведінки вектора напруг під час їх провалу введенням порівняльного аналізу реального сигналу та нормованого шаблону, що дозволило враховувати третю характеристику (стрибок фазового кута) при проведенні випробувань електрообладнання на несприйнятливість до провалів напруги, короточасних переривань та змінень напруги.

2. Розроблено метод ідентифікації провалів напруги в трифазних електричних мережах за рахунок застосування методології просторового вектору в комплексній площині та сегментації провалів напруги по кожній фазі, що дозволило проводити автоматичне виявлення провалів напруги для побудови системи моніторингу якості електричної енергії в електричних мережах.

3. Розроблено метод класифікації провалів напруги шляхом визначення характеристик просторового еліпса - мала-велика напіввісі, кут їх повороту та напруги нульової послідовності, що використовуються для автоматичного визначення появи часу падіння/зростання напруги електричної мережі, класифікації провалів та остаточної характеристики наявного порушення якості електричної енергії.

Практичне значення одержаних результатів. Поява в системах електропостачання потужних нелінійних споживачів електричної енергії, засобів силової електроніки, відновлювальних джерел енергії приводить до погіршення якості електричної енергії і, як наслідок, до збоїв в роботі промислового обладнання, виходу його з ладу і великих виробничих і грошових втрат.

На даний час тестування обладнання на несприятливість до провалів напруги, короткочасних переривань та змінень напруги проводиться тільки по двом його характеристикам – тривалості та глибини. Але, як показують дослідження в даній роботі, на продуктивність роботи промислового обладнання дуже впливають додаткові характеристики провалів напруги, короткочасних переривань та змінень напруги, які викликані наявністю стрибка фазового кута (PAJ). Його поява, спричиняє невідповідність обчислення характеристик провалу- тривалості та глибини появою змін місцезнаходження точок початку і закінчення провалів напруги, обчислення амплітуди залишкової напруги. Все це призводить до невірного розрахунку захисних засобів в системі електропостачання, невірного їх спрацювання та виходу із ладу обладнання.

Враховуючи це в дисертації обґрунтована необхідність введення в програму тестування електрообладнання перевірку на вплив додаткових характеристик

провалів напруги, а саме: стрибок фазового кута (PAJ), точок початку та закінчення провалу (POI, POR) і залишкову напругу.

Для побудови системи моніторингу якості електричної енергії в електричних мережах може бути використаний метод ідентифікації провалів напруги в трифазних електричних мережах за рахунок застосування методології просторового вектору в комплексній площині та сегментації провалів напруги по кожній фазі, що дозволить проводити автоматичне виявлення провалів напруги.

Розроблений метод класифікації провалів напруги шляхом визначення характеристик просторового еліпса - мала-велика напіввісі, кут їх повороту та напруги нульової послідовності, може використовуватися для автоматичного визначення появи часу падіння/зростання напруги електричної мережі, класифікації провалів та остаточної характеристики наявного порушення якості електричної енергії. Отримані при цьому дані можуть використовуватися при проектуванні захисного обладнання для обладнання виробничих процесів.

Результати дослідження впроваджені в навчальний процес при викладанні наступних дисциплін: «Мікропроцесорна техніка в системах обліку енергії» та «Системи моніторингу, обліку та керування енерговикористанням».

Особистий внесок здобувача. Усі результати та висновки, що становлять основний зміст дисертації, отримані автором особисто. У роботах, опублікованих автором у співавторстві, особисто здобувачеві належить: у [1] запропоновано застосування стохастичних характеристик добових графіків електричного навантаження трансформаторних підстанцій; у [2] розроблено метод оцінки однотипності і подібності добових графіків електричного навантаження шляхом порівняння їх з еталонними (типовими); у [3] запропоновано для визначення провалів напруги застосовувати не тільки їх основні характеристики – глибина та тривалість, а і стрибок фазового кута; у [4] на основі аналізу впливу температури повітря на споживання електричної енергії, визначено характерні особливості, які необхідно враховувати при побудові моделі прогнозу споживання електричної енергії; у [5] запропоновано метод ідентифікації та класифікації однофазних провалів напруги за

методологією просторового вектору кутової частоти; у [6] показано застосування характеристик частотно-впорядкованих рівнів вейвлет-декомпозиції для ідентифікації типів спотворень якості електричної енергії; у [7] на основі аналізу результатів застосування основних методів обробки інформаційних сигналів на предмет визначення типу спотворення якості електричної енергії, окреслені необхідні межі їх застосування; у [8] запропоновано спосіб формування вектору ознак класифікації спотворень якості електричної енергії; у [9] досліджено вплив потужних нелінійних споживачів на якість електричної енергії та шляхи зменшення їх впливу; у [10] запропоновано для більш ефективного визначення впливу провалів напруги на продуктивність роботи електрообладнання визначати характеристики провалів напруги не тільки як їх глибина та тривалість, а і вплив на їх характеристики положення точок початку і закінчення провалів (стрибок фазового кута).

Апробація роботи. Основні положення роботи доповідалися та були обговорені на таких науково-технічних конференціях: V Міжнародна науково-практична конференція "Recent scientific investigation"; XII Міжнародна науково-практична конференція "Science and Practice: Implementation to Modern Society"; XIV Науково-технічна конференція Навчально Наукового Інституту Енергозбереження та Енергоменеджменту «Енергетика. Екологія. Людина»; I Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Achievements of 21st Century Scientific Community».

Публікації. Основний зміст дисертації відображений у 10 наукових працях, 4 статті у наукових фахових виданнях за переліком ВАК України, 1 стаття у виданні, яке увійшло до міжнародних наукових баз (Scopus), 1 розділ колективної монографії, 4 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків та списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації становить 119 сторінок, у тому числі 95 сторінка основного змісту, 36 рисунків, 7 таблиць, список використаних джерел із 90 найменувань.

РОЗДІЛ 1.

СПОТВОРЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ТА ЇХ ВПЛИВ НА РОБОТУ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

1.1 Якість електроенергії

Розвиток суспільства супроводжується збільшенням використання електричної енергії. Інтенсифікація виробництва та поширення електротехнологій призводять до значного зростання енерговитрат і навантажень у системі. Проблема забезпечення якості електроенергії з кожним роком набуває особливого значення завдяки впровадженню різноманітних відновлюваних джерел енергії, потужних нелінійних споживачів та перетворенню централізованих систем електропостачання в децентралізовані. Всі ці зміни призводять до неможливості забезпечити стійкий режим постачання електроенергії, що спричиняє значні втрати від зниження якості електроенергії.

З огляду на зміни у сфері енергетики, питання про зменшення втрат електроенергії в електричних мережах стає ще більш актуальним. Це стає одним із пріоритетних завдань для забезпечення фінансової стабільності енергопостачальних підприємств. Рівень втрат електроенергії у мережах є ключовим показником ефективності їхньої роботи. Це також свідчить про якість системи обліку електроенергії та результативність діяльності енергопостачальних компаній у забезпеченні передачі та розподілу електричної енергії.

Якість електроенергії визначається як комплексний набір технічних параметрів, що характеризують якість живлення та функціонування електричних мереж та споживачів. [11]

Основні параметри включають стабільність напруги та частоти, гармонічні спотворення, перерви в подачі, фазові зсуви, спотворення хвиль, неоднорідності напруги та інші. Якість електроенергії має велике значення для безпеки людей і майна, ефективності виробництва, комфорту в побуті та стійкості інфраструктури.

Стабільне та надійне електропостачання забезпечує нормальну роботу електричних приладів, захищає від втрат даних та пошкоджень обладнання. [7]

Якість електричної енергії – це комплекс характеристик, які визначають її відповідність встановленим стандартам і можливість використання для потреб, на які вона призначена [12]. Основними показниками якості електроенергії, відповідно до вказівок у розділі XI Кодексу систем розподілу [12] є:

- 1) Стандартна номінальна напруга, що становить 220 В, з можливістю відхилень не більше $\pm 10\%$. [12]
- 2) Частота електропостачання для систем, синхронно приєднаних до ОЕС України, становить 50 Гц з відхиленням $\pm 1\%$ протягом 99,5% часу за рік та 50 Гц з відхиленням $+4\%$ (6%) протягом усього часу. Для систем без синхронного приєднання до ОЕС України, частота також становить 50 Гц, але з відхиленням $\pm 2\%$ протягом 99,5% часу за рік та $\pm 15\%$ протягом усього часу. [12]
- 3) Показник довготривалого флікера (мерехтіння), викликаного коливанням напруги, для мереж низької напруги має бути меншим або рівним 1 для 95 % часу спостереження. [12]
- 4) Зворотна послідовність напруги. 95% середньоквадратичних значень зворотної послідовності напруги знаходяться в діапазоні від 0% до 2% від значень складника напруги прямої послідовності, що свідчить про стабільність системи. [12]
- 5) Сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень напруги не перевищує 8%, що вказує на високу якість електричного живлення. [12]

Концепція якості електричної енергії відрізняється від інших видів продукції. Кожен електричний пристрій призначений для роботи за певних параметрів та умов експлуатації, включаючи номінальну частоту, напругу, форму кривої напруги, коефіцієнт часової перенапруги та інші. Ці параметри визначають рівні електромагнітних перешкод у системі електропостачання, таких як частота, напруга, форма кривої, симетрія та імпульси напруги. Погіршення якості електроенергії, з іншого боку, є наслідком збільшення рівня електромагнітної сумісності в системі електропостачання, що обумовлено технологічними процесами виробництва, передачі, розподілу та споживання електроенергії. [7]

Алгоритми визначення характеристик споживання електроенергії ґрунтуються на обробці зашифрованих вибірок миттєвих значень фазних струмів і напруг, зібраних протягом певного періоду сигналу в рівновіддалених моментах часу. Зростаюча потреба в електроенергії, зміни в структурі енергопереносу, а також збільшення числа потужних нелінійних навантажень мають негативний вплив на якість електроенергії і сприяють появі систематичних похибок у вимірювальних приладах для синусоїдальних систем. Це особливо помітно внаслідок нестабільності частоти в електричній мережі.

Порушення якості електроенергії може мати наступні наслідки [13]:

- збільшення втрат енергії в мережах;
- перегрів електродвигунів та електричних машин, що призводить до швидшого старіння ізоляції та підвищує ризик аварій внаслідок однофазних коротких замикань та їх переходу в багатofазні замикання;
- збільшення споживання електроенергії та потужності обладнання;
- відмови та помилкові спрацьовування автоматики і пристроїв релейного захисту;
- відмови електроніки управління та обчислювальної техніки;
- поява перешкод для телевізійного та радіоустаткування, порушення працездатності рентгенівського обладнання;
- некоректна робота електролічильників.

Сукупність показників якості електроенергії включає основні, такі як: відхилення напруги (δU , %), розмах зміни напруги (δU_t , %), доза коливань напруги (ψ , %), коефіцієнт несинусоїдальності кривої напруги (k_{ncU} , %), коефіцієнт n -й гармонійної складової напруги непарного (парного) порядку ($k_{U(n)}$, %), коефіцієнт зворотної послідовності напруги (k_{2U} , %), коефіцієнт нульової послідовності напруг (k_{0U} , %), тривалість провалу напруги (Δt_{np} , с), імпульсна напруга (U_{imp} , кВ), та відхилення частоти (Δf , Гц). [12]

Додаткові показники якості електроенергії відображають в собі різні форми виміру основних показників якості електроенергії та мають широке застосування у

різних нормативно-технічних документах, включаючи: коефіцієнт амплітудної модуляції напруги (k_{mod}), коефіцієнт небалансу міжфазних напруг ($k_{неб.м}$), коефіцієнт небалансу фазних напруг ($k_{неб.ф}$). [12]

Дозволені значення цих показників визначені, а їх вимірювання проводиться персоналом електричних мереж на характерних точках. Зазначено, що протягом 95% доби (22,8 години) показники якості електроенергії повинні залишатися в межах нормальних значень, а протягом усього часу, включаючи післяаварійні режими, вони повинні дотримуватися максимально допустимих значень. Співробітники електричних мереж підприємства ведуть контроль якості електроенергії в ключових точках електричних мереж. Під час цього процесу час вимірювань показників якості електроенергії повинен складати не менше доби.

Один з основних параметрів якості електроенергії – це стабільність напруги. [7] Вона повинна знаходитися в межах, які визначені стандартами, щоб забезпечити нормальну роботу електричних пристроїв та устаткування. Великі коливання напруги можуть призводити до пошкоджень електроніки та інших чутливих систем. Відхилення напруги обчислюється за формулою:

$$\delta U_t = \frac{U(t) - U_n}{U_n} \cdot 100\%, \quad (1.1)$$

де $U(t)$ представляє діюче значення напруги прямої послідовності основної частоти в момент часу t , кВ; U_n є номінальною напругою, кВ.

Величина $U_t = \frac{1}{3}(U_{AB(1)} + U_{BC(1)} + U_{AC(1)})$, де $U_{AB(1)}$, $U_{BC(1)}$, $U_{AC(1)}$ – діючі значення міжфазних напруг основної частоти.

Зміни у навантаженні, рівні напруги та інші фактори призводять до коливань величини падіння напруги в елементах мережі, а отже, рівня напруги U_t . Це призводить до виявлення різних відхилень напруги в різних місцях мережі в один і той самий момент часу, або в одній точці в різні моменти.

Працездатність електроприймачів з напругою до 1 кВ гарантується в умовах, коли відхилення напруги на їх вході становить $\pm 5\%$ (нормальне значення) і $\pm 10\%$ (максимальне значення). Для мереж з напругою 6-20 кВ встановлюється максимальне відхилення напруги $\pm 10\%$. [11]

Рівень напруги впливає на швидкість обертання асинхронних електродвигунів та їх продуктивність, а також на споживану реактивну потужність, що може впливати на величину втрат напруги та потужності в різних ділянках мережі.

Зниження напруги може призвести до подовження часу проведення технологічних процесів в електротермічних і електролізних установках, а також до нестабільного прийому телевізійних передач у комунальних мережах. Для компенсації цього застосовують стабілізатори напруги, які можуть самі споживати реактивну потужність та мати втрати потужності в стані спокою. На їх виробництво часто використовується дефіцитна трансформаторна сталь. З метою забезпечення необхідного рівня напруги на шинах низької напруги в усіх ТП застосовується зустрічне регулювання напруги в центрі живлення. В цьому режимі підтримується максимально допустима напруга.

Діапазон зміни напруги визначається як різниця між значеннями напруги до та після конкретної зміни. Цей діапазон можна обчислити за певною формулою:

$$\delta U_t = \frac{U_i - U_{i+1}}{\sqrt{2} \cdot U_n} \cdot 100\%, \quad (1.2)$$

де U_i і U_{i+1} є значеннями послідовних екстремумів або екстремуму по горизонталі обвідних амплітудних значень напруги.

Розмахи зміни напруги охоплюють окремі зміни напруги будь-якої форми, що повторюються з частотою від двох разів на хвилину до одного разу на годину. Ці зміни мають середню швидкість зміни напруги більше 0,1% за секунду для ламп розжарювання та 0,2% за секунду для інших приймачів.

Швидкі зміни напруги спричиняються ударним режимом роботи різних устаткувань, таких як двигуни металургійних прокатних станів, тягові установки залізниць, лугові сталеплавильні печі, зварювальна апаратура, а також частими пусками потужних короткозамкнених асинхронних електродвигунів, коли їх пускова реактивна потужність становить кілька відсотків потужності короткого замикання.

Число змін напруги в одиницю часу, тобто їх частота, визначається за формулою

$$F = \frac{m}{T}, \quad (1.3)$$

де m – кількість змін напруги за час T , який визначає загальний час спостереження за розмахами напруги.

Цей показник особливо важливий для деяких видів споживачів, наприклад, для ламп розжарювання чи інших електроприладів, які чутливі до коливань напруги. Розмахи зміни напруги можуть впливати на роботу таких приладів та викликати збої чи навіть пошкодження.

Під час операції в мережі потужних випрямних та перетворювальних установок, а також в дугових печах і зварювальних установках, що містять нелінійні елементи, відбувається спотворення кривих струму і напруги. Несинусоїдальні криві струму і напруги є гармонійними коливаннями з різними частотами (промислова частота - це нижча гармоніка, а всі інші є вищими гармоніками в порівнянні з нею).

Вищі гармоніки в електропостачальній системі призводять до додаткових втрат енергії, скорочують термін служби конденсаторних батарей, електродвигунів і трансформаторів. Крім того, вони спричиняють труднощі при налагодженні релейного захисту та сигналізації, а також експлуатації електроприводів з тиристорним управлінням і т. д. [15]

Коефіцієнт несинусоїдальності кривої напруги k_{ncU} є показником, що відображає вміст вищих гармонік в електричній мережі. Його значення визначається за виразом:

$$k_{ncU} = \frac{1}{U_n} \sqrt{\sum_{n=2}^N U_n^2} \cdot 100\%, \quad (1.4)$$

де N вказує на порядок останньої врахованої гармонійної складової, U_n визначає діюче значення для кожної гармонії n (де $n = 2, \dots, N$) у вольтах. Нормативні значення для коефіцієнта несинусоїдальності кривої напруги k_{ncU} не повинні перевищувати: для мереж напругою до 1 кВ – 5% для нормальних та 10% для максимальних значень, для мереж напругою від 6 до 20 кВ – 4% для нормальних та 8% для максимальних значень, для мереж напругою 35 кВ – 3% для нормальних та 6% для максимальних значень, та для мереж напругою 110 кВ і вище – 2% для нормальних та 4% для максимальних значень. [11]

Для зменшення вищих гармонік використовуються силові фільтри, які складаються з послідовного з'єднання індуктивних та ємнісних опорів, налаштованих

в резонанс на певну гармоніку. Для усунення гармонік низьких частот застосовують перетворювальні установки з великою кількістю фаз.

1.2 Основні методи та засоби визначень спотворень якості електричної енергії

Спотворення якості електроенергії – це відхилення від нормальних параметрів електричної енергії, яке може виникати внаслідок різних фізичних або технічних причин. Це може включати в себе такі явища, як гармоніки, перепади напруги, високі рівні шуму, флікер, недостатній фактор потужності тощо. Такі спотворення можуть впливати на електричні системи та прилади, що використовуються в промисловості, комерції або побуті, та можуть призводити до різноманітних проблем. [7]

Як показано на рис. 1.1, найбільший відсоток відмов у обладнанні, а саме 31%, обумовлений провалами напруги. Провал напруги може вплинути на більшість чутливого обладнання, таке як персональні комп'ютери (ПК), приводи з регульованою швидкістю (ASD), програмовані логічні контролери (PLC) і контактори. [3]

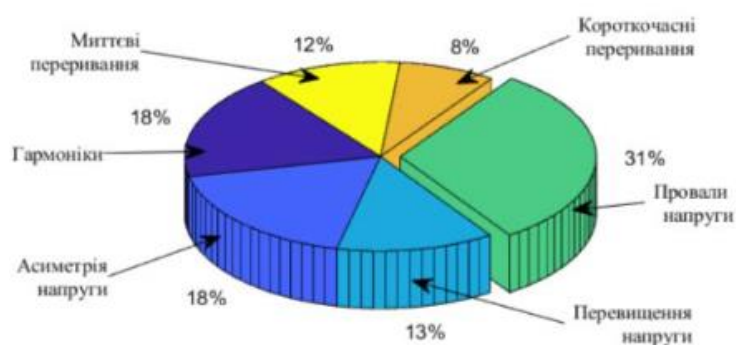


Рисунок 1.1 – Вплив параметрів якості електроенергії на перебої в роботі електричного обладнання [3]

Спотворення, що впливають на якість напруги, можуть з'являтися як при передачі, так і при розподілі електроенергії. Щодо спотворень при передачі, повітряні

лінії електропередачі, через свою значну протяжність, піддаються впливу атмосферних явищ, таких як блискавки, що може викликати різні види спотворень, переривань, змін напруги та навіть припинення подачі електроенергії. Тривалість та ступінь цих спотворень залежать від структури мережі та часу, необхідного для її реконфігурації. Перенапруги, викликані ударом блискавки, зазвичай розглядаються як зовнішні відносно мережі явища.

Інші види спотворень можуть виникати під час управління мережею, зокрема під час скидань або несподіваних збільшень навантаження. Хоча останній вид спотворень рідко виникає, оскільки великі навантаження зазвичай підключаються до мережі поступово, це може стати результатом раптових скидань навантаження, часто викликаних аварійними ситуаціями. Внутрішньомережеві джерела спотворень включають резонанс, нестійкість при передачі, ферорезонанс, комутації та пошкодження "фаза/земля".

Щодо спотворень при розподілі, зростаюча кількість електричних навантажень може погіршувати якість енергії на всіх рівнях, в той час як стандартизація якості енергії активно здійснюється. Хоча силова електроніка може призводити до погіршення якості енергії, вона також має власні засоби для боротьби з цими проблемами. Розвиток активних фільтрів для різних напруг та використання нових елементів, таких як IGBT, GTO або IGCT, дозволяє підвищити якість енергії. Погіршення якості електроенергії не обмежується лише гармоніками, а також включає зміни напруги, посадки напруги і спотворення, пов'язані з коливаннями напруги, відомі як "мерехтіння", які можуть бути ефективно подолані за допомогою сучасних технологій. [13]

Існує дві основні групи спотворень у якості електроенергії. До першої групи належать кількість напруг і дисбаланси напруги, а також перехідні напруги. Огляди напруги та інші типи якісних з'єднань складають другу групу. Виявлення двох типів спотворень, серед іншого, обговорювали Абдель-Галіл та співавт. [13], Старзик та співавт. [14]. У 2007 році Ріберіо [15] запропонував принцип розподілу електричного сигналу на ряд простих компонентів для класифікації спотворень в електричній

мережі. Але запропонований підхід не дозволяв класифікувати мерехтіння (кількість частот), міжгармонійність та асиметрію.

Оскільки проблеми з якістю електроенергії є небажаними для електричної системи, їх точне та раннє виявлення дуже важливо. Ефективність правильного виявлення дуже допомагає у належному вирішенні проблем. Для належного покращення необхідно виділити властивості завад сигналу. Наявність непарних гармонік є основною причиною цих порушень. Для правильного функціонування електричних приладів кількість гармонік повинна бути зменшена до мінімальних меж. Найвища якість необхідна для швидкого використання чутливого електронного обладнання в електротехнічній промисловості.

Існує багато методів, заснованих на візуальному аналізі сигналів, але вони не можуть бути використані в програмах реального часу. Методи обробки сигналів [16] дозволили розробити методи, які є більш надійними та точними. Ефективність алгоритму класифікації дуже важлива для точного проектування системи контролю пом'якшення. Основними типами класифікацій, є метод RMS, короткочасне перетворення Фур'є, швидке перетворення Фур'є, вейвлет перетворення і дискретне вейвлет-перетворення. [17]

RMS є найпоширенішим і простим методом класифікації сигналів. Нормальні коливання сигналу класифікуються за середньоквадратичними значеннями. Цей метод певною мірою прийнятний для перегляду простих подій несправності. Але для складної системи, в якій одночасно виникають різні несправності, цей метод ненадійний. Основним недоліком є його залежність від меншого розміру сигналів, а також він не може розрізнити основну частоту та гармоніки. [17].

Для точного пом'якшення необхідно мати досконале уявлення про джерело порушення. Це допоможе нам вибрати правильний метод. Класифікація, заснована на методах обробки сигналів, вважається точною та охоплює локалізацію події несправності, тривалість і тип подій. Цей метод вважається надійною технікою, коли механізм автоматизованого керування об'єднано з різними програмними обчисленнями. Це також покращує швидкість обробки даних для пом'якшення наслідків у режимі реального часу, а також забезпечує зберігання даних на основі

таблиці для подальших посилань. Порухення якості електроенергії мають нестационарний і нелінійний характер. Класифікація цих змінних сигналів здійснюється двома способами, а саме методами на основі трансформації та методами на основі амплітуди-частоти. Ідентифікація та класифікація різних типів порушень якості електроенергії в реальному часі здійснюється з посиланням на стандарти та рекомендації IEEE.

Перетворення Фур'є використовується для перетворення сигналів у часовій області у відповідні частотні компоненти. Це ефективно для періодичних сигналів, щоб отримати їх величини та фази. Дискретне перетворення Фур'є (ДПФ) – це передовий метод аналізу перетворення Фур'є. Швидке перетворення Фур'є (ШПФ) вважається швидшою версією ДПФ, вибірка виконується у віконному режимі. Але ШПФ не є ефективним методом аналізу вилучення інформації як нестационарних, так і нелінійних сигналів. Тоді ДПФ вважається надійним інструментом для аналізу розкладання сигналу. Запровадження ШПФ може зменшити загальний час обчислень і таким чином вибрати ефективний алгоритм пом'якшення. [23]

Коротке перетворення Фур'є – це метод широко відомий як версія ШПФ із ковзним вікном, яка має досить хороші результати щодо частоти порівняно з іншими методами класифікації. Він також показує погані результати для змінних у часі та нелінійних сигналів. Він може розділити тривалі сигнали, що змінюються в часі, на відповідні коротші сегменти, щоб зменшити складність обчислень. [23]

Порівняно з вищезгаданими методами, вейвлет перетворення (Karoor and Saini, 2011a; 2010a [18]) є дуже швидким і надійним методом для виділення ознак нестационарних сигналів, таких як падіння напруги та здуття. Вейвлет може мати можливість витягувати функції протягом короткого проміжку часу. Цього можна досягти як для високочастотних, так і для низькочастотних компонентів сигналу. Метод аналізу різних частот, як правило, адаптований і відомий як багаторазовий аналіз. Його недоліком є погана частотна характеристика на високочастотних компонентах. Енергетичний аналіз проводиться для всіх рівнів.

Енергія вейвлета є сумою квадратів загального рівня коефіцієнтів вейвлета. Цей рівень енергії змінюється для різних масштабів перетворень. Енергетичні коефіцієнти

спотворених сигналів будуть надані для детального аналізу. Для розкладання сигналу з метою класифікації вибрано тип вейвлетів Добеші “db4”. Тут операції зсуву та масштабування виконуються над материнським вейвлетом і отримують результуючий (дочірній) вейвлет. Це може бути представлення як частотної, так і часової області. Ця функція відрізняє вейвлети від представлень перетворення Фур’є, оскільки він дає представлення лише в термінах частоти. Аналіз вейвлет перетворення виконується за трьома типами, а саме: безперервні вейвлет-перетворення, вейвлет-серії та дискретні вейвлет-перетворення. [23]

Таблиця 1.1 – Події якості електроенергії та їх стандарти

Події	Стандарти
Класифікація якості електроенергії	IEC61000-2-1:1990, IEC 61000-2-5:1995
Моніторинг якості електроенергії	IEEE 1159:1995
Перехідні процеси	IEC 816:1984 IEC 61000-2-1:1990
	IEEE C62:41:1991, IEEE 1159:1995
Просадка/зростання напруги та переривання	IEC 61009-2-1:1990, IEEE 519:1992
Гармоніки	IEC 61000-2-1:1990; IEEE 519:1992
Мерехтіння напруги	IEC 61000-4-15:1997

Вейвлет-пакетні перетворення також пов'язані з дискретним вейвлет-перетворенням. Іншою формою є комплексне вейвлет-перетворення. Щоб розширити частотну роздільну здатність, розкладання сигналу виконується багаторазово, і сигнал може бути реалізований у двох нижчих частотних діапазонах. У широко використовуваних вейвлетах вейвлет Добеші є одним із найбільш широко використовуваних материнських вейвлетів. Відповідно до стандартів IEEE, вейвлет-перетворення Добеші є дуже точним для аналізу порушень якості електроенергії серед усіх сімейств вейвлетів для перехідних несправностей. Назви вейвлетів родини Добеші записуються як DbN, де N – порядок, а db – «прізвище» вейвлет.

Matlab має ефективний набір інструментів вейвлетів, де класифікація сигналу виконується простішим способом. Вейвлет-перетворення є більш придатним через його здатність виявлення коефіцієнта за короткий проміжок часу та можливість вибору короткосмугового спектру, а також збереження інформації в частотно-часовій області без накладання енергії. Статистичні параметри вейвлет коефіцієнтів, такі як середнє, медіана, стандартне відхилення, абсолютне значення тощо, можуть легко представити Добеші (db), материнську вейвлет-функцію [19]. Ці методи виділення ознак допоможуть зменшити розмірність дискретизованого сигналу, і, таким чином, зменшити час обчислення та підвищити вимоги до точності.

1.3 Формування вектору ознак класифікації спотворень якості електричної енергії

При класифікації спотворень параметрів якості електроенергії важливо виокремити ознаки, що забезпечують стійкість до різних видів спотворень у мережі та дозволяють виявляти та розпізнавати зміни у сигналах напруги і струму. Більшість спотворень аналізуються з урахуванням таких параметрів, як амплітуда, тривалість, частотні характеристики та форма хвиль. Отже, окремі спотворення якості електроенергії вимагають розробки комплексного набору ознак для їх класифікації, що дозволить виявити не лише наявність спотворень, але й точно визначити момент та місце їх виникнення.

Проведений порівняльний аналіз методів формування ознак ідентифікації та класифікації інформаційних сигналів, умовно розбитих на дві основні групи: статистичні методи та методи, оснований на розкладанні вхідної реалізації по деяких системах ортогональних функцій, показав, що традиційно в енергетиці використовуються методи першої групи [20-22]. Але методи формування ознак ідентифікації та класифікації другої групи надають можливість синтезу більш узагальнених і незалежних алгоритмів, які дозволяють забезпечити розпізнавання більшого числа вхідних реалізацій на основі єдиного уніфікованого підходу [23].

У зв'язку з цим виникає необхідність розробки такого методу формування ознак ідентифікації та класифікації графіків електричних навантажень, який був би оснований на розкладі вхідної реалізації по системі ортогональних функцій і забезпечував можливість виявлення особливостей інформаційних сигналів – розривів I роду з підвищеною швидкістю, достовірністю і уніфікацією алгоритму обробки у порівнянні з існуючими методами.

Як відомо з попередніх досліджень, характерні особливості сигналу відображаються на різних рівнях при вейвлет-декомпозиції. В основу розробленого у даній роботі методу ідентифікації та класифікації спотворень якості електричної енергії покладене положення теореми Парсеваля [24] – «Енергія сигналу в часовому просторі дорівнює сумі енергій, сконцентрованих на різних рівнях декомпозиції відповідного вейвлет-перетворення даного сигналу». Математично це формулюється наступним чином: [8]

$$\|\varepsilon\|_2^2 = \sum_i |\langle \varepsilon, \psi_i \rangle|^2, \quad (1.5)$$

де $\varepsilon \in L^2$ та ψ_i являються ортонормованим базисом L^2 (функції скінченної енергії). При цьому приймається, що енергія, яка визначається як квадрат її L^2 норми, зберігається і при ортонормованому вейвлет-перетворенні. [8]

Зважаючи на властивості вейвлет-перетворення сигналу, теорема Парсеваля запишеться наступним чином: [8]

$$\sum_{k=1}^N |f(k)|^2 = \sum_{k=1}^N |cA_J(k)|^2 + \sum_{j=0}^J \sum_{k=1}^N |cD_j(k)|^2, \quad (1.6)$$

Зважаючи на властивості вейвлет-перетворення сигналу, теорема Парсеваля запишеться наступним чином: [8]

$$\sum_{k=1}^N |f(k)|^2 = \sum_{k=1}^N |cA_J(k)|^2 + \sum_{j=0}^J \sum_{k=1}^N |cD_j(k)|^2, \quad (1.7)$$

де $\sum_{k=1}^N |f(k)|^2$ – сумарна енергія дискретизованого сигналу, N – число дискрет на періоді; $\sum_{k=1}^N |cA_J(k)|^2$ – енергія, яка міститься в апроксимуючих коефіцієнтах останнього (J -го) рівня вейвлет-декомпозиції (у випадку вейвлет-перетворення за алгоритмом Малла); $\sum_{j=0}^J \sum_{k=1}^N |cD_j(k)|^2$ – енергія, яка міститься в деталізуючих коефіцієнтах всіх рівнів вейвлет-декомпозиції – від рівня 0 до рівня J . [8]

Оскільки в результаті вейвлет-декомпозиції сигналу за допомогою аналізу вейвлет-коефіцієнтів, отримується локалізована в часі інформація щодо його спотворення (відхилення від номінальних значень його параметрів) із високо- та низькочастотних діапазонів, значення даних коефіцієнтів (їх частотно-енергетичні властивості) і покладені в основу класифікації спотворень якості електричної енергії [21-24]. Індивідуальну інформацію щодо спотворень якості електричної енергії (час спотворення, його тривалість і розподіл енергії) містять деталізуючі коефіцієнти, тому аналіз саме цих параметрів передбачається у розробленому методі.

Як показали попередні дослідження, ідентифікація і послідовна класифікація типів спотворень параметрів якості електричної енергії шляхом визначення величин вейвлет-коефіцієнтів не завжди дає однозначні результати. Це обумовлено присутністю у досліджуваному сигналі гармоніки основної частоти і даний метод застосовується тільки для проведення швидкого експрес-аналізу. Щоб цього уникнути в роботі пропонується модифікований вектор ознак класифікації спотворень параметрів якості електричної енергії.

Аналіз результатів дослідження розподілу енергії спотвореного сигналу за рівнями декомпозиції за одночасної наявності частотних і амплітудних спотворень, показав наступне. Як відомо, сигнал обмеженої тривалості з додаванням спотворення представляється як $f(t) = p(t) + s(t)$, де $p(t)$ – синусоїдальний сигнал, $s(t)$ – спотворений сигнал. У вейвлетній області даний сигнал буде представлений наступним чином:

$$V_{f(t)} = [cA_J, cD_1, cD_2, \dots, cD_J].$$

а енергія сигналу - $E_{f(t)} = [\|cA_J\|, \|cD_1\|, \|cD_2\|, \dots, \|cD_J\|]$.

Відповідно буде представлений і синусоїдальний сигнал:

$$V_{p(t)} = [cA_{J(p(t))}, cD_{1(p(t))}, cD_{2(p(t))}, \dots, cD_{J(p(t))}],$$

а енергія синусоїдального сигналу:

$$E_{p(t)} = [\|cA_{J(p(t))}\|, \|cD_{1(p(t))}\|, \|cD_{2(p(t))}\|, \dots, \|cD_{J(p(t))}\|].$$

Вектор ознак класифікації спотворення якості електричної енергії $V_{\text{ознак}}$ представляється різницею енергій за рівнями вейвлет-декомпозиції $\Delta E_{j=1}^J = E_{j=1}^J(f(t)) - E_{j=1}^J(p(t))$ і математично визначається наступним чином: [8]

$$V_{\text{ознак}} = [\Delta E_{cA_J}, \Delta E_{cD_1}, \Delta E_{cD_2}, \dots, \Delta E_{cD_J}]$$

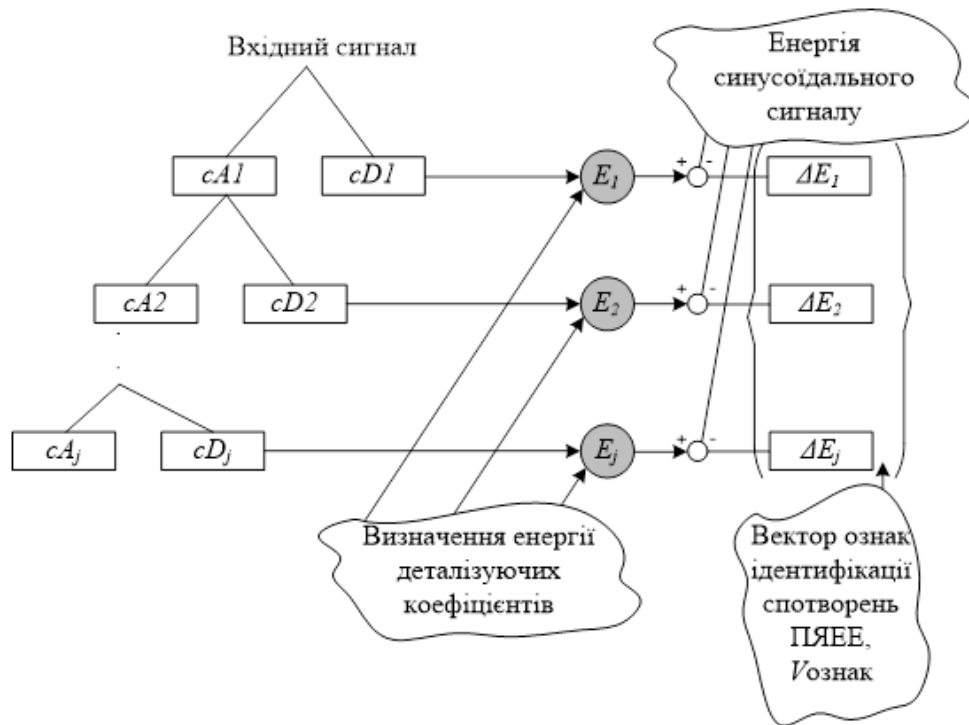


Рисунок 1.2 – Алгоритм формування вектору ознак ідентифікації та класифікація спотворень якості електричної енергії за різницею енергій вейвлет-коефіцієнтів за рівнями вейвлет-декомпозиції [8]

Проаналізуємо необхідну частоту дискретизації інформаційного сигналу та, відповідно, необхідний рівень вейвлет-декомпозиції зважаючи на необхідність зменшення часу обробки сигналів при зберіганні достатніх характеристик точності та якості класифікації типу спотворень якості електричної енергії. Як відомо, фільтри високої та низької частоти, які застосовуються для вейвлет-перетворення, мають половинну смугу частот по відношенню до сигналу, що аналізується. Позначимо частоту дискретизації інформаційного сигналу як F_s . На рис. 1.3 та в табл. 1.2

представлені частотні діапазони вейвлет-перетворення в залежності від рівня декомпозиції.

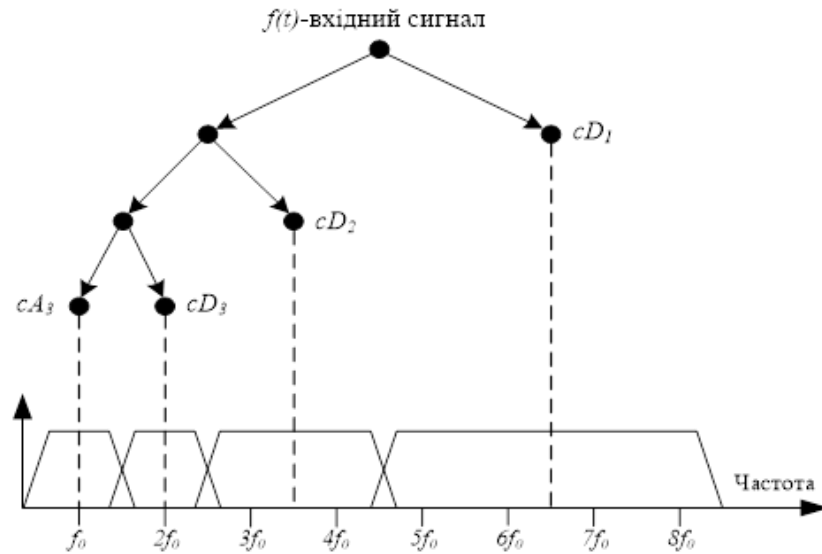


Рисунок 1.3 – Частотні діапазони
вейвлет-перетворення за алгоритмом Малла [8]

Як відомо, вейвлет-декомпозиція розбиває сигнал на частотні піддіапазони (за рівнями вейвлет-декомпозиції) в залежності від частоти дискретизації. В табл. 1.2 представлено таке частотне розбиття у загальному вигляді.

Таблиця 1.2 – Частотні діапазони вейвлет-декомпозиції
за алгоритмом Малла [8]

Рівень декомпозиції (j)	Частотний діапазон	
	Коефіцієнт апроксимації (cA _j)	Коефіцієнт деталізації (cD _j)
1	Від 0 до $F_s/2^2$ Гц	Від $F_s/2^2$ до $F_s/2^1$ Гц
2	Від 0 до $F_s/2^3$ Гц	Від $F_s/2^3$ до $F_s/2^2$
...	...	...
J	Від 0 до $F_s/2^{j+1}$	Від $F_s/2^{2j+1}$ до $F_s/2^j$

Основна частота досліджуваного сигналу становить $f_{\text{досл}} = 50$ Гц, найвищий рівень вейвлет-декомпозиції становить J . Тоді необхідний частотний діапазон для дослідження сигналу буде відповідати частотному діапазону деталізуючого коефіцієнту останнього рівня вейвлет-декомпозиції, а саме $\frac{F_s}{2^{J+1}} \leq F_{f(t)} \leq \frac{F_s}{2^J}$. Логарифмуванням даного виразу, одержується діапазон необхідного значення рівня декомпозиції J . Тобто,

$$\log_2 \left(\frac{F_s}{F_{f(t)}} \right) - 1 \leq J \leq \log_2 \left(\frac{F_s}{F_{f(t)}} \right) \quad (1.8)$$

Для розглядуваного випадку (частота дискретизації становить 3 200,00 Гц) маємо. Тоді у відповідності до виразу (6), маємо $3 \leq J \leq 4$. В даній роботі прийнято $J = 4$. Оскільки для наочності класифікації спотворення якості електричної енергії основна частота $F_f(t)$ являється предметом дослідження, то мінімальний проаналізований рівень декомпозиції становить $N_{\min} = 2 \cdot J = 8$. [8]

Вибір оптимального прийнятного материнського вейвлету без врахування типу спотворення є трудомісткою процедурою. При цьому, по-перше, короткотривалі та швидкоплинні спотворення найкраще визначаються за допомогою вейвлетів Добеші db4 та db6, а повільні спотворення – db8 та db10. По-друге, застосування вейвлетів Нааг приводить до зміщення енергії спотворень перевищення та зниження напруги в область рівнів декомпозиції 3 – 4, а також до більш виражених значень низькочастотних спотворень. Пропонується проводити вибір материнського вейвлету наступним чином. Оскільки на верхніх рівнях декомпозиції вейвлет більш локалізований в часі і його коливання проходять з великою швидкістю і малим періодом, то ці рівні більш придатні для визначення короточасних і швидкоплинних спотворень, а на нижніх рівнях декомпозиції слід обирати вейвлети з більшим періодом коливань. В зв'язку з цим, рекомендується використовувати наступні типи вейвлетів – Db2, Sym2, Coif1. [8]

1.4 Провали напруги в електричній мережі

Провали напруги в електромережі можуть призвести до серйозних проблем для підключених пристроїв та обладнання. Провали напруги також відомі як "sags" – це короточасні спади напруги нижче номінального рівня, що можуть виникати через різні фактори, такі як короткі замикання чи інші несправності в системі. Зазвичай вони тривають декілька циклів напруги. [25]

Провал напруги визначається як раптове зниження напруги нижче 0,9 від номінального значення, після якого відбувається відновлення напруги до її початкового рівня або близького до нього протягом проміжку часу від декількох мілісекунд до кількох десятків секунд. Характеристики спаду напруги включають тривалість та глибину зниження напруги. Цей аспект є дуже важливим у сучасному виробництві, де велика кількість електронних систем керування використовується. Особливо чутливі до навіть невеликих спадів напруги є мікропроцесорні системи керування електроприводами. [26]

Протягом останніх років обладнання, що використовується на промислових підприємствах, стало більш чутливим до провалів напруги в результаті вдосконалення технології та збільшення використання пристроїв силової електроніки [27, 28].

Технологічні збої на металургійних підприємствах можуть мати серйозні наслідки, оскільки зупинка обладнання та витрати на відновлення технологічного процесу є вкрай високими. Поява провалів напруги часто пов'язана з раптовими змінами у режимі роботи, такими як короткі замикання або великі пускові струми при запуску потужних асинхронних двигунів. При аналізі причин провалів напруги на підприємстві важливо розрізняти зовнішні та внутрішні фактори. Це має значення при визначенні відповідальності за виникнення збитків у зв'язку з порушенням технологічного процесу. Невизначеність джерела провалу напруги може призвести до довготривалих правових суперечок між споживачем електроенергії та постачальником, що можуть тривати роками.

Уникнення і підготовка до провалу напруги включають в себе створення резервування живлення, використання стабілізаторів напруги та інших заходів для захисту обладнання, а також знання процедур безпеки та способів виживання в разі тривалого відключення.

Характеристики провалів напруги, такі як їх тривалість та глибина, відіграють критичну роль у забезпеченні стабільності та безпеки електропостачання.

Тривалість провалу напруги визначає часовий інтервал, протягом якого напруга в електричній мережі знаходиться нижче певного порогового значення. Цей параметр може варіюватися від дуже короткого періоду, наприклад, лише декілька мілісекунд, до тривалого періоду, що складає декілька секунд або навіть десятків секунд. Короткі провали напруги можуть бути менш критичними для багатьох електричних систем, тоді як тривалі провали можуть призвести до серйозних порушень у роботі обладнання та пристроїв.

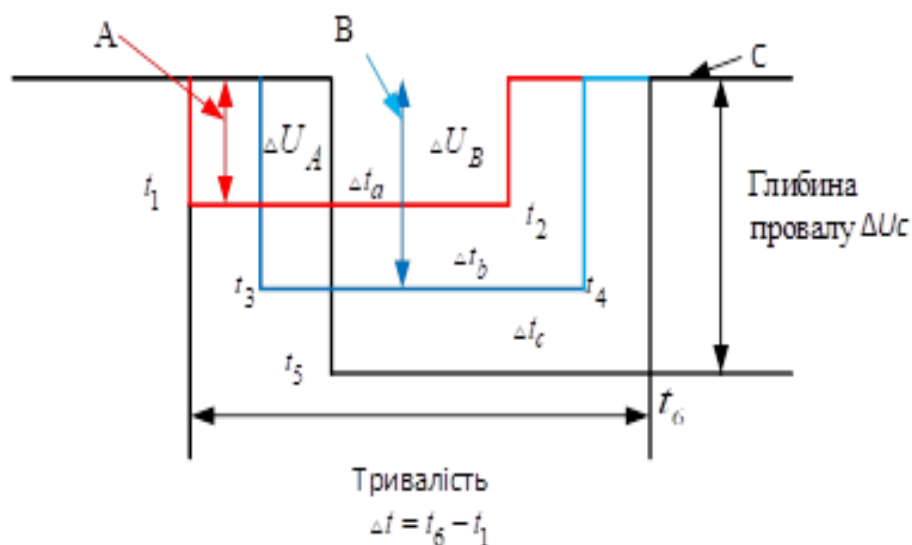


Рисунок 1.4 – Основні характеристики провалу напруги [3]

Глибина провалу напруги вказує на величину, на яку падає напруга відносно номінального значення під час провалу. Вимірюється у відсотках або у відносних одиницях відносно номінального значення напруги. Наприклад, провал напруги на 10% означає, що напруга знижується на 10% від номінального значення. Глибина провалу напруги може бути важливою для визначення того, наскільки значний вплив

має провал на роботу електронних систем та обладнання. Велика глибина провалу може спричинити серйозні проблеми, такі як відмова електронних пристроїв або пошкодження обладнання.

Провал напруги обчислюють за виразом:

$$\delta U_n = U_{\text{ном}} - U_{\text{мін}} \quad (1.9)$$

Існують три типи провалів напруги: симетричні, асиметричні та міжфазні. [25]

У симетричних провалах напруга в усіх трьох фазах зменшується або зникає одночасно. Це може бути результатом замикання на землю або іншу несправність у системі, яка однаково впливає на всі фази. Симетричні провали напруги можуть мати однакову або різну амплітуду в кожній фазі.

У випадку асиметричних провалів напруги амплітуда або тривалість провалу може відрізнятися між різними фазами. Це може статися, наприклад, через нерівномірне навантаження або несправності у конкретній фазі.

Міжфазні провали виникають, коли провал відбувається між двома фазами системи, зазвичай через замикання або коротке з'єднання між фазами. Кожен з цих типів провалів напруги має свої характеристики, які можуть впливати на роботу електричної системи і вимагати специфічних заходів захисту та відновлення. Дані три типи можна віднести до загальної категорії провалів напруги з погляду їхнього характеру та впливу на систему.

Однак, існують також сім типів провалів напруги (від А до G), що визначаються за іншими параметрами, такими як зміни амплітуди, форми, частоти, гармонік та інші. Типи провалів напруги від А до G відображають різні характеристики та параметри провалів, які визначені стандартом EN 50160 [26] (табл. 1.3).

Таблиця 1.3 – Типи провалів напруги та їх параметри [26]

Тип провалу напруги	Тип несправності
Type A	Трифазний
Type B	Однофазний на землю
Type C	Міжфазний

Type D	Міжфазне замикання (виникає через навантаження, підключене трикутником), однофазне замикання на землю (вилучено компонент нульової послідовності)
Type E	Двофазне замикання (виникає при навантаженні, підключеному шлейфом)
Type F	Двофазне замикання (зазнає навантаження, підключеного трикутником)
Type G	Двофазне замикання (виникає через навантаження, підключене через незаземлений трансформатор, видаляючи компонент нульової послідовності)

Тип А (Voltage Magnitude Variation) визначається як зміщення напруги на частоті мережі протягом тривалого часу. Це означає, що напруга у системі змінюється відносно нормального рівня протягом певного періоду, що може варіюватися від декількох хвилин до декількох годин або навіть днів. [29]

Тип А характеризується стійким відхиленням амплітуди напруги, і це може бути наслідком різних факторів, таких як зміни у виробництві електроенергії, робота споживачів електроенергії або вплив зовнішніх факторів, таких як погодні умови. Цей тип провалу напруги може вплинути на функціонування електричних пристроїв та обладнання, оскільки вони можуть бути розраховані на певний рівень напруги для оптимальної роботи.

Тип В (Voltage Shape Variation) відноситься до провалів напруги, при яких відбуваються зміни у формі сигналу напруги. Це означає, що характеристики хвилі напруги, такі як амплітуда, частота, фаза тощо, можуть змінюватися з часом. Такі зміни форми хвилі можуть бути спричинені різними факторами, такими як нестабільність виробництва електроенергії, дефекти обладнання, інтерференція зовнішніх джерел, або навіть неправильна робота споживачів електроенергії. [30]

Тип C (Voltage Amplitude Variation) – зміни амплітуди напруги у мережі. Такі зміни можуть виникати через різні фактори, такі як збої у трансформаторах або несправності у системі розподілу.

Тип D (Voltage Frequency Variation) – зміни частоти напруги, які можуть виникнути, наприклад, через зміни у роботі генераторів або великі споживання електроенергії, що призводять до перевантаження системи.

Тип E (Harmonics and Interharmonics) – це відхилення від синусоїдальної форми хвилі напруги через наявність гармонік та міжгармонік у сигналі. Це може виникати через використання нестабільних джерел живлення або взаємодію електронних пристроїв з мережею.

Тип F (Voltage Fluctuations) характеризується коливаннями амплітуди напруги протягом короткого періоду часу. Це може бути спричинене великими змінами навантаження або використанням потужних електроприладів у мережі.

Тип G (Voltage Interruptions) – повне припинення напруги на певний період часу. Причини можуть бути різними, від технічних несправностей до планового відключення електромережі.

Поява провалів напруги може бути наслідком різких змін у режимі роботи, таких як короткі замикання або великі пускові струми при запуску потужних асинхронних двигунів. Причини провалів напруги на підприємстві можна умовно поділити на зовнішні та внутрішні. Визначення того, до якої з цих груп відноситься причина виникнення провалів, має значення при визначенні відповідальності за виникнення збитків від порушення технологічного процесу. Нез'ясованість місця походження провалу напруги може призвести до довгих правових конфліктів між споживачем електроенергії та постачальником, які можуть тривати роками.

1.5 Аналіз сучасних методів визначення характеристик провалів напруги

Для визначення якості електричної енергії застосовується широкий спектр методів обробки інформаційних сигналів. Один з найпоширеніших методів – метод

середньоквадратичних значень, який базується на апроксимації вхідного сигналу спеціальною функцією. Ця функція забезпечує задовільну апроксимацію амплітуди основної частоти електричної мережі. Основними перевагами цього методу є простота, швидкість обчислень та невеликий обсяг пам'яті для зберігання результатів. Проте результати цього методу досить сильно залежать від розміру обчислювального вікна і не враховують гармоніки та компоненти шуму. В даний момент цей метод застосовується переважно для визначення середньоквадратичного значення напруги електричної мережі та для автоматичної класифікації сигналів. [31]

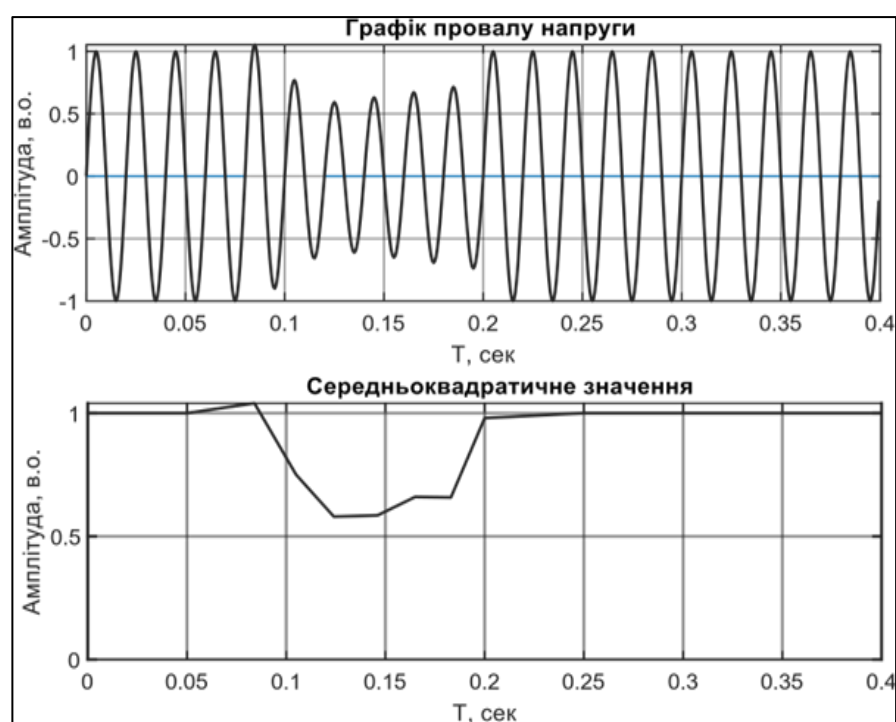


Рисунок 1.5 – Провал напруги та його середньоквадратичне значення [3]

Метод пікової напруги (Peak Voltage Method) використовується для визначення величини провалу напруги в електричних мережах. Цей метод вимірює амплітуду відхилення напруги від нормального рівня та дозволяє визначити як тривалість, так і глибину провалів напруги. [3]

Основні кроки методу пікової напруги:

1) Вимірювання пікової амплітуди: За допомогою вимірювального приладу (наприклад, осцилографа або цифрового вимірювача) фіксують пікову амплітуду напруги в електричній мережі.

2) Встановлення порогового рівня: Визначається пороговий рівень амплітуди, який вважається прийнятним для нормального функціонування обладнання. Зазвичай цей рівень встановлюється на певному відсотку від номінальної напруги (наприклад, 90% або 95%). [32]

3) Визначення тривалості та глибини провалу: Коли амплітуда напруги впаде нижче порогового рівня, фіксується початок провалу, а коли напруга повертається до нормального рівня, фіксується кінець провалу. Тривалість провалу вимірюється у часових одиницях, а глибина провалу – відхилення амплітуди від нормального рівня.

4) Аналіз та реакція: Отримані дані аналізуються, і, якщо провал напруги перевищує прийнятний поріг тривалості або глибини, можуть бути запущені автоматичні заходи, такі як ввімкнення додаткових джерел живлення, відключення навантаження або інші дії для забезпечення стабільного живлення обладнання. [3]

Метод пікової напруги дозволяє точно визначити момент початку та закінчення провалу напруги, а також виміряти глибину провалу. Використовується для моніторингу якості електропостачання та для захисту обладнання від можливих пошкоджень, які можуть виникнути внаслідок провалів напруги. [3]

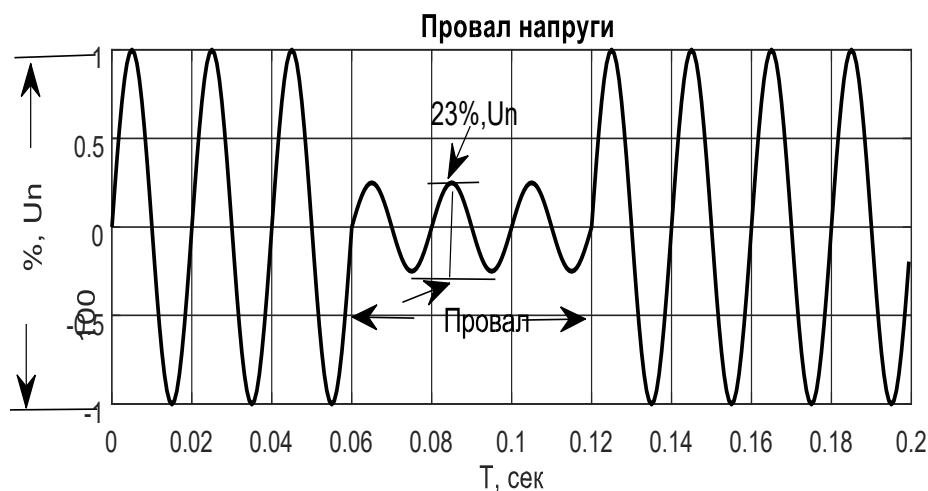


Рисунок 1.6 – Зображення провалу напруги при визначення піковим методом [33]

Метод врахування найнижчої фазної напруги і ігнорування решти для визначення величини провалу напруги відомий як "метод мінімальної фазної напруги" або "метод мінімального фазного спаду напруги". Цей метод використовується для оцінки провалу напруги, коли важливо визначити найнижчу фазну напругу під час провалу, ігноруючи інші фази. [3]

Основні кроки цього методу:

1) Вимірювання фазних напруг. За допомогою вимірювального обладнання (наприклад, вимірювача фазової напруги) фіксують значення напруги для кожної фази системи (зазвичай три фази в системах змінного струму).

2) Визначення найнижчої фазної напруги. Знаходять фазу, у якій напруга впала найнижче під час провалу. Це значення вважається мінімальною фазною напругою під час провалу.

3) Визначення величини провалу. Величина провалу напруги визначається як різниця між номінальною (або очікуваною) напругою і мінімальною фазною напругою, знайденою на попередньому кроці. [3]

Цей метод дозволяє враховувати тільки найнижчу фазну напругу під час провалу і ігнорувати інші фази. Він корисний, коли обладнання чутливе до падіння напруги в конкретній фазі і важливо визначити вплив провалу на цю фазу. Однак слід врахувати, що цей метод не дозволяє отримати повну картину провалу напруги для всіх фаз, тому в інших випадках може бути використано інші методи визначення провалу напруги. [3]

Метод визначення величини провалу напруги на основі Кларка використовується для оцінки провалу напруги з використанням Кларка, або «Кларківського вектора», який визначає амплітуду і фазу напруги у трьох фазах змінного струму (А, В, С). Цей метод особливо корисний для аналізу провалу напруги у трифазних системах. [3]

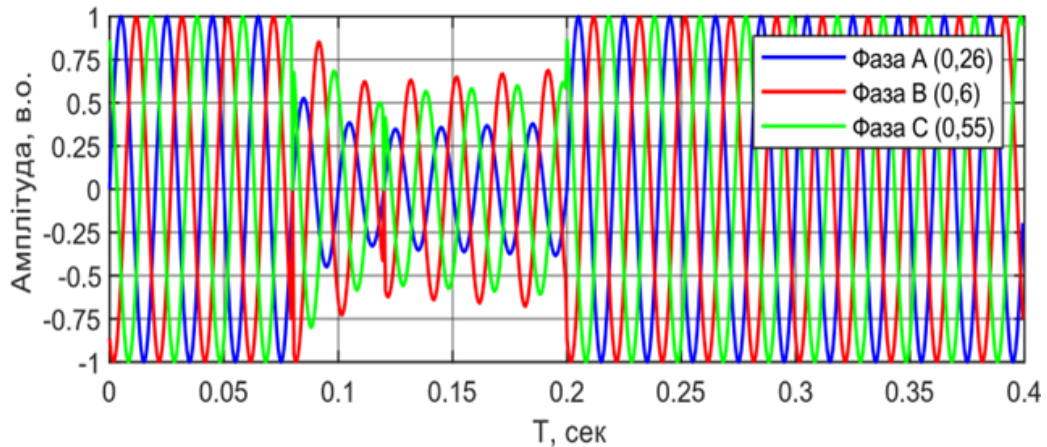


Рисунок – 1.7. Трифазне незбалансоване падіння напруги [3]

Для визначення величини провалу напруги на основі Кларка можна використовувати наступні формули та кроки [24]:

1) Виміряні фазні напруги: Позначимо значення фазних напруг як U_A , U_B і U_C .

2) Перетворення вектора Кларка: Використовуючи фазні напруги, створюємо вектори Кларка для кожної фази.

Вектор для фази А: $I_A = U_A$

Вектор для фази В: $I_B = U_B * e^{(j120^\circ)}$, де j - уявна одиниця, 120° - кут між фазами у трьохфазній системі.

Вектор для фази: С: $I_C = U_C * e^{(j240^\circ)}$, де 240° - ще один кут між фазами.

3) Знаходження максимальної амплітуди: Для знаходження максимальної амплітуди вектора Кларка ми визначаємо модуль кожного вектора і обираємо найбільший:

Максимальна амплітуда: $U_{\max} = \max(|I_A|, |I_B|, |I_C|)$.

4) Розрахунок: фази: Для визначення фази максимального вектора Кларка ми знаходимо аргумент цього вектора:

Фаза максимального вектора: $\phi_{\max} = \arg(\max(|I_A|, |I_B|, |I_C|))$.

5) Знаходження величини провалу напруги: Величина провалу напруги (U_{dip}) визначається як різниця між номінальною або очікуваною напругою і максимальною амплітудою:

Величина провалу напруги: $U_{\text{dip}} = U_{\text{nominal}} - U_{\max}$.

6) Визначення фази провалу: Фаза провалу визначається як фаза максимального вектора:

Фаза провалу: $\varphi_{\text{dip}} = \varphi_{\text{max}}$. [24, 32].

Отже, ці формули та кроки дозволяють визначити величину і фазу провалу напруги в трьохфазній системі за допомогою методу Кларка.

Висновки до розділу 1

На основі аналізу проведених досліджень методів та засобів визначення спотворень якості електроенергії було визначено наступне:

- одним із основних типів спотворень якості електроенергії в плані їх наявності (31 % від загальної кількості наявних спотворень) та величини економічних збитків (до 10 млрд грн. за рік) є провали напруги;

- існуючі сучасні методи спрощеного визначення характеристик провалів напруги – тривалості та глибини провалу, є тільки відповідним способом кількісної їх оцінки та порівняльного аналізу. Визначення тільки таких характеристик провалу напруги не показує різниці між різними типами провалів напруги та не містить усіх можливих особливостей, які можуть впливати на роботу різного електрообладнання;

- в зв'язку з чим постає необхідність розробки нового, або модифікація існуючого методу визначення додаткових характеристик провалів напруги, а саме, стрибка фазового кута (PAJ), точок початку (POI) та закінчення (POR) провалу напруги та залишкового її значення;

Для проведення моніторингу наявності спотворень якості електроенергії в електричних мережах, необхідно визначення наявності провалів напруги, ідентифікація їх типу та класифікація для визначення необхідних керуючих сигналів та засобів захисту електрообладнання.

Розроблений метод ідентифікації типу провалів напруги повинен однозначно ідентифікувати як провали, які викликані короткими замиканнями в електричній мережі, та наявністю потужного електричного обладнання.

РОЗДІЛ 2

ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОВАЛІВ НАПРУГИ ТА ДОДАТКОВИХ, ПОВ'ЯЗАНИХ ІЗ СТРИБКОМ ФАЗОВОГО КУТА

2.1 Характеристики провалів напруги – тривалість та глибина. Їх вплив на роботу чутливого обладнання

Провали напруги є однією з причин погіршення якості ЯЕЕ, оскільки їх наявність призводить до величезних фінансових втрат як для постачальників електричної енергії, так і для її споживачів. Стандартне визначення провалів напруги було встановлено на основі двох характеристик: середньоквадратичного значення величини провалу напруги та його тривалості [34]. Величина середньоквадратичного значення (СКЗ) обчислюється шляхом усереднення середньоквадратичної напруги за один або половину періоду, що оновлюється кожні півперіоду.

Величина провалу напруги – це мінімальне СКЗ, виміряне під час падіння напруги [35], яка також називається залишковою напругою ($u_z(t)$). Величина виражається як значення у вольтах, у відсотках або як значення еталонної напруги на одиницю. Типове еталонне значення становить 90 – 95 % до номінальної. На рис. 2.1 представлено позначення основних характеристик провалу напруги.

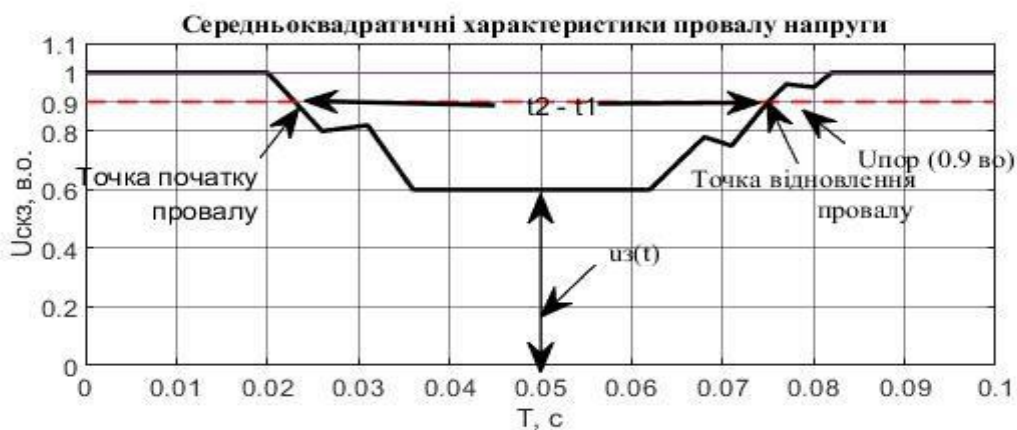


Рисунок 2.1 – Середньоквадратичні характеристики провалу напруги [33]

де $t_2 - t_1 = \Delta t$ - тривалість провалу напруги, $u_3(t) = 60\%$

Тривалість провалу Δt – це тривалість часу, коли середньоквадратична напруга залишається між пороговими опорними значеннями. Іншими словами, тривалість спаду – це загальний час від моменту, коли величина напруги однієї або кількох фаз падає нижче порогового значення (90% від номінального значення), доки всі фази не відновляться вище порогового значення.

Тривалість провалу зазвичай становить від 0,5 циклу до 1 хвилини [36]. Для падіння напруги, показаного на рис. 1, тривалість провалу становить 51 мс. Методи середньоквадратичного обчислення падіння напруги мають похибку від втрати інформації про миттєвий час, фазу та полярність, що може призвести до надання неточної тривалості провалу напруги.

Крім того, через відсутність інформації про фазу, методи СКЗ не застосовуються для оцінки характеристик форми сигналу, таких як стрибок фазового кута, POW, гармоніки, відсутня напруга та симетрія напруги.

2.1.1 Обчислення глибини та тривалості провалу напруги в СКЗ

Розрахунок СКЗ напруги вхідного сигналу за один цикл проводиться наступним чином:

$$U_{скз}[k] = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{p=k-N+1}^k u[p]^2} \quad (2.1)$$

Відповідно до стандарту [34, 35] вимірюється провал напруги, а порогова величина визначається як зміна СКЗ напруги між 0.1 в.о. і 0.9 в.о. протягом періоду від 0.5 циклу до 1 хвилини. Провал напруги також може бути виражений як різниця між еталонним СКЗ напруги та залишкової середньоквадратичної напруги, яка називається глибиною провалу, яка зазвичай, виражається у відсотках від еталонної середньоквадратичної напруги [37].

$$\Delta U = \frac{(U_{нор} - U_{зал})}{U_{нор}} \cdot 100\% \quad (2.2)$$

де $U_{пор}$ – середньоквадратична еталонна порогова напруга, $U_{зал}$ – залишкова середньоквадратична напруга.

Як відомо [38], стандартне визначення провалу напруги в електричній мережі встановлюється на основі двох основних характеристик – глибини провалу та його тривалості. Цей опис обмежує дослідження провалів напруги лише двома параметрами: середньоквадратичною величиною провалу напруги та його тривалістю. Відповідно до цього оцінка впливу провалу на стійкість електрообладнання та необхідні їх характеристики розробляються з використанням цих двох параметрів [39, 30]. Необхідність обчислення інших характеристик провалу напруги привернули увагу дослідників, коли були оприлюднені результати тестування промислового обладнання на стійкість до провалів напруги [41]. При цьому були відмічені численні випадки відключення промислового обладнання під час провалів напруги в допустимих межах.

2.1.2 Вплив глибини та тривалості провалів напруги на чутливе обладнання

Провал напруги спричиняє значні втрати у виробництві через відключення чутливого обладнання, такого як комп'ютери, електронні пристрої, програмовані логічні контролери [42, 43], трифазні трансформатори, асинхронні машини [44, 45], індукційних генератори з подвійним живленням [46], сонячні інвертори [47], приводи з регульованою швидкістю [48] та різні види апаратури керування промисловими процесами та комп'ютери [48-51]. При пуску потужних асинхронних двигунів часто тривалість провалу напруги може перевищувати тривалість одного або двох циклів, що призводить до спрацювання деякого обладнання [19].

Необхідно відмітити той факт, що наслідки провалів напруги дуже вагомі, якщо вони відбуваються через несправність високовольтних систем передачі електроенергії. Як відомо, також провали напруги виникають через короткочасне збільшення величини струму, у більшості випадків десь в іншій частині системи. Розглянемо спрощену систему, показану на рис. 2.2.

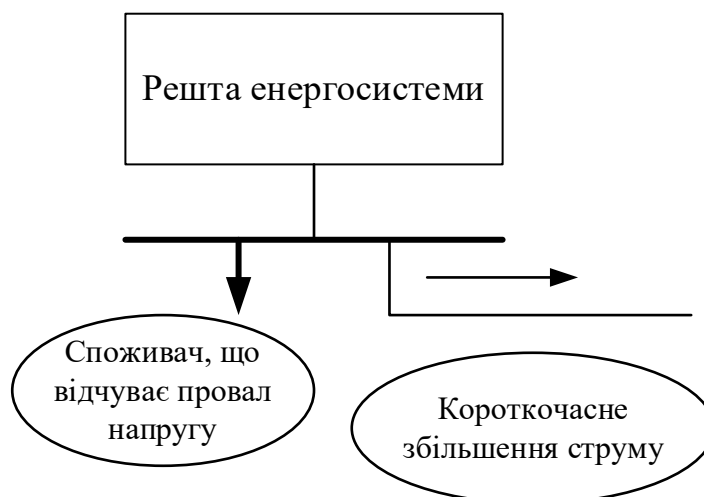


Рисунок 2.2 - Джерело провалу напруги [52]

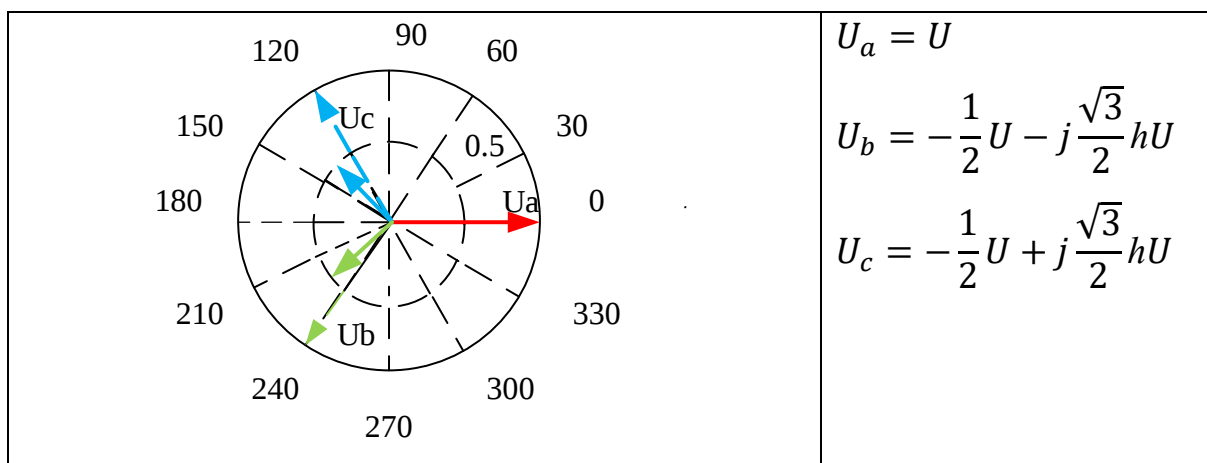
Короткочасне збільшення струму дає додаткове падіння напруги на вказаній шині. Цю шину називають точкою загального з'єднання (між клієнтом і несправністю) або РСС. Зверніть увагу, що РСС може відрізнятися для різних клієнтів. Усі споживачі, що живляться від зазначеної шини, відчуватимуть знижену напругу під час збільшення струму, отже, падіння напруги. Є багато причин для тимчасового збільшення струму, але три основні причини такі:

- короткі замикання та замикання на землю;
- пуск асинхронних двигунів;
- напруга трансформаторів.

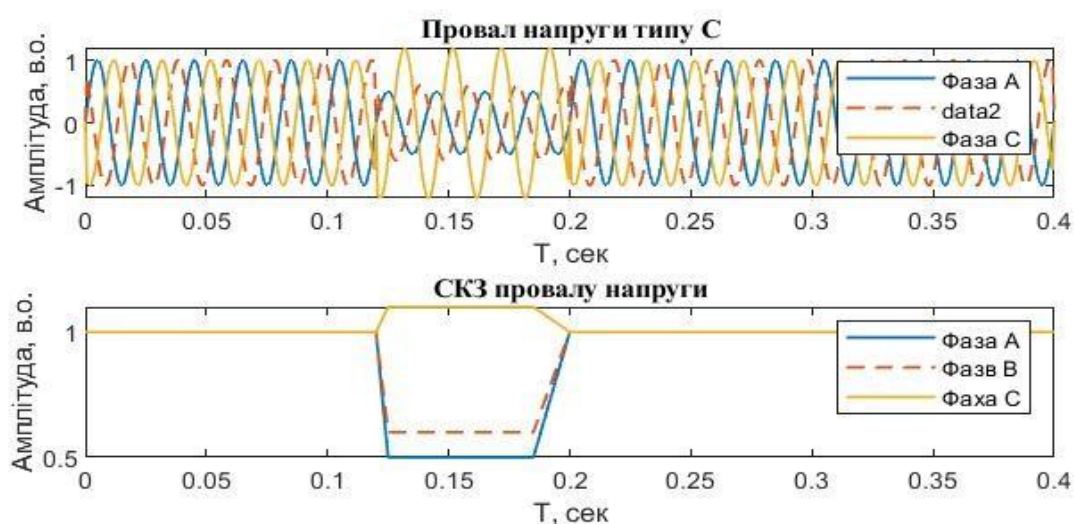
Також необхідно відмітити для повноти і наявності ще однієї причини це конденсатор під напругою. Однак тривалість перевантаження по струму внаслідок активації конденсатора становить лише кілька мілісекунд, і результуюча напруга зазвичай класифікується як перехідна.

Як зазначалося раніше, основними характеристиками, які описують провал напруги, є глибина провалу (залишкова напруга) та тривалість. Ці два терміни визначені для вимірювань у стандартному документі ІЕС 61000-4-30 [53].

На рис. 2.3 представлено провал напруги типу С: векторна діаграма та форма сигналів напруг і СКЗ провалу напруги.



а)



б)

Рисунок 2.3 – Провал напруги типу С: а) векторна діаграма б) форма сигналів напруг і СКЗ провалу напруги [5]

Провал типу С – міжфазне коротке замикання (дві зміни фазної напруги вздовж уявної осі (як за величиною, так і за кутом)). Із рис. 2.3 видно, що СКЗ провалу – двох фаз падає на глибину провалу, а напруга третьої фази трохи підвищилась. Початкове падіння напруги відповідає виникненню несправності; відновлення починається, коли захист усуне несправність. Фактичне падіння напруги через несправність краще видно на рис. 3,б де середньоквадратичне значення напруги показано як функцію часу.

Середньоквадратичне значення отримано як прямокутне вікно тривалістю 10 мс (один напівперіод), який зміщується по формі хвилі. Більшість моніторів якості електроенергії обчислюють не фундаментальний компонент, а середньоквадратичне значення одноциклове або напівциклове вікно. Результат буде близький до величини основної складової.

2.2 Додаткові характеристики провалів напруги та необхідність їх визначення

Основною причиною введення додаткових характеристик провалів напруги є те, що поведінка навантаження під час провалів напруги не може бути повністю пояснена лише величиною та тривалістю. Додаткові характеристики також надають додаткову інформацію про подію в енергосистемі, яка призвела до провалу напруги.

Миттєва синусоїдальна форма сигналу напруги містить важливі характеристики, пов'язані з фазовим кутом напруги, такі як точка початку провалу напруги (POI), точка закінчення провалу напруги (POR), стрибок фазового кута (PAJ), які не можуть бути представлені вимірюванням СКЗ. Характеристики форми сигналу витягуються з миттєвої форми синусоїдальної напруги [53, 54].

Перш ніж досліджувати всі можливі відхилення, які виникають під час провалу напруги, важливо зрозуміти всі характеристики, наявні в середньоквадратичній напрузі, а також у формі хвилі синусоїдальної напруги. Основні характеристики форми хвилі просідання напруги, такі як відсутність напруги, POI, POR і PAJ. Характеристики прогину сигналу наведені на рис. 2.4.

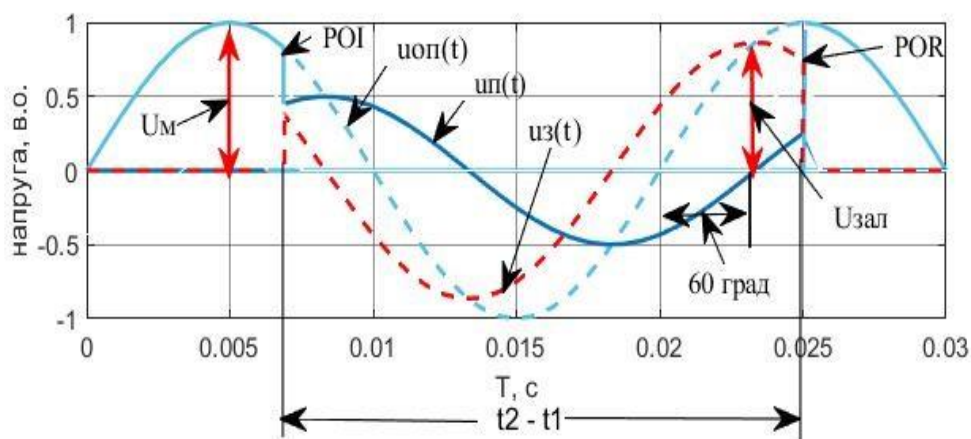
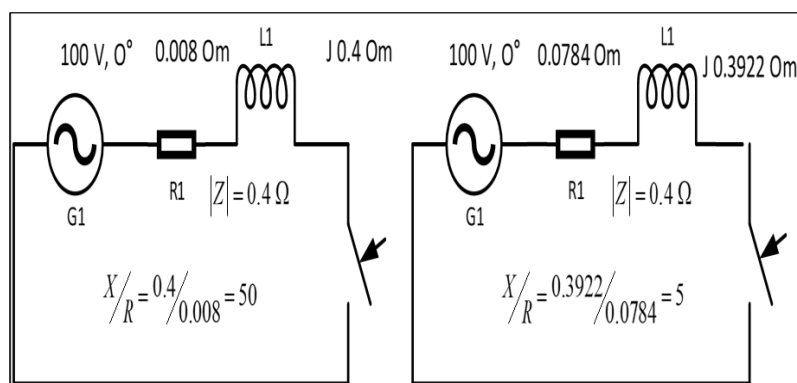


Рисунок 2.4 – Форма сигналу напруги з характеристиками провалу напруги [33]

Де $u_{оп}(t)$ – опорна напруга, $u_з(t)$ – залишкова напруга, $u_n(t)$ – напруга провалу, $t_2 - t_1$ – тривалість провалу.

2.2.1 Стрибки фазового кута, пов'язані з провалами напруги

Провал напруги спричиняє зміну фазового кута напруги в основному через різницю у співвідношенні X/R між джерелом і фідером (збалансоване падіння напруги). Співвідношення X/R впливає на компонент постійного струму, а отже, і на загальний струм. Чим вище співвідношення X/R ланцюга, тим довше згасає компонент постійного струму. На рис. 2.5 представлені дві електричні схеми з однаковим імпедансом 0.4 Ом, але зі значно різним співвідношенням X/R : 50 проти 5. [55]



a)

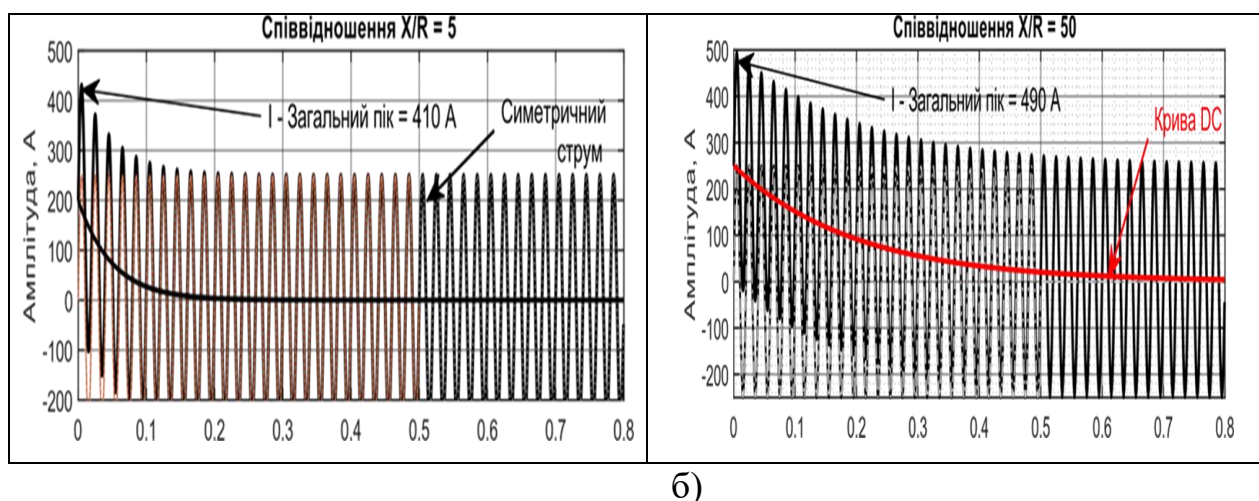


Рисунок 2.5 – Електричні схеми а) з різним співвідношенням X/R , б) графіки короткого замикання з компонентами змінного та постійного струму для перших 40 циклів

Для обох ланцюгів симетричний струм короткого замикання однаковий – 250 А. Однак як показано на рис. 2.5 схема із відношенням $X/R = 50$ має піковий струм приблизно 490 А, тоді як схема з відношенням $X/R = 5$, матиме піковий струм приблизно 410 А. Тобто, чим вище співвідношення X/R , тим вищим буде піковий струм короткого замикання. Крім того, постійний компонент має швидкість згасання яка визначається співвідношенням X/R .

Як слідує із рис. 2.5, компонент постійного струму (крива DC) для схеми з відношенням $X/R = 50$ є більш тривалим: 40 циклів для $X/R = 50$ порівняно з 5 циклами в ланцюзі з $X/R = 5$. Чим вище співвідношення X/R , тим повільніше спадає компонент постійного струму.

На табличках автоматичних вимикачів іноді вказують тільки номінал симетричного струму короткого замикання. У таких випадках результат відображає лише змінну складову струму короткого замикання. Поширене неправильне тлумачення виникає, коли порівнюють симетричний струм короткого замикання вимикача з симетричним номінальним струмом короткого замикання вимикача з метою оцінки режиму роботи вимикача.

На рис. 2.6 представлена векторна діаграма провалу типу В та на рис. 2.7 представлено його СКЗ і стрибок фазового кута.

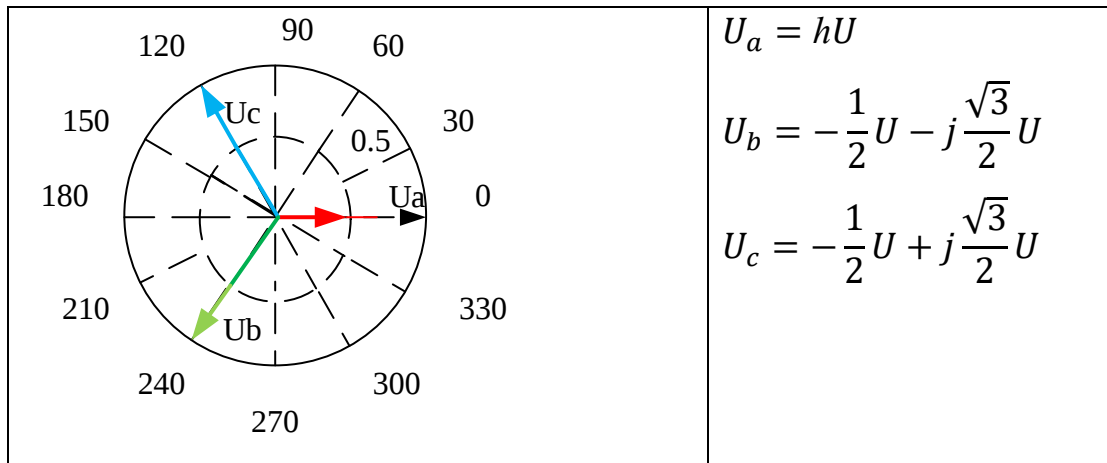


Рисунок 2.6 – Векторна діаграма провалу типу В

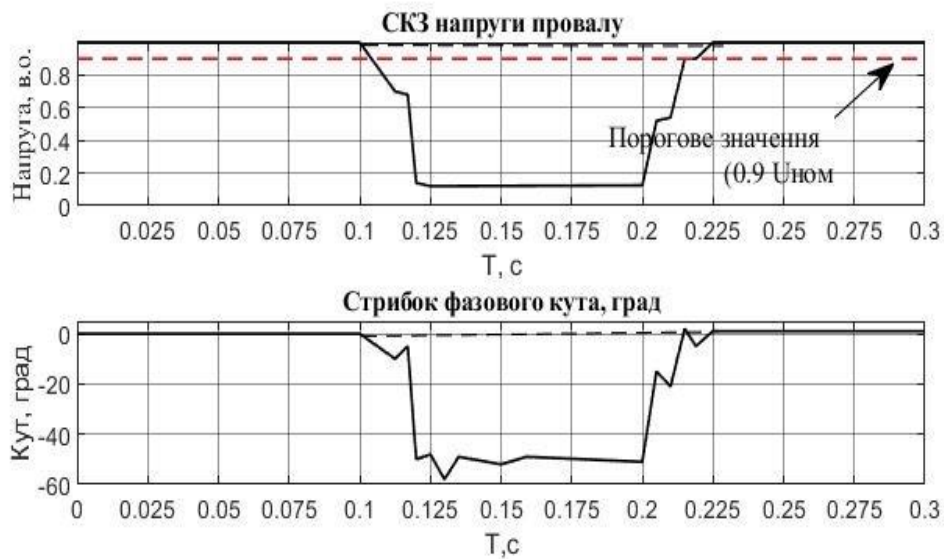


Рисунок 2.7 – СКЗ напруги провалу типу В та стрибок фазового кута

2.2.2 Визначення фазового кута

Як відомо, фазовий кут напруги містить додаткову інформацію про причину події. Ще однією причиною використання стрибка фазового кута як характеристики є те, що він впливає на певні типи обладнання. Як і з будь-яким індексом однієї події, першим кроком є визначення характеристики в залежності від часу, з якого

визначається індекс. Для стрибків фазового кута ми виходимо з аргументу комплексної напруги від часу. Розглянемо ситуацію, коли і амплітуда, і фазовий кут синусоїди є функцією часу [19]:

$$u(t) = \sqrt{2} \cdot U(t) \cos(\omega t + \varphi(t)) \quad (2.3)$$

Вилучення основної складової (наприклад, за допомогою алгоритму дискретного перетворення Фур'є протягом періоду з один цикл основної частоти дає таке комплексне значення:

$$U_{очн}(t) = U(t) \cdot e^{j(\omega t + \varphi(t))}, \quad (2.4)$$

де було припущено, що і величина, і фазовий кут змінюються повільно, так що ми можемо припустити, що сигнал є квазістаціонарним у межах вікна одного циклу, що використовується для визначення основної напруги. Коли вікно зміщується через сигнал, початкова фаза сигналу на початку вікна безперервно змінюється.

Побудова аргументу (фазового кута) комплексної основної напруги призведе до лінійного збільшення з часом:

$$\arg[U_{очн}(t)] = \omega t + \varphi(t) \quad (2.5)$$

Другий член $\varphi(t)$ після віднімання його попереднього значення називається стрибком фазового кута як функція часу:

$$\Delta \varphi = \varphi(t) - \varphi(0) \quad (2.6)$$

Наведене вище міркування дає метод вилучення стрибка фазового кута з вимірної форми сигналу напруги. Їх поєднання та використання $\varphi(0) = \arg[U_{очн}(0)]$, дає такий вираз:

$$\Delta \varphi = \arg[U_{очн}(t)] - \arg[U_{очн}(0)] - \omega t \quad (2.7)$$

Цей вираз, хоч і є математично правильним, його дуже складно реалізувати.

Проблема полягає в тому, що аргумент, будучи кутом, має обмежений діапазон. Останній член лінійно зростає з часом. Це можна виправити, змінивши результат на значення між -180° і $+180^\circ$, але переписування виразу призводить до

більш практичного виразу. Для цього ми використовуємо $\omega t = \arg(e^{j\omega t})$ і це $\arg(A) - \arg(B) = \arg\left(\frac{A}{B}\right)$. Вставивши це, отримаємо наступний вираз:

$$\Delta \varphi = \arg\left(\frac{U_{осн}(t)}{U_{осн}(0)} \cdot e^{-j\omega t}\right) \quad (2.8)$$

Результатом цього виразу завжди є значення від -180° до $+180^\circ$. Вираз також висвітлює головну проблему отримання інформації про фазовий кут: потрібне точне знання частоти енергосистеми. Помилка частоти призведе до очевидного зсуву фазового кута. Абсолютна похибка Δf у частоті призводить до наступного фазового кута як функції часу:

$$\Delta \varphi = \varphi(t) - \varphi(0) + 2\pi \Delta f t \quad (2.9)$$

2.3 Модифікація методу визначення характеристик динамічної поведінки вектору напруг

Відомі підходи виявлення стрибка фазового кута із застосуванням методу огинаючої форми сигналу напруги визначаючи час початку та закінчення провалу за формою миттєвої фазної напруги [56-58]. Точки початку та закінчення провалів ідентифікуються або оцінюються шляхом простого огляду записаної форми сигналу напруги.

Дослідження застосування методу визначення характеристик провалів напруги за СКЗ та розробленим (модифікованим) методом визначення динамічних характеристик провалів напруги в електричній мережі проводилися на основі моделі провалу напруги [59], який спричинений коротким замиканням, за допомогою синусоїдальної функції амплітудно модульованої ступінчатими функціями. Числова модель представлена наступним чином:

$$U_A = A[1 - \alpha(u(t - t_1) - u(t - t_2))] \sin(2\pi f_1 t + \theta_A), \quad (2.10)$$

де α – глибина провалу у в.о., $0.1 \leq \alpha \leq 0.9$, $T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$, f_1 – основна частота, θ_A – фазовий кут. Тривалість падіння напруги визначається ступінчастими функціями $u(t - t_1)$, $u(t - t_2)$, t_1 і t_2 є часом початку та кінця падіння напруги.

На рис. 2.8 представлений графік провалу напруги (миттєві значення) з наявністю стрибка фазового кута.

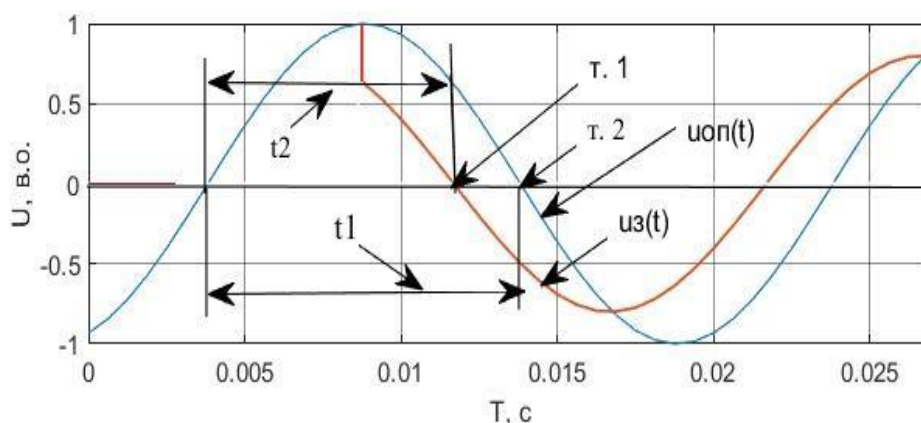


Рисунок 2.8 – Визначення точки початку провалу напруги

т.1 – точка перетину нуля форми сигналу провалу напруги, т.2 – точка перетину нуля форми опорного сигналу, t_1 – період опорного сигналу.

Сигнал на рис. 2.8 функціонально представляється наступним чином:

$$U_i = U_m \sin(\omega t), \quad (2.11)$$

де U_i - миттєва напруга, U_m - пік напруги, ωt - фазовий кут (θ).

В основному алгоритм полягає в наступному. Визначається різниця в часі та відповідний кут, враховуючи, що частота постійна. Знаходиться час переходу через нуль до початку падіння напруги та порівняння форм сигналів провалу з опорною для знаходження точки початку провалу. Подібним чином знаходиться і точка закінчення провалу.

Більш суттєвим способом визначення точок початку та закінчення провалів є застосування вейвлет-аналізу. Як показують результати багатьох досліджень, для аналізу структури сигналів різноманітної тривалості необхідні частотно-часові атоми з різноманітними часовими носіями. У ортогональних перетвореннях, в якості

сімейства таких частотно-часових атомів, застосовується вейвлет-функція в результаті її масштабування на величину s і зсуву на величину u [38]:

$$\psi_{u,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-u}{s}\right) \quad (2.12)$$

При цьому, ортогональне перетворення $\psi \in L^2(R)$ від часу u і масштабу s є наступним:

$$Wf(u, s) = \langle f, \psi_{u,s} \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-u}{s}\right) dt, \quad (2.13)$$

де $\langle f, \psi_{u,s} \rangle$ – скалярний добуток.

Як слідує із виразу, вейвлет-перетворення може фокусуватись на локальних структурах сигналу за допомогою процедури наближення та віддалення об'єктів, яка поступово зменшує/збільшує масштабний параметр. Особливості і негладкі структури сигналу часто містять основну інформацію про його характеристики. Оскільки локальна гладкість сигналу характеризується зменшенням амплітуди вейвлет-перетворення зі зменшенням масштабу, можливі досліджено особливості і перепади сигналу шляхом аналізу локальних максимумів вейвлет-перетворення при малих масштабах, що дозволило деталізувати місця «аномалій» у сигналі [39].

Як відзначається в науковій літературі, зменшення амплітуди вейвлет-коефіцієнтів в залежності від масштабу зв'язано з рівномірною і точковою гладкістю Ліпшиця [60] сигналу.

Вимірювання цього асимптотичного убуття еквівалентне наближенню структур сигналу при масштабі, який прямує до нуля. Тобто, якщо $f \in L^2(R)$ задовольняє умові Ліпшиця α , $\alpha \leq n$, на $[a,b]$, то існує $A > 0$ таке, що $\forall(u, s) \in [a, b] \times R^+ \quad |Wf(u, s)| \leq As^{\frac{\alpha+1}{2}}$.

Нерівність являється умовою асимптотичного спадання $|Wf(u, s)|$, якщо s прямує до нуля. При цьому, при зменшенні масштабу s функція $|Wf(u, s)|$ характеризує дрібномасштабні зміни довкілля u . Масштаб s має бути більше 2, в протилежному випадку крок вибірки може бути більше носія вейвлета. Тому при

обчисленні найменший масштаб вейвлет-перетворення обмежений розділенням дискретних даних. Як відомо, дискретне вейвлет-перетворення обчислюється з масштабом $2^j \geq s \geq \mu N^{-1}$, де μ може бути достатньо велике для того, щоб усунути вплив неточної вибірки на вейвлети найменшого масштабу. Тому найбільший масштаб 2^j потрібно обирати так, щоб він був меншим, ніж відстань між двома послідовними особливостями у часі, для того, щоб запобігти впливу інших особливостей на $Wf(u, s)$.

При кожному масштабі 2^j представлення максимумів дає значення $Wf(u, 2^j)$ там, де $|Wf(u, 2^j)|$ – локальний максимум. При цьому, коли значення функції $f(t)$ зрушене на τ , кожне $Wf(u, 2^j)$ також зрушене на τ , як і їх максимуми [61].

На рис. 2.9 представлено визначення тривалості провалу напруги за допомогою вейвлет-аналізу.

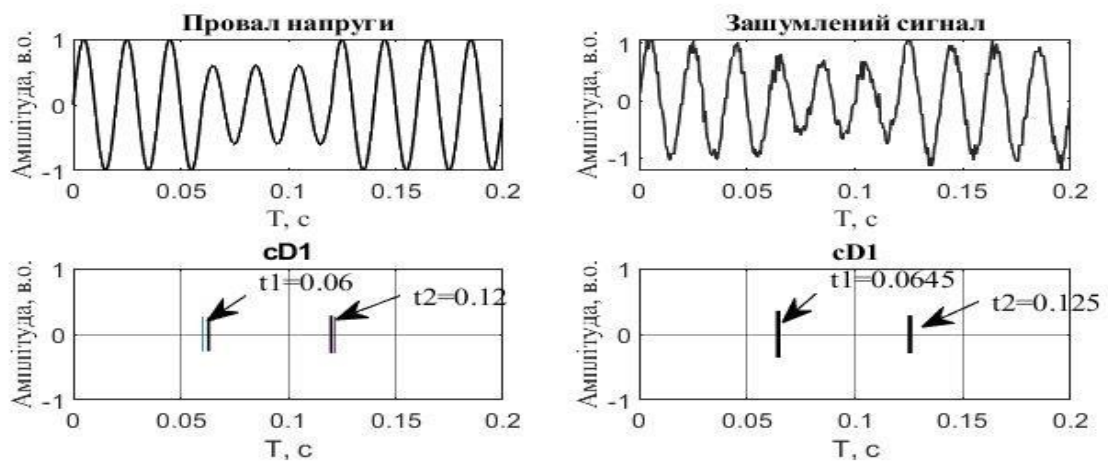


Рисунок 2.9 – Визначення тривалості провалу напруги за допомогою вейвлет-аналізу

Вейвлет перетворення застосовується для кожної фазної напруги, а моменти початку та закінчення провалу напруги визначаються шляхом пошуку піків вейвлет-коефіцієнтів. Критичним аспектом застосування даного методу є правильний вибір материнського вейвлету. Так як, короткі вейвлети дають кращу часову локалізацію спотворень сигналу то точність виявлення порушення у них низька. З іншого боку, довші материнські вейвлети мають нижчу швидкість, але вони менш точні у визначенні часу початку та закінчення провалу напруги [31].

Даний метод не дозволяє визначити напругу провалу коли він не містить перехідних компонентів, тобто, провал напруги плавний. Також за допомогою цього методу точність визначення точки закінчення провалу зменшується, якщо провал напруги супроводжується зсувом фазового кута.

Метод оцінки з використанням перетворення dq. Перетворення dq – це метод керування просторовим вектором, який перетворює набір стаціонарної трифазної напруги в обертальний ортогональний кадр dq [62]. За допомогою даного перетворення можна виявити трифазний симетричний провал напруги у реальному часі і воно також точне у визначенні точок початку та закінчення провалу. Застосування даного перетворення для асиметричних провалів напруги ускладнено.

Метод оцінки з використанням так званої числової матриці. Метод полягає у визначенні стану системи електропостачання шляхом обчислення кожної окремої частотної складової. Значення напруги відбирається і зберігається у форматі матриці. Кількість одночасних рівнянь, які потрібно розв'язати, подвоюється відповідно до кількості гармонік в сигналі [63]. Даний метод має невелику затримку у визначенні миттєвого початку провалу та його закінчення для форм напруги без гармонік.

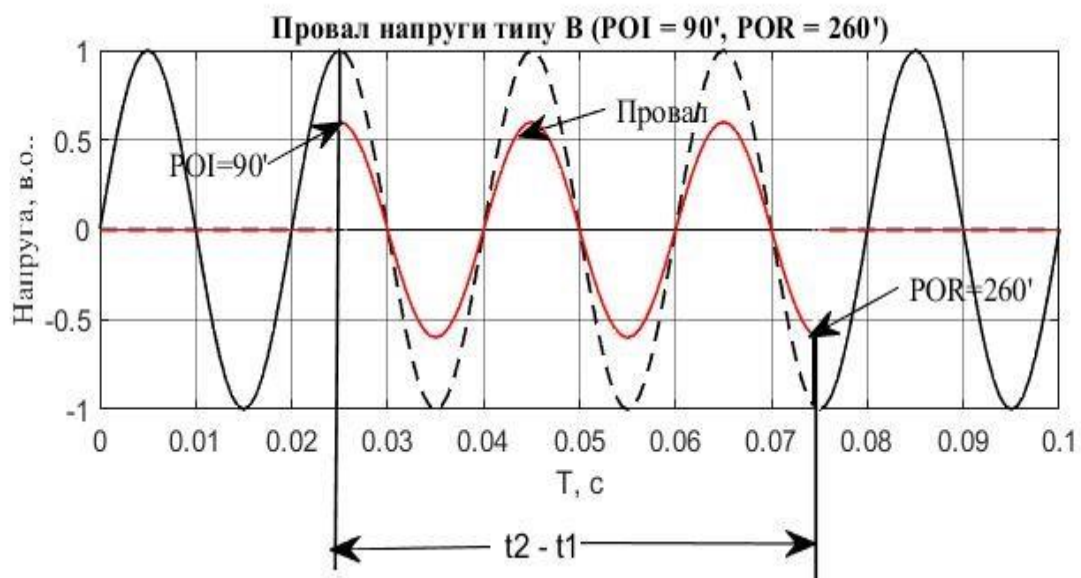
В табл. 2.1 представлені основні характеристики застосування розглянутих методів визначення характеристик провалів напруги.

Таблиця 2.1. Порівняльні характеристики розглянутих методів

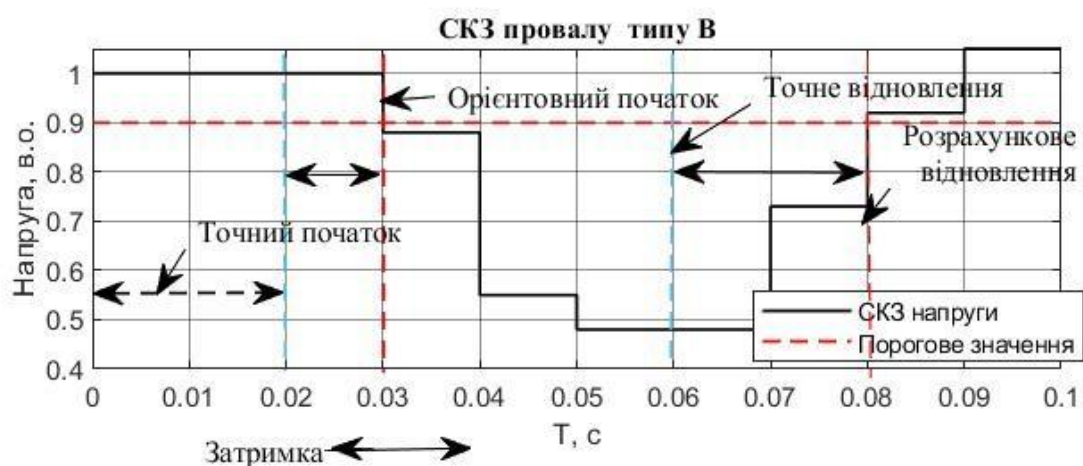
Метод	Вхідні дані про напругу	Точність	Величина
СКЗ	1-фаза, скз	Низька	так
Метод огиначаючої	1-фаза, миттєва	Середня	ні
Вейвлет, без перехідних професів	1-фаза, миттєва	Висока	ні
Вейвлет, наявність перехідних професів	1-фаза, миттєва		ні
Перетворення dq	3-фази, миттєва		H_i^*
Числова матриця	1-фаза, миттєва		H_i^*

Примітка. N_i^ - Збережену величину можна обчислити в кількох конкретних сценаріях.*

Визначення коректності обчислення тривалості провалу напруги проводилося порівнянням методів огинаючої та методу СКЗ. На рис. 2.10 представлені порівняльні графіки методу СКЗ та методу огинаючої.



а)



б)

Рисунок 2.10 – Порівняльні графіки визначення провалу напруги а) методом огинаючої, б) методом СКЗ

Дослідження проводилися із провалом напруги типу В з наявністю точки початку провалу (POI) та точки закінчення провалу (POR) з різними часовими значеннями [64, 65].

Отже, середньоквадратична величина значення напруги оновлюється кожні півперіоду, а отже, наступні значення обчислюються за індексами $\left(k + \frac{hN}{2}\right)$, де h – ціле число. При цьому часова роздільна здатність дискретної часової послідовності є напівциклом. Провал напруги виявляється, якщо обчислене СКЗ напруги падає нижче попередньо визначеного порогового значення. В літературі цей метод ще називають традиційним.

Незважаючи на те, що він широко використовується, цей метод не є точним для визначення моментів початку та відновлення провалу напруги. Оператор СКЗ створює ефект усереднення, і в результаті середньоквадратичний профіль напруги може зайняти до одного циклу, щоб досягти нового сталого значення після початку провалу або його відновлення [32]. Бачимо, що існує різниця в часі між моментом точного початку провалу та розрахунковим. Тобто між ними є деякий час затримки, який може в окремих випадках (коли величина провалу мінімальна) дорівнювати одному циклу.

Даний метод легко реалізується і вимагає невеликих об'ємів обчислень. Синхронізація частоти дискретизації з частотою системи електропостачання не потрібна, оскільки різниця між синхронізованим та несинхронізованим СКЗ невелика [37]. Але визначення точок початку та закінчення провалу є досить неточним, оскільки СКЗ напруги може зайняти до одного циклу для переходу від значень перед провалом напруги до значень під час провалу [66].

Порівнюючи рис. 2.10а та рис. 2.10б видно, що точні моменти часу початку та закінчення провалу визначаються візуальним оглядом вимірної та еталонної напруги. З іншого боку, оцінювання моменту початку та закінчення провалу за традиційним пороговим середньоквадратичним методом не є точним. На рис. 2.10б часові затримки становлять 0.36 та 0.872 циклу відповідно. Така похибка

перешкоджає використанню розрахункових значень початку та закінчення провалів в аналізі чутливості обладнання до провалів напруги в електричних мережах.

В [33] було відмічено, що найнижча часова затримка для традиційного методу досягається завдяки застосуванню коротких ковзних вікон (напівциклів) і високій швидкості оновлення (обчислення СКЗ для кожного нового зразка напруги). Проте це також давало велику похибку.

Метод СКЗ може бути корисним для отримання СКЗ показника напруги, але цього недостатньо для оцінки ефективності захисту системи передачі та розподілу електричної енергії через його обмеження у визначенні точок початку та закінчення провалу напруги [58].

Як було відмічено раніше, метод огинаючої форми сигналу використовує миттєву фазну напругу для визначення початку та завершення провалу напруги. Для підвищення швидкості визначення точок початку та закінчення провалу напруги навкруги опорної (номінальної – в стаціонарному стані) фазної напруги створюються 5% та 10% її порогові значення. На рис. 2.11 це $U_{\text{ном}} \pm 10\%$ та $U_{\text{ном}} \pm 5\%$. Метод виявлення точок спрацьовує коли миттєве значення напруги виходить за порогові значення [67].

При цьому, точка початку провалу визначається коли виміряна напруга вийшла за межі 5% порогового значення, а точка закінчення провалу – коли виміряна напруга виходить за 10% порогове значення. Метод вважається високочутливим для знаходження точної точки початку провалу. Потім, для точного визначення точки закінчення провалу та його тривалості використовується метод вейвлет-аналізу (рис. 2.11).

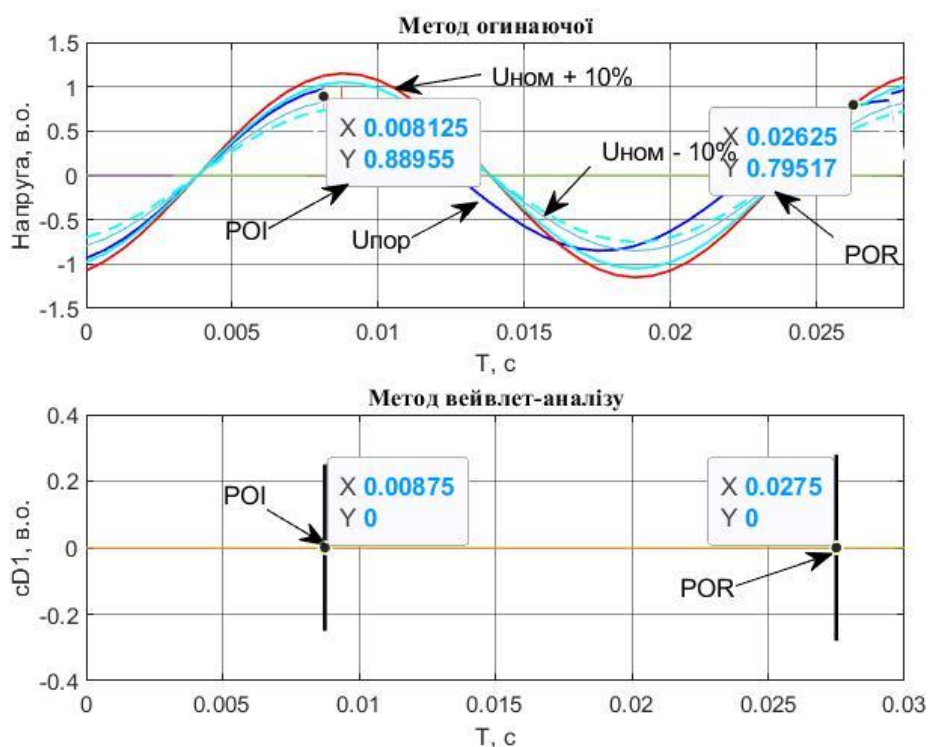


Рисунок 2.11 - Модифікований метод визначення точок початку/закінчення провалу напруги та його тривалості

Виходячи з рис. 2.11, точність визначення точок початку/закінчення провалу напруги та його тривалість методом вейвлет-аналізу вища ніж методом огинаючої. Це пояснюється залежністю точності визначення характеристик провалу напруги від частоти дискретизації.

Висновки до розділу 2

Методи середньоквадратичного обчислення падіння напруги мають похибку від втрати інформації про миттєвий час, фазу та полярність, що може призвести до надання неточної тривалості провалу напруги.

Через відсутність інформації про фазу, методи СКЗ не застосовуються для оцінки характеристик форми сигналу, таких як стрибок фазового кута, POW, гармоніки, відсутня напруга та симетрія напруги.

Провали напруги є важливою проблемою якості електроенергії, оскільки вони існують у мережах усіх класів напруг, а їх вплив відчують усі електроприймачі.

Провали напруги можуть спричиняти порушення в роботі, які супроводжуються значними матеріальними збитками.

Підводячи результати проведених досліджень застосування різних методів визначення тривалості провалу, точок початку/закінчення та глибини провалу необхідно відмітити наступне. Ні один із методів не може одноособово визначити з необхідною точністю характеристики провалів напруги. В зв'язку з чим у роботі пропонується модифікований метод визначення характеристик провалів напруги.

РОЗДІЛ 3.

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ ТИПІВ ПРОВАЛУ НАПРУГИ

3.1 Вейвлет-перетворення просторового вектора: новий трифазний підхід

Останні досягнення в методах моніторингу якості електроенергії базуються на вилученні даних про порушення за допомогою частотно-часового аналізу. Частотно-часовий аналіз більше підходить для виявлення порушень якості електроенергії, які змінюються в широкому діапазоні часу та частоти. Вейвлет-перетворення має унікальну здатність досліджувати сигнал у часовому та частотному діапазонах, що робить його перспективним інструментом для аналізу порушень якості електроенергії. Недоліком усіх вищевказаних методів є те, що всі вони є однофазними. Для виявлення та ідентифікації порушень якості електроенергії потрібно більше часу. Інша проблема полягає в тому, що практичні порушення мають різну величину та різний частотний спектр, тому жоден метод, описаний вище, не може їх виявити чи ідентифікувати. В роботі представлено нову техніку, засновану на трифазному підході з використанням дискретного вейвлет-перетворення просторового вектора, що усуває обмеження існуючих однофазних методів.

Перетворення Кларка зазвичай використовується в програмах керування двигуном у реальному часі. Це пов'язано з тим, що в трифазній системі фазові величини не є незалежними змінними. Таким чином, можна перетворити трифазну систему в еквівалентне двофазне представлення.

В роботі наведена вище концепція застосована, щоб запропонувати альтернативний метод, який здатний обробляти всі три сигнали фазної напруги одночасно.

Перетворення Кларка визначається як [24],

$$\begin{bmatrix} X_a[k] \\ X_\beta[k] \\ X_o[k] \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1\sqrt{2} & -1\sqrt{2} \\ 0 & -\sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a[k] \\ V_b[k] \\ V_c[k] \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$Sv[k] = X_\alpha[k] + jX_\beta[k] \quad (3.2)$$

$$|Sv[k]| = \sqrt{X_{\alpha^2}[k] + X_{\beta^2}[k]} \quad (3.3)$$

Перші два компоненти перетворення X_α і X_β утворюють просторовий вектор, заданий рівнянням (3.2). Третій компонент перетворення представляє компонент нульової послідовності (X_0). Рівняння (3.3) дає величину просторового вектора.

У [68-70] пояснюється застосування просторових векторів для виявлення та класифікації порушень якості електроенергії. У [68] для виявлення порушень використовується метод трифазної векторної суми. Просторовий вектор аналізується за допомогою перетворення Фур'є для виявлення та класифікації прогинів і здуття, пояснення в [24]. У [69] досліджено просторовий вектор із подвійним фільтром гістерезису для виявлення та пом'якшення порушень. У [70] для класифікації порушень використовуються статистичні ознаки просторового вектора.

Для перевірки запропонованого методу мережа розподілу електроенергії моделюється за допомогою MATLAB SIMULINK, як показано на рис.3.1

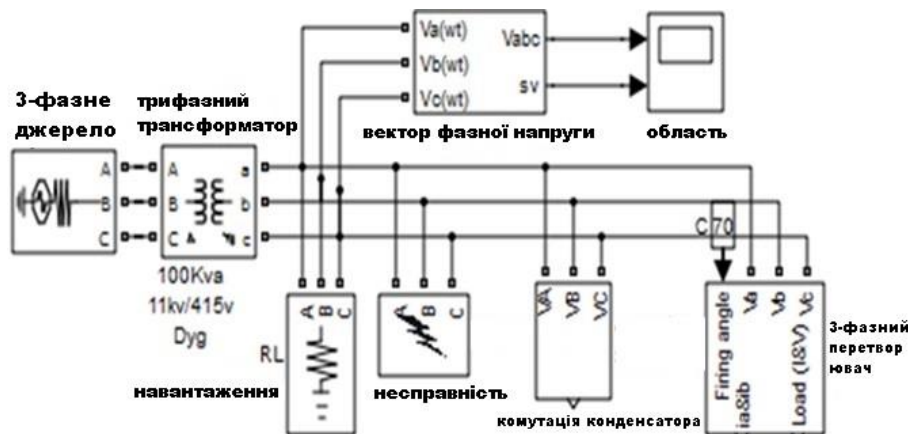


Рисунок 3.1. - Практична мережа енергосистеми (модель Simulink) [71]

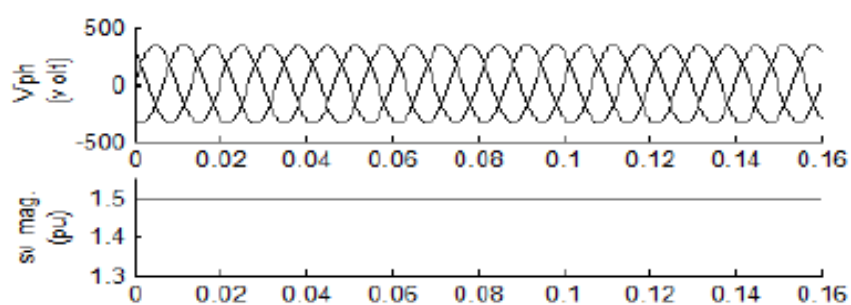
Розглянута мережа розподілу електроенергії має трифазний розподільний трансформатор 100 кВА, 11 кВ/415 В, що забезпечує різні навантаження, які створюють перешкоди під час роботи або під час перемикавання. Перехідні процеси перемикавання конденсатора генеруються під час перемикавання батареї конденсаторів із покращенням коефіцієнта потужності 5 кВАр. Трифазний перетворювач потужністю 35 кВт використовується для живлення постійного струму. Просідання та зростання

на різних фазах генеруються шляхом зменшення або підвищення фазної напруги. Вважається, що сім різних типів порушень якості електроенергії, наведених у таблиці 1, створюють дані для тестування.

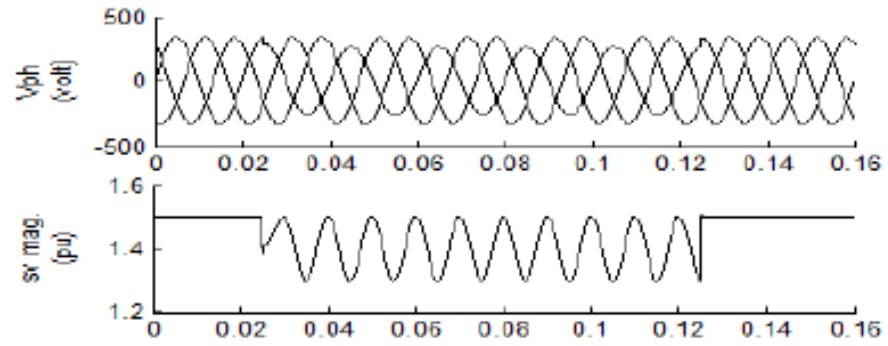
Розглянуті порушення включають 1-фазне падіння та збільшення, комбіноване 1-фазне падіння та збільшення (рівні та неоднакові величини), 3-фазне збалансоване падіння та збільшення, 3-фазні перехідні процеси перемикавання конденсатора та трифазний перехідний режим роботи перетворювача. Перемикавання конденсатора - це нестационарне порушення, яке виникло в момент початку $t_{st} = 0,012$ с. Усі типи просідання та зростання виникають у $t_{st} = 0,025$ сек. і закінчуються в момент часу $t_{ed} = 0,125$ сек.

Таблиця 3.1 - Спотворення якості електроенергії, що розглядаються для моделювання [71]

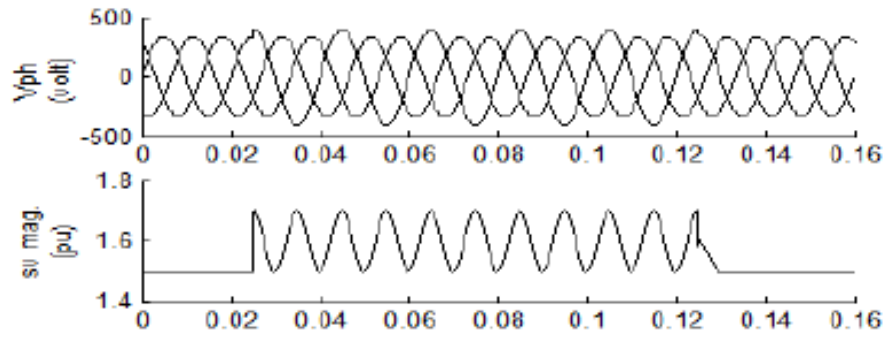
№	Порушення якості електроенергії	Тривалість, сек.	
		t_{st}	t_{ed}
1	Перемикавання конденсаторів	0,012	-
2	Насічка	Стійкий стан	
3	Однофазне просідання	0,025	0,125
4	Однофазне зростання	0,025	0,125
5	Комбіноване просідання та зростання i) Рівна величина ii) Нерівна величина	0,025	0,125
6	Трифазне просідання	0,025	0,125
7	Трифазне зростання	0,025	0,125



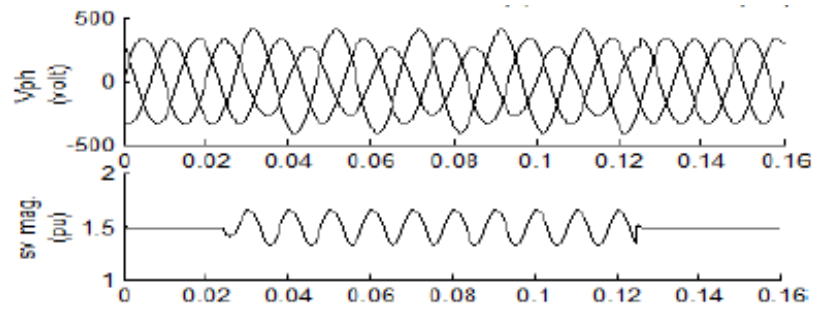
a)



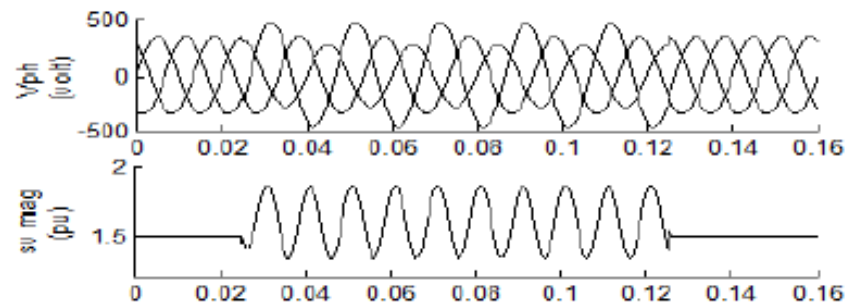
б)



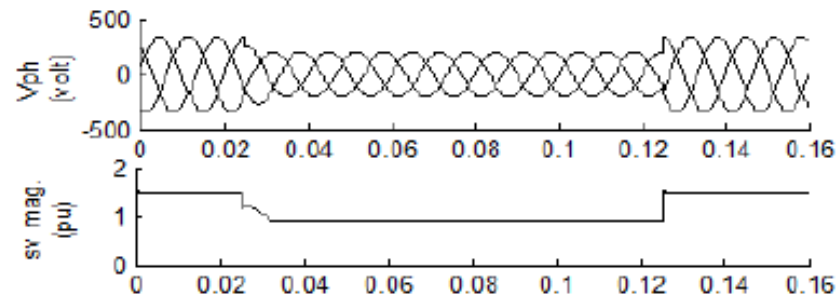
в)



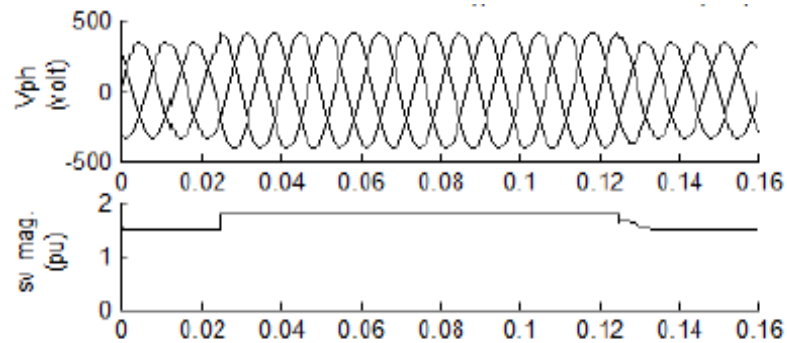
г)



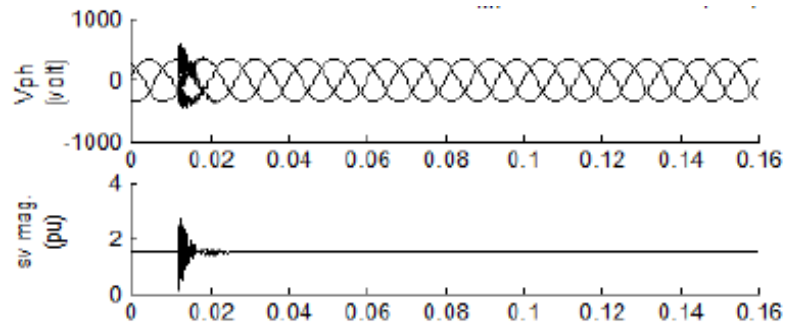
д)



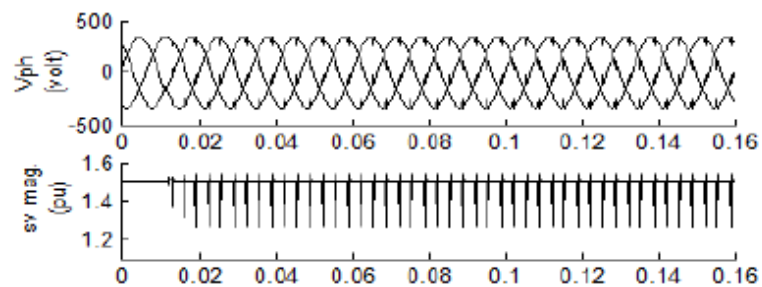
е)



є)



ж)



з)

Рисунок 3.2 - Просторовий вектор для різних порушень якості електроенергії [71]:

а) нормальне трифазне живлення; б) 80% провисання у фазі А; в) 120% зростання у фазі А; г) рівне провисання та зростання (80% і 120%) у двох фазах; д) нерівномірне провисання та зростання (80% провисання та 140% зростання) у двох фазах; е)

трифазне збалансоване падіння напруги; є) трифазне збалансоване збільшення напруги; ж) перехідні процеси перемикавання конденсатора; з) робота трифазного перетворювача [71].

З результатів можна зробити висновок, що коли відбувається порушення якості електроенергії, змінюються такі характеристики, як вміст частоти та величина просторового вектора. Також спостерігається, що просторовий вектор є унікальним для різних груп порушень.

Застосована вищезазначена концепція, щоб запропонувати альтернативний метод, який здатний виявляти та локалізувати порушення якості електроенергії у трифазних сигналах напруги одночасно шляхом аналізу просторового вектора за допомогою дискретного вейвлет-перетворення.

Дискретне вейвлет-перетворення є одним з корисних математичних інструментів для розкладання сигналів порушень у часовій області на кілька масштабів на різних рівнях роздільної здатності через розширення та трансляцію [71, 72]. Ця властивість відома як техніка розкладання сигналу з різною роздільною здатністю (MSD), яка розкладає сигнал на шкали з різною роздільною здатністю за часом і частотою. У сигналах порушення якості електроенергії багато порушень містять різкі краї, переходи та стрибки. За допомогою діадичних банків фільтрів можна легко досягти MSD. Таким чином, техніка розкладання сигналу з різною роздільною здатністю відрізняє порушення від початкового та аналізує їх окремо. Здатність вейвлета фокусуватися на коротких інтервалах часу для високочастотних компонентів і довгих інтервалах для низькочастотних компонентів покращує аналіз сигналів з локалізованими імпульсами та коливаннями.

Існує багато типів дискретного вейвлет-перетворення щодо вибору материнської вейвлет-функції; однак у практичних застосуваннях діадичне перетворення з аналізом з багаторазовою роздільною здатністю (MRA) зазвичай використовується для виявлення порушень якості електроенергії [71]. Вейвлет-коефіцієнти дискретизованих сигналів, $s(n)$, розкладені за L -шкалою техніки розкладання сигналу з різною роздільною здатністю, визначені як:

$$d_j(k) = \sum_{n=1}^N s(n)h_j(n - 2^j k) \quad j = 1, 2, \dots, L \quad (3.4)$$

$$c_L(k) = \sum_{n=1}^N s(n)g_L(n - 2^L k) \quad (3.5)$$

Де $d_j(k)$ – коефіцієнти деталізації на j -му масштабі, $c_L(k)$ наближені коефіцієнти в останній шкалі, L , h_j і g_L позначає імпульсні відгуки з наступною фільтрацією в MSD, а N є кількістю вибірових даних у кінцевому інтервалі. Оскільки сімейство розширених вейвлетів становить ортогональний базис, тоді можна точно реконструювати вихідний сигнал з його коефіцієнтів.

Проблеми з якістю електроенергії характеризуються їхніми максимальними амплітудами, напругою на вершині, RMS, частотою, статистикою вейвлет-коефіцієнтів, миттєвими падіннями напруги, кількістю вирізів, тривалістю перехідних процесів тощо. Ці характеристики є унікальними ідентифікаційними ознаками різних порушень якості електроенергії.

Вейвлет-перетворення може отримати інформацію як про час, так і про частоту сигналів, що є дуже привабливою особливістю при аналізі часових рядів, оскільки можна отримати часову локалізацію спектральних компонентів. Однією з переваг вейвлет-аналізу є його здатність виконувати локальний аналіз. Вейвлет-аналіз здатний виявити аспекти сигналу, які пропускають інші методи аналізу, такі як тренди, точки розриву, розриви тощо. Ця властивість вейвлет-аналізу використовується для виявлення та локалізації порушень якості електроенергії.

Просторовий вектор, створений різними порушеннями якості електроенергії, був проаналізований за допомогою вейвлет-декомпозиції сигналу з багаторазовою роздільною здатністю (MSD) для виявлення та локалізації збурення. Аналіз дискретного вейвлет-перетворення просторового вектора виявляє зміну величини та частоти просторового вектора та визначає інтервал порушень. Щоб застосувати вейвлет-перетворення для ідентифікації інтервалів часу, виконуються такі дії:

- 1) Генеруються дані просторового вектора порушень якості електроенергії з відомими початковим і кінцевим часом.
- 2) Застосовуються дискретне вейвлет-перетворення з відповідним основним вейвлетом.
- 3) Визначаються інтервали порушень за допомогою вейвлет-коефіцієнтів.

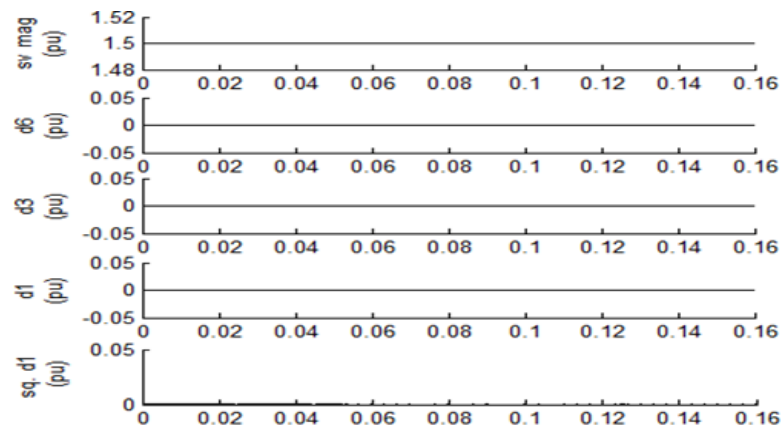
Багато дослідників застосовували різні алгоритми для швидкого виявлення порушень якості електроенергії [68-70]. У цьому документі алгоритм MRA було застосовано до згенерованих даних порушень для тестування запропонованої техніки. Багато комерційних приладів моніторингу якості електроенергії мають частоту дискретизації 256 вибірок/цикл, оскільки більшість подій якості електроенергії мають частотний вміст нижче 5 кГц [20]. Отже, згенеровані дані порушень дискретизуються на частоті дискретизації 12,8 кГц протягом 8 циклів, тобто 2048 вибірок, і аналізуються до шести рівнів роздільної здатності. Вищий рівень масштабування вейвлета є більш придатним, але враховуючи переваги обчислювальної ефективності та практичних міркувань, шестирівневе розкладання за допомогою материнського вейвлета Daubechies (db6) є достатнім для отримання відповідної інформації.

За допомогою інструментів MATLAB Wavelet Blockset та DSP (Digital Signal Processing) реалізовано алгоритм дискретного вейвлет-перетворення просторового вектора. Таблиця 3.2 показує смуги частот приблизного та детального WTC після аналізу для шести рівнів розкладання.

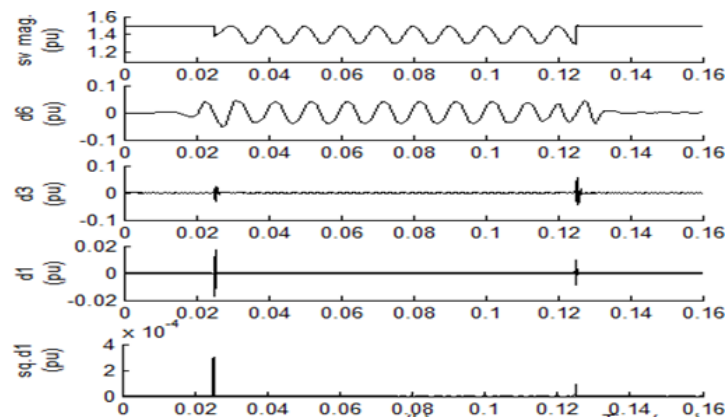
Таблиця 3.2 - Приблизні та детальні коефіцієнти та їх діапазони частот [71]

Прибл. WTC	Частота Діапазон (Гц)	Детал. WTC	Частота Діапазон (Гц)
рівень a1	0-3200	рівень d1	3200-6400
рівень a2	0-1600	рівень d2	1600-3200
рівень a3	0-800	рівень d3	800-1600
рівень a4	0-400	рівень d4	400-800
рівень a5	0-200	рівень d5	200-400
рівень a6	0-100	рівень d6	100-200
рівень a7	0-50	рівень d7	50-100
рівень a8	0-25	рівень d8	25-50
рівень a9	0-12.5	рівень d9	12.5-25
рівень a10	0-6.25	рівень d10	6.25-12.5
рівень a11	0-3.125	рівень d11	3.125-6.25
рівень a12	0-1.56	рівень d12	1.56-3.125
рівень a13	0-0.78	рівень d13	0.78-1.56

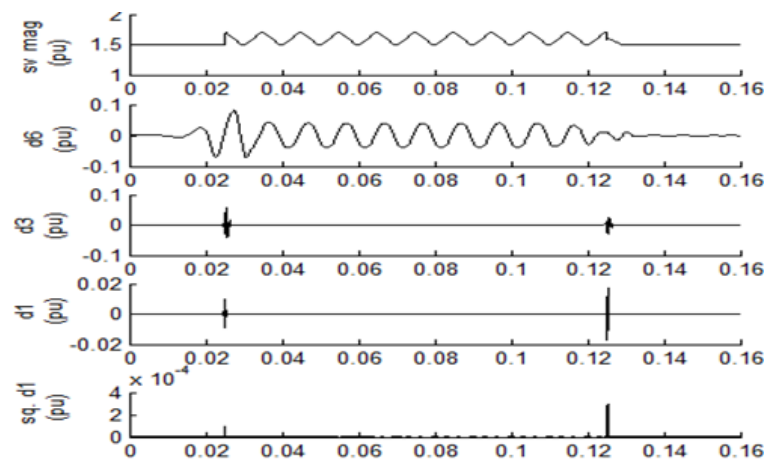
Бачимо, що коефіцієнти дискретного вейвлет-перетворення на інтервалі порушень значно вищі, ніж в інші часи. Сигнал коефіцієнта деталізації першого масштабу (d1) включає найвищий діапазон частот, що миттєво виявляє заваду. Сигнал із наближеним коефіцієнтом високої шкали (a6 і d6) виявляє низькочастотну смугу сигналу в шостій шкалі. Це розкладання дає інформацію про час і частоту сигналу з хорошою роздільною здатністю.



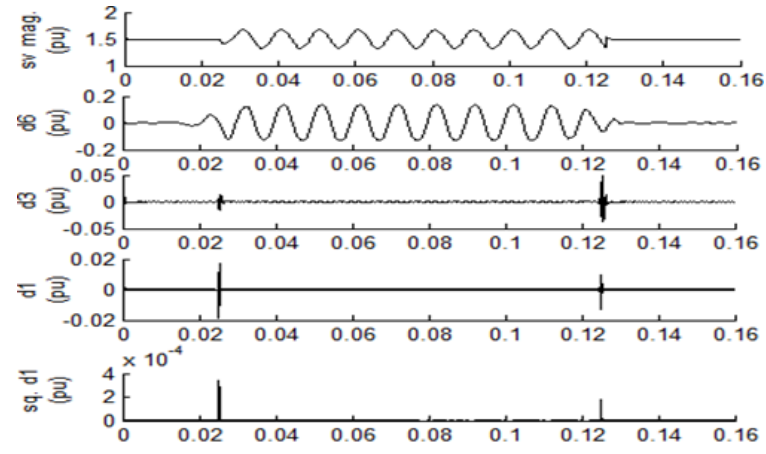
а)



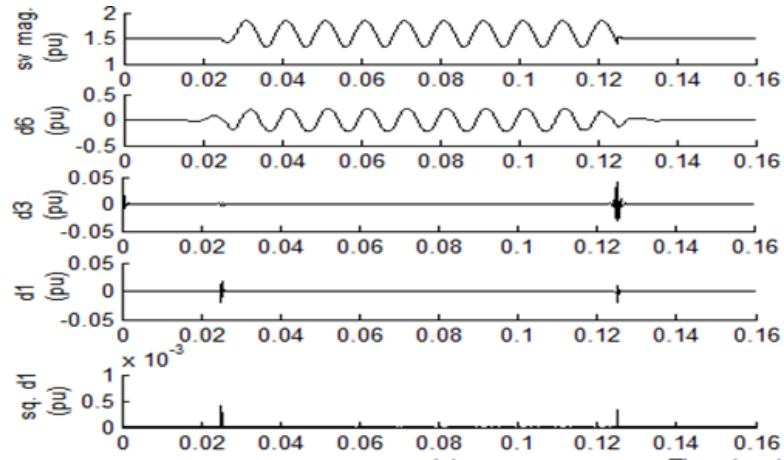
б)



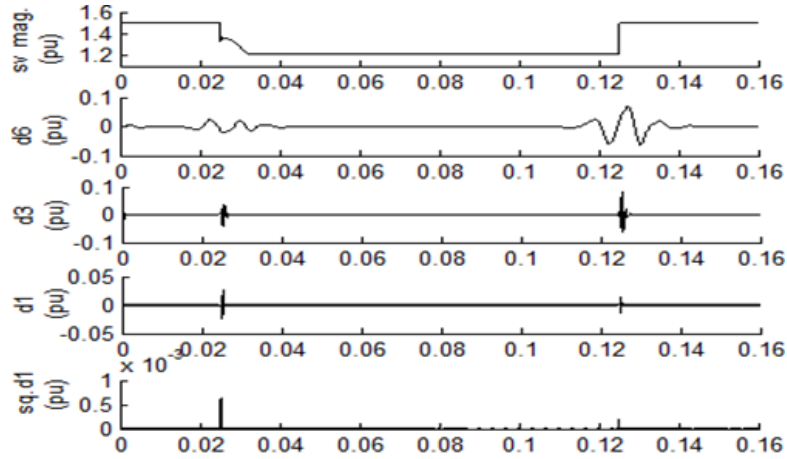
в)



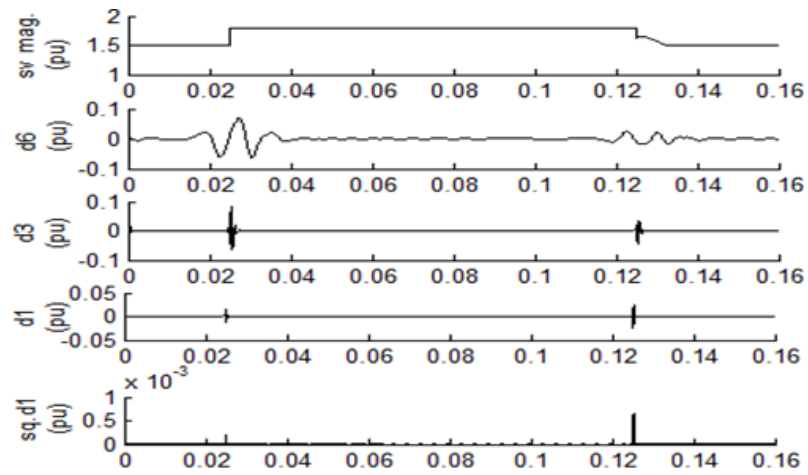
Г)



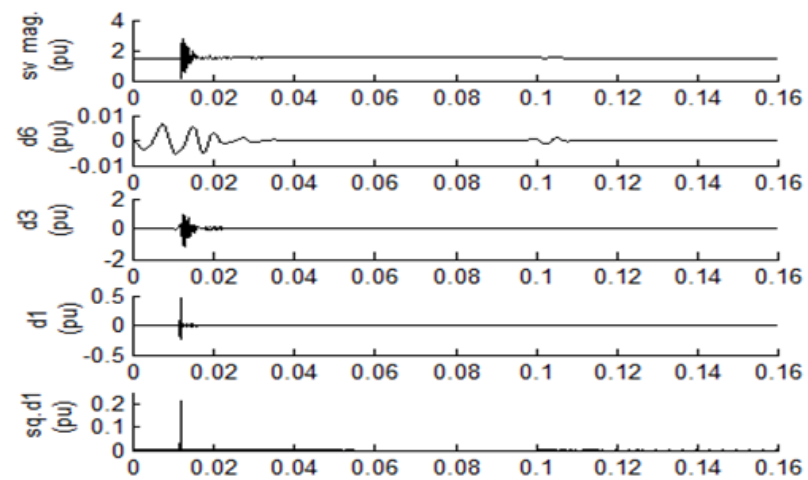
Д)



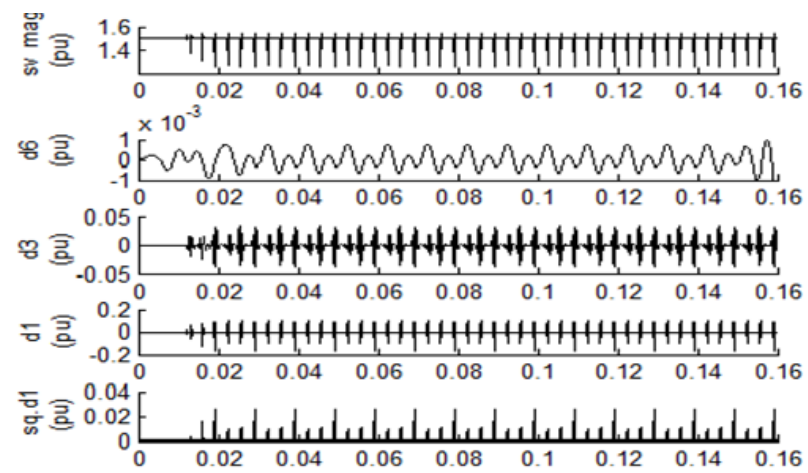
е)



є)



ж)



з)

Рисунок 3.3 - Просторовий векторний дискретний вейвлет-перетворення
аналіз спотворень якості електроенергії [71]:

а) нормальне трифазне живлення; б) однофазне (80%) провисання; в) однофазне (120%) зростання; г) дорівнює однофазному спаду та зростанню (80% та 120% кожен;

д) нерівномірні однофазні спад та зростання (80% і 140%); е) збалансований трифазний провал; є) збалансоване трифазне зростання; ж) перехідні процеси перемикавання конденсатора; з) нарізка 3-фазного перетворювача. [71]

На рис. 3.3 (а)-(з) показано аналіз дискретного вейвлет-перетворення просторового вектора сигналів порушень якості електроенергії за допомогою MRA. Незважаючи на те, що розкладання виконується до шести рівнів, на рис. показано лише сигнали коефіцієнтів деталізації трьох рівнів (d_6 , d_3 і d_1). П'ять різних сигналів, показаних у формах хвилі, є просторовими векторами, детальними коефіцієнтами вейвлет-перетворення на рівнях d_6 , d_3 , d_1 і квадрат рівня 1 (кв. d_1). Причиною зведення вейвлет-коефіцієнта в квадрат є зменшення ефекту шуму в сигналах. На рис. 3.3 (а) для нормальної трифазної напруги величина просторового вектора є постійною, а аналіз дискретного вейвлет-перетворення просторового вектора дає нульові значення WTC на всіх масштабах. На рис. 3.3 (б)-(з) показано вплив змінених характеристик просторового вектора під час порушень значень WTC на різних рівнях роздільної здатності. Помічено, що в момент виникнення та в кінці збурення значення WTC набагато вищі, ніж в інший час. Ця функція вейвлет-перетворення використовується для визначення часу початку (t_{st}) і час закінчення (t_{ed}) порушення. [71]

Тоді рівняння (6) використовується для вимірювання тривалості порушення Δt і використовується для класифікації порушення як миттєвого, короткочасного або тимчасового.

$$\Delta t = t_{ed} - t_{st} \quad (3.6)$$

На найнижчому масштабі (шкала 1) основний вейвлет найбільш локалізований у часі та коливається найшвидше протягом короткого періоду часу. Коли вейвлет переходить до вищих масштабів, аналізуючий вейвлет стає менш локалізованим у часі та менше коливається через розширення. Нижні рівні розкладання (1-3) на рис. 3.3 (б) – (є) навряд чи показують будь-які ненульові коефіцієнти через відсутність частотних компонентів на цих високих частотах, за винятком початку та кінця порушень якості електроенергії. Вищі рівні роздільної здатності, що відповідають нижчим частотам, починають вловлювати збурення. На рис. 3.3 (ж) показано початок

перехідного явища, яке поступово згасає з часом. На рис. 3.3 (з) показано перехідне явище внаслідок комутації напівпровідникових приладів перетворювача. Це доводить, що зі збільшенням масштабу точність визначення часу порушень зменшується, а роздільна здатність частоти зростає. Отже, хороша часова локалізація в низькому масштабі, а хороша частотна локалізація у високому масштабі.

З результатів можна зробити висновок, що дискретне вейвлет-перетворення просторового вектора є придатним інструментом для аналізу порушень якості електроенергії, коли потрібна інформація про час і частоту одночасно. Також він може дуже швидко та точно виявляти майже всі типи порушень. Єдиним недоліком є те, що він не може виявити події, що поступово змінюються.

3.2 Визначення характерних ознак наявності провалів напруги

Провали напруги у системах електропостачання є серйозними проблемами, які можуть мати різні причини і наслідки. Характерні ознаки провалів напруги [19, 20]:

1. *Відключення електроприладів:* Провал напруги призводить до вимкнення електроприладів, які потребують постійного живлення. Це може стосуватися побутових пристроїв (таких як холодильники, кондиціонери, освітлення) або промислового обладнання.
2. *Перебої в роботі комп'ютерів та інших електронних пристроїв:* При несподіваному різкому зниженні напруги можливе переривання роботи комп'ютерів, серверів, мережевого обладнання та інших електронних систем. Це може призвести до втрати даних або пошкодження обладнання.
3. *Зниження освітлення:* Провал напруги може призводити до зниження яскравості освітлення, особливо у великих будівлях або на вулицях. Це може створити серйозні проблеми з безпекою та комфортом людей.

4. *Проблеми з підтримкою життєвих систем:* У деяких випадках провал напруги може призвести до зупинки систем, які підтримують життєво важливі об'єкти, такі як лікарні, лабораторії або важливі інфраструктурні об'єкти. [73]

5. *Економічні втрати:* Великі провали напруги можуть призвести до значних економічних втрат для підприємств та приватних осіб. Вони можуть втратити доходи через припинення виробництва або роботи бізнесу.

6. *Ризики для інфраструктури:* Провали напруги можуть викликати проблеми з інфраструктурою, такими як зупинка ліфтів, збої в роботі систем водопостачання та/або опалення. [74]

7. *Пожежний ризик:* Напругові провали можуть призвести до небезпеки пожежі, особливо якщо електричне обладнання перегрівається або викликає коротке замикання.

Причини: Провали напруги можуть мати різноманітні причини, такі як перевантаження в мережі, аварійні ситуації, відмови обладнання, природні катаклізми (як наприклад урагани чи землетруси) або технічні проблеми в системі електропостачання.

Для запобігання серйозним наслідкам провалів напруги важливо мати надійні системи резервного живлення (такі як резервні джерела живлення або стабілізатори напруги), а також ефективні системи моніторингу та управління енергопостачанням.

3.3 Розробка методу ідентифікації типів провалу напруги на основі застосування методології просторового вектору в комплексній площині

Метод ідентифікації типів провалу напруги на основі застосування методології просторового вектору в комплексній площині полягає в алгебраїчному перетворенні (трансформація Кларка) з трьох фазних напруг і струмів у ABC системі координат до $\alpha\beta 0$ координати, де α і β ортогональні, або, точніше, до однофазної системи з двома проекціями α - β для трьох основних ліній і додатково нульова складова 0 (її також позначають як « γ ») для чотирьох провідних. [5]

Зв'язок між трифазною симетричною системою a-b-c і системою α - β встановлюється за умови, що вісь α розташована на векторі фази a, а вісь β розташована перпендикулярно до α , спрямованому до вектора фази b. [5]

Проекції кожного вектора на вісь підсумовуються з урахуванням напрямку [5]:

$$U_{\alpha} = \frac{2}{3} \left(1\dot{U}_A - \frac{1}{2}\dot{U}_B - \frac{1}{2}\dot{U}_C \right) \quad (3.7)$$

$$U_{\beta} = \frac{2}{3} \left(0\dot{U}_A - \frac{\sqrt{3}}{2}\dot{U}_B - \frac{\sqrt{3}}{2}\dot{U}_C \right) \quad (3.8)$$

Нульовий компонент в системі α - β -0 обчислюється так само, як нульова послідовність у системі 1-2-0, тобто [5]:

$$U_0 = \frac{2}{3} \left(\frac{1}{2}\dot{U}_A - \frac{1}{2}\dot{U}_B - \frac{1}{2}\dot{U}_C \right) \quad (3.9)$$

Проекції кожного вектору в системі α - β -0 буде мати наступний вигляд [5]:

$$U_{\alpha\beta 0} = T_{\alpha\beta 0}^{abc} U_{abc} \rightarrow \begin{bmatrix} \dot{U}_{\alpha} \\ \dot{U}_{\beta} \\ \dot{U}_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Просторовий вектор визначається як [5]:

$$SPM = \frac{2}{3} [V_a(t) + aV_b(t) + a^2V_c(t)] \quad (3.11)$$

Як зазначено в роботі [5], співвідношення між трифазною симетричною системою a-b-c і системою α - β встановлюється за умови, що вісь α лежить на векторі фази a, а вісь β розташована перпендикулярно до α і спрямована до вектора фази b. Тоді на основі рівнянь (1) і (2) та з урахуванням розташування векторів трифазної системи і відповідних кутів між ними системи і відповідних кутів між ними та осями α і β , визначаються проекції кожного вектора на осі визначаються проекції кожного вектора на вісь і ці проекції підсумовуються з урахуванням напрямку. [17]

Згідно з p-q теорією миттєва потужність чотирипровідної мережі [5]:

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_0 & 0 & 0 \\ 0 & u_{\alpha} & u_{\beta} \\ 0 & u_{\beta} & -u_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix}$$

Можна представити з урахуванням складових прямої та зворотної послідовностей [5]:

$$p_0 = u_0 i_0$$

$$p = (u_{\alpha 1} + u_{\alpha 2})(i_{\alpha 1} + i_{\alpha 2}) + (u_{\beta 1} + u_{\beta 2})(i_{\beta 1} + i_{\beta 2})$$

$$q = (u_{\beta 1} + u_{\beta 2})(i_{\alpha 1} + i_{\alpha 2}) - (u_{\alpha 1} + u_{\alpha 2})(i_{\beta 1} + i_{\beta 2})$$

На основі отриманого рівняння, можна виділити наступні складові [5]:

$$p_0 = u_0 i_0$$

$$\bar{p} = u_{\alpha 1} i_{\alpha 1} + u_{\alpha 2} i_{\alpha 2} + u_{\beta 1} i_{\beta 1} + u_{\beta 2} i_{\beta 2}$$

$$\tilde{p} = u_{\alpha 1} i_{\alpha 2} + u_{\alpha 2} i_{\alpha 1} + u_{\beta 1} i_{\beta 2} + u_{\beta 2} i_{\beta 1}$$

$$\bar{q} = u_{\beta 1} i_{\alpha 1} + u_{\beta 2} i_{\alpha 2} - u_{\alpha 1} i_{\beta 1} + u_{\alpha 2} i_{\beta 2}$$

$$\tilde{q} = u_{\beta 1} i_{\alpha 2} + u_{\beta 2} i_{\alpha 1} - u_{\alpha 1} i_{\beta 2} + u_{\alpha 2} i_{\beta 1}$$

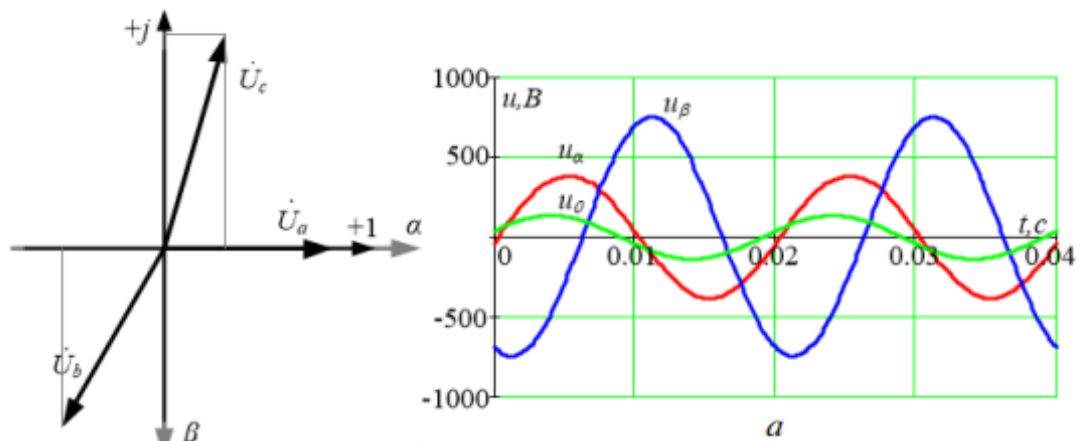


Рисунок 3.4 – Представлення напруг за допомогою перетворення Кларка:
напруги a-b-c

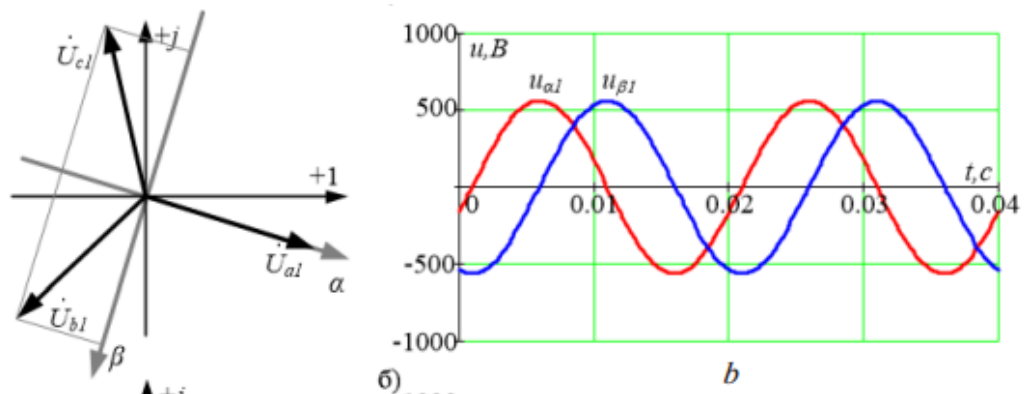


Рисунок 3.5 – Представлення напруг за допомогою перетворення Кларка:
напруги прямої послідовності $\alpha\beta$

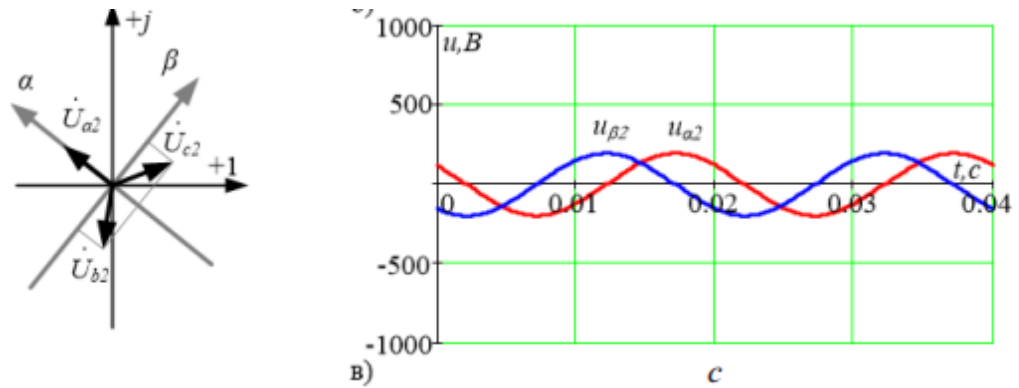


Рисунок 3.6 – Представлення напруг за допомогою перетворення Кларка:
напруги зворотної послідовності α

Тоді на основі рівнянь 3-5 та з урахуванням розташування векторів трифазної системи та відповідних кутів між ними і осями α і β , визначаються проекції кожного вектора на осі визначаються проекції кожного вектора на вісь α і ці проекції підсумовуються з урахуванням напрямку

$$U_{\alpha} = \frac{2}{3} \left(1U_A - \frac{1}{2}U_B - \frac{1}{2}U_C \right)$$

$$U_{\beta} = \frac{2}{3} \left(0U_A - \frac{\sqrt{3}}{2}U_B - \frac{\sqrt{3}}{2}U_C \right)$$

$$U_0 = \frac{2}{3} \left(\frac{1}{2}U_A - \frac{1}{2}U_B - \frac{1}{2}U_C \right)$$

Використовуючи формулу Ейлера для вектора, який потрібно повернути на певний кут, тобто пряма послідовність визначається як векторна сума половини проекції α з половиною проекції β , поверненої на 90° у додатному напрямку, а зворотна послідовність - як векторна сума половини проекції α з половиною проекції β , повернутої на 90° в позитивному напрямку, а зворотна послідовність - як векторна сума половини проекції β , поверненої на 90° у від'ємний бік.

3.4 Розробка методу класифікації провалів напруги шляхом визначення характеристик просторового вектору та напруги нульової послідовності

Останнім часом широке застосування до аналізу якісних параметрів режимів електроспоживання набули так звані методи формування просторового вектору [18]. Основна їх ідея полягає в переході трифазної симетричної системи до двофазної, або, точніше, до однофазної системи з двома проєкціями α - β для трьох основних ліній і додатково нульова складова 0 (її також позначають як « γ ») для чотирьохпроводних. Як зазначено в роботі [19], зв'язок між трифазною симетричною системою A - B - C і системою α - β встановлюється за умови, що вісь α розташована на векторі фази A , а вісь β розташована перпендикулярно до α , спрямованому до вектору фази B .

Проекції кожного вектору на вісь підсумовуються з урахуванням напрямку:

$$U_{\alpha} = \frac{2}{3} \left(1U_A - \frac{1}{2}U_B - \frac{1}{2}U_C \right)$$

$$U_{\beta} = \frac{2}{3} \left(0U_A - \frac{\sqrt{3}}{2}U_B - \frac{\sqrt{3}}{2}U_C \right)$$

Нульовий компонент в системі α - β -0 обчислюється так само, як нульова послідовність у системі 1-2-0, тобто:

$$U_0 = \frac{2}{3} \left(\frac{1}{2}U_A - \frac{1}{2}U_B - \frac{1}{2}U_C \right)$$

Проекції кожного вектору в системі α - β -0 буде мати наступний вигляд:

$$U_{\alpha\beta 0} = T_{\alpha\beta 0}^{abc} U_{abc} \rightarrow \begin{bmatrix} U_{\alpha} \\ U_{\beta} \\ U_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix}$$

З точки зору першої гармоніки, три системні напруги можна розглядати як синусоїдальні величини до, під час і після несправності. Згідно з цим припущенням і використовуючи формулу Ейлера, їх можна представити у вигляді суми двох векторів, що обертаються протилежно, з кутовою частотою ω [3, 9].

$$u_a(t) = U \cdot \cos(\omega t + \varphi) = \frac{U}{2} (e^{j(\omega t + \varphi)} + e^{-j(\omega t + \varphi)}) \quad (3.12)$$

Просторовий вектор виводиться з попередніх напруг і отже, описується як сума позитивних і негативних векторів кутової частоти, які представляють собою комплексні величини.

Основними характеристиками просторового вектору, які використовуються для ідентифікації та класифікації провалів та коротких замикань, є велика $R_{\max}$ та мала $R_{\min}$ напівосі, кут повороту сформованого еліпсу θ . Для збалансованих провалів просторовий вектор складається тільки з додатного вектору кутової частоти і слідує по колу в комплексній площині з радіусом рівним напрузі (рис.3.7, крива 1). Для незбалансованих провалів просторовий вектор є еліпсом із параметрами, що залежать від фази падіння напруги, величини провалу та зсуву фазового кута (рис.3.7, крива 2).



Рисунок 3.7 – Просторовий вектор трифазної системи
з наявністю однофазної несправності [5]

де Бета (β) – уявна вісь Im , Альфа (α) – дійсна вісь Re , кут просторового вектору θ - кут нахилу еліпса

Розглянемо ідентифікацію та класифікацію незбалансованих типів провалів на прикладі провалу напруги в одній фазі (однофазний провал). Як слідує із попередніх досліджень, сигнатура (унікальний ідентифікатор) провалів напруги залежить від кількох параметрів: місця пошкодження та вимірювання, заземлення мережі та

трансформаторів і типу вимірювань (фаза-фаза або фаза-нейтраль). Існує три типи однофазних провалів, які позначаються відповідно літерами B , D та F [10].

Розглянемо просторові вектори однофазного провалу типу B , фази A , B та C . Щоб розрізнити різні типи незбалансованих провалів напруги, використовуємо параметри еліпса ($R_{\max}$, $R_{\min}$) і напругу нульової послідовності.

Для провалу напруги типу B , фази A трифазна система напруги буде симетричною із зменшеною амплітудою у фазі A на величину провалу – h ($0 \leq h \leq 1$).

$$u_A(t) = h \cdot U \cos(\omega t + \varphi) \quad (3.13)$$

При цьому, $R_{\min}$ для еліпса визначається як, $R_{\min} = \left(1 - \frac{2}{3}h\right) \cdot U$, а для кола $R_{\min} = U$. Напруга нульової послідовності для даного типу провалу обчислюється наступним чином:

$$u_0(t) = \frac{h}{3} \cos\left(\omega t + \varphi - (n-1)\frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.14)$$

де n – фаза в якій відбувається провал напруги ($n=1, 2, 3$ для трифазної системи)

На рисунках 3.8,а; 3.8,б та 2в представлені трифазні симетричні системи фазних напруг та відповідні просторові вектори кутової частоти.

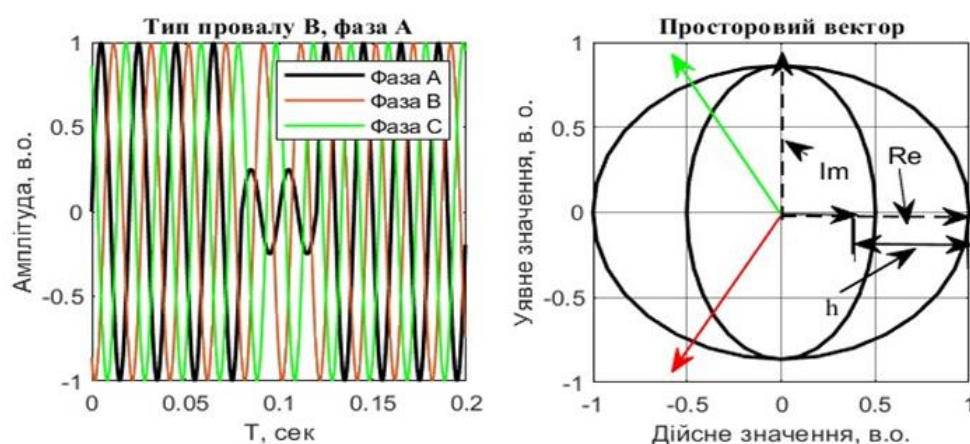


Рисунок 3.8,а – Просторовий вектор однофазного провалу типу B , фаза A [5]

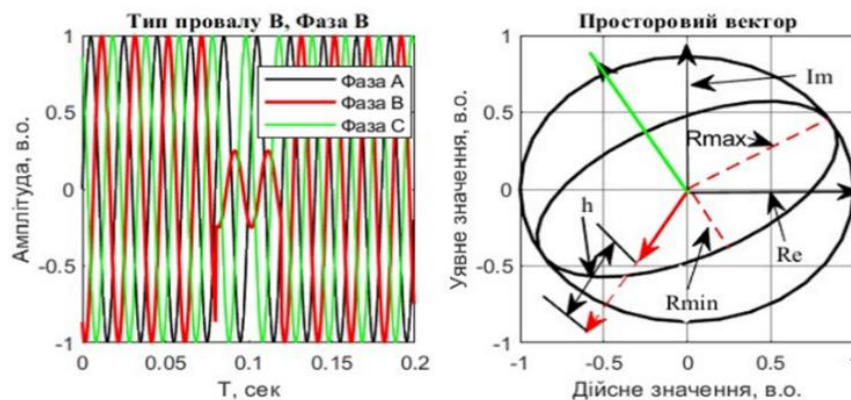


Рисунок 3.8,б – Просторовий вектор однофазного провалу типу *B*, фаза *B* [5]

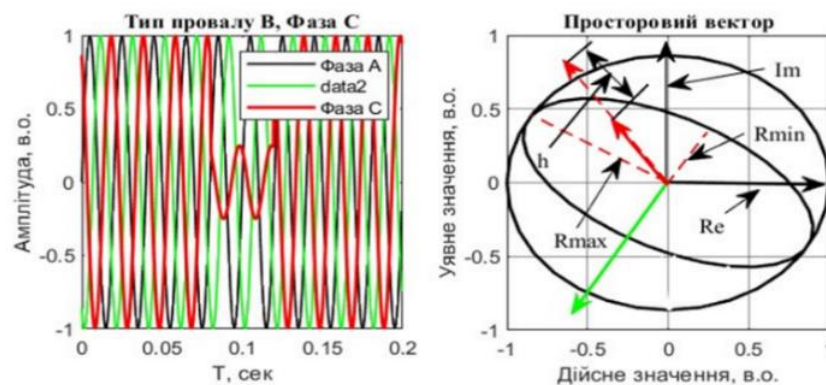


Рисунок 3.8,в – Просторовий вектор однофазного провалу типу *B*, фаза *C* [5]

Кут нахилу еліпса для однофазних провалів в трифазній електричній мережі визначається за наступною формулою:

$$\theta = \frac{5\pi}{6} - n \frac{\pi}{3} \quad (3.15)$$

Тобто, для провалу фази *A* $\theta_A = \frac{\pi}{2}$, фази *B* $\theta_B = \frac{\pi}{6}$, фази *C* $\theta_C = \frac{5\pi}{6}$.

Згідно з аналізом досліджень (рис. 3.5), ідентифікація та класифікація провалу типу *B* в залежності від фази, виконується за допомогою обчислення напруги нульової послідовності та великої вісі еліпса ($2 \cdot R_{max}$).

Метод аналізу якості електроенергії, що використовує модель просторового вектора для моніторингу падіння/перевищення напруги в трифазній системі, є ефективним інструментом. Цей підхід використовується для вивчення динаміки

напруги в трьох фазах системи та аналізу небажаних спотворень, таких як провали або перевищення.

Трифазна система електропостачання складається з трьох фаз, які підключені до навантаження. У моделі просторового вектора кожна фаза представлена комплексним вектором у двовимірному просторі, де декартові координати (x, y) відображають реальну та уявну частини.

Використовуючи систему координат " α - β -0" для трьох фаз, можна ідентифікувати вектори кожної фази, включаючи " α " для фази АВ, " β " для фази С-АВ та "0" для загального стану системи.

Моніторинг падіння/перевищення напруги виконується за допомогою спостереження за рухом цих просторових векторів на часовій діаграмі. У випадку стабільної напруги в усіх трьох фазах вектори рухаються відповідно до звичайних траєкторій із відповідними кутовими швидкостями.

Проте, якщо в системі виникає провал або перевищення напруги в одній або кількох фазах, вектори відхиляються від звичайних траєкторій, що дає можливість оперативно визначити проблеми та прийняти необхідні заходи для забезпечення стабільного живлення.

Переваги моделі просторового вектора включають виявлення небажаних спотворень, таких як провали та перевищення напруги, аналіз взаємного впливу фаз та ідентифікацію можливих проблем в системі. Цей метод також дозволяє швидко реагувати на провали та перевищення напруги, забезпечуючи стабільне електропостачання та покращуючи якість електроенергії, що врешті-решт позитивно позначається на зменшенні збитків внаслідок небажаних спотворень.

Модель просторового вектора становить потужний інструмент для оцінки якості електроенергії у трифазних системах. Цей метод дозволяє ефективно реагувати на провали та перевищення напруги, забезпечуючи надійне та стабільне живлення для споживачів. В широкому спектрі галузей, таких як електроенергетика, інженерія електропостачання та наукові дослідження, модель просторового вектора використовується для аналізу та оптимізації систем електроживлення. [10]

Використання моделі просторового вектора дозволяє виявляти та аналізувати провали напруги в трифазних системах, що допомагає зменшити збитки, що виникають внаслідок цих провалів [10]. Основний механізм зменшення збитків від провалів напруги включає такі етапи:

1. Моніторинг і аналіз: Система моніторингу збирає дані про стан напруги в трьох фазах системи та відображає ці дані у вигляді просторових векторів на часовій діаграмі. [71]
2. Виявлення провалів напруги: Застосування моделі просторового вектора для аналізу якості електроенергії. Система використовує комплексні вектори у двовимірному просторі α - β -0, де α та β представляють стани фази АВ та С-АВ відповідно, а вектор 0 показує загальний стан системи. При провалі напруги в одній або кількох фазах вектори відхиляються від звичайних траєкторій. [69]
3. Швидка реакція: Система автоматично вмикає резервні джерела, такі як джерела безперебійного живлення (UPS), що забезпечують стабільне живлення споживачів навіть під час провалів. [71]
4. Корекція: Після вмикання резервних джерел, система може застосовувати додаткові заходи для корекції провалів напруги, такі як зміна навантаження, компенсація реактивної потужності або регулювання джерел живлення. [71]
5. Запобігання: Аналіз даних про наявність напруги допомагає зрозуміти причини спотворень і приймати заходи для їх запобігання у майбутньому. [69]

Використання моделі просторового вектора дозволяє ефективно управляти електропостачанням, забезпечуючи стабільність системи та знижуючи можливість збитків через провали напруги. Цей підхід є особливо важливим для критичних систем, таких як сервери, медичне обладнання та фінансові системи, де навіть короткочасні знижки напруги можуть призвести до серйозних наслідків.

Висновки до розділу 3

Дискретне вейвлет-перетворення просторового вектора є придатним інструментом для аналізу порушень якості електроенергії, коли потрібна інформація про час і частоту одночасно. Також він може дуже швидко та точно виявляти майже всі типи порушень. Єдиним недоліком є те, що він не може виявити події, що поступово змінюються.

Проведено детальний аналіз трансформації Кларка та методології просторового вектору. Створено алгоритм класифікації провалів та внесено модифікації у метод визначення характеристик динамічної поведінки вектора напруг під час провалу.

Окремий підхід в розділі 3 включає розробку методу ідентифікації та класифікації провалів напруги на основі просторового вектору для напруги нульової послідовності. Висновок дозволяє визначити, що розроблені методи не лише ефективно розширюють можливості ідентифікації провалів напруги, але й сприяють підвищенню надійності та стійкості електричних мереж в цілому.

РОЗДІЛ 4.

ТЕСТУВАННЯ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ НА НЕСПРИЙНЯТЛИВІСТЬ ДО ПРОВАЛІВ НАПРУГИ, КОРОТКОЧАСНИХ ПЕРЕРИВАНЬ ТА ЗМІН НАПРУГИ

В умовах сучасного електропостачання надзвичайно важливо мати високу надійність та стабільність роботи електрообладнання. Провали напруги, короточасні переривання та зміни напруги можуть викликати різноманітні проблеми, включаючи перевантаження електрообладнання, недостатнє живлення, можливу зупинку роботи і навіть потенційні пошкодження внаслідок впливу на його чутливість і функціонування.

Одним із способів запобігти негативним наслідкам таких ситуацій є тестування електрообладнання на його несприйнятливості до провалів напруги, короточасних переривань та змін напруги. Це включає в себе проведення різних тестів, які можуть симулювати умови непередбачених втрат напруги та оцінювати реакцію обладнання на такі ситуації. Тестування дозволяє виявити потенційні проблеми та внести відповідні корективи у конструкцію або роботу обладнання для забезпечення його надійності та стабільності при різних умовах електропостачання.

Відповідно до ДСТУ EN IEC 61000-4-11:2022 [75], електрообладнання, яке застосовується в системах електропостачання/електроспоживання перед їх введенням в промислову експлуатацію повинні пройти випробування на несприйнятливості до провалів напруги, короточасних переривань та змін напруги. В основному такі випробування відносно провалів напруги проводяться по їх характеристикам – глибині та тривалості [76].

Електрообладнання перевіряється на випробувальних рівнях на 30%, 60% і >95% нижче номінальної напруги для обладнання. Тривалість провалів/переривань становить 10 мс, 100 мс і 5000 мс відповідно. Для кожного рівня тестування виконується п'ять провалів зі швидкістю один провал на хвилину. Зміна напруги живлення відбувається при переході напруги через нуль. Напруги в цих

випробуваннях використовують номінальну напругу для обладнання як основу для визначення рівня випробувальної напруги.

4.1 Вплив точки початку провалу на чутливість електрообладнання

У сучасних електроенергетичних системах, точка початку провалу є важливим показником, що визначає стійкість та надійність електрообладнання. Цей термін використовується для опису випадків, коли напруга спадає нижче нормального рівня на певний час, який може тривати від декількох мілісекунд до декількох секунд.

Початок провалу може виникати з різних причин, включаючи перевантаження в електричній мережі, зміни навантаження, короткі замикання або викиди. Коли такі події відбуваються, напруга в мережі може раптово спадати, що може мати серйозний вплив на електрообладнання.

Слід враховувати, що точка початку провалу може бути особливо критичною для деяких типів обладнання, особливо для чутливих пристроїв, таких як комп'ютери, медичне обладнання або обладнання з автоматичним управлінням.

Важливість положення точки початку провалу напруги широко визначається в стандартах та науково-технічній літературі. Так в [53, 75] зазначено, що: «Для деяких застосувань, наприклад, відключення електромеханічного контактора, фазовий кут, при якому починається падіння напруги (просідання), є важливою характеристикою, яку іноді називають точкою на хвилі». Так само в [77] зазначено, що «обладнання може бути чутливим до точки ініціації під час провисання», у [38] стверджується, що як точка початку провалу, так і точка його завершення можуть впливати на роботу «пристроїв з активним керуванням, які покладаються на інформацію про синхронізацію з формою сигналу» (двигуни постійного струму, які використовують керовані тиристори, підключені до мережі змінного струму).

Як приклад, у [78, 79] ряд реле, пускачів двигунів і контакторів були випробувані з використанням двох значень точки початку провалу як параметрів (0 і 90^0). Вища чутливість визначалась для провалів напруги, коротших ніж 4 – 5 циклів з 90^0 точкою

початку провалу, ніж для тих самих провалів з 0^0 точкою початку провалу напруги. Для провалів тривалістю більше 5 циклів чутливість вища для 0^0 точки початку провалу, ніж для 90^0 точки. Подальші дослідження показали, що більшість провалів напруги тривають від 5 до 30 циклів, і тому рекомендується перевіряти реле, пускачі двигунів і контактори з 0^0 точкою початку провалу напруги.

Аналізуючи результати досліджень також представлених в [73], показано, що положення точки початку провалу суттєво впливає на чутливість контакторів котушки змінного струму до провалів напруги (рис. 4.1).

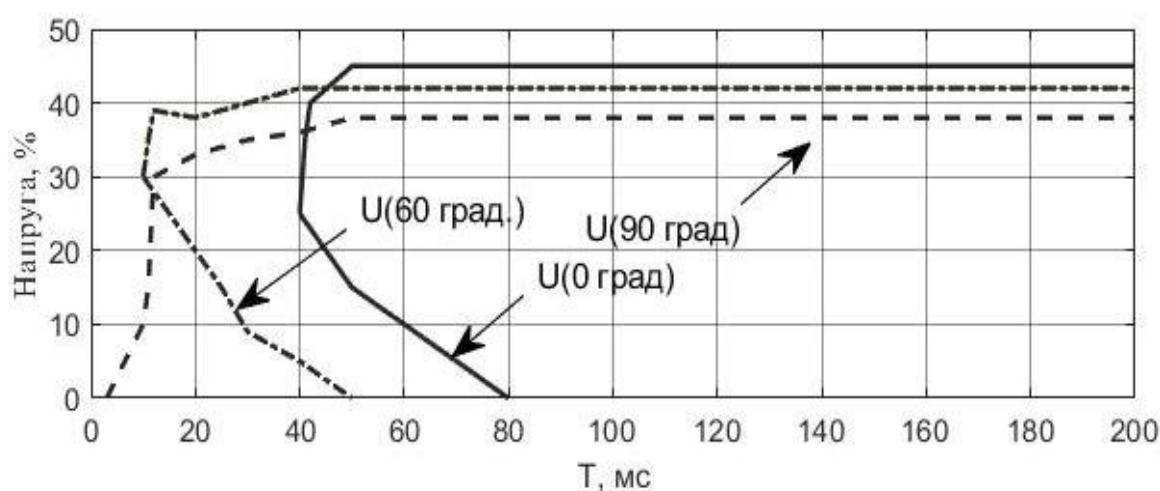


Рисунок 4.1 – Вплив точки початку провалу на чутливість провідника (без зсуву фази) [19]

Як слідує із рис. 4.1, контактор більш чутливий до глибоких провалів напруги з 90^0 точкою на хвилі, ніж до тих же провалів з 0^0 точкою початку провалу. Найпомітніший вплив точки початку провалу призводить до виникнення високого пускового струму під час відновлення номінальних умов електропостачання після завершення провалу (рис. 4.2).

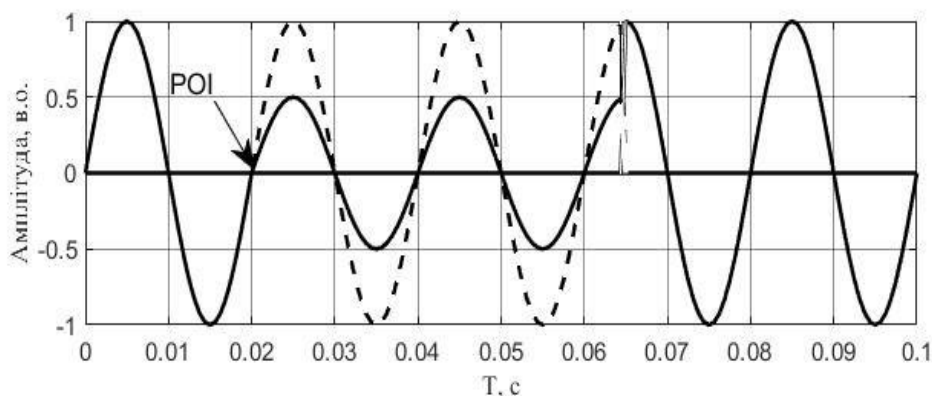


Рисунок 4.2 – Провал напруги з 0⁰ точкою його початку [19]

4.2 Дослідження стійкості електромагнітного реле до провалів напруги, стрибку фазового кута та точок початку та закінчення провалів

Електромагнітне реле (ЕМР) – це пристрій, який використовується для керування електричними контактами за допомогою електромагнітних полів. Воно складається з котушки з ізольованим проводом, що намотана на магнітний сердечник, і контактів, які рухаються під впливом цього поля, відкриваючи або закриваючи електричне коло. Принцип дії ЕМР полягає в тому, що під час подачі електричного струму на котушку вона створює магнітне поле, яке впливає на магнітний сердечник, викликаючи його рух. Цей рух змінює положення контактів, що призводить до відкриття або закриття електричного кола.

ЕМР широко використовується в електричних системах для керування різноманітними процесами, такими як вимикання, включення, регулювання і захист. Вони можуть бути використані для автоматичного вимикання електричних систем у разі перевищення певних параметрів (наприклад, струму або напруги), а також для керування роботою пристроїв у системах автоматики та вимірювання.

Основні переваги ЕМР включають високу швидкість реакції, надійність та довговічність. Вони можуть працювати в широкому діапазоні напруг та струмів і відрізняються відмінною здатністю до комутації великих потужностей.

У багатьох випадках ЕМР використовуються разом з контролерами або системами автоматизації для керування процесами на основі вимог та умов споживачів електроенергії. Також вони широко застосовуються у сфері електроніки, автомобілебудування, промисловості та інших галузях техніки.

Під час дослідження стійкості ЕМР, важливо враховувати його здатність до реагування на такі непередбачені ситуації в мережі. Це включає в себе оцінку його здатності до витримки провалів напруги різної тривалості, від короткочасних до тривалих, а також до реагування на стрибки фазового кута, які можуть виникнути внаслідок змін параметрів електричної мережі.

Проведення дослідження спрямоване на визначення моментів початку та завершення провалів напруги, під час яких ЕМР реагує на зміни в електричній мережі. Це допомагає з'ясувати, наскільки ефективно пристрій справляється зі змінами в живленні та його можливості захисту у непередбачених обставинах.

ЕМР широко застосовується в промислових системах управління та зв'язку як свого роду базовий електричний компонент, який також відіграє роль у комутаційних ланцюгах, передачі сигналів та усуненні перешкод. Однак, коли в електромережі виникає коротке замикання це спричиняє проблеми з якістю електроенергії, такі як падіння напруги та короткі переривання [63, 80, 81], які впливають на нормальну роботу ЕМР.

Провали напруги навіть можуть спричинити несправність і пошкодження ЕМР у деяких випадках [74], що потім призводить до збою всього промислового процесу на підприємстві та призводить до значних економічних збитків [82]. Відповідно до стандартів Величина і тривалість провалів є основними характеристиками, які повинні бути включені в процес тестування електрообладнання. Але як вказано в [80, 83] крім них, слід включити інші характеристики, такі як точка на хвилі (фазовий кут – POW) та стрибок фазового кута (PAJ). POW – фазовий кут основної форми сигналу напруги, при якому відбувається провал напруги, PAJ – це зміна фазового кута під час провалу напруги. В [57, 64, 84] відмічається, що POW і PAJ мають значний вплив на електромагнітне обладнання.

Вважаючи вищезначене, в роботі проведені дослідження роботи ЕМР при наявності провалів, POW (POR, POI) та PAJ.

4.2.1 Механізм реагування електромагнітного реле на провал напруги

Механізм реагування ЕМР на провал напруги ґрунтується на його основному принципі дії, що базується на використанні електромагнітного поля для керування перемиканням контактів. Коли на котушку ЕМР подається електричний струм, це створює магнітне поле, яке впливає на магнітний сердечник.

Під час провалу напруги, коли електричний струм або напруга падають нижче певного рівня, струм через котушку ЕМР може також зменшитися або втратити. Це призводить до втрати магнітного поля, яке утримувало контакти у потрібному стані.

У результаті, магнітний сердечник може відпустити свою позицію під дією сили пружини або іншого механізму, що призведе до зміни положення контактів. Це може призвести до відкриття або закриття електричного кола, залежно від конфігурації ЕМР.

ЕМРФ – це електромеханічні реле, робота яких заснована на дії магнітного поля нерухомої обмотки зі струмом на рухомий феромагнітний елемент (якір). Коли подається синусоїдальне живлення змінного струму, основний потік котушки змінного струму змінюється синусоїдально з часом:

$$\Phi = \Phi_m \sin(\omega t) \quad (4.1)$$

Електромагнітна сила розраховується за допомогою електромагнітної сили Максвелла:

$$F_{mag} = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 S}, \quad (4.2)$$

де S – площа магнітного притягання в повітряному зазорі,

μ_0 – проникність вакууму

Таким чином, згідно з рівняннями (4.1) та (4.2), F_{mag} можна записати як:

$$F_{mag} = \frac{\Phi_m^2 \sin^2(\omega t)}{2\mu_0 S} = \frac{\Phi_m^2}{4\mu_0 S} = \frac{\Phi_m^2 \cos(2\omega t)}{4\mu_0 S} \quad (4.3)$$

Із (4.3) слідує, що F_{mag} пропорційний квадрату основного потоку і змінюється в залежності від часу при подвоєній частоті напруги.

На рис. 4.3 представлені форми сигналів – електромагнітної сили та сили пружини.

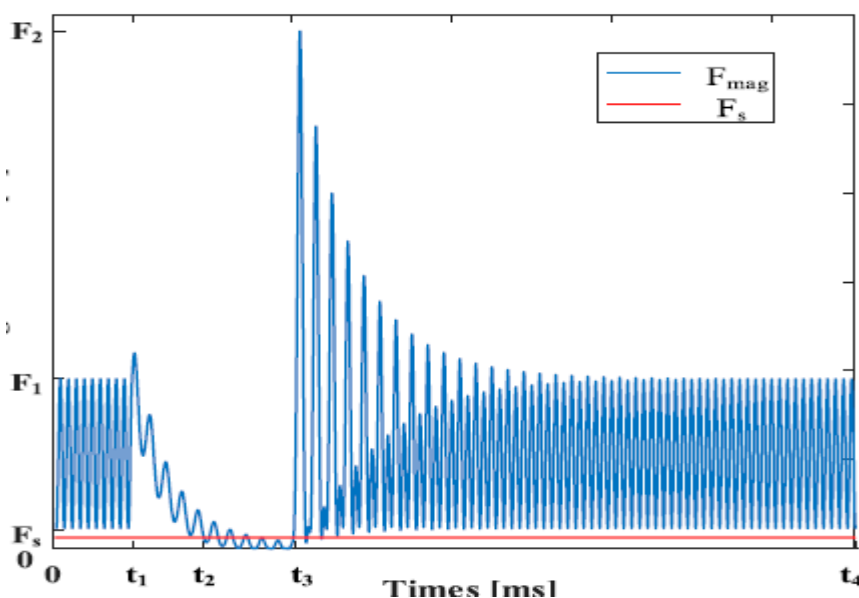
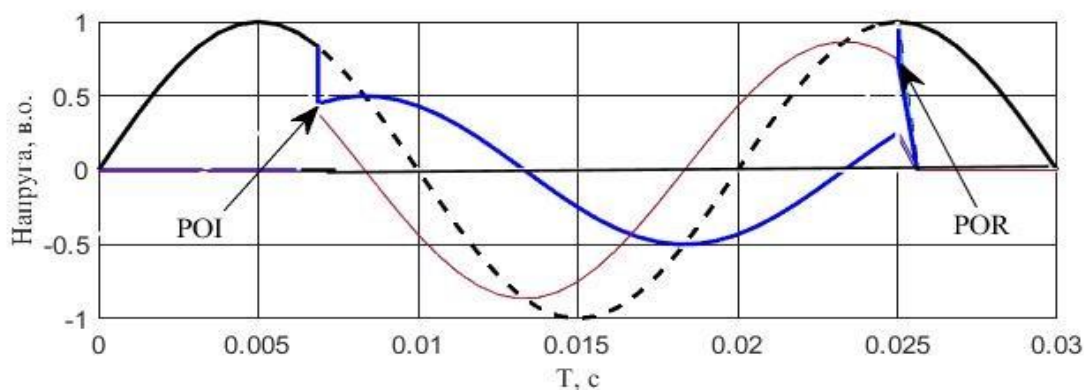


Рисунок 4.3 – Криві електромагнітної сили (F_{mag}) і сили пружини (F_s) під час провалу напруги [85]

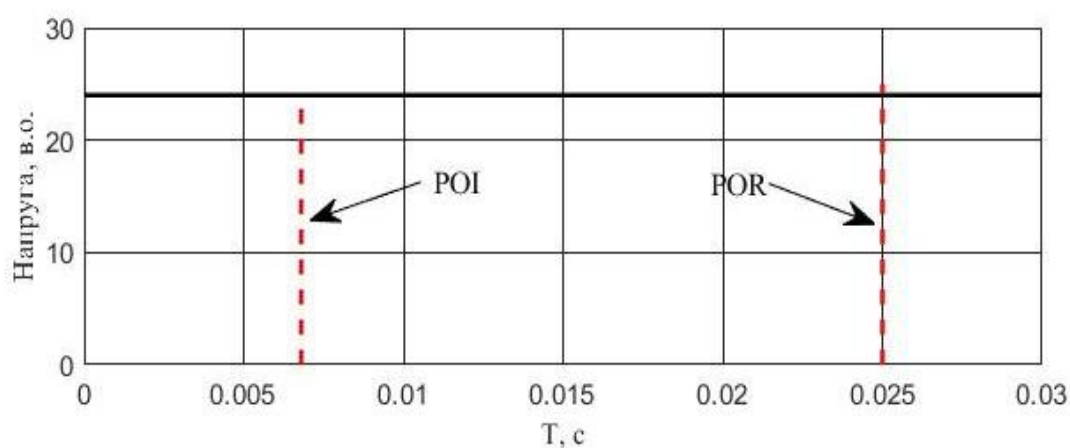
Перед початком провалу F_{mag} перевищує F_s , і ЕМР працює нормально. Коли провал відбувається в момент часу t_1 , F_{mag} поступово зменшується; однак F_{mag} все ще перевищує F_s до часу t_2 , і ЕМР працює нормально від t_1 до t_2 . F_{mag} менше, ніж F_s від t_2 , і ЕМР відключається від t_2 до t_3 . Зниження закінчується в t_3 , і ЕМР відновлюється для нормальної роботи. Це відбувається коли величина провалу напруги перевищує певний рівень і F_{mag} залишається вищим за F_s незалежно від того, скільки триває провал, і ЕМР може працювати стабільно [86]. Іншими словами, для забезпечення нормальної роботи ЕМР під час живлення F_{mag} має бути більше F_s . Таким чином, необхідно знати та кількісно визначити толерантність ЕМР до падіння напруги.

Крім того, різні POW і PAJ впливають на основний потік ЕМР, тим самим впливаючи на зміну F_{mag} . Це означає, що POW і PAJ можуть впливати на сприйнятність до ЕМР, тому при проведенні тестування ЕМР потрібно брати до уваги ці характеристики.

В роботі була досліджена залежності роботи ЕМР від тривалості провалу напруги. На рис. 4.4 а, б, представлені провали напруги з різною тривалістю та криві спрацювання ЕМР.



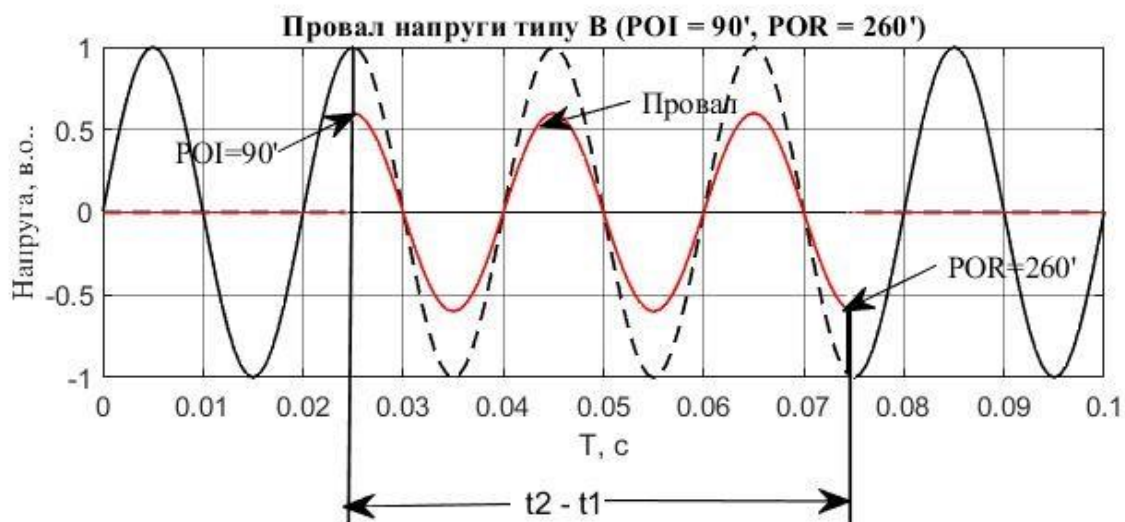
а)



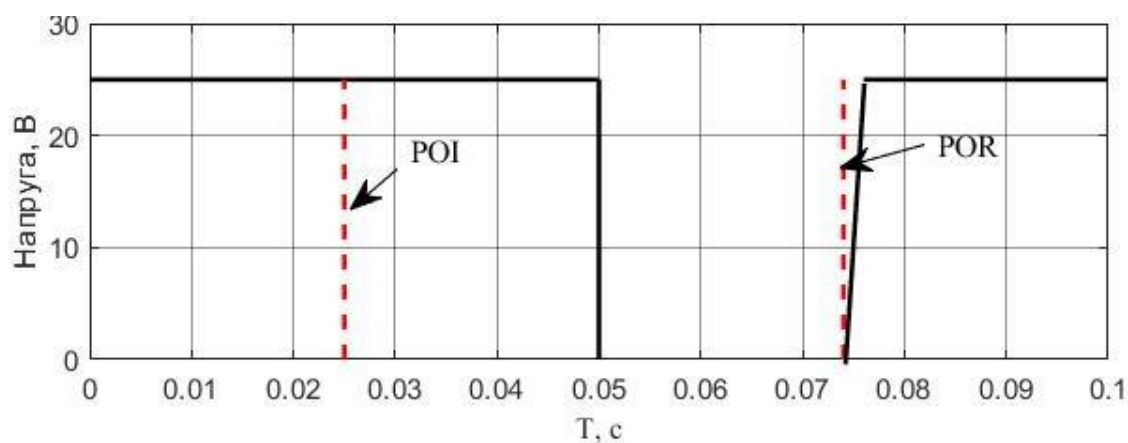
б)

Рисунок 4.4 – Провал напруги з тривалістю 18 мс та крива спрацювання ЕМР

Як видно на рис. 4.4 а) представлений сигнал провалу напруги з тривалістю 18 мс і в даному випадку реле не спрацювало (рис. 4.4 б). Зазвичай, реле витримує тривалість провалу 20 - 25 мс, а потім спрацьовує. Провал напруги тривалістю 18 мс може відбутися внаслідок різних факторів, таких як короточасне перевантаження або імпульсне навантаження.



а)



б)

Рисунок 4.5 – Провал напруги з тривалістю 49 мс та крива спрацювання ЕМР

При наявності провалу 49 мс (рис. 4.5 а) реле спрацьовує через 25 мс після початку провалу (Точка POI). Напруга живлення навантаження знижується до 0 В, а після відновлення провалу напруги (точка POR) продовжує свою роботу.

Провал напруги тривалістю 49 мс може бути більш серйозним інцидентом, що може виникнути внаслідок більших перевантажень або навіть короткого замикання.

Результати даного тесту показують, що чим довша тривалість, тим більша ймовірність відключення ЕМР.

4.2.2 Чутливість до зміни частоти, наявності гармонійних спотворень, змін номінального значення напруги

Чутливість електромагнітного реле до зміни частоти, наявності гармонійних спотворень та змін номінального значення напруги є критичними для його оптимальної роботи в електричних системах. Зміна частоти може відбуватися з різних причин, таких як неправильна синхронізація джерел живлення або неправильна робота генераторів. Чутливість ЕМР до цих змін полягає у здатності реагувати на варіації частоти, забезпечуючи надійне включення або вимикання електричного кола.

Наявність гармонійних спотворень у сигналі живлення також може впливати на роботу ЕМР. Гармонійні спотворення можуть виникати через неправильну роботу електричних приладів або інших джерел, що впливають на сигнал. Чутливість реле до цих спотворень полягає у здатності розрізняти між корисним сигналом та спотвореним сигналом і реагувати відповідно. Зміни номінального значення напруги можуть виникати через флуктуації в електричних мережах або через перенапруження.

Чутливість ЕМР до цих змін полягає у здатності реагувати на навантаження і витримувати відповідні зміни в напрузі, забезпечуючи стабільну роботу електричних систем. Була проведена перевірка стійкості ЕМР до провалів зі зміною частоти на $\pm 2\%$. Провалі напруги розглядалися на частотах 49, 50 і 51 Гц. Зміна частоти на $\pm 2\%$ від номінальної не впливає на чутливість тестованих ЕМР, оскільки їх характеристики майже ідентичні при всіх трьох частотах. Результати тестування при наявності гармонік представлені на рис. 4.6.

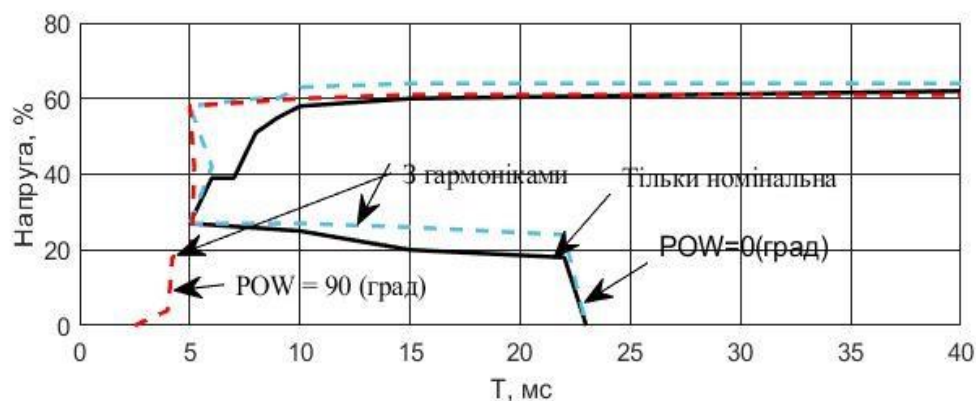


Рисунок 4.6 – Наявність гармонічних спотворень

Результати тестування стійкості (ЕМР) при номінальній напрузі та при наявності спотворень свідчать про його залежність від POW, тобто від потужності (Power). Це означає, що ефективність роботи реле може варіюватися в залежності від потужності сигналу, яку воно отримує.

Перш ніж розглядати вплив наявності спотворень, важливо відзначити, що при номінальній напрузі реле показує стабільну роботу. Однак, коли ми вводимо спотворення в сигнал живлення, зокрема гармонічні спотворення, реле може реагувати по-різному в залежності від потужності цих спотворень.

Далі, коли ми підвищуємо номінальну напругу на 10%, результати тестування стійкості ЕМР знову залежать від POW. Це означає, що при підвищенні напруги реле може зазнавати змін у своїй ефективності залежно від потужності сигналу, що подається на нього (рис. 4.7).

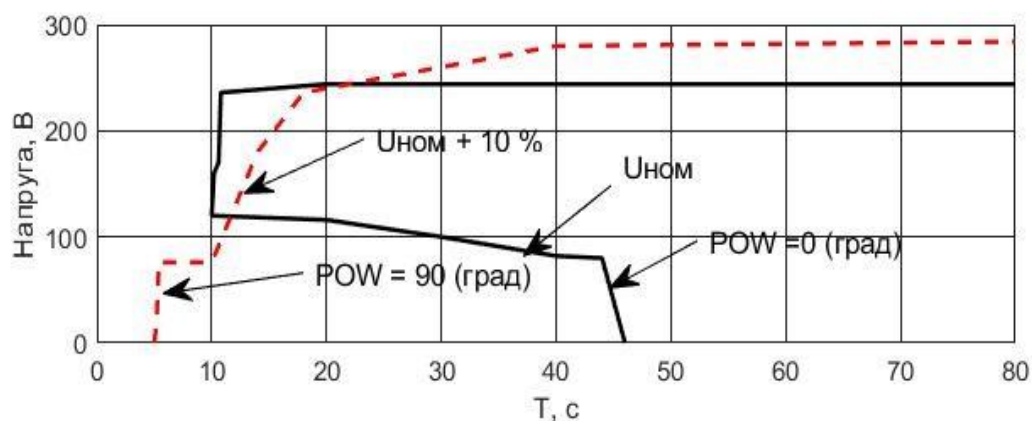


Рисунок 4.7 – Наявність підвищення напруги на 10 %

Отже, результати цих тестів вказують на важливість розуміння залежності роботи ЕМР від потужності сигналу, який воно отримує. Це може мати важливе значення при проектуванні та використанні реле в електричних системах, де важливо забезпечити стабільну та надійну роботу при різних умовах живлення.

4.2.3 Симетрія чверті циклу щодо точки на хвилі

Результати випробувань, які можна знайти на графіці у рисунку 4.8, відображають моделювання провалів напруги при різних значеннях кута зсуву фаз (POW). Зокрема, випробування проводилися для значень кута зсуву фаз 0° , 180° і 360° , які виявилися досить схожими, а також для 90° і 270° , які практично ідентичні.

Крім цього, хоча існує невелика різниця в кривих при значеннях кута зсуву фаз 45° , 135° , 225° і 315° , їх форма майже однакова. Це вказує на симетрію чверті циклу електромагнітних випромінювань (ЕМВ). Згідно з цим, чутливість ЕМР була вивчена лише для значень кута зсуву фаз від 0° до 90° . Випробування також обмежилися провалами при кутах зсуву фаз 0° , 27° , 45° , 63° і 90° .

Це дозволяє отримати детальну інформацію про те, як реагує ЕМР на провали напруги при різних умовах, враховуючи їх фазові параметри. Такий підхід дозволяє краще розуміти характеристики та реакцію реле на різні сценарії в електричних системах.

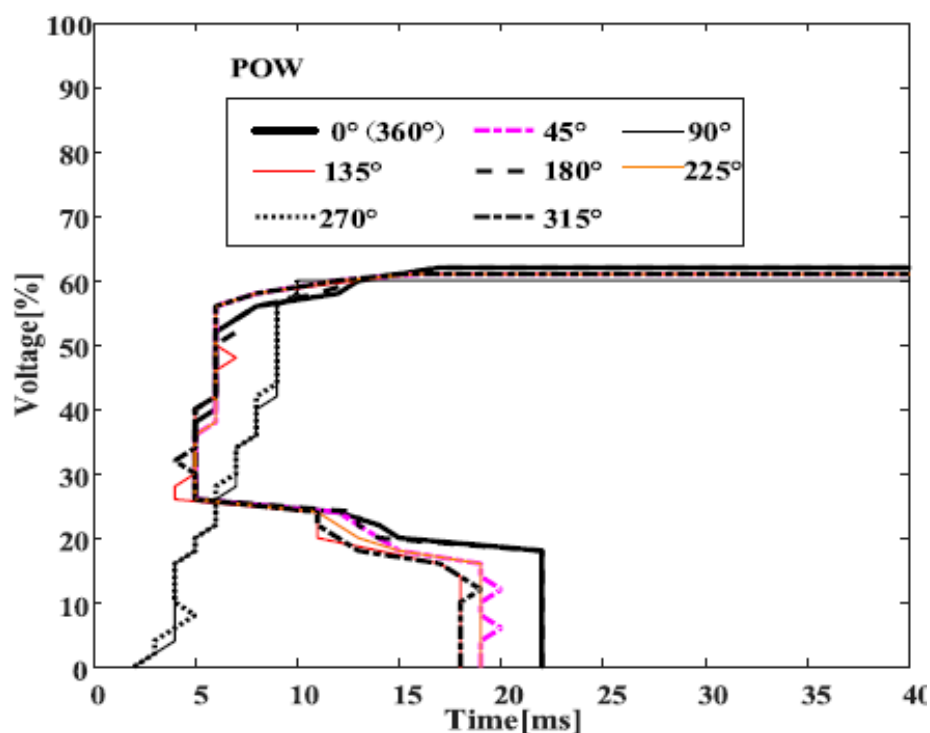


Рисунок 4.8 - Ілюстрація симетрії чверті циклу (0° PAJ) [85]

4.3 Співвідношення X/R і вибір автоматичного вимикача

Співвідношення X/R ланцюга визначає, наскільки значний компонент постійного струму відображається в цьому ланцюгу. Чим вище це співвідношення, тим більший струм короткого замикання буде спостерігатися. Якщо співвідношення X/R менше, ніж у співвідношенні X/R, яке використовується при випробуванні автоматичного вимикача, ми можемо безпосередньо перевірити симетричний рейтинг автоматичного вимикача з врахуванням симетричного струму короткого замикання. На рисунку 4.9 наведено графіки, що показують залежність струмів під час короткого замикання.

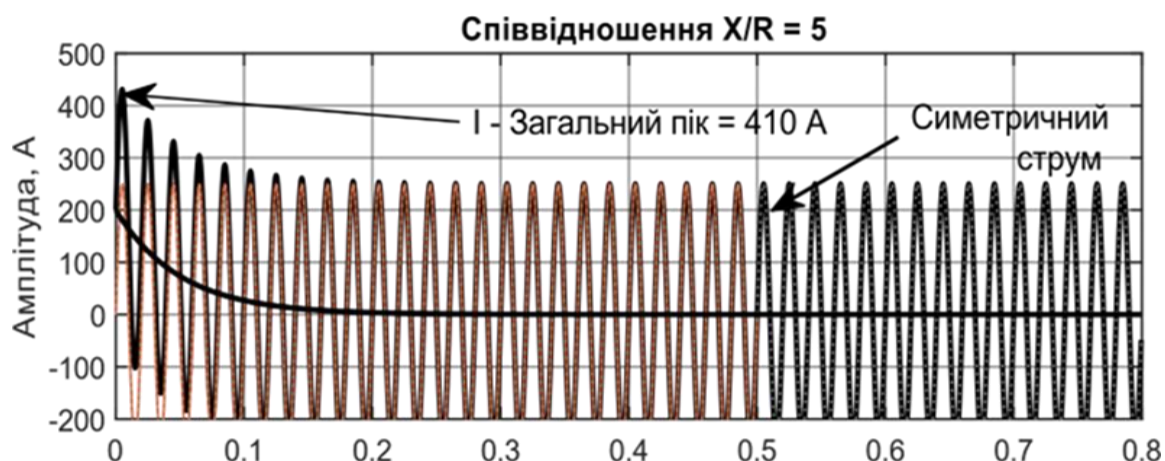


Рисунок 4.9 – графіки струмів під час короткого замикання

Співвідношення X/R , що визначається як відношення індуктивного опору (X) до опору (R) електричної системи, відіграє важливу роль у різних аспектах електричної інженерії. Знання цього співвідношення має вирішальне значення з кількох причин. Інженерам-електрикам важливо мати на увазі співвідношення X/R при розрахунках несправностей у системах живлення. Це співвідношення, насправді, може визначити піковий асиметричний струм короткого замикання, що в свою чергу може бути значно вищим, ніж симетричний струм короткого замикання.

Векторне об'єднання величин R та X для отримання імпеданса виглядає наступним чином:

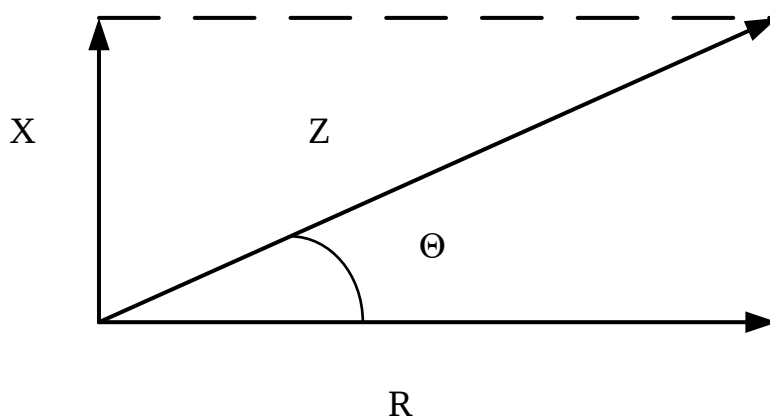


Рисунок 4.10 – Імпеданс X/R

Враховуючи значення опору (R) та індуктивного опору (X), інженери можуть використовувати векторне об'єднання цих величин для визначення імпедансу. Цей

імпеданс вказує на загальний опір системи до струму залежно від як від опору, так і від реактивного опору, що вираховується за формулою:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}, \quad (4.4)$$

де Z - імпеданс, R - опір, X - реактивний опір (індуктивний або ємнісний).

$$X/R = \tan \theta \quad (4.5)$$

Такий підхід дозволяє інженерам отримати повну картину структури опору електричної системи та аналізувати її властивості відносно струмів короткого замикання.

Асиметрична хвиля струму не є симетричною відносно нульової осі. Вісь симетрії зміщена або зміщена відносно нульової осі, а величини вище і нижче нульової осі не рівні. Вісь симетрії зсувної хвилі нагадує постійний струм, і асиметричні струми можна легко впоратися, якщо вважати, що вони мають Компонент змінного струму та компонент постійного струму. Ці компоненти є теоретичними. Компонент постійного струму генерується в системі змінного струму і не має зовнішнього джерела.

Під час короткого замикання повний струм складається з двох складових:

1) компонент змінного струму, який змінюється синусоїдально з часом і також відомий як симетричний струм;

2) компонент постійного струму, який є не періодичним і спадає експоненціально з постійною часу L/R (де L/R пропорційний X/R). Завдяки постійному струму симетричний струм стає асиметричним. Відношення X/R впливає на величину компонента постійного струму, який, у свою чергу, впливає на загальний струм.

Зокрема, схеми з вищим відношенням X/R матимуть більшу постійну часу для спадання компонента постійного струму, що призводить до повільнішого спаду загального струму. Співвідношення X/R допомагає у виборі відповідних захисних пристроїв для електричної системи.

Співвідношення X/R виявляється корисним інструментом при розрахунках кривої струмової характеристики для захисних пристроїв, таких як автоматичні вимикачі та запобіжники. Невідповідність між значенням співвідношення X/R та

параметрами захисного пристрою може призвести до його неправильної роботи, що в свою чергу може призвести до пошкодження обладнання або створення загрози безпеці персоналу.

Крім того, розуміння співвідношення X/R дозволяє оптимізувати роботу електричної системи. Це співвідношення впливає на падіння напруги в системі та перехідну реакцію на події перемикавання, такі як запуск двигуна або включення конденсатора. Імовірності виникнення непередбачених ситуацій значно зменшуються при правильному розрахунку та врахуванні цього співвідношення під час проектування електричної системи.

Не останнє місце у важливості співвідношення X/R займає виправлення несправностей в електричній системі. Його правильне розуміння та використання можуть сприяти швидкому виявленню та усуненню проблем, що можуть виникнути в системі під час експлуатації.

Високе або низьке співвідношення X/R може свідчити про можливі проблеми, такі як несправність обладнання або неправильне підключення, які можна виправити для забезпечення оптимальної роботи системи.

Трансформатори, двигуни, генератори і лінії передачі, які за своєю природою є індуктивними, мають зазвичай невелике значення співвідношення X/R . У випадку короткого замикання в системі, середньоквадратичне значення симетричного струму замикання визначається напругою джерела системи та загальним опором системи до точки замикання. Проте більшість несправностей мають значну асиметрію, принаймні в одній фазі. Ця асиметрія враховується як компонент постійного струму, який потрібно додати до симетричного компонента змінного струму для отримання середньоквадратичного асиметричного значення струму. Це значення струму в момент роз'єднання контакту, який має забезпечити автоматичний вимикач.

Слід зазначити, що постійна складова струму замикання досить швидко спадає, досягаючи незначного значення протягом 3-5 циклів частоти живлення. Швидкість цього зменшення визначається співвідношенням X/R ланцюга в точці пошкодження. Якщо значення співвідношення вище, то розпад постійного струму відбувається повільніше, що може подовжити тривалість небезпеки у разі несправності.

Сучасні автоматичні вимикачі випробовуються з встановленими стандартними значеннями X/R . Наприклад, для автоматичних вимикачів як низької, так і високої напруги, стандарти ANSI вимагають, щоб співвідношення X/R було 6,6 або вище, що відповідає коефіцієнту потужності 15% або менше. Це співвідношення X/R визначає значення асиметричного струму замикання, яке повинен перервати вимикач для даного рівня симетричного струму замикання та заданого неповного часу контакту.

Більше співвідношення X/R , яке характеризується повільнішим розпадом, може призвести до вищого рівня асиметричного струму замикання під час контакту. У випадку занадто високого значення цього співвідношення, асиметричний струм замикання може перевищити здатність вимикача до відключення. Загалом, знання співвідношення X/R виявляється ключовим для правильного вибору захисних пристроїв, оптимізації продуктивності системи та вирішення проблем, які можуть виникнути в електричних мережах.

Відношення X/R відіграє вирішальну роль у розрахунках короткого замикання, оскільки воно визначає поведінку схеми під час короткого замикання. Під час короткого замикання електрична система відчуває перехідний стан, і реакція системи залежить від співвідношення X/R ланцюга.

Високе співвідношення X/R вказує на те, що схема є більш реактивною, і відповідь системи на коротке замикання буде домінувати індуктивністю системи. З іншого боку, низьке співвідношення X/R вказує на те, що схема є більш резистивною, і реакція системи на коротке замикання буде домінувати через опір системи.

Знання співвідношення X/R має важливе значення для розрахунків короткого замикання, оскільки це допомагає оцінити величину та тривалість струму короткого замикання, що є критичним для проектування та роботи захисних пристроїв. Захисні пристрої, такі як автоматичні вимикачі та запобіжники, призначені для роботи в певних межах струму та часу, щоб запобігти пошкодженню обладнання та персоналу.

Хоча розрахунок короткого замикання може бути виконаний вручну для невеликих систем, ефективніше використовувати комп'ютерне програмне забезпечення для прискорення цього процесу. Крім того, комп'ютерні інструменти можуть легко координувати захисні пристрої між собою та з кабелями.

Згідно з законом Ома, сила струму пропорційна напрузі, поділеній на опір (або імпеданс). У разі короткого замикання, коли імпеданс ланцюга наближається до нуля, струм стає максимальним, що може призвести до термічного навантаження на кабелі та трансформатори і викликати руйнування ізоляційних матеріалів.

Таким же чином умови короткого замикання також створюють високі магнітні сили, які можуть згинати шини в розподільних пристроях і щитах. Величезне значення магнітної сили має значення, пропорційне квадрату струмів замикання.

Розуміння співвідношення X/R є критичним при виборі захисних пристроїв для електричних систем. Це співвідношення визначає, як поведе себе система в разі короткого замикання та який захисний пристрій буде необхідний для забезпечення безпеки та ефективності.

Захисний пристрій повинен мати відповідну відключаючу здатність, щоб забезпечити витримку максимального струму короткого замикання в ланцюзі. Ця відключаюча здатність зазвичай виражається через номінальний струм та витримку пристрою.

Співвідношення X/R впливає на величину та тривалість короткого замикання, що в свою чергу впливає на потрібну відключаючу здатність захисного пристрою. Система з високим співвідношенням X/R буде мати довший час тривалості короткого замикання, і тому вимагатиме захисного пристрою з вищою відключаючою здатністю. Навпаки, система з низьким співвідношенням X/R потребуватиме меншої відключаючої здатності захисного пристрою.

Додатково, співвідношення X/R може також впливати на реакцію захисного пристрою. Наприклад, захисний пристрій, призначений для системи з високим співвідношенням X/R , може мати більшу затримку перед спрацюванням, щоб врахувати тривалість струму короткого замикання. На відміну, захисний пристрій для системи з низьким співвідношенням X/R може мати меншу затримку, оскільки тривалість короткого замикання буде меншою.

У підсумку, розуміння співвідношення X/R має велике значення для безпечної та ефективної роботи електричних систем. Це важливо як для вибору захисних пристроїв, так і для проектування систем та виявлення несправностей. Знання

співвідношення X/R допомагає забезпечити, що захисні пристрої зможуть витримати максимальний струм короткого замикання в системі.

4.4 Розрахунок короткого замикання імпедансним методом

Розрахунок короткого замикання є важливою складовою процесу проектування та експлуатації систем електроенергії. Однією з ключових причин проведення цього розрахунку є забезпечення безпеки працівників, які працюють з електричним обладнанням, а також забезпечення їхнього оточуючого середовища.

Коротке замикання може викликати значні електричні струми, що може призвести до виникнення пожеж, вибухів та уражень електричним струмом. Усі ці наслідки можуть бути небезпечними, навіть смертельними. Точний розрахунок коротких замикань дозволяє розробити безпечні та надійні електричні системи.

Крім того, коротке замикання може призвести до пошкодження електричного обладнання, такого як трансформатори, розподільні пристрої та інші компоненти. Під час розрахунку коротких замикань та проектування систем захисту, які швидко виявлятимуть та ізолюватимуть короткі замикання, можна мінімізувати пошкодження обладнання та скоротити час простою для його ремонту. Існує безліч кодексів і стандартів, які регулюють проектування та експлуатацію електричних систем з метою забезпечення безпеки та надійності.

Розрахунок короткого замикання часто є обов'язковим для демонстрації відповідності цим нормам і стандартам. Він може допомогти оптимізувати конструкцію електричних систем, виявляючи потенційні проблемні зони та дозволяючи вносити зміни до їх монтажу. Це може призвести до економії часу і грошей у довгостроковій перспективі, зменшуючи потребу у ремонті та модифікаціях після встановлення.

Метод імпедансу для аналізу електричних ланцюгів є потужним інструментом, який дозволяє розуміти, як струм проходить через ланцюг та як розподіляються

напруги. Одним з важливих аспектів цього аналізу є вивчення коротких замикань, які виникають, коли між двома точками ланцюга створюється дуже низький імпеданс.

Загальний огляд розрахунку струмів короткого замикання методами імпедансу включає наступні кроки:

1. Ідентифікація та визначення всіх елементів електричної схеми, таких як резистори, конденсатори та котушки індуктивності. Кожен елемент буде мати свій опір (R), ємність (C) або індуктивність (L).

2. Обчислення імпедансу (Z) для кожного елемента схеми. Для різних типів елементів формули для розрахунку імпедансу будуть різні:

Для резистора: $Z = R$

Для конденсатора:

$$Z = \frac{1}{j\omega C}, \quad (4.6)$$

де j - уявна одиниця, ω - кругова частота, C - ємність конденсатора.

Для котушки індуктивності:

$$Z = j\omega L, \quad (4.7)$$

де j - уявна одиниця, ω - кругова частота, L - індуктивність котушки.

3. Виявлення будь-яких шляхів в схемі з низьким опором, які можуть призвести до короткого замикання. Це може бути пов'язано з паралельними ланцюгами або прямим зв'язком між двома точками схеми.

4. Після виявлення шляхів короткого замикання потрібно обчислити загальний опір схеми. Якщо є шлях короткого замикання, опір цього шляху буде дуже низьким, що значно зменшить загальний опір схеми. Загальний опір обчислюється за допомогою формул для обчислення опору в паралельних чи послідовних ланцюгах.

5. Після визначення загального опору схеми можна обчислити струм короткого замикання, використовуючи закон Ома:

$$I = \frac{V}{Z}, \quad (4.8)$$

де I - струм, V - напруга, Z - загальний опір схеми. Струм короткого замикання буде вищим, ніж звичайний робочий струм схеми, оскільки опір шляху короткого замикання дуже низький.

Висновки до розділу 4

Фактори впливу, які розглядаються тут, включають POW, PAJ, зміна частоти, гармоніка, зміна величини в кривих після провисання, двоетапне провисання та провисання повільного відновлення. Отримані результати чітко показують, що відповідь ЕМР на падіння напруги або коротке переривання можуть бути досить складними. Величина і тривалість провалу – не єдині параметри, які впливати на чутливість ЕМР; POW і PAJ також мають важливий вплив на сприйнятливості ЕМР. З тестів можна зробити такі конкретні висновки.

1) Випробування на допуск при прямокутному просіданні напруги отримана величина сприйнятливості ЕМР. Сприятливість ЕМР буває різною в залежності від свого типу, форми усі перевірені ЕМР в основному схожі. ЕМР може витримати провал напруги величиною понад 74% Уном. При провалі величина менше 48% Уном, ЕМР спрацьовує, коли тривалість провалу перевищує 28 мс.

2) Доведена чвертьциклова симетрія кривих відносно POW. Значний вплив на поведінку ЕМР має провал напруги. Криві сприйнятливості мають різні форми для 0° та 90° POW - сприйнятливості сильніша при 0° POW, ніж 90° POW.

3) Вплив PAJ на переносимість ЕМР: коли виникає PAJ, переносимість ЕМР слабша.

Автоматичні вимикачі мають припиняти однофазні (фаза-нуль) замикання, коли миттєвий струм пошкодження перетинає нульовий рівень. Це означає, що найбільш ймовірне значення точки на кривій закінчення буде близьким до ± 900 , тобто біля максимального рівня напруги, через передбачуваний індуктивний опір системи. Точка закінчення на кривій при однофазних самозатухаючих замиканнях також пов'язана з моментом перетину струму через нуль, оскільки це найбільш ймовірний момент, коли дугове замикання припиниться самостійно. Те саме стосується однофазних замикань, які усуваються запобіжниками, оскільки дуга всередині запобіжника згасне при переході через нуль миттєвого струму пошкодження.

Оскільки виробництво та життя потребують все більш високоякісного та точного енергетичного обладнання, якісна електроенергія стає основою для роботи цього обладнання. Також посилився вплив провалів напруги на ці пристрої. Кількісне визначення впливу провалів напруги на різне чутливе обладнання за допомогою випробувань є важливою основою для вдосконалення виробників обладнання.

Здатність обладнання витримувати провали напруги та вживання користувачами заходів керування. Існуючі схеми випробувань полягають у ручній зміні умов провалу напруги, багаторазовому тестуванні, ручному аналізі даних випробувань і малюванні кривої допустимого падіння напруги. Фактична операція процесу є тривіальною та має низький ступінь автоматизації, що споживає багато людських ресурсів.

Тому необхідна розробка систем автоматичного тестування, яка всебічно враховувала характеристики провалу напруги, типи чутливого обладнання, атрибути та стан навантаження, автоматично генерувала вектори характеристики напруги, автоматично тестувала обладнання, автоматично аналізувала результати експерименту та малювала криву допустимого падіння напруги, що значно скоротило час тестування та витрати на оплату праці.

Провал напруги відноситься до ситуації, коли ефективне значення вихідної напруги раптово падає протягом певного періоду часу, і після підтримки протягом певного періоду часу, це нарешті повертається до нормальної вихідної напруги. Його тривалість здебільшого становить від половини циклу до кількох секунд. З безперервним розвитком енергетичної промисловості виробництво напівпровідників, точна обробка, аерокосмічне обладнання та інше виробництво високого класу висувають дедалі вищі вимоги до якості електроенергії. Аварії призведуть до провалу напруги неоціненні втрати у виробництві, експлуатації та обслуговування.

ВИСНОВКИ

1. Провали напруги є одним із основних типів спотворень якості електроенергії з точки зору їх поширеності (31% від загальної кількості спотворень) та економічних збитків (до 10 млрд грн. за рік). Це підкреслює важливість вивчення та управління цим видом спотворень для покращення якості електропостачання та зменшення економічних втрат.

2. Існуючі методи визначення характеристик провалів напруги (тривалості та глибини) є корисними для кількісної оцінки і порівняльного аналізу. Однак, їх обмеження полягає у тому, що вони не враховують різницю між різними типами провалів напруги та не охоплюють всі можливі особливості, що можуть впливати на роботу різного електрообладнання.

3. Виокремлено необхідність розробки нового або модифікації існуючих методів визначення додаткових характеристик провалів напруги, таких як стрибок фазового кута (PAJ), точки початку (POI) та закінчення (POR) провалу напруги, а також залишкове значення напруги. Це допоможе більш повно і точно описати провали напруги і врахувати їх вплив на різні типи електрообладнання.

4. Для моніторингу спотворень якості електроенергії в електричних мережах критично важливо мати методи визначення наявності провалів напруги, їх типу та класифікації. Це дозволить ефективно вживати необхідні керуючі сигнали та засоби захисту для збереження працездатності електрообладнання та підтримання стабільності систем електропостачання.

5. Похибка методів середньоквадратичного обчислення падіння напруги: Методи, які базуються на середньоквадратичному обчисленні падіння напруги, мають похибку через втрату інформації про миттєвий час, фазу та полярність. Це може призвести до неточного визначення тривалості провалу напруги.

6. Методи статистичного контролю якості не можуть застосовуватися для оцінки характеристик форми сигналу, таких як стрибок фазового кута, відсутня напруга, гармоніки та симетрія напруги через відсутність інформації про фазу.

7. Жоден із методів визначення тривалості, початку/закінчення та глибини провалу напруги самотійно не може забезпечити необхідну точність у визначенні характеристик провалів.

8. Для покращення точності визначення провалів напруги рекомендується використовувати інтегрований підхід з урахуванням різних параметрів і методів оцінки, що дозволить отримати більш повну та точну інформацію про ці спотворення якості електроенергії.

9. В результаті дослідження внесено модифікації у метод визначення характеристик динамічної поведінки вектора напруг під час провалів. Це дозволяє більш точно ідентифікувати та оцінювати параметри провалів напруги.

10. Результати дослідження дозволяють зробити висновок, що розроблені методи не лише розширюють можливості ідентифікації провалів напруги, але також сприяють підвищенню надійності та стійкості електричних мереж в цілому. Це є кроком до покращення якості електроенергії та забезпечення стабільності систем електропостачання.

Перелік літературних джерел

1. Волошко А.В. Застосування теорії подібності для контролю електроспоживання промислових підприємств / Волошко А.В., В.В. Шевчук // Енергетика: економіка, технології, екологія : науковий журнал. – 2020. – № 4 (62). – С. 78-83. – Бібліогр.: 4 назв. ISSN 1813-5420.
2. Волошко А.В. Перевірка подібності та однотипності добових графіків електричного навантаження промислових підприємств / А.В. Волошко, Я.С. Бедерак, В.В. Шевчук // Енергетика: економіка, технології, екологія : науковий журнал. – 2021. – № 3. – С. 57-63. – Бібліогр.: 6 назв. ISSN 1813-5420.
3. Волошко А.В. Провали напруги в електричних мережах та визначення їхніх характеристик / А.В. Волошко, В.В. Шевчук // Вісник ВПІ, вип. 5 – 2023 – С. 12-17. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-170-5-12-17>.
4. Джеря Т.Е. Forecasting electricity consumption using neural networks. / Т.Е. Джеря, В.В. Шевчук // Системи управління, навігації та зв'язку – 3б. наукових праць – 2023 – Том 2 № 72 – НУ «Полтавська політехніка ім. І. Кондратюка» – С. 42-44. ISSN 2073-7394.
5. Волошко А.В. Ідентифікація та класифікація однофазних провалів напруги за методологією просторового вектору кутової частоти. / А.В. Волошко, В.В. Шевчук // Енергетика: економіка, технології, екологія: науковий журнал. – 2023 – № 4 – С. 145-149 <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2023.290944>
6. Dzheria, T., Shevchuk, V., & Voloshko, A. V. (2022). Power Quality Monitoring System for electrical networks. In Studies in systems, decision and control (pp. 215–234). https://doi.org/10.1007/978-3-031-17554-1_10
7. Волошко А.В., Джеря Т.Е., Шевчук В.В. (2022). Problems of determining the presence of distortions of electric power quality. 3б. наукових праць "InterConf," (№ 106) з матеріалами 5-ої Міжнародної науково-практичної конференції "Recent scientific investigation" (26-28 квітня 2022 року), Oslo, Norway, с. 369-376.

8. Волошко А.В., Джеря, Т.Е., Шевчук В.В. (2022). The formation of the vector of classification features of electric power quality distortions. Зб. наукових праць "InterConf," (№ 107) з матеріалами 12-ої Міжнародної науково-практичної конференції "Science and Practice: Implementation to Modern Society" (6-8 травня 2022 року), Manchester, Great Britain, с. 510-516.
9. Шевчук В.В., Джеря Т.Е. (2022). Зниження впливу нелінійних навантажень на показники якості електричної енергії: основні способи управління параметрами енергетичних систем. Зб. наукових праць НН ІЕЕ, КПІ імені Ігоря Сікорського «Енергетика. Екологія. Людина». Київ, с. 11-17.
10. Шевчук В.В. (2023). Механізм зменшення збитків від наявності провалів напруги за допомогою моделі просторового вектора. Міжнародний електронний науково-практичний журнал «WayScience» ISSN 2664-4819. Конференція 14-15 вересня 2023, вихід збірника тез доповідей 22.09.2023 р.
11. Heydt, G. T. (2000). Electric Power Quality. Wiley-IEEE Press.
12. Про затвердження Кодексу систем розподілу
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0310874-18#Text>
13. T. K. Abdel-Galil, M. Kamel, A. M. Youssef, E. F. El-Saadany and M. M. A. Salama, "Power quality disturbance classification using the inductive inference approach," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, no. 4, pp. 1812-1818, Oct. 2004, doi: 10.1109/TPWRD.2003.822533
14. H. He and J. A. Starzyk, "A self-organizing learning array system for power quality classification based on wavelet transform," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 21, no. 1, pp. 286-295, Jan. 2006, doi: 10.1109/TPWRD.2005.852392
15. P. Ribeiro, "Wavelet Transform: An Advanced Tool for Analysing non Stationary Harmonic Distortion in Power Systems ", Proc. of IEEE intern. conf., VI, pp. 452–457, 1994.
16. Bollen, M.H.J. and I.Y.H. Gu, 2006. Signal Processing of Power Quality Disturbances. 1st Edn., John Wiley and Sons, Piscataway, ISBN-10: 0471931306, pp: 760

17. Burrus, C.S., R.A. Gopinath and H. Guo, 1998. Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms: A Primer. 1st Edn., Prentice Hall, New Jersey, ISBN-10: 0134896009, pp: 268
18. Kapoor, R. and M.K. Saini, 2010a. Classification of non linear power quality events based on Multiwavelet transform. *Int. J. Nonlinear Sci.*, 10: 279-286.; Kapoor, R. and M.K. Saini, 2011a. Multiwavelet transform based classification of power quality events. *Eur. Trans. Electr. Power*, 22: 518-532. DOI: 10.1002/etep.581
19. Bollen, M.H., 2000. Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions. 1st Edn., Wiley, New York, ISBN-10: 0780347137, pp: 543
20. Dugan, McGranaghan, Santoso, and Beaty, — *Electrical Power Systems Quality*, McGraw-Hill, 2nd Edition.
21. Flores R. A., — State of the Art in the Classification of Power Quality Events, an Overview, *Harmonics and Quality of Power*, 2002, 10th International Conference on Volume 1, issue, 6-9, pp. 17-20, Oct. 2002.
22. Santoso, E. J. Powers, and W. M. Grady, — Power Quality Assessment via Wavelet Transform Analysis, *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 11(2), pp. 924-930 (1996).
23. Surya Santoso, W. M. Grady, E. J. Powers, Jeff Lamoree, Siddharth C. Bhatt, - Characterization of Distribution Power Quality Events with Fourier and Wavelet Transforms, *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 15(1), Jan. 2000.
24. Vanya Ignatova, Pierre Granjon, and Seddik Bacha, — Space Vector Method for voltage Dips and Swells Analysis, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 24, No. 4, Oct. 2009.
25. Lidong Zhan and M. H. J. Bollen, "Characteristic of voltage dips (sags) in power systems," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, no. 2, pp. 827-832, April 2000, doi: 10.1109/61.853026.
26. ДСТУ EN 50160:2023 Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності.

27. M. F. McGranaghan, D. R. Mueller, and M. J. Samotyj, "Voltage Sags in Industrial Systems," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 29, no. 2, pp. 397-403, 1993.
28. T. Andersson, D. Nilsson, Test and evaluation of voltage dip immunity, STRI report, Sweden, 2002.
29. Mohammad A.S. Masoum and Ewald F. Fuchs. Power Quality in Power Systems and Electrical Machines. Book, Second Edition, 2015. 87-95.
30. H. Nam and C. Shin, "Impact of Current Flow Shape in Tapered (Versus Rectangular) FinFET on Threshold Voltage Variation Induced by Work-Function Variation," in IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 61, no. 6, pp. 2007-2011, June 2014, doi: 10.1109/TED.2014.2318696.
31. О. Г. Гриб, Г. А. Сендерович, П. Г. Щербакова і Х. Яров, "АВТОМАТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ ДЖЕРЕЛА ПРОВАЛУ НАПРУГИ," Електронний ресурс. Режим доступу: <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/3bf42e02-76e1-4599-9d65-dfa0c58559de/content>
32. О. В. Білобржеський, Р. В. Власенко «Зв'язок перетворення Кларка та Фортеск'ю для трифазної несиметричної електричної мережі», електронний ресурс, доступний за адресою <http://nvngu.in.ua/index.php/uk/component/jdownloads/finish/63-05/8560>. -05-2016-bialobrzheskyi/0, 2016.
33. Most. Sumaiya Hasan. Detection, analysis, and mitigation of voltage sag in renewable energy-rich power grids. 2020. Pp. 1 – 211. <https://ro.uow.edu.au/theses1>.
34. IEC 61000-4-30 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods.
35. Guide for Voltage Sag Indices, IEEE Std 1564-2014 Power transmission and distribution networks in general. 2014. DOI:10.1109/IEEESTD.2014.6842577
36. IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, IEEE Std 1159™-2009.
37. IEEE Guide for Voltage Sag Indices, IEEE Std 1564-2014.

38. IEEE Standard 1159: 'Recommended practice for monitoring electric power quality', and new draft standard P1159.1, (IEEE, New York, 1995) <http://grouper.ieee.org/groups/1159/2/wave7>.
39. IEEE 1159.2 Working Group, Test Waveforms. [Online]. Available: <http://grouper.ieee.org/groups/1159/2/testwave.html>.
40. A. Otcenasova, R. Bodnar, M. Regula, M. Hoger, and M. Repak, "Methodology for Determination of the Number of Equipment Malfunctions Due to Voltage Sags," IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2016 no. DOI: 10.1109/EEEIC.2016.7555685, p. 401, 2017.
41. Ralf Hartings. Test and evaluation of voltage dip immunity. Chalmers Publication Library. <https://publications.lib.chalmers.se>.
42. "Understanding the Cost of Power Interruptions to U.S. Electricity Consumers.," in "LBNL-55718," Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California. 2004, Available: <https://emp.lbl.gov/sites/all/files/REPORT%20lbl%20%2055718.pdf>(undated
43. "The Cost of Power Disturbances to Industrial & Digital Economy Companies," in "Consortium for Electric Infrastructure to Support a Digital Society," Primer for the Electric Power Research Institute, Palo Alto 2001, Available: <http://www.onpower.com/pdf/EPRICostOfPowerProblems.pdf>.
44. L. Guasch, F. Corcoles, and J. Pedra, "Effects of symmetrical and unsymmetrical voltage sags on induction machines," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, no. 2, pp. 774-782, 2004.
45. X. Shuai, G. Hua, Z. Honglin, and Y. Geng, "Analysis of the control limit for rotor-side converter of doubly fed induction generator-based wind energy conversion system under various voltage dips," IET Renewable Power Generation, vol. 7, no. 1, pp. 71-81, 2013.
46. Y. Ling and X. Cai, "Rotor current dynamics of doubly fed induction generators during grid voltage dip and rise," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 44, no. 1, pp. 17-24, 1// 2013.

47. K. Yamashita, Y. Kitauchi, and K. Katsuragi, "Influence of voltage sags on dynamic voltage behavior with massive inverter-based loads," in IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), 2012, 2012, pp. 1-8.
48. K. Lee, T. M. Jahns, D. W. Novotny, T. A. Lipo, W. E. Berkopec, and V. Blasko, "Impact of Inductor Placement on the Performance of Adjustable-Speed Drives Under Input Voltage Unbalance and Sag Conditions," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 42, no. 5, pp. 1230-1240, 2006.
49. M. F. McGranaghan, D. R. Mueller, and M. J. Samotyj, "Voltage Sags in Industrial Systems," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 29, no. 2, pp. 397-403, 1993.
50. R. Curiac and H. Li, "Specific design considerations for AC induction motors connected to adjustable frequency drives," in *Pulp and Paper Industry Technical Conference (PPIC), Conference Record of 2010 Annual*, 2010, pp. 1-6.
51. M. H. J. Bollen, "Characterisation of voltage sags experienced by three-phase adjustable-speed drives," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 12, no. 4, pp. 1666-1671, 1997
52. Math H. J. Bollen, Irene Y. H. Gu. *SIGNAL PROCESSING OF POWER QUALITY DISTURBANCES*. IEEE press series on Power Engineering. 882 p.
53. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30:Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods, IEC Std. 61000-4-30, 2015.
54. "Waveform Characteristics of Voltage Sags: Statistical Analysis," EPRI, Palo Alto, CA1999.
55. Role of X/R Ratio in Circuit Breaker Short Circuit Duty Evaluation
56. Math J. Bollen, "Voltage sag indices-Draft 1.2, working document for IEEE P1564 and CIGRE WG 36-07", Dec.2000.
57. Sasa Z. Djokic, Jovica V. Milanovic, "Advanced voltage sag characterization II: Point on wave" *IET Gen.Trans.Distrib.* Vol.1,N0.1,Jan 2007.

58. Antony C Parsons, W. Mack Grady, “A Wavelet based procedure for automatically Determining the beginning and of transmission System voltage sag”. 1999 IEEE.
59. Pengfei Wei, Yonghai Xu, Yapen Wu, Chenyi Li. Research on classification of voltage sag sources based on recorded events. 24th International Conference & Exhibition on Electricity Distribution (CIRED) 12-15 June 2017. Is. 1. Pp. 846 – 850. DOI: 10.1049/oap-cired.2017.0907
60. Juha heinonen. Lectures on lipschitz analysis. 77 p. <http://www.math.jyu.fi/research/reports/rep100.pdf>
61. Волошко А.В. Узагальнений ідентифікатор наявності спотворень якості електричної енергії. Технічна електродинаміка. 2022, №6, С. 72 - 76. <https://doi.org/10.15407/techned2022.06.072>
62. Z. Fan and X. Liu, “A novel universal grid voltage sag detection algorithm,” in Power Engineering and Automation Conf., 2012.
63. C. Fitzer, M. Barnes, and P. Green, “Voltage sag detection technique for a dynamic voltage restorer,” IEEE Trans. Ind. App., vol. 40, 2004.
64. Alvaro Furlani Bastos, Keng-Weng Lao, Grazia Todeschini and Surya Santoso “Accurate Identification of Point-on-Wave Inception and Recovery Instants of Voltage Sags and Swells” in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 34, no. 2, pp. 551-560, April 2019.
65. F. Bastos, K. Lao, G. Todeschini and S. Santoso, “Accurate Identification of Point-on-Wave Inception and Recovery Instants of Voltage Sags and Swells,” in IEEE Transactions on Power Delivery, 2019. vol. 34, no. 2, pp. 551-560.
66. J. Barros and E. Perez, “Limitations in the use of rms value in power quality analysis,” in Instr. Meas. Tech. Conf., 2006.
67. Y. Wang, X. Xiao, and M. Bollen, “Challenges in the calculation methods of point-on-wave characteristics for voltage dips,” in Int. Conf. Harm. and Quality of Power, 2016.)
68. A. M. Gargoom, N. Ertugrul, and W. L. Soong, —A Comparative Study on Effective Signal Processing Tools for Power Quality Monitoring‡, EPE 2005-Dresden.

69. Oscar C. Montero-Hernandez and Prasad, - A Fast Detection Algorithm Suitable for Mitigation of Numerous Power Quality Disturbances, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 41, No. 6, Nov/Dec. 2005.
70. Ameen M. Gargoom, Nesimi Ertugrul, and W.L. Soong, - Investigation of Effective Automatic Recognition System of Power-Quality Events, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 22, NO. 4, pp. 2319-2326, Oct, 2007.
71. Subhash V. Murkute, V. B. Borghate, M. A. Chaudhari - Detection and Localization of Power Quality Disturbances Using Space Vector Wavelet Transform: A New Three Phase Approach, Int. J. on Recent Trends in Engineering and Technology, 2012.
72. Mallat S.A. A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation/IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell. – 1989. – vol. 11. – P. 674 – 693
73. Djokic, S.Z., Milanovic, J.V. and Kirschen, D.S. (2004) Sensitivity of AC Coil Contactors to Voltage Sags, Short Interruptions, and Under-Voltage Transients. IEEE Transaction on Power Delivery, 19, 1299-1307.
74. Jianbo, Z., and Qi, W. (2018). “An Anti-misoperation Method for Intermediate Relay Used in DC System of Substation,” in 2018 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), Wuhan, China, May 31-June 2, 2018, 455–460. doi:10.1109/iciea.2018.8397760.
75. ДСТУ EN IEC 61000-4-11:2022 Електромагнітна сумісність. Частина 4-11. Методики випробування та вимірювання. Випробування на несприйнятливість до провалів напруги, короткочасних переривань та змінень напруги для обладнання з силою вхідного струму до 16 А на фазу.
76. «IEEE Trial-Use Recommended Practice for Voltage Sag and Short Interruption Ride-Through Testing for End-Use Electrical Equipment Rated Less than 1000 V.», IEEE STD 1668-2014, pp. 1 – 92. 2014.
77. IEEE Standard 1346: ‘IEEE recommended practice for evaluating electric power system compatibility with electronic process equipment’, (IEEE, New York, 1998).
78. EPRI: ‘The effects of point-on-wave on low-voltage tolerance of industrial process devices’, (EPRI Brief 44, 1998)

79. EPRI: ‘Performance of a hold-in device for relays, contactors and motor starters’, (EPRI Brief 46, 1998).
80. Wang, Y., Deng, L.-F., Bollen, M. H. J., and Xiao, X.-Y. (2020). Calculation of the point-on-wave for Voltage Dips in Three-phase Systems. *IEEE Trans. Power Deliv.* 35 (4), 2068–2079. doi:10.1109/tpwrd.2019.2960524.
81. Ye, J., Gooi, H. B., Wang, B., Li, Y., and Liu, Y. (2019). Elliptical Restoration Based Single-phase Dynamic Voltage Restorer for Source Power Factor Correction. *Electric Power Syst. Res.* 166, 199–209. doi:10.1016/j.epsr.2018.10.011.
82. О. М. Маценко, Д. М. Овчаренко. Економічні засади підвищення контролю якості енергоресурсів промислових підприємств. *Mechanism of Economic Regulation*, 2013, No 3. С. 71 – 79.
83. Wang, Y., Bollen, M. H. J., and Xiao, X.-Y. (2015). Calculation of the Phase-Angle-Jump for Voltage Dips in Three-phase Systems. *IEEE Trans. Power Deliv.* 30 (1), 480–487. doi:10.1109/tpwrd.2014.2352358.
84. Ren, J., Xiao, X., Zheng, Z., Wang, Y., Ma, Z., and Liu, K. (2021). Impact of Phase Angle Jump on DFIG under LVRT Conditions: Challenges and Recommendations. *IEEE Trans. Power Deliv.*, 1. doi:10.1109/TPWRD.2020.3048434.
85. Huaying Zhang, Qing Wang, Yihong You. Tolerance of Electromagnetic Relay to Voltage Sags and Short Interruptions. *Frontiers in Energy Res.* December 2021 | Volume 9 | Article 766472. doi: 10.3389/fenrg.2021.766472.
86. Zhai, G., and Yang, W. (2008). “3-D Finite Element Analysis of Dynamic Characteristics of Electromagnetic Relay Interfered by Voltage Dips and Short Interruptions,” in 2008 International Conference on Electrical Machines and Systems, Wuhan, China, October 17-20, 2008, 564–567.
87. M. Karimi, H. Mokthari, and M. R. Iravani, —Wavelet based on line disturbance detection for power quality applications,|| *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 15, no. 4, pp. 1212–1220, Oct. 2000.
88. Styvaktakis E., M.H.J. Bollen, I.Y.H. Gu, —Automatic Classification of Power System events using RMS voltage Measurements,|| *IEEE Power engineering Society Summer Meeting*, Vol.2, pp 824-829, July 2002.

89. R. Flores, - Signal processing tools for power quality event classification, || Lic.Eng. thesis, School Elect. Eng., Chalmers Univ. Technol., Göteborg, Sweden, 2003, Tech. Rep. 477L
90. T. El-Shennawy, - Detection, Localization, and classification of Power quality Disturbances using DWT technique, || M.Sc. Thesis, Alexandria University, Egypt-2002.