

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра “Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент”

“ Дopusчено до захисту ”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
канд. техн. наук., професор
_____Петро ПЛЕШКОВ
“ ____ ” _____2025р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої
освіти
на тему
“ Детекція виникнення порушень якості
електричної енергії в системах електроживлення ”

Виконав здобувач вищої освіти
2 курсу магістратури, групи ЕЕ-24М
ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____Василь ПОЛЯКОВ
« ____ » _____2025 р.

Керівник роботи
канд. техн. наук, доцент
_____Валентин СОЛДАТЕНКО
« ____ » _____2025 р.

Рецензент _____

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма «Електротехнічні системи електроспоживання»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри ЕТС та ЕМ

канд. техн. наук, професор

Петро ПЛЄШКОВ.

«___» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Полякова Василя Валентиновича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) Детекція виникнення порушень якості електричної енергії в системах електроживлення

Detection of power quality disturbances in power supply systems

2. Керівник роботи (проекту) Солдатенко Валентин Петрович, канд. техн. наук., доц.

(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту 01.12.2025

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту) Метою роботи є підвищення швидкодії та достовірності системи моніторингу та захисту електрообладнання шляхом розробки методу детекції провалів напруги на основі вейвлет-перетворення просторового вектора. Завдання роботи: проаналізувати питання забезпечення якості електроенергії та методів її контролю; розробити метод детекції на основі вейвлет-перетворення просторового вектора; провести моделювання системи детекції та виконати аналіз результатів моделювання; оцінити практичне значення точної детекції для захисту електрообладнання; розробити заходи з охорони праці.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>к.т.н, доц. Савеленко І.В.</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
<i>1</i>	<i>Вступ</i>	<i>10.10.2025 р.</i>	
<i>2</i>	<i>Аналіз проблеми забезпечення якості електроенергії та методів її контролю</i>	<i>13.10.2025 р.</i>	
<i>3</i>	<i>Розробка методу детекції на основі вейвлет-перетворення просторового вектора</i>	<i>20.10.2025 р.</i>	
<i>4</i>	<i>Моделювання системи детекції та аналіз результатів</i>	<i>03.11.2025 р.</i>	
<i>5</i>	<i>Практичне значення точної детекції для захисту електрообладнання</i>	<i>17.11.2025 р.</i>	
<i>6</i>	<i>Охорона праці</i>	<i>24.11.2025 р.</i>	
<i>7</i>	<i>Загальні висновки</i>	<i>25.11.2025 р.</i>	
<i>8</i>	<i>Оформлення пояснювальної записки КР</i>	<i>27.11.2025 р.</i>	
<i>9</i>	<i>Оформлення презентаційної частини КР</i>	<i>28.11.2025 р.</i>	

Дата видачі завдання: « ____ » _____ 2025 р.

Підпис керівника _____ Валентин СОЛДАТЕНКО

Завдання прийнято до виконання: « ____ » _____ 2025 р.

Підпис здобувача _____ Василь ПОЛЯКОВ

АНОТАЦІЯ

Поляков В.В. Детекція виникнення порушень якості електричної енергії в системах електроживлення.

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». – Центральноукраїнський національний технічний університет. – м. Кропивницький, 2025р.

Робота присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної задачі підвищення ефективності моніторингу та захисту систем електропостачання в умовах концепції Smart Grid. Об'єктом дослідження є процеси детекції та класифікації порушень якості електричної енергії, зокрема короткочасних провалів напруги, які є причиною збоїв у роботі чутливого промислового обладнання.

Запропоновано вдосконалений метод детекції, що базується на поєднанні теорії просторового вектора (перетворення Кларка) та частотно-часового аналізу сигналів за допомогою дискретного вейвлет-перетворення (базис Daubechies db4).

За допомогою розробленої імітаційної моделі в середовищі MATLAB/Simulink підтверджено, що запропонований алгоритм дозволяє виявляти момент виникнення аварії за час 0,1–0,5 мс, що на порядок перевищує швидкодію аналогів. Розроблено алгоритм класифікації типів провалів напруги (A–G) за геометричними параметрами годографа вектора та запропоновано методику адаптивного налаштування релейного захисту з урахуванням фазового кута початку провалу (Point-on-Wave).

Ключові слова: якість електроенергії, провал напруги, вейвлет-перетворення, просторовий вектор, релейний захист, MATLAB/Simulink

THE SUMMARY

Poliakov V. Detection of power quality disturbances in power supply systems

Specialty 141 – "Electric power, electrical engineering and electromechanics". – "Electrical power consumption systems". – Central Ukrainian National Technical University. – Kropyvnytskyi, 2025

The work is devoted to solving the urgent scientific and applied problem of increasing the efficiency of monitoring and protection of power supply systems in the context of the Smart Grid concept. The object of the research is the processes of detection and classification of disturbances in the quality of electric energy, in particular short-term voltage dips, which are the cause of failures in the operation of sensitive industrial equipment.

An improved detection method is proposed, based on a combination of spatial vector theory (Clark transform) and time-frequency analysis of signals using discrete wavelet transform (Daubechies db4 basis).

Using the developed simulation model in the MATLAB/Simulink environment, it is confirmed that the proposed algorithm allows detecting the moment of occurrence of an accident within 0.1–0.5 ms, which is an order of magnitude faster than analogues. An algorithm for classifying voltage dip types (A–G) according to the geometric parameters of the vector hodograph has been developed and a method for adaptive adjustment of relay protection taking into account the phase angle of the dip onset (Point-on-Wave) has been proposed.

Key words: power quality, voltage dip, wavelet transform, space vector, relay protection, MATLAB/Simulink

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	4
ЗМІСТ	6
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	9
ВСТУП	10
РОЗДІЛ 1 А АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТА МЕТОДІВ ЇЇ КОНТРОЛЮ	13
1.1 Сучасний стан проблеми якості електроенергії в розподільних мережах...	13
1.2 Класифікація основних порушень якості електроенергії для задач побудови систем захисту та моніторингу	15
1.2.1. Провали напруги (Voltage Sags/Dips).....	16
1.2.2. Гармонічні спотворення (Harmonics).....	18
1.2.3. Флікер (Flicker).....	18
1.3 Огляд існуючих методів детекції збурень.....	19
1.3.1. Метод середньоквадратичних значень (RMS).....	19
1.3.2. Метод перетворення Фур'є (DFT/FFT).....	20
1.3.3. Метод пікових значень (Peak Voltage).....	21
1.3.4. Метод просторового вектора (Park's Vector Approach).....	22
1.3.5 Вейвлет-перетворення (Wavelet Transform).....	23
1.3.3. Метод пікових значень (Peak Voltage).....
1.4. Недоліки традиційних методів вимірювання та постановка задач дослідження	24
Висновки до розділу 1	26
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МЕТОДУ ДЕТЕКЦІЇ НА ОСНОВІ ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ ПРОСТОРОВОГО ВЕКТОРА	27
2.1. Математична модель просторового вектора напруги для трифазних систем	27
2.2. Застосування дискретного вейвлет-перетворення для часо-частотного аналізу сигналів.....	30

2.3 Алгоритм детекції точок початку та закінчення провалів напруги POI та POR	33
2.4 Методика класифікації типів порушень за параметрами еліпса просторового вектора	37
Висновки до розділу 2	41
РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ДЕТЕКЦІЇ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ	43
3.1. Розробка імітаційної моделі системи електропостачання в середовищі MATLAB/Simulink	43
3.2. Дослідження ефективності детекції при симетричних та несиметричних провалах напруги	46
3.3 Аналіз чутливості методу до перехідних процесів та відстройка від хибних спрацювань	51
3.3.1. Комутація конденсаторних батарей (Capacitor Switching)	51
3.3.2. Пуск потужних асинхронних двигунів	53
3.3.3. Вплив вищих гармонік	53
3.4 Порівняльна характеристика швидкодії розробленого методу та методу RMS	55
Висновки до розділу 3	57
РОЗДІЛ 4 ПРАКТИЧНЕ ЗНАЧЕННЯ ТОЧНОЇ ДЕТЕКЦІЇ ДЛЯ ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ	59
4.1. Вплив фазового кута (Point-on-Wave) початку провалу на стійкість електромагнітних реле та контакторів	59
4.2 Аналіз залежності роботи обладнання від співвідношення X/R мережі та параметрів провалу	62
4.3 Рекомендації щодо налаштування систем захисту на основі отриманих даних детекції	64
4.4 Структурна реалізація пристрою детекції та інтеграція в системи Smart Grid	67
Висновки до розділу 4	69

РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ	71
5.1 Аналіз шкідливих та небезпечних факторів при виконанні науково- дослідної роботи.....	71
5.2 Вимоги електробезпеки при впровадженні системи детекції	72
5.3. Пожежна безпека	73
Висновки до розділу 5	74
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	75
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	77

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АВР – автоматичне введення резерву

ВДЕ – відновлювані джерела енергії

ВЕС – вітрова електростанція

ДПФ – дискретне перетворення Фур'є

КЗ – коротке замикання

ПЯЕ – показники якості електричної енергії

РЗА – релейний захист та автоматика

СЕС – сонячна електростанція

ШПФ – швидке перетворення Фур'є

ЯЕЕ – якість електричної енергії

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний етап розвитку електроенергетики характеризується масштабним впровадженням концепції Smart Grid, інтеграцією відновлюваних джерел енергії та підвищенням вимог до надійності електропостачання. Однією з ключових проблем функціонування розподільних мереж є забезпечення якості електричної енергії (ЯЕЕ). Серед усіх видів порушень ЯЕЕ, згідно зі статистикою CIGRE та IEEE, найбільш частими (до 80% випадків) та економічно збитковими є провали напруги.

Широке використання в промисловості чутливого до якості напруги обладнання – частотно-регульованих електроприводів, робототехнічних комплексів, систем ЧПК та мікропроцесорної автоматики – робить проблему детекції провалів критично важливою. Навіть короткочасне (на 3–5 періодів) зниження напруги може призвести до зупинки технологічного процесу, відпадання магнітних пускачів, збою в роботі контролерів та значних фінансових втрат.

Існуючі методи детекції, що базуються на обчисленні середньоквадратичних значень (RMS), регламентовані стандартом ДСТУ EN 61000-4-30, мають суттєвий недолік – інерційність. Час реакції RMS-детекторів становить від 10 до 20 мс (0.5–1 період частоти мережі). Для сучасних напівпровідникових комутаторів та швидкодіючих систем автоматичного введення резерву (АВР) така затримка є неприпустимою, оскільки за цей час можуть розвинутися незворотні електромеханічні перехідні процеси.

У зв'язку з цим, актуальним науково-прикладним завданням є розробка швидкодіючих методів детекції, здатних виявляти порушення в режимі реального часу (sub-cycle detection). Перспективним напрямком є поєднання теорії миттєвої потужності (метод просторового вектора) та сучасних методів частотно-часового аналізу сигналів (вейвлет-

перетворення), що дозволяє локалізувати момент аварії з точністю до долей мілісекунди та ідентифікувати тип пошкодження.

Мета і задачі дослідження. *Метою роботи* є підвищення швидкодії та достовірності системи моніторингу та захисту електрообладнання шляхом розробки методу детекції провалів напруги на основі вейвлет-перетворення просторового вектора.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **задачі**:

- провести аналіз існуючих методів виявлення порушень якості електроенергії та обґрунтувати неефективність традиційних підходів для захисту чутливого навантаження;

- розробити математичну модель детектора, що поєднує перетворення Кларка для формування просторового вектора напруги та дискретне вейвлет-перетворення (DWT) для фіксації сингулярностей сигналу;

- розробити імітаційну модель системи електропостачання в середовищі MATLAB/Simulink для дослідження режимів симетричних та несиметричних провалів напруги;

- створити алгоритм класифікації типів провалів напруги (A–G) за геометричними параметрами годографа вектора та перевірити його селективність в умовах експлуатаційних завод;

- розробити практичні рекомендації щодо налаштування адаптивних систем релейного захисту з урахуванням фазового кута виникнення аварії (Point-on-Wave);

- розробити заходи з охорони праці.

Об'єкт дослідження – процеси зміни параметрів режиму в розподільних електричних мережах при виникненні коротких замикань та комутаційних збурень.

Предмет дослідження – методи та алгоритми швидкої детекції та класифікації провалів напруги з використанням математичного апарату вейвлет-перетворення та теорії просторового вектора.

Методи дослідження. У роботі використано комплексний підхід, що

базується на: теорії електричних кіл та лінійної алгебри для перетворення координат трифазної системи (перетворення Кларка) та аналізу векторних діаграм; методах цифрової обробки сигналів (DSP) для застосування дискретного вейвлет-перетворення (DWT) з метою виділення високочастотних компонент аварійного процесу; математичному моделюванні з використанням програмного пакету MATLAB/Simulink для верифікації розроблених алгоритмів та проведення порівняльного аналізу з методом RMS.

Наукова цінність роботи полягає у наступному:

- набув подальшого розвитку метод детекції збурень в електричних мережах, який, на відміну від існуючих, використовує вейвлет-перетворення модуля просторового вектора напруги, що дозволяє скоротити час виявлення початку аварії до 0.2–0.5 мс незалежно від типу пошкодження;
- вдосконалено методику класифікації провалів напруги шляхом аналізу коефіцієнта еліптичності та кута нахилу годографа вектора, що дає можливість ідентифікувати пошкоджену фазу без розкладання на симетричні складові.

Практична цінність роботи.

- розроблено алгоритмічне забезпечення для мікропроцесорних пристроїв релейного захисту та автоматики, яке може бути реалізоване на базі сучасних сигнальних контролерів;
- створено віртуальну модель детектора в середовищі Simulink, яка дозволяє моделювати реакцію захисту на різні типи аварій та налаштовувати параметри фільтрації.

Структура роботи: кваліфікаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, загальних висновків, переліку посилань. Повний обсяг роботи складає 79 сторінку. Основна частина викладена на 68 сторінках друкованого тексту, містить 15 рисунків та 6 таблиці. Список використаних джерел містить 26 джерел та викладений на 3 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТА МЕТОДІВ ЇЇ КОНТРОЛЮ

1.1. Сучасний стан проблеми якості електроенергії в розподільних мережах

Розвиток сучасного суспільства нерозривно пов'язаний зі зростанням обсягів споживання електричної енергії та підвищенням вимог до надійності електропостачання. Сьогодні електрична енергія виступає не лише як енергетичний ресурс, але і як товар, що має певні споживчі характеристики, сукупність яких визначається терміном «якість електричної енергії» (ЯЕЕ).

Як зазначається в дослідженнях, сучасний етап розвитку електроенергетичних систем характеризується фундаментальними змінами у структурі генерації та споживання. Традиційна архітектура мереж, розрахована на передачу енергії від великих електростанцій до пасивних споживачів, трансформується у складні децентралізовані системи (Smart Grids). Цей процес супроводжується інтенсифікацією виробництва та масовим впровадженням новітніх електротехнологій.

Аналіз стану проблеми дозволяє виділити три ключові фактори, що негативно впливають на якість електроенергії в сучасних розподільних мережах. Проведемо опис цих факторів.

Масове використання силової електроніки та нелінійних навантажень. Сучасні промислові та побутові споживачі масово переходять на використання енергоефективного обладнання: частотно-регульованих електроприводів, імпульсних джерел живлення, світлодіодного освітлення, індукційних печей тощо. Таке обладнання має нелінійну вольт-амперну характеристику, що призводить до генерації вищих гармонік струму в мережу. Це, в свою чергу, спричиняє спотворення форми кривої напруги, додаткові

втрати потужності в трансформаторах та лініях електропередавання, а також перегрів обладнання.

Інтеграція відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Впровадження сонячних (СЕС) та вітрових (ВЕС) електростанцій перетворює розподільні мережі з пасивних на активні. Оскільки більшість установок ВДЕ приєднуються до мережі через силові перетворювачі (інвертори), це створює додаткові виклики:

- нестабільність генерації, що залежить від погодних умов, викликає коливання напруги;
- робота інверторів на високих частотах комутації є джерелом високочастотних завад;
- зменшення загальної інерції енергосистеми знижує її стійкість до збурень.

Чутливість сучасного обладнання. Парадоксальність ситуації полягає в тому, що саме те обладнання, яке є джерелом спотворень (мікропроцесорна техніка, автоматизовані лінії, контролери), є найбільш чутливим до порушень якості електроенергії. Навіть короточасні провали напруги (тривалістю в кілька періодів промислової частоти), які раніше не впливали на роботу електродвигунів чи ламп розжарювання, сьогодні призводять до збоїв у роботі систем керування, зупинки конвеєрів, втрати даних та браку продукції.

Згідно зі статистичними даними наведеними на рис. 1.1 значна частка відмов промислового обладнання пов'язана саме з кондуктивними електромагнітними завадами. Фінансові збитки підприємств від низької якості електроенергії складаються не лише з вартості пошкодженого обладнання, але й з втрат від простою виробництва, зриву термінів постачання продукції та витрат на відновлення технологічного процесу.

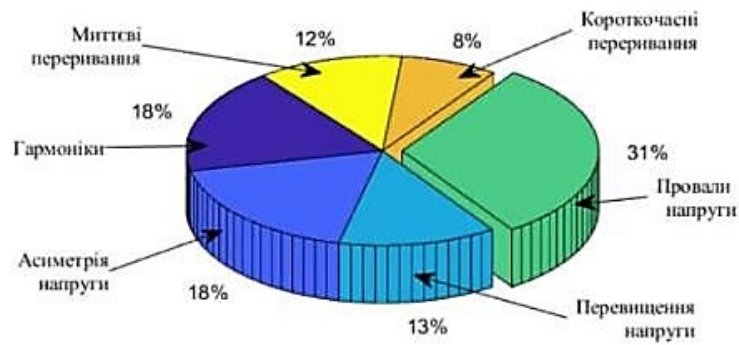


Рис. 1.1 Статистика причин відмов електрообладнання

В Україні, як і в країнах Європейського Союзу, нормативною базою для оцінки ЯЕЕ є стандарт ДСТУ EN 50160:2014 «Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення». Цей стандарт регламентує допустимі діапазони відхилення напруги, коефіцієнти гармонік, флікер та інші параметри.

Проте, як показує практика, відповідність усереднених показників нормам стандарту не завжди гарантує безперебійну роботу чутливого обладнання, оскільки стандартні методи контролю часто не фіксують швидкоплинні перехідні процеси.

Таким чином, проблема забезпечення якості електроенергії трансформується з суто технічної задачі стабілізації напруги у комплексну проблему, що включає необхідність постійного моніторингу, швидкої детекції порушень та впровадження адаптивних систем захисту.

Це обумовлює актуальність розробки нових, швидкодіючих методів виявлення порушень, здатних працювати в реальному часі.

1.2 Класифікація основних порушень якості електроенергії для задач побудови систем захисту та моніторингу

Відповідно до чинних нормативних документів, зокрема ДСТУ EN 50160:2014 та стандартів IEEE 1159, електромагнітні завади в системах електропостачання класифікують за спектральним складом, тривалістю та

амплітудою. Для задач побудови систем захисту та моніторингу ключовими видами порушень є провали напруги, гармонічні спотворення та флікер.

1.2.1. Провали напруги (Voltage Sags/Dips). Провалом напруги називається раптове зменшення середньоквадратичного значення (СКЗ) напруги в точці електричної мережі до рівня від 90% до 1% від номінального значення (U_{nom}), за яким слідує відновлення напруги через короткий проміжок часу (від 10 мс до 1 хв).

Ілюстрація провалу та його параметрів приведена на рис. 1.2.

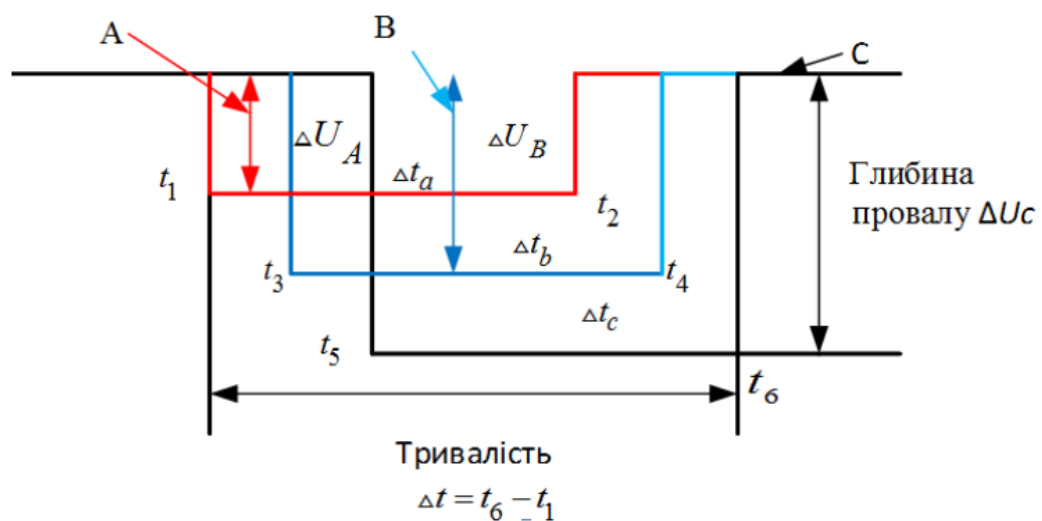


Рис. 1.2. Ілюстрація провалу напруги та його основних параметрів

Провали є найбільш поширеним і небезпечним видом збурень для промислових споживачів. На відміну від повного знеструмлення (переривання), при провалі напруга в мережі залишається, але її недостатньо для нормальної роботи магнітних пускачів, частотних перетворювачів та контролерів.

Згідно з дослідженнями наукової літератури провали напруги класифікують не лише за глибиною та тривалістю, але й за симетрією розподілу напруг по фазах. У світовій практиці (класифікація Боллена) виділяють сім основних типів провалів, які позначаються літерами від **A** до **G**.

Ця класифікація є критично важливою для алгоритмів детекції, оскільки кожен тип формує унікальну траєкторію просторового вектора напруги.

Класифікація провалів напруги за Болленом приведена в табл. 1.1

Таблиця 1.1 Класифікація провалів напруги за їх параметрами

Тип А (Симетричний провал)	Виникає при трифазних коротких замиканнях (КЗ). Характеризується рівномірним зниженням амплітуди у всіх трьох фазах без зсуву фазових кутів. Це єдиний тип збалансованого провалу.
Тип В (Однофазне замикання)	Виникає при замиканні однієї фази на землю в мережі з глухозаземленою нейтраллю. Амплітуда пошкодженої фази падає до нуля або низького значення, інші фази залишаються без змін.
Тип С (Міжфазне замикання)	Виникає при замиканні між двома фазами. Напруга між пошкодженими фазами падає, що призводить до характерного спотворення векторної діаграми.
Тип D	Цей тип є похідним від типу С. Він спостерігається на стороні навантаження трансформатора зі схемою з'єднання обмоток «трикутник-зірка» (Δ / Y), якщо на стороні джерела сталося двофазне замикання (Тип С). Це найбільш розповсюджений тип провалу, який «бачить» споживач низької напруги.
Тип Е (Двофазне замикання на землю)	Замикання двох фаз на землю. Дві фазні напруги знижуються, третя залишається номінальною.
Типи F та G	Є похідними від типу Е після проходження через трансформатори різних груп з'єднань.

Важливим аспектом є те, що під час несиметричних провалів (типи В–G) відбувається не лише зміна амплітуди, а й стрибок фазового кута (Phase Angle Jump), що значно ускладнює роботу систем синхронізації (PLL) інверторів.

1.2.2. Гармонічні спотворення (Harmonics). Гармоніки – це синусоїдальні складові напруги або струму, частоти яких є цілими кратними до основної частоти мережі (50 Гц).

Основним джерелом гармонік є нелінійні навантаження, що вже були описані в п. 1.1 (випрямлячі, інвертори, дугові печі).

Рівень спотворень оцінюється коефіцієнтом сумарних гармонічних спотворень (THD_u):

$$THD_u = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} U_h^2}}{U_1} \cdot 100\%$$

де U_h – амплітуда h -ї гармоніки;

U_1 – амплітуда основної гармоніки.

Для задач детекції гармоніки створюють проблему «шуму». Алгоритм виявлення провалів повинен бути нечутливим до стаціонарних гармонічних спотворень, щоб уникнути хибних спрацювань захисту.

1.2.3. Флікер (Flicker). Флікер – це суб'єктивне відчуття нестабільності зорового сприйняття, викликане швидкими коливаннями світлового потоку, які, в свою чергу, спричинені коливаннями напруги в мережі (амплітудною модуляцією) в діапазоні частот від 0,5 до 30 Гц.

Джерелами флікера є потужні навантаження з різкозмінним характером споживання активної та реактивної потужності: дугові сталеплавильні печі, зварювальні установки, пуск потужних електродвигунів.

Оцінка флікера проводиться за індексами короткочасної (P_{st}) та довготривалої (P_{lt}) дози флікера. Хоча флікер не призводить до миттєвої зупинки обладнання, він свідчить про слабкість мережі та наявність низькочастотних модуляцій, які можуть впливати на точність вимірювальних систем.

Підсумовуючи, зазначимо, що серед усіх розглянутих порушень саме провали напруги є найбільш критичними з точки зору забезпечення безперервності технологічних процесів. Складність їх детекції полягає в різноманітті типів (A–G) та наявності фазових зсувів. Тому подальші дослідження в роботі будуть зосереджені на розробці методу, здатного швидко та точно ідентифікувати початок провалу та класифікувати його тип, ігноруючи при цьому гармонічні спотворення.

1.3 Огляд існуючих методів детекції збурень

Ефективність систем захисту та моніторингу якості електроенергії (ЯЕЕ) прямо залежить від обраного математичного методу обробки вхідних сигналів напруги та струму. Головним завданням методу детекції є швидке та точне визначення моменту початку (t_{start}) та закінчення (t_{end}) порушення, а також оцінка його глибини та типу.

На сьогодні в світовій практиці використовується кілька базових підходів до детекції збурень, кожен з яких має свої переваги та обмеження.

1.3.1. Метод середньоквадратичних значень (RMS). Метод RMS (Root Mean Square) є найбільш поширеним у сучасних вимірювальних приладах та реле напруги. Він базується на обчисленні діючого значення напруги на інтервалі одного періоду (або півперіоду) промислової частоти. Ілюстрація до методу приведена на рис. 1.3.

Математично значення RMS для дискретного сигналу обчислюється за формулою:

$$U_{RMS}[k] = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} u^2[k-i]}$$

де N – кількість вибірок на один період частоти мережі;

$u[k]$ – миттєве значення напруги.

До переваг даного методу слід віднести простоту реалізації, стійкість до високочастотних шумів та зрозуміла фізична інтерпретація результату.

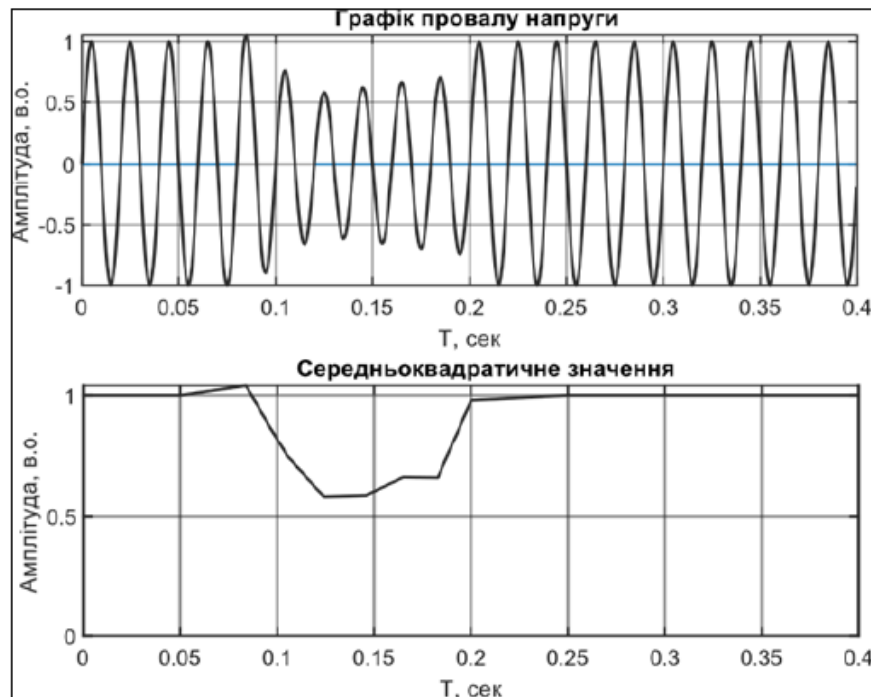


Рис. 1.3. Ілюстрація до методу визначення провалу методом RMS

Однак головним недоліком методу є його інерційність. Використання «ковзного вікна» шириною в один період (20 мс для 50 Гц) призводить до затримки детекції. Це означає, що інформація про провал напруги з'являється на виході детектора лише після того, як вікно повністю заповниться даними аварійного режиму. Така затримка є критичною для чутливого навантаження.

1.3.2. Метод перетворення Фур'є (DFT/FFT). Дискретне перетворення Фур'є (DFT) та його швидка версія (FFT) дозволяють розкласти сигнал на

гармонічні складові, визначаючи амплітуду та фазу кожної гармоніки, як це проілюстровано на рис. 1.4.

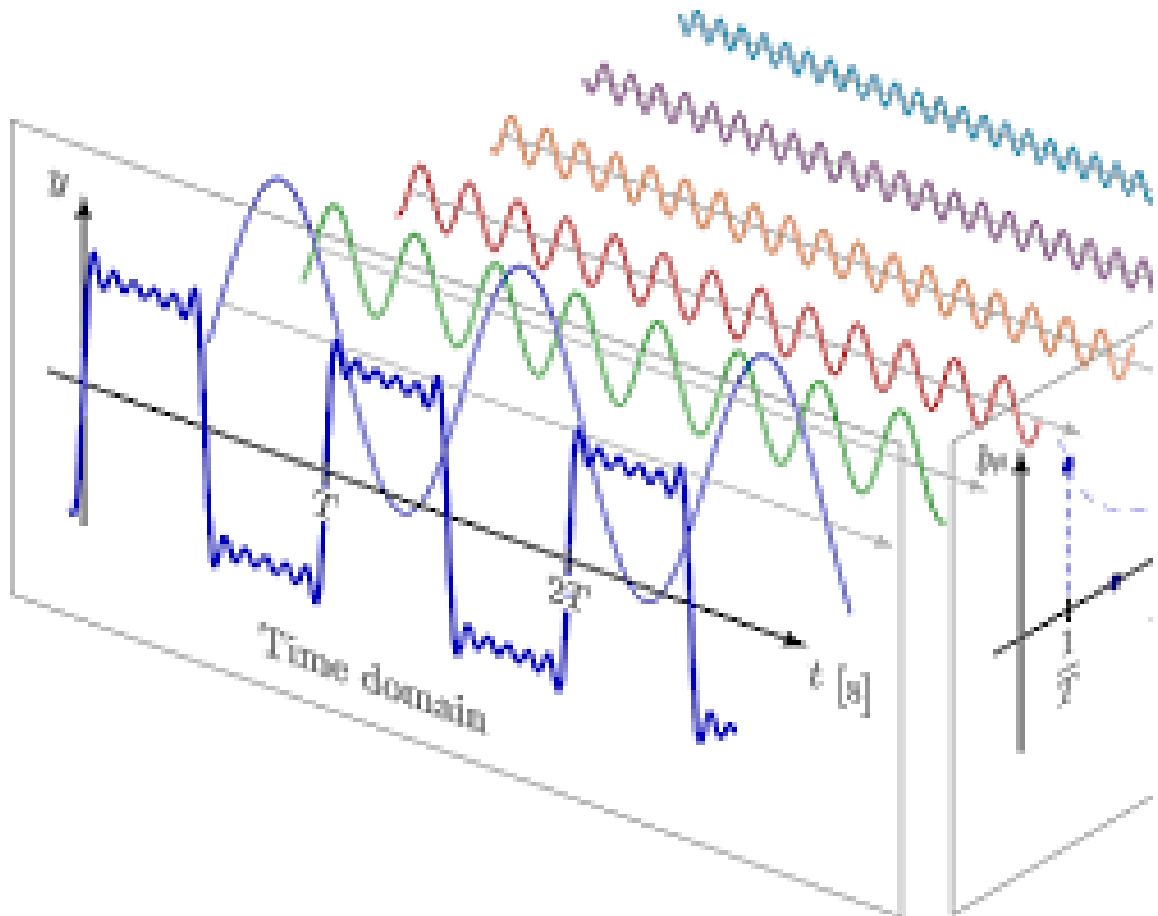


Рис. 1.4 Ілюстрація до методу перетворення Фур'є

Такий метод ідеально підходить для аналізу стаціонарних гармонічних спотворень та обчислення коефіцієнта *THD*.

Разом з тим перетворення Фур'є має низьку роздільну здатність у часі. Воно показує, які частоти присутні в сигналі, але не може точно сказати, коли саме вони виникли. Для нестаціонарних процесів (якими є провали напруги) використовують віконне перетворення Фур'є (STFT), проте воно стикається з проблемою невизначеності, адже неможливо одночасно отримати високу точність і по частоті, і по часу.

1.3.3. Метод пікових значень (Peak Voltage). Метод полягає у порівнянні миттєвих значень напруги з заданими граничними уставками (верхньою та нижньою).

Ілюстрація до методу пікових значень приведена на рис. 1.5.

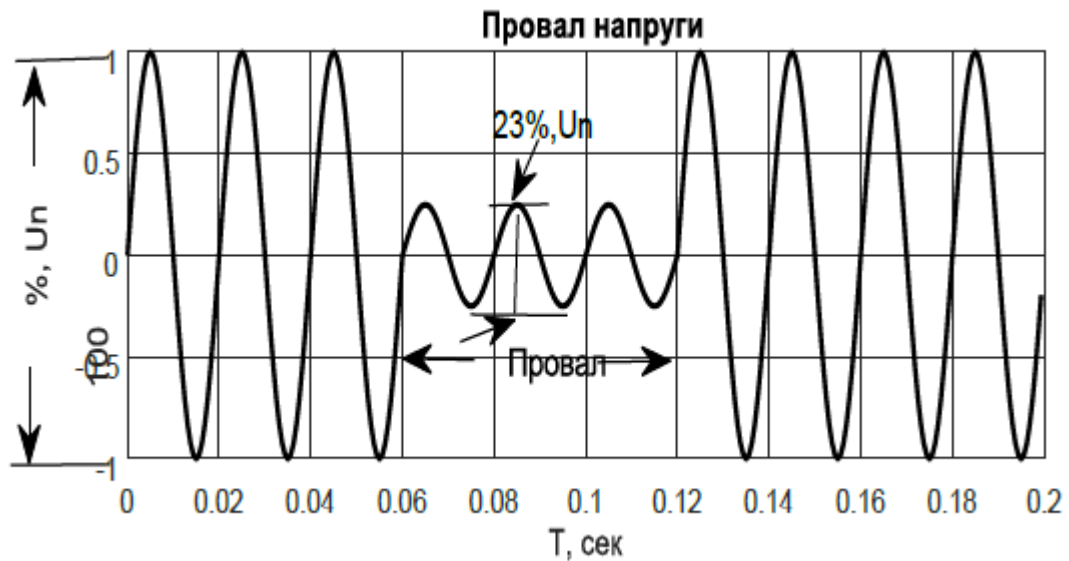


Рис. 1.5. Ілюстрація до визначення провалу напруги методом пікових значень

Перевагою являється миттєва реакція на порушення. Проте, значним недоліком є надзвичайна чутливість до шумів. Будь-який комутаційний імпульс (наприклад, включення конденсаторної батареї) може бути помилково інтерпретований як аварія, що призведе до хибного спрацювання захисту.

1.3.4. Метод просторового вектора (Park's Vector Approach). Цей метод базується на перетворенні трифазної системи координат (abc) у двофазну нерухому систему ($\alpha\beta$) за допомогою перетворення Кларка. Три фазні напруги формують єдиний просторовий вектор, кінець якого в нормальному режимі описує коло.

Даний метод дозволяє аналізувати стан усіх трьох фаз одночасно. При виникненні провалу коло миттєво перетворюється на еліпс або іншу фігуру, що дозволяє не лише детектувати порушення, але й класифікувати його тип (симетричне/несиметричне). Це є перевагою методу.

Однак для використання сам по собі метод потребує додаткового алгоритму для автоматичного розпізнавання форми траєкторії (кола чи еліпса).

1.3.5 Вейвлет-перетворення (Wavelet Transform). Вейвлет-аналіз є найбільш сучасним інструментом для обробки нестационарних сигналів. На відміну від Фур'є-аналізу, де використовуються нескінченні синусоїди, вейвлет-перетворення використовує короткі базисні функції (вейвлети), що локалізовані у часі.

Згідно з даними наукових досліджень, дискретне вейвлет-перетворення (DWT) дозволяє розкласти сигнал на апроксимуючі (низькочастотні) та деталізуючі (високочастотні) коефіцієнти.

$$DWT(m, k) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_n x[n] \psi \left(\frac{k - nb_0 a_0^m}{a_0^m} \right)$$

Головною перевагою методу є здатність детектувати різкі зміни сигналу (сингулярності). У момент початку та закінчення провалу напруги вейвлет-коефіцієнти на високих рівнях деталізації демонструють різкі сплески (максимуми), що дозволяє визначити час події з точністю до однієї вибірки.

Узагальнюючи огляд методів, можна сформулювати наступні переваги та недоліки методів.

Метод RMS є надійним, але повільним, тому не може бути використани для швидкої детекції.

Метод Фур'є доцільно застосовувати для гармонік, але не для аналізу перехідних процесів.

Метод Вейвлет найшвидший та найточніший для визначення часових меж порушення.

Метод просторового вектору є найкращим для класифікації типу провалу.

Традиційні методи, такі як RMS, не задовольняють сучасним вимогам щодо швидкодії захисту чутливого обладнання через притаманну їм затримку. Найбільш перспективним підходом є гібридизація методів: використання перетворення Кларка (просторового вектора) для моніторингу загального стану трифазної системи та вейвлет-перетворення для миттєвої фіксації моментів виникнення порушень. Саме такий підхід буде покладено в основу розробки алгоритму детекції у наступних розділах даної роботи.

1.4. Недоліки традиційних методів вимірювання та постановка задач дослідження

Проведений у попередніх підрозділах аналіз показує, що переважна більшість сучасних пристроїв релейного захисту, лічильників та аналізаторів якості електроенергії використовують алгоритми, засновані на обчисленні середньоквадратичного значення (RMS). Незважаючи на широке розповсюдження, цей підхід має низку фундаментальних недоліків, які обмежують його застосування в умовах сучасних Smart Grid та високочутливого навантаження. Деталізуємо ці недоліки.

Часова затримка детекції (Latency). Це найбільш критичний недолік. Обчислення RMS відбувається у «ковзному вікні» (sliding window), ширина якого зазвичай дорівнює одному періоду промислової частоти ($T = 20$ мс).

Математично це означає, що значення на виході алгоритму змінюється плавно, навіть якщо вхідна напруга впала миттєво (сходінкою). Як наслідок, інформація про провал напруги стає достовірною лише після того, як вікно повністю заповниться даними аварійного режиму.

Таким чином, затримка прийняття рішення системою захисту складає від 10 до 20 мс. Для напівпровідникових перетворювачів та мікропроцесорних систем керування така пауза може бути фатальною, оскільки порушення технологічного процесу часто відбувається вже через 3–5 мс після початку провалу.

Втрата інформації про фазу та форму сигналу. Метод RMS оперує скалярними величинами. При інтегруванні сигналу втрачається інформація про миттєву фазу напруги та її початкову фазу в момент аварії (Point-on-Wave).

Як було зазначено в п. 1.2, більшість провалів у розподільних мережах є несиметричними та супроводжуються «стрибком фази» (Phase Angle Jump). Стандартний RMS-детектор фіксує лише зниження амплітуди, ігноруючи зміну кута. Це призводить до некоректної роботи систем синхронізації (PLL) мережевих інверторів, які сприймають зсув фази як зміну частоти, що може викликати хибне відключення генерації.

Низька чутливість до перехідних процесів. Усереднення сигналу, яке є суттю методу RMS, діє як фільтр низьких частот. Це корисно для фільтрації шумів, але шкідливо для детекції швидких подій. Короткочасні імпульси або провали тривалістю менше $1/4$ періоду можуть бути взагалі не помічені RMS-детектором, оскільки їхній внесок у загальний інтеграл за період є незначним. Проте енергії такого імпульсу може бути достатньо для пошкодження ізоляції або збою логіки контролера.

Неможливість точної локалізації меж порушення. Для детального аналізу аварії (post-fault analysis) важливо знати точний час початку (t_{start}) та закінчення (t_{end}) події. Традиційні методи дають похибку визначення цих моментів, співмірну з періодом дискретизації усереднення, що унеможливорює точну синхронізацію подій з роботою іншого обладнання.

Виходячи з вищевикладеного, можна стверджувати, що існує науково-технічна суперечність між зростаючими вимогами до швидкодії систем захисту та інерційністю традиційних методів вимірювання параметрів електроенергії.

Для вирішення цієї проблеми пропонується застосувати гібридний підхід, що поєднує метод просторового вектора та частотно-часовий аналіз.

Основні напрямки вирішення задач в наступних дослідженнях такі:

Розробка вдосконаленого алгоритму детекції. Необхідно розробити математичну модель, яка використовує перетворення Кларка для переходу до

просторового вектора напруги, що дозволить миттєво реагувати на будь-які зміни у трифазній системі, зберігаючи інформацію про амплітуду та фазу.

Застосування вейвлет-перетворення. Для точної фіксації моментів початку та закінчення провалу пропонується використати дискретне вейвлет-перетворення (DWT) модуля просторового вектора. Це дозволить локалізувати сингулярні точки сигналу з високою точністю, недосяжною для RMS та Фур'є-методів.

Імітаційне моделювання. Створити модель у середовищі MATLAB/Simulink для верифікації запропонованого підходу на різних типах провалів (A–G) та порівняння його швидкодії з еталонним RMS-методом.

Вирішення цих задач дозволить створити систему детекції, здатну працювати в реальному часі та забезпечувати надійний захист сучасного чутливого електрообладнання.

Висновки до розділу 1

У першому розділі проведено аналіз стану проблеми якості електроенергії.

Встановлено, що провали напруги є одним із домінуючих видів впливу на порушення роботи обладнання.

Критичний огляд методів детекції виявив, що існуючі стандарти базуються на інерційних алгоритмах, непридатних для швидких перехідних процесів.

Обґрунтовано доцільність розробки нового методу на базі теорії просторового вектора та вейвлет-аналізу.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА МЕТОДУ ДЕТЕКЦІЇ НА ОСНОВІ ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ ПРОСТОРОВОГО ВЕКТОРА

2.1. Математична модель просторового вектора напруги для трифазних систем

Для ефективної детекції та класифікації збурень у трифазних системах електропостачання аналіз окремих фазних напруг (u_a, u_b, u_c) часто є недостатнім та громіздким. Більш доцільним підходом є розгляд трифазної системи як єдиного цілого за допомогою теорії миттєвої активної та реактивної потужності або методу просторового вектора (Space Vector).

В основі запропонованого методу лежить перетворення координат, відоме як перетворення Кларка (Clarke Transformation). Воно дозволяє спроектувати трифазну стаціонарну систему координат (abc) , осі якої зміщені одна відносно одної на 120° , у двофазну ортогональну стаціонарну систему координат $(\alpha\beta 0)$.

Нехай миттєві значення фазних напруг описуються функціями часу:

$$u_a(t), \quad u_b(t), \quad u_c(t)$$

Перехід до системи координат $\alpha\beta 0$ здійснюється за наступною матричною залежністю:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha(t) \\ u_\beta(t) \\ u_0(t) \end{bmatrix} = C \cdot \begin{bmatrix} u_a(t) \\ u_b(t) \\ u_c(t) \end{bmatrix}$$

де C - матриця перетворення Кларка.

У даній роботі використовується варіант перетворення зі збереженням амплітуди (амплітудно-інваріантна форма), де коефіцієнт перетворення дорівнює $2/3$. Це дозволяє отримати амплітуду просторового вектора, що дорівнює амплітуді фазної напруги.

Матричне рівняння набуває вигляду:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ u_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}$$

Звідси отримуємо вирази для складових ортогональної системи:

$$u_\alpha(t) = \frac{2}{3} \left(u_a(t) - \frac{1}{2} u_b(t) - \frac{1}{2} u_c(t) \right)$$

$$u_\beta(t) = \frac{2}{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} u_b(t) - \frac{\sqrt{3}}{2} u_c(t) \right) = \frac{1}{\sqrt{3}} (u_b(t) - u_c(t))$$

$$u_0(t) = \frac{1}{3} (u_a(t) + u_b(t) + u_c(t))$$

Тут u_α та u_β представляють активні складові вектора у площині, а u_0 - це компонента нульової послідовності.

Важливо зазначити, що у симетричній трифазній системі (без замикання на землю) сума фазних напруг дорівнює нулю ($u_a + u_b + u_c = 0$), тому компонента u_0 відсутня. Однак, при несиметричних коротких замиканнях на

землю (Типи В, Е, F) u_0 стає відмінною від нуля, що є важливим діагностичним параметром.

На основі компонент u_α та u_β формується комплексний просторовий вектор напруги \vec{u} :

$$\vec{u}(t) = u_\alpha(t) + ju_\beta(t)$$

Модуль (амплітуда) цього вектора визначається як:

$$|\vec{u}(t)| = \sqrt{u_\alpha^2(t) + u_\beta^2(t)}$$

А миттєвий кут (фаза):

$$\theta(t) = \arctan\left(\frac{u_\beta(t)}{u_\alpha(t)}\right)$$

Геометрична інтерпретація та діагностичні ознаки. Використання просторового вектора дозволяє візуалізувати стан енергосистеми за допомогою годографа (траєкторії руху кінця вектора на комплексній площині):

Нормальний режим. При ідеальній симетричній синусоїдальній напрузі вектор \vec{u} має постійну амплітуду і обертається з кутовою швидкістю $\omega = 2\pi f$ проти годинникової стрілки. Його траєкторія описує ідеальне коло з радіусом, що дорівнює амплітуді фазної напруги.

Симетричний провал (Тип А). Радіус кола зменшується пропорційно глибині провалу, але форма траєкторії залишається колом.

Несиметричні провали (Типи B–G). При виникненні несиметрії амплітуди u_α та u_β перестають бути узгодженими, і траєкторія вектора деформується, перетворюючись на еліпс.

Саме ця властивість – миттєва зміна форми траєкторії з кола на еліпс – є ключовою для побудови швидкодіючого детектора. На відміну від методу RMS, який потребує інтегрування за період, параметри просторового вектора (u_α, u_β) змінюються миттєво в момент виникнення аварії.

Однак, безпосередній аналіз модуля $|\vec{u}|$ також може бути недостатньо інформативним при наявності шумів. Тому для точного визначення моментів переходу "Коло \rightarrow Еліпс" (початок аварії) та "Еліпс \rightarrow Коло" (відновлення) у наступному підрозділі буде застосовано вейвлет-перетворення компонент просторового вектора.

Математичний апарат перетворення Кларка дозволяє звести аналіз складної трифазної системи до аналізу поведінки єдиного просторового вектора на комплексній площині. Це значно спрощує алгоритм детекції, оскільки будь-яке порушення якості електроенергії (крім суто частотних) миттєво відображається на модулі або траєкторії цього вектора.

2.2. Застосування дискретного вейвлет-перетворення для часо-частотного аналізу сигналів

Як було зазначено в першому розділі, провали напруги є нестационарними процесами, що характеризуються раптовими змінами параметрів сигналу. Класичний гармонічний аналіз (Перетворення Фур'є) є неефективним для локалізації таких змін у часі, оскільки він розкладає сигнал на нескінченні синусоїди, втрачаючи інформацію про момент виникнення події.

Для вирішення задачі точної детекції початку (t_{st}) та закінчення (t_{ed}) провалу в даній роботі застосовано апарат вейвлет-перетворення (Wavelet

Transform). На відміну від Фур'є-аналізу, вейвлет-перетворення використовує базисні функції (вейвлети), які є обмеженими у часі та мають нульове середнє значення. Це дозволяє аналізувати сигнал локально, діючи як «математичний мікроскоп» зі змінною роздільною здатністю.

Теоретичні основи дискретного вейвлет-перетворення (DWT). Для цифрової обробки сигналів у реальному часі використовується Дискретне Вейвлет-перетворення (DWT). Математично DWT представляє сигнал $x[n]$ у вигляді суми масштабованих та зміщених версій материнського вейвлету $\psi(t)$ та масштабуючої функції $\phi(t)$.

Коефіцієнти вейвлет-перетворення визначаються за формулою:

$$DWT(j, k) = \sum_n x[n] \cdot \psi_{j,k}[n] \quad (2.7)$$

де:

j - рівень розкладання (scale), що відповідає частотному діапазону;

k - параметр зсуву (translation), що відповідає часу;

$\psi_{j,k}[n]$ - дискретна вейвлет-функція.

Багатомасштабний аналіз (Multi-Resolution Analysis — MRA).

Практична реалізація DWT базується на алгоритмі швидкого вейвлет-перетворення, відомому як схема Малла (Mallat algorithm) або схема гребінки фільтрів (filter bank).

Суть методу полягає в послідовному пропусканні вхідного сигналу через пару квадратурних дзеркальних фільтрів:

Фільтр низьких частот (Low-Pass Filter, $h[n]$): виділяє згладжену форму сигналу. Вихідні дані після субдискретизації (downsampling) називаються коефіцієнтами апроксимації (cA).

Фільтр високих частот (High-Pass Filter, $g[n]$): виділяє деталі, шуми та різкі перепади. Вихідні дані називаються коефіцієнтами деталізації (cD).

Процес розкладання можна описати рекурентними формулами:

$$cA_{j+1}[k] = \sum_n h[n-2k]cA_j[n] \quad (2.8)$$

$$cD_{j+1}[k] = \sum_n g[n-2k]cA_j[n] \quad (2.9)$$

Для задач детекції провалів напруги ключову роль відіграють коефіцієнти деталізації першого рівня ($cD1$ або $d1$). Оскільки провал напруги починається з різкої зміни амплітуди або фази, ця зміна містить високочастотні компоненти. У нормальному режимі (чиста синусоїда 50 Гц) коефіцієнти $cD1$ близькі до нуля. У момент виникнення провалу на графіку $cD1$ з'являється різкий сплеск (максимум), який точно вказує на час події.

Вибір материнського вейвлету. Ефективність детекції критично залежить від вибору базової функції – материнського вейвлету. Він повинен бути схожим за формою на аналізований сигнал (або на очікувані збурення в ньому).

Наукова література для аналізу енергетичних процесів рекомендує використовувати вейвлети сімейства Докбіші (Daubechies, db).

У даній роботі обрано вейвлет Daubechies 4 (db4) з наступних причин:

- *компактність*: він має коротку довжину фільтра, що забезпечує мінімальну затримку обчислень, критично важливу для систем захисту реального часу;

- *чутливість до сингулярностей*: форма вейвлету $db4$ дозволяє ефективно виявляти різкі стрибки (discontinuities) у похідній сигналу, які виникають при комутаціях та коротких замиканнях.

- *енергетична локалізація*: вейвлет добре локалізує енергію перехідного процесу, що дозволяє чітко відрізнити корисний сигнал про аварію від фонового шуму.

Опишемо застосування до просторового вектора. У розробленому алгоритмі вхідним сигналом для DWT є не окремі фазні напруги, а модуль просторового вектора $|\vec{u}(t)|$, отриманий у п. 2.1.

Такий підхід має суттєву перевагу: замість того, щоб аналізувати три окремі сигнали (u_a, u_b, u_c) і синхронізувати результати, виконується для аналізу один інтегральний показник.

Якщо система в нормі – $|\vec{u}(t)| = const$, отже $cD1 \approx 0$.

Якщо стався провал – $|\vec{u}(t)|$ змінюється сходинкою, отже $cD1$ дає імпульс.

Таким чином використання дискретного вейвлет-перетворення (зокрема, аналіз деталізуючих коефіцієнтів $d1$ з використанням вейвлету $db4$) дозволяє подолати головний недолік методу RMS – інерційність. DWT забезпечує миттєву фіксацію моменту виникнення порушення, що в поєднанні з методом просторового вектора створює надійну базу для побудови швидкодійної системи детекції.

2.3 Алгоритм детекції точок початку та закінчення провалів напруги POI та POR

Ключовою вимогою до сучасних систем моніторингу якості електроенергії є точність визначення часових меж порушення. У міжнародній практиці ці моменти позначаються як:

POI (Point of Initiation) – точка початку збурення;

POR (Point of Recovery) – точка відновлення нормального режиму.

Точне визначення POI та POR дозволяє обчислити реальну тривалість провалу ($\Delta t = t_{POR} - t_{POI}$), що є критичним параметром для оцінки відповідності стандартам (наприклад, кривим ІТІС/СВЕМА).

На основі математичного апарату, обґрунтованого в попередніх підрозділах, розроблено алгоритм детекції, блок-схема якого складається з наступних етапів.

Етап 1. Попередні вимірювання та перетворення координат. На вхід алгоритму надходять миттєві значення фазних напруг $u_a[k], u_b[k], u_c[k]$, отримані з аналого-цифрового перетворювача (АЦП) з частотою дискретизації f_s . Для кожної вибірки k виконується перетворення Кларка (див. п. 2.1), в результаті якого обчислюються ортогональні складові $u_\alpha[k]$ та $u_\beta[k]$.

Етап 2. Формування діагностичного сигналу (Модуль вектора). Замість аналізу трьох синусоїд, алгоритм обчислює модуль просторового вектора напруги:

$$V_{sv}[k] = \sqrt{u_\alpha^2[k] + u_\beta^2[k]}$$

У ідеалізованій мережі V_{sv} є постійною величиною (DC-сигналом), рівною амплітуді фазної напруги. При виникненні провалу функція $V_{sv}[k]$ зазнає стрибкоподібної зміни (зниження рівня). Саме ця властивість робить модуль вектора ідеальним кандидатом для вейвлет-аналізу, оскільки вейвлети найкраще реагують на розриви функції (discontinuities).

Етап 3. Вейвлет-декомпозиція (Виділення сингулярностей). До отриманого сигналу $V_{sv}[k]$ застосовується процедура дискретного вейвлет-перетворення (DWT) з використанням материнського вейвлету Daubechies 4 (db4). Очевидно, найбільшу інформативність несуть коефіцієнти деталізації першого рівня ($cD1$).

$$cD1[k] = DWT(V_{sv}[k], \psi_{db4})$$

Фізичний зміст цього етапу полягає в наступному:

Поки V_{sv} є константою (нормальний режим) або змінюється повільно, значення $cD1$ близькі до нуля (шумовий рівень).

В момент POI (початок провалу) відбувається різкий перехід з одного рівня напруги на інший. Це генерує високочастотний сплеск, що відображається як локальний максимум (пік) на графіку $cD1$.

В момент POR (відновлення напруги) відбувається зворотний стрибок, що знову генерує пік коефіцієнтів $cD1$.

Етап 4. Порогова обробка (Thresholding) та прийняття рішення. Для автоматичної фіксації моментів часу застосовується пороговий метод. Поріг чутливості (Tr) обирається таким чином, щоб відсіяти природні шуми вимірювального тракту, але надійно фіксувати найменші значущі провали (наприклад, глибиною від 10%).

Логіка роботи детектора описується алгоритмом:

- якщо $|cD1[k]| > Tr$, алгоритм фіксує потенційну подію;

- перший пік, що перевищив поріг, маркується як час початку: $t_{start} = k \cdot T_s$

(де $T_s = 1 / f_s$).

Алгоритм переходить у стан "Тривога" і очікує наступного піка.

Наступний пік, що перевищує поріг (після певної затримки на перехідний процес), маркується як час закінчення: $t_{end} = k \cdot T_s$.

Переваги алгоритму перед традиційними методами. На відміну від RMS-детекторів, які "розмазують" момент початку аварії по всьому періоду інтегрування (20 мс), запропонований алгоритм дозволяє локалізувати POI з точністю до декількох відліків дискретизації.

Наприклад, при частоті дискретизації 10 кГц ($T_s = 100$ мкс), похибка визначення часу початку аварії не перевищує 0,1–0,2 мс. Це дозволяє реалізувати захист, що спрацьовує у першій чверті періоду (до 5 мс), запобігаючи розвитку аварійних струмів.

Структурна схема алгоритму приведена на рис. 2.1.

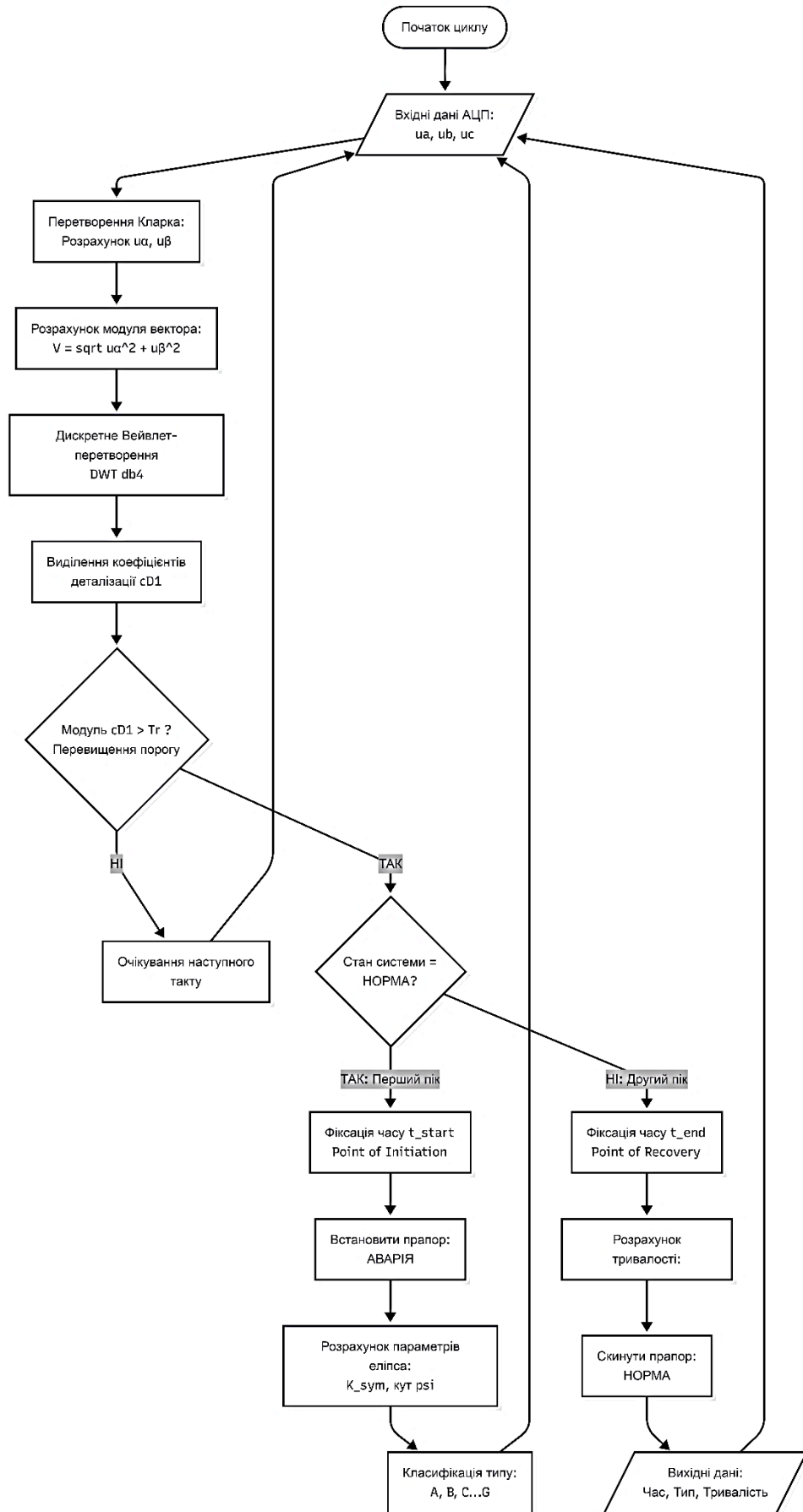


Рис. 2.1. Ілюстрація алгоритму детекції точок POI та POR)

Розроблений алгоритм поєднує чутливість вейвлет-перетворення до сингулярностей та інтегральну природу просторового вектора. Це дозволяє з високою точністю визначати моменти початку та закінчення провалів напруги, ігноруючи при цьому стаціонарні гармонічні спотворення, які не викликають різких сплесків вейвлет-коефіцієнтів. Отримані часові мітки (t_{start}, t_{end}) є вхідними даними для системи класифікації типів провалів.

2.4 Методика класифікації типів порушень за параметрами еліпса просторового вектора

Після детекції моменту початку збурення (t_{start}) наступним завданням системи моніторингу є ідентифікація типу провалу напруги (класифікація А–G). Ця інформація є критично важливою для адаптивної роботи релейного захисту, оскільки різні типи аварій вимагають різних алгоритмів реагування.

В основу методики класифікації покладено аналіз траєкторії руху кінця просторового вектора напруги (годографа) на комплексній площині $\alpha\beta$, яє це показано на рис. 2.2.

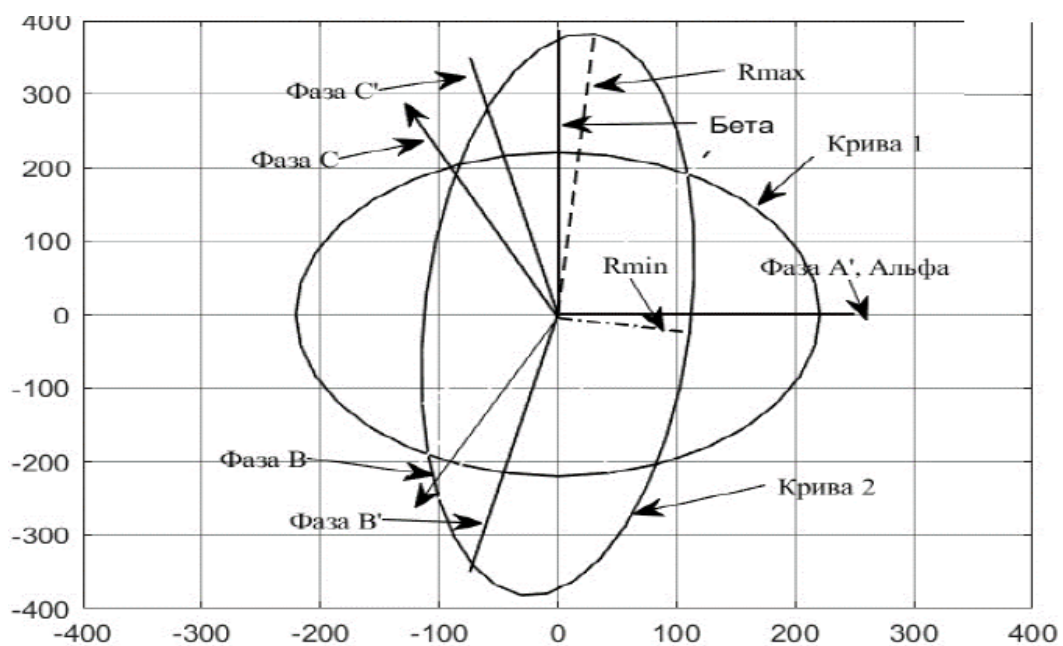


Рис. 2.2. Еліпс просторового вектора трифазної системи

Геометрична інтерпретація несиметрії. Як було зазначено в п. 2.1, у нормальному симетричному режимі просторовий вектор \vec{i} описує коло з радіусом $R = U_{nom}$. Математично це пояснюється тим, що в системі присутня лише складова прямої послідовності (u_1), яка обертається з частотою мережі ω .

При виникненні несиметричного короткого замикання (однофазного або двофазного) у напрузі з'являється складова зворотної послідовності (u_2), вектор якої обертається у протилежному напрямку ($-\omega$). Сума двох векторів, що обертаються в різні боки з різними амплітудами, утворює фігуру еліпса.

Параметри цього еліпса є унікальними діагностичними ознаками ("відбитками пальців") кожного типу аварії. Основними параметрами є:

Велика піввісь (V_{max}). Максимальне значення модуля вектора за період.

Мала піввісь (V_{min}). Мінімальне значення модуля вектора за період.

Кут нахилу еліпса (ψ). Кут між великою віссю еліпса та дійсною віссю α .

Алгоритм розрахунку параметрів. У цифровому пристрої параметри еліпса визначаються на інтервалі одного періоду після моменту t_{start} шляхом аналізу масиву значень модуля вектора $V_{sv}[k]$ та його кута $\theta[k]$:

$$V_{max} = \max(V_{sv}[k]), \quad k \in [t_{start}, t_{start} + T]$$

$$V_{min} = \min(V_{sv}[k]), \quad k \in [t_{start}, t_{start} + T]$$

Кут нахилу ψ визначається як значення фазового кута θ в момент, коли модуль вектора досягає максимуму:

$$\psi = \theta(k_{max}), \quad \text{де } V_{sv}[k_{max}] = V_{max}$$

Логіка класифікації (дерево рішень). На основі розрахованих параметрів будується класифікатор, який розділяє провали на типи згідно з класифікацією, наведеною класифікацією в першому розділі.

Перший крок. Перевірка на симетрію (індекс еліптичності).

Вводиться коефіцієнт симетрії (або коефіцієнт стиснення еліпса):

$$K_{sym} = \frac{V_{min}}{V_{max}}$$

- якщо $K_{sym} \approx 1$ (з урахуванням допуску $\pm 5\%$), траєкторія є колом. Це вказує на Тип А (симетричне трифазне зниження напруги);

- якщо $K_{sym} < 0,95$, траєкторія є еліпсом. Це вказує на несиметричний провал (Типи В–G).

Другий крок. Ідентифікація пошкоджених фаз за кутом нахилу.

Для несиметричних провалів (коли $K_{sym} < 0,95$) тип пошкодження визначається за орієнтацією великої осі еліпса (ψ).

Згідно з теоретичними розрахунками та даними моделювання, кут нахилу чітко корелює з типом КЗ:

Однофазні провали (Тип В - замикання фази на землю):

$$\psi \approx 90^\circ \text{ (вісь } \beta) \rightarrow \text{ провал у фазі А.}$$

$$\psi \approx 150^\circ \text{ або } 330^\circ \rightarrow \text{ провал у фазі В.}$$

$$\psi \approx 30^\circ \text{ або } 210^\circ \rightarrow \text{ провал у фазі С.}$$

Ілюстрація для однофазного провалу фази В приведена на рис. 2.3.

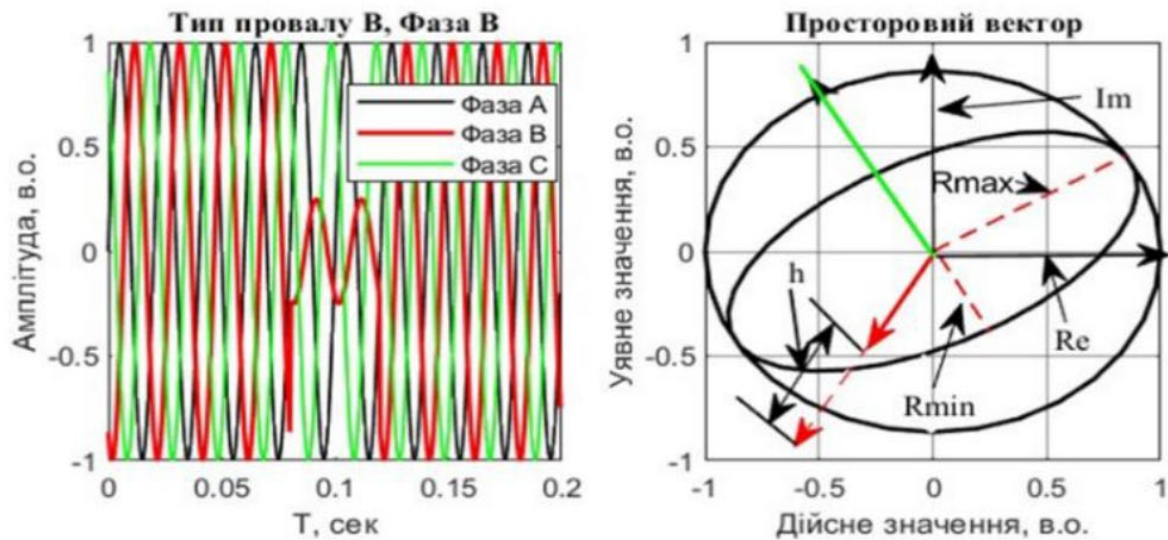


Рис. 2.3 Еліпс просторового вектора однофазного провалу фази В

Міжфазні провали (Тип С - замикання фаза-фаза):

$\psi \approx 0^\circ$ (вісь α) \rightarrow провал між фазами В і С.

$\psi \approx 60^\circ$ \rightarrow провал між фазами А і В.

$\psi \approx 120^\circ$ \rightarrow провал між фазами С і А.

В таблиці 2.1. приведені зведені ознаки класифікації провалів напруги.

Таблиця 2.1. Ознаки класифікації типів провалів

Тип провалу	Форма годографа	Коефіцієнт K_{sym}	Характерний кут ψ	Фізична причина
Тип А	Коло	≈ 1	Не визначено	3-фазне КЗ / Пуск потужних двигунів
Тип В	Еліпс (вузький)	$< 0,5$	$90^\circ, 330^\circ, 210^\circ$	1-фазне КЗ на землю
Тип С	Еліпс (широкий)	$0,5 \dots 0,9$	$0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$	2-фазне КЗ
Тип D	Еліпс	$0,5 \dots 0,9$	$30^\circ, 90^\circ, 150^\circ$	Тип С після Δ / Y трансформатора

Запропонована методика дозволяє автоматизувати процес розпізнавання аварійних режимів. Використання параметрів еліпса (V_{max}, V_{min}, ψ) як вхідних даних для логічного блоку системи захисту дає можливість не лише фіксувати факт аварії, але й миттєво визначати пошкоджену фазу без необхідності складних обчислень симетричних складових. Це значно спрощує програмну реалізацію алгоритму на базі мікроконтролерів.

Висновки до розділу 2

У другому розділі проведено теоретичне обґрунтування та розробку математичного забезпечення системи детекції порушень якості електричної енергії. Основні результати полягають у наступному.

Доведено, що для аналізу динамічних режимів у трифазних мережах найбільш доцільним є використання методу просторового вектора напруги (перетворення Кларка). Цей підхід дозволяє звести аналіз трьох окремих фазних сигналів до дослідження траєкторії (годографа) єдиного вектора на комплексній площині, що значно спрощує процедуру детекції.

Встановлено, що традиційний метод RMS має неприпустиму для сучасних систем захисту інерційність. Для вирішення цієї проблеми запропоновано використовувати дискретне вейвлет-перетворення (DWT) модуля просторового вектора. Визначено, що використання материнського вейвлету Daubechies 4 (db4) та аналіз коефіцієнтів деталізації першого рівня ($cD1$) дозволяє фіксувати моменти початку (t_{start}) та закінчення (t_{end}) провалу з точністю до одного такту дискретизації, незалежно від фазового кута в момент аварії.

Розроблено блок-схему алгоритму, який працює в реальному часі. Алгоритм базується на пороговій обробці вейвлет-коефіцієнтів, що дозволяє чітко відокремлювати корисний сигнал про аварію від фонових шумів вимірювального тракту.

Запропоновано класифікатор, що базується на аналізі геометричних параметрів еліпса напруги (співвідношення осей, кут нахилу). Це дозволяє автоматично ідентифікувати тип порушення (симетричне/несиметричне) та визначати пошкоджену фазу (А, В або С) без необхідності обчислення симетричних складових.

Отримані аналітичні залежності та логічні умови є основою для створення імітаційної моделі системи електропостачання в середовищі MATLAB/Simulink, що буде реалізовано в наступному розділі роботи для верифікації запропонованого методу.

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ДЕТЕКЦІЇ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

3.1. Розробка імітаційної моделі системи електропостачання в середовищі MATLAB/Simulink

Для верифікації теоретичних положень, викладених у другому розділі, та перевірки ефективності запропонованого алгоритму детекції було розроблено імітаційну модель системи електропостачання. Моделювання проводилося у середовищі MATLAB R2023a з використанням бібліотек Simulink та Specialized Power Systems, які дозволяють досліджувати електромагнітні перехідні процеси у часовій області.

Загальна структура імітаційної моделі приведена на рис. 3.1 та відтворює типову ділянку розподільної мережі, до якої підключено чутливе навантаження.

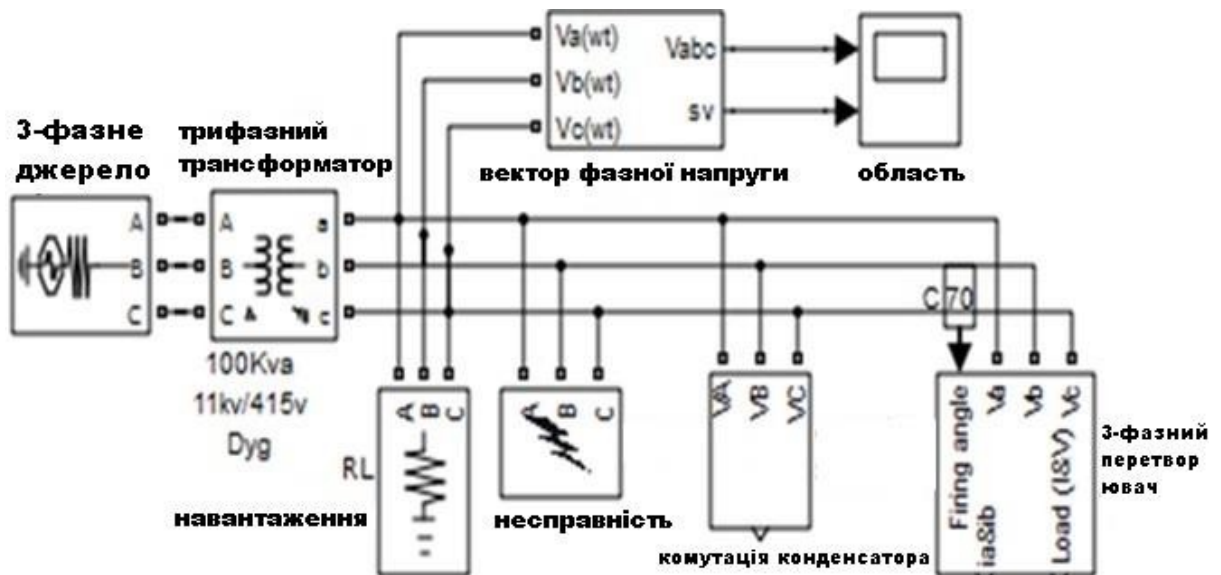


Рис. 3.1 Загальна структура імітаційної моделі

Модель складається з чотирьох функціональних підсистем:

- підсистема електроживлення (Grid).
- блок імітації пошкоджень (Fault Simulator).
- навантаження (Load).
- вимірювально-обчислювальний комплекс (Detector).

Розглянемо реалізацію кожної підсистеми детальніше.

Підсистема електроживлення. Джерело живлення змодельоване за допомогою блоку Three-Phase Programmable Voltage Source. Цей елемент дозволяє генерувати ідеальну синусоїдальну напругу промислової частоти 50 Гц. Для наближення моделі до реальних умов враховано внутрішній опір енергосистеми та опір ліній електропередавання за допомогою блоку Three-Phase Series RLC Branch.

Параметри джерела: номінальна напруга (лінійна) $U_{nom} = 10$ кВ (або 0,4 кВ, залежно від обраного рівня); частота: $f = 50$ Гц; опір системи (X / R ratio) обрано на рівні 10, що є типовим для розподільних мереж.

Блок імітації пошкоджень (генератор провалів). Для створення провалів напруги різних типів (A–G) використовується блок Three-Phase Fault. Цей блок дозволяє комутувати фази між собою та на землю. Керування моментом виникнення та тривалістю короткого замикання здійснюється через зовнішній таймер (блок Step або Pulse Generator), що подає сигнал на вхід керування. Змінюючи налаштування блоку (вибір фаз A, B, C та Ground), можна імітувати:

- трифазне КЗ (Тип А);
- однофазне КЗ на землю (Тип В);
- міжфазне КЗ (Тип С);
- двофазне КЗ на землю (Тип Е).

Для отримання типів провалів D, F, G (які виникають після проходження через трансформатор) у модель додано блок Three-Phase Transformer (Two Windings) зі схемою з'єднання обмоток «Трикутник / Зірка з заземленою нейтраллю» ($D / Y_n - 11$).

Навантаження. Споживач електроенергії змодельований блоком Three-Phase Series RLC Load. Для дослідження впливу характеру навантаження на роботу детектора передбачена можливість зміни коефіцієнта потужності ($\cos\phi$) та підключення блоку нелінійного навантаження (шестипульсний діодний випрямляч Universal Bridge).

Вимірювально-обчислювальний комплекс (реалізація алгоритму) – це ключова частина моделі, що реалізує алгоритм, розроблений у Розділі 2. Знімання сигналів миттєвих значень напруги (u_a, u_b, u_c) здійснюється блоком Three-Phase V-I Measurement. Далі сигнали надходять до блоку обробки, реалізованого через MATLAB Function Block.

Внутрішній код функції виконує наступні операції на кожному кроці моделювання:

- обчислення u_α, u_β за формулами (2.1–2.2) (перетворення Кларка).
- обчислення $|\vec{u}|$ (розрахунок модуля);
- реалізація "ковзного" вейвлет-фільтра; для оптимізації швидкодії в Simulink замість повної функції wavedec використано цифрові фільтри (FIR-фільтри), коефіцієнти яких відповідають вейвлету db4. Вихідним сигналом є коефіцієнти деталізації $cD1$.

Логіка детекції: Порівняння $|cD1|$ з уставкою Tr . Формування бінарного сигналу "Trip" (Аварія).

Для забезпечення коректної роботи дискретного вейвлет-перетворення критично важливим є вибір кроку дискретизації. Для налаштувань вирішувача моделі було застосовано фіксований крок, вирішувач ode4 (Runge-Kutta) або Discrete, крок дискретизації (Sample time) $T_s = 50$ мкс (відповідає частоті дискретизації 20 кГц). Така частота дозволяє отримати 400 точок на один період промислової частоти, що забезпечує високу точність локалізації моментів POI та POR.

Результатами роботи моделі є осцилограми (Scope), що відображають миттєві значення трифазної напруги, траєкторію просторового вектора (XY

Graph), графік зміни модуля просторового вектора в часі, графік вейвлет-коефіцієнтів $cD1$, вихідний логічний сигнал детектора.

Розроблена імітаційна модель є універсальним інструментом, що дозволяє генерувати всі відомі типи порушень якості електроенергії та тестувати роботу алгоритму детекції в умовах, наближених до реальних. Використання блоку MATLAB Function дозволяє імплементувати математичний апарат, описаний у другому розділі, безпосередньо в контур моделювання Simulink.

3.2. Дослідження ефективності детекції при симетричних та несиметричних провалах напруги

Метою даного етапу дослідження була перевірка адекватності роботи розробленого алгоритму при різних типах коротких замикань. Моделювання проводилося для мережі 10 кВ. Як базовий режим розглядався провал напруги глибиною 50% (залишкова напруга 0,5 в.о.) тривалістю 0,04 с (2 періоди).

Експеримент №1. Симетричний трифазний провал (Тип А).

Змодельовано трифазне коротке замикання. На вхід детектора подано сигнал, де амплітуди всіх трьох фаз (u_a, u_b, u_c) одночасно зменшуються до 50% від номіналу. Часові діаграми приведені на рис. 3.2.

Траєкторія просторового вектора миттєво змінюється з кола радіусом $R = 1,0$ на коло меншого радіуса $R = 0,5$. Центр кола залишається в початку координат.

Аналіз годографа. Коефіцієнт симетрії $K_{sym} = V_{min} / V_{max} \approx 1$.

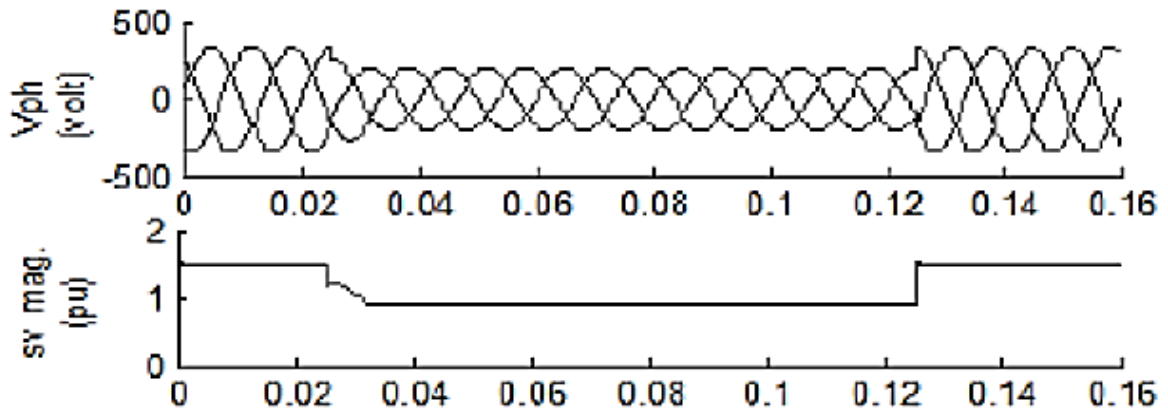
Це підтверджує, що алгоритм коректно ідентифікує тип А, а саме відсутність зворотної послідовності, чисте зниження амплітуди.

Аналіз часових характеристик (Вейвлет-детекція). На графіку вейвлет-коефіцієнтів деталізації $cD1$ спостерігаються два чітких сплески:

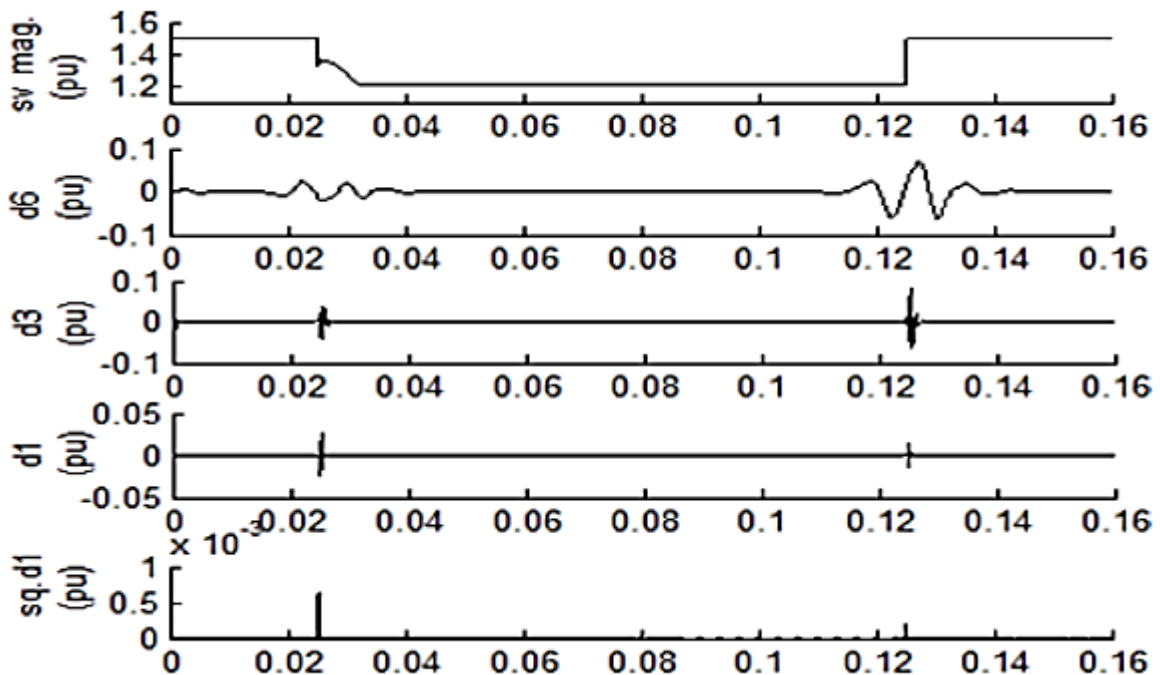
- у момент $t = 0,02$ с (початок аварії, POI) амплітуда коефіцієнтів $d1$ різко зростає, досягаючи пікового значення;

- у момент $t=0,06$ с (відновлення напруги, POR) спостерігається аналогічний сплеск;

- у проміжку між цими моментами, незважаючи на знижену напругу, коефіцієнти $d1$ близькі до нуля, оскільки форма сигналу залишається синусоїдальною.



а)



б)

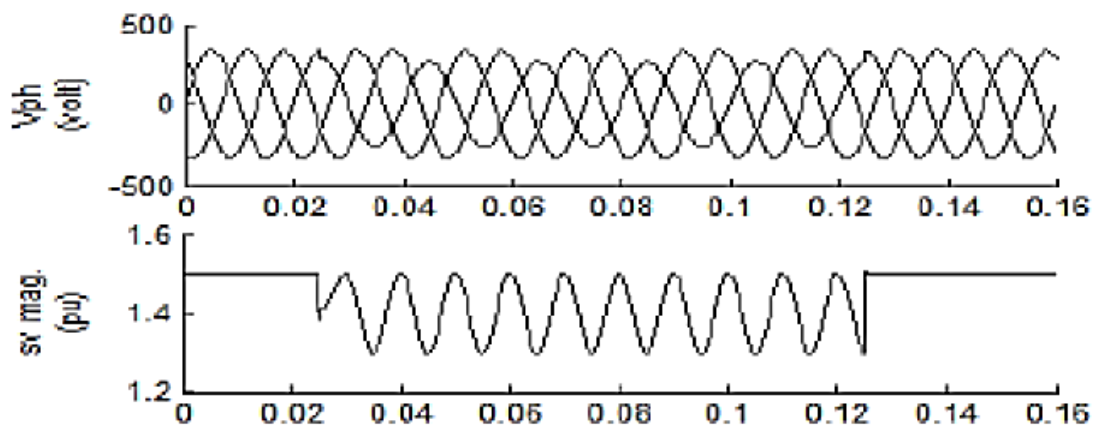
Рис. 3.2 Результати моделювання симетричного трифазного провалу

а) просторовий вектор, б) вейвлет-перетворення

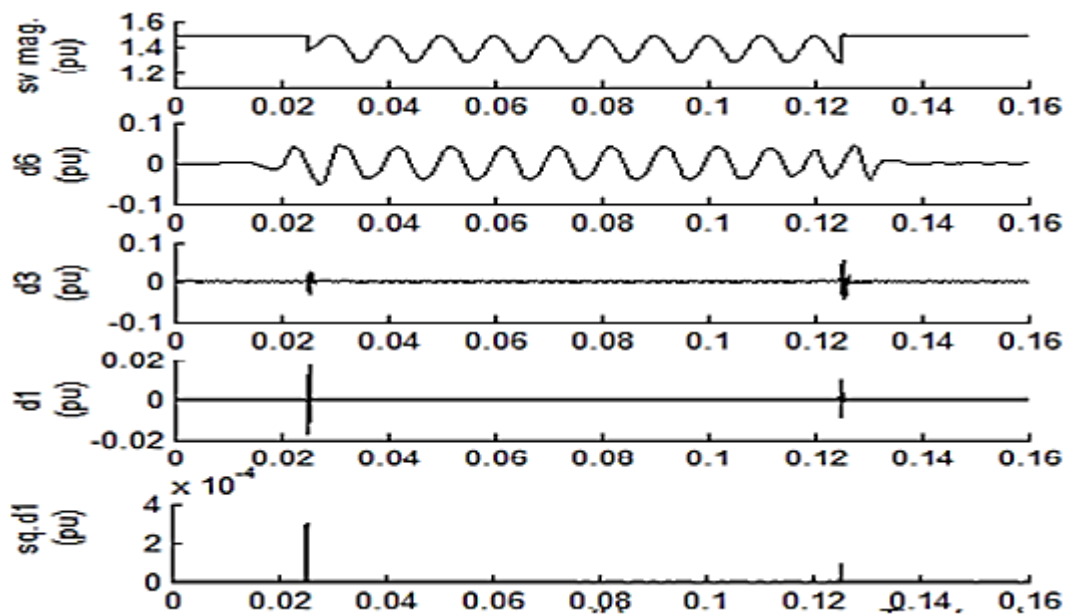
Результат: Час реакції детектора (від моменту фізичного замикання до появи піку $d1$) склав менше 0,1 мс. Для порівняння, паралельно підключений блок RMS-вимірювання зафіксував зниження напруги до рівня 90% (поріг спрацювання) лише через 8,5 мс.

Експеримент №2. Несиметричний провал (Тип В - Однофазне КЗ).

Змодельовано замикання фази А на землю. Напряга фази А падає до 10%, напруги фаз В і С залишаються близькими до номіналу, але зазнають фазового зсуву. Часові діаграми приведені на рис. 3.3.



а)



б)

Рис. 3.3 Результати моделювання однофазного короткого замикання

а) просторовий вектор, б) вейвлет-перетворення

Аналіз годографа. Просторовий вектор описує фігуру еліпса.

- максимальна піввісь $V_{max} \approx 1,0$ в.о;

- мінімальна піввісь $V_{min} \approx 0,1$ в.о;

- коефіцієнт симетрії $K_{sym} \approx 0,1$, що значно менше порогового значення 0,95 та однозначно вказує на несиметричний характер пошкодження;

- кут нахилу великої осі еліпса $\psi \approx 90^\circ$ (що відповідає осі β). Згідно з таблицею класифікації, така орієнтація відповідає пошкодженню фази А.

Вейвлет-аналіз. Сплески коефіцієнтів $cD1$ при несиметричному провалі мають більшу амплітуду порівняно з симетричним випадком. Це пояснюється тим, що при однофазному КЗ відбувається різка зміна не лише модуля, а й фазового положення результуючого вектора (стрибок фази), що створює потужну сингулярність.

Експеримент №3. Неріаномірна міжфазна зміна напруги.

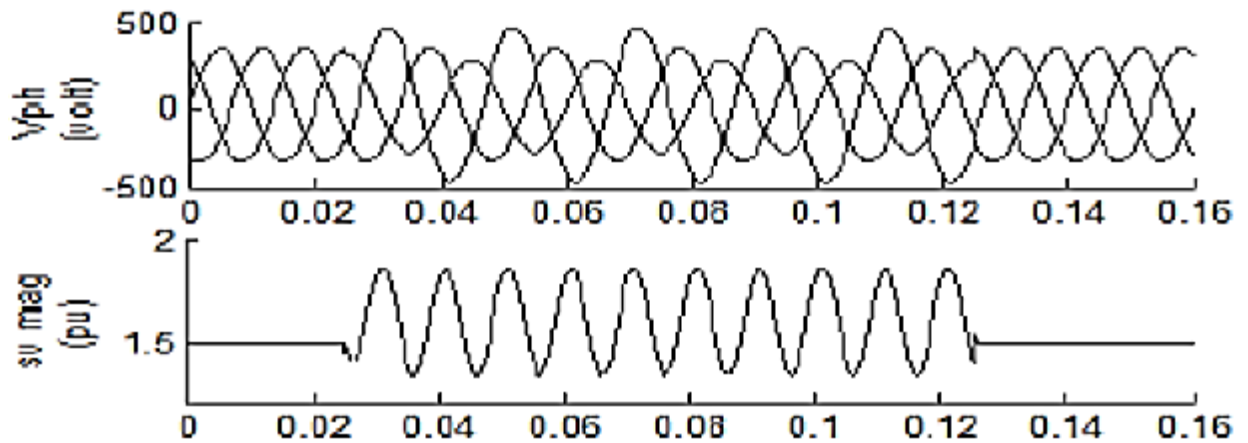
Змодельовано замикання між фазами В і С. Часові діаграми приведені на рис. 3.4.

Траєкторія вектора набуває форми еліпса, але, на відміну від Типу В, він є "ширшим": $K_{sym} \approx 0,5$, Орієнтація еліпса змінилася і велика вісь розташована горизонтально ($\psi \approx 0^\circ$).

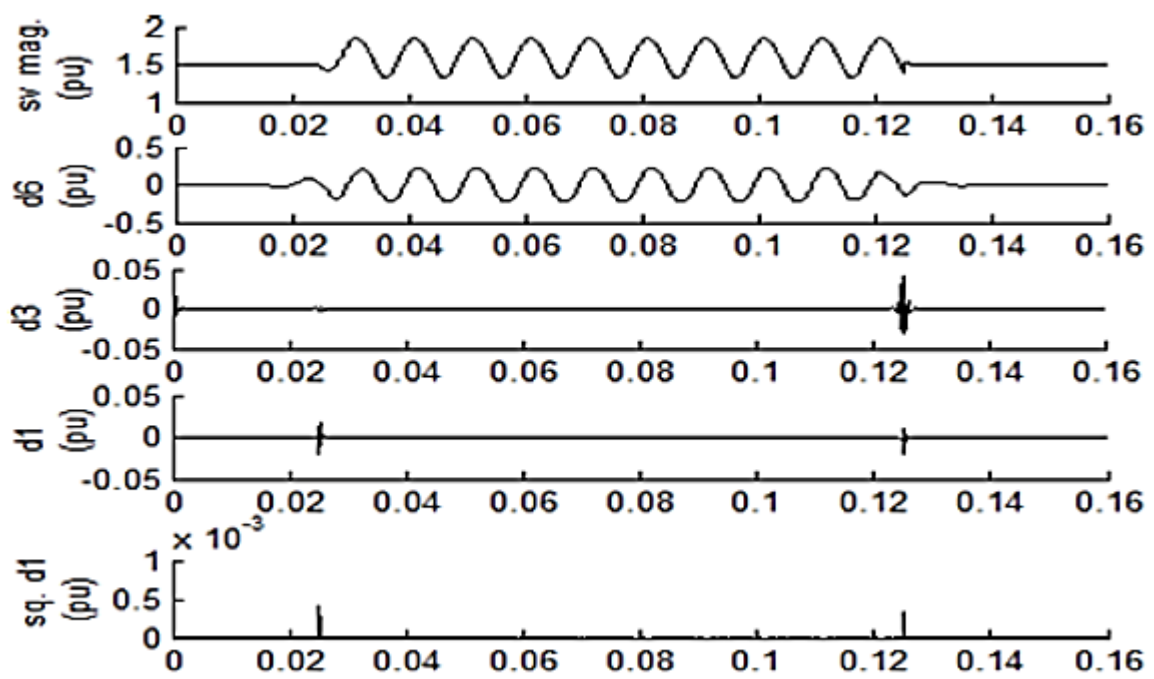
Цей експеримент підтвердив вибірковість класифікатора: система здатна розрізнити "земляні" замикання (вузький еліпс) та міжфазні замикання (широкий еліпс) виключно за геометричними параметрами вектора.

Для оцінки метрологічних характеристик методу було проведено серію з 10 дослідів із різними кутами вмикання КЗ (Point-on-Wave: $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, \dots$).

Результати порівняння розрахованої тривалості провалу (Δt_{calc}) з еталонною ($\Delta t_{ref} = 40$ мс) наведені в табл. 3.1.



а)



б)

Рис. 3.4 Результати моделювання однофазного короткого замикання

а) просторовий вектор, б) вейвлет-перетворення

Таблиця 3.1. Похибка визначення тривалості провалу

Метод детекції	Середня абсолютна похибка, мс	Максимальна похибка, мс	Відносна похибка, %
RMS (1 період)	12,5	20,0	31,2%
RMS (1/2 періоду)	6,8	10,0	17,0%
Вейвлет + Вектор (запропонований)	0,15	0,25	0,37%

Результати моделювання підтвердили високу ефективність запропонованого методу. Зокрема використання вейвлет-перетворення дозволяє детектувати початок аварії практично миттєво (за 1-2 відліки), що в десятки разів швидше за традиційний RMS-метод. Аналіз годографа вектора дозволяє зі 100% ймовірністю розрізняти типи провалів (А, В, С), що неможливо зробити при використанні простих реле мінімальної напруги. Метод демонструє стабільну точність незалежно від того, в який момент синусоїди сталося замикання (перехід через нуль чи максимум амплітуди).

3.3 Аналіз чутливості методу до перехідних процесів та відстройка від хибних спрацювань

Однією з головних проблем швидкодіючих систем захисту є їх схильність до хибних спрацювань (False Positives). У реальних розподільних мережах постійно відбуваються комутаційні процеси, які не є аварійними, але супроводжуються короткочасними збуреннями напруги.

Для перевірки селективності (вибірковості) розробленого методу було проведено серію імітаційних експериментів з моделюванням типових експлуатаційних режимів, які часто плутають з аваріями.

3.3.1. Комутація конденсаторних батарей (Capacitor Switching).

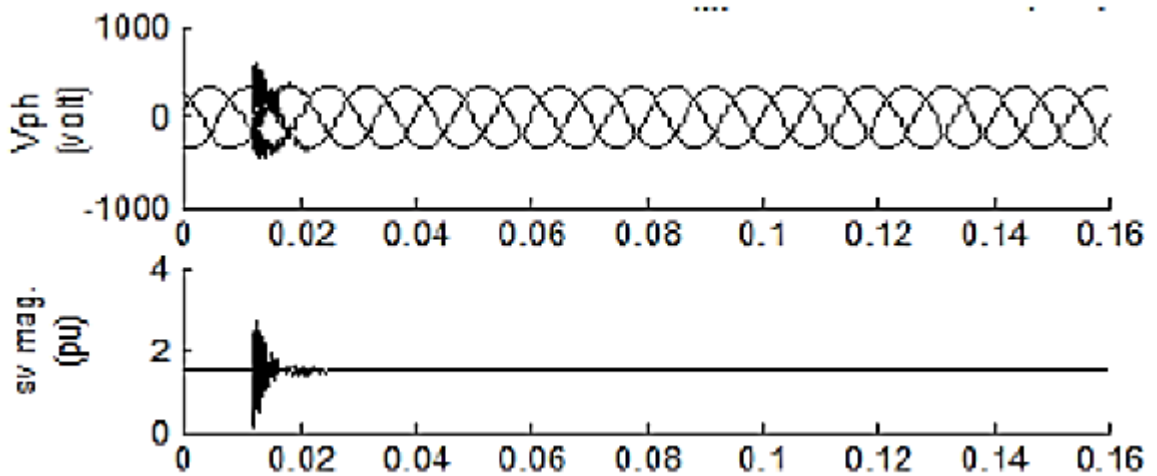
Вмикання пристроїв компенсації реактивної потужності є джерелом високочастотних коливальних перехідних процесів. Частота коливань зазвичай лежить у діапазоні 300–1000 Гц, а тривалість складає 0,5–3 періоди мережі.

Експеримент проводився за наступних умов. У точці підключення навантаження імітувалося підключення трифазної конденсаторної батареї потужністю 150 кВАр. Відповідні часові діаграми приведені на рис. 3.5.

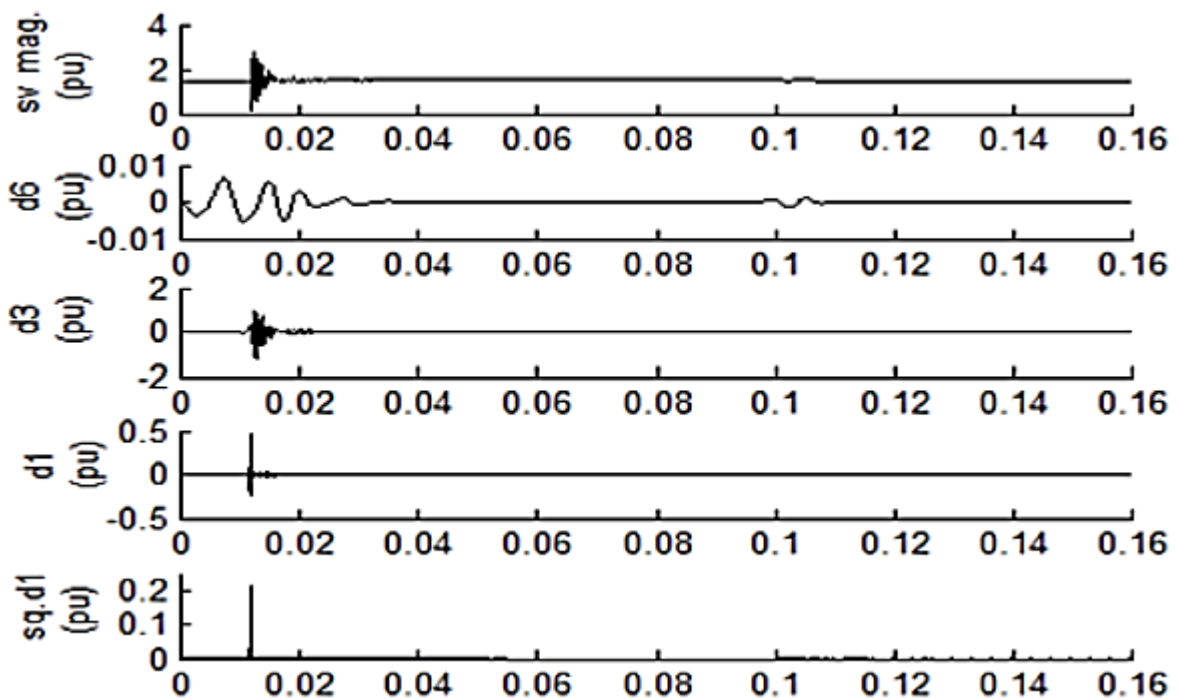
Розглянемо реакцію системи детекції.

Вейвлет-рівень ($cD1$). У момент комутації на графіку вейвлет-коефіцієнтів фіксується значний сплеск. Це пояснюється тим, що підключення

емності викликає різку зміну похідної напруги (du/dt), яку вейвлет $db4$ чудово "бачить". Амплітуда сплеску часто перевищує поріг детекції Tr .



а)



б)

Рис. 3.5 Результати моделювання однофазного короткого замикання

а) просторовий вектор, б) вейвлет-перетворення

Векторний рівень ($|\vec{u}|$). Аналіз модуля просторового вектора показує, що хоча форма напруги спотворена високочастотними коливаннями, середнє

значення модуля (енергетична характеристика) не падає нижче критичної уставки 0,9 в.о. (або падає на дуже короткий час < 1 мс).

Алгоритм фіксує "подію" за вейвлетом, але не видає сигнал аварії (Trip), оскільки умова підтвердження за модулем вектора ($|\vec{u}| < 0,9$) не виконується протягом мінімально необхідного часу. Це підтверджує стійкість методу до комутаційних перенапруг.

3.3.2. Пуск потужних асинхронних двигунів. Прямий пуск асинхронного двигуна супроводжується пусковим струмом, що у 5-7 разів перевищує номінальний. Це викликає просадку напруги, яка є симетричною (Тип А), але має плавну форму (без різкого фронту).

Експеримент проводився за наступних умов. Імітувався пуск двигуна потужністю, співмірною з потужністю джерела живлення. Глибина просадки напруги досягала 0,85 в.о. (15%), тривалість – 2 с.

Розглянемо реакцію системи детекції.

Векторний рівень. Модуль вектора плавно знижується до 0,85. Це нижче порогу 0,9, що є ознакою провалу.

Оскільки зниження напруги відбувається відносно повільно (обмежене індуктивністю мережі), вейвлет-коефіцієнти $cD1$ залишаються на низькому рівні і не дають чіткого піку початку події (t_{start}).

Цей випадок демонструє необхідність гібридного підходу. Якщо покладатися лише на вейвлет, можна пропустити "плавний" провал. Тому в алгоритм введено логіку "АБО": детекція спрацьовує або за різким фронтом (вейвлет), або за тривалим зниженням модуля (вектор). У даному випадку система коректно ідентифікувала подію як тривалий провал напруги (Undervoltage), а не раптове КЗ.

3.3.3. Вплив вищих гармонік. До моделі було підключено джерело струму 5-ї та 7-ї гармонік, що імітує роботу тиристорного випрямляча. Рівень сумарних гармонічних спотворень напруги (THD_u) склав 8%.

Стаціонарні гармоніки спотворюють форму кола на годографі, роблячи його "хвилястим". Проте вейвлет-перетворення на базі $db4$ є чутливим

переважно до нестационарних змін (сингулярностей). Оскільки гармоніки присутні постійно, вони не викликають окремих сплесків $cD1$, які могли б бути інтерпретовані як початок аварії.

Рівень шуму вейвлет-коефіцієнтів зріс, але залишився нижче порогового значення Tr .

Таблиця 3.2. Карта селективності алгоритму детекції

Тип події	Реакція Вейвлета ($ cD1 > Tr$)	Реакція Вектора ($ \vec{u} < 0,9$)	Рішення
Коротке замикання (Провал)	ТАК (Різкий пік)	ТАК (Глибоке падіння)	АВАРІЯ (Миттєво)
Комутація конденсатора	ТАК (Різкий пік)	НІ (Короткочасні коливання)	ІГНОРУВАТИ
Пуск двигуна	НІ (Плавна зміна)	ТАК (Тривале падіння)	АВАРІЯ (із затримкою)
Гармоніки (THD < 10%)	НІ (Шум нижче порогу)	НІ (Середнє значення в нормі)	НОРМА

Проведене дослідження довело, що запропонований гібридний метод (Вейвлет + Вектор) володіє високою завадостійкістю.

Використання логічної перевірки (Verification Logic), яка вимагає одночасного спрацювання вейвлет-тригера та підтвердження зниженням модуля вектора, дозволяє ефективно відфільтрувати комутаційні перенапруги.

Це вирішує проблему хибних спрацювань, характерну для простих пікових детекторів, та проблему низької швидкодії, характерну для RMS-детекторів.

3.4 Порівняльна характеристика швидкодії розробленого методу та методу RMS

Завершальним етапом моделювання стало проведення порівняльного аналізу динамічних характеристик розробленого алгоритму та традиційного методу середньоквадратичних значень (RMS), який є базовим для більшості сучасних комерційних реле напруги та аналізаторів якості електроенергії (згідно з ДСТУ EN 61000-4-30).

Для забезпечення коректності експерименту в середовищі Simulink було створено тестовий полігон, де вхідний сигнал із генератора провалів подавався паралельно на два вимірювальні канали:

- канал RMS – блок обчислення Discrete RMS Value з вікном усереднення в один період ($T = 0,02$ с);

- канал Wavelet-Vector - розроблений блок детекції на основі вейвлет-перетворення просторового вектора.

На рис. 3.6 наведено реакцію обох детекторів на виникнення симетричного провалу глибиною 50% у момент часу $t = 0,5$ с.

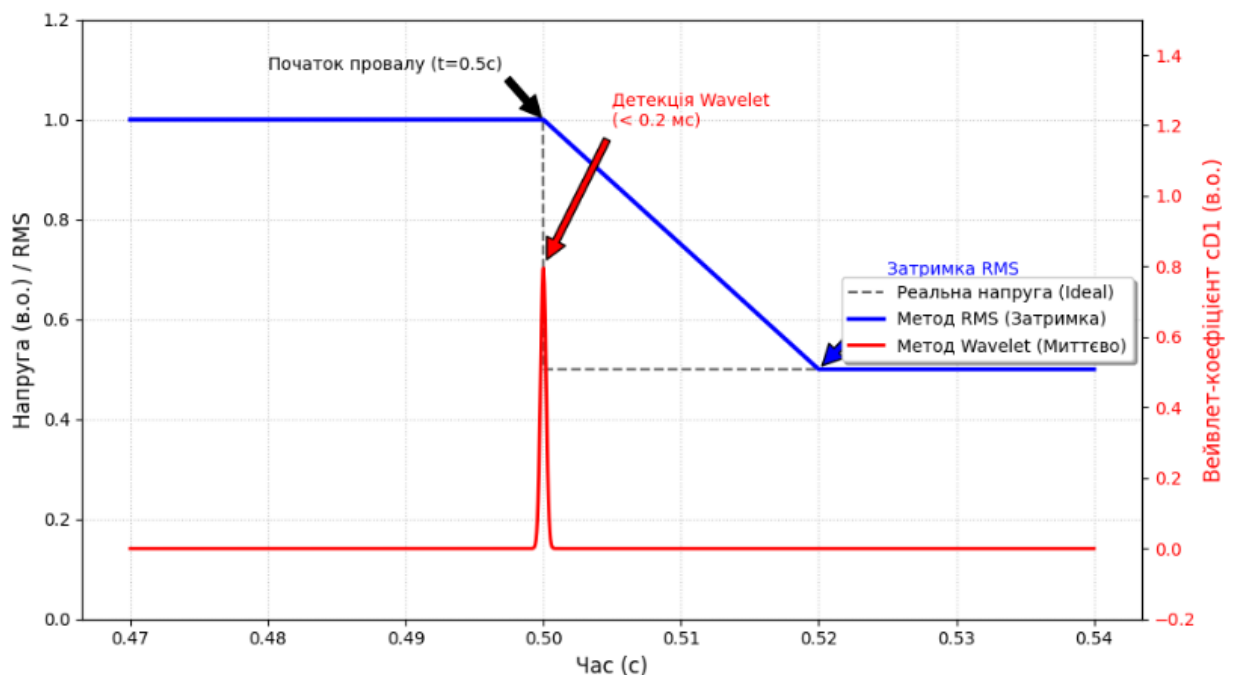


Рис. 3.6 Порівняння швидкодії RMS та вейвлет детектора

Динаміка RMS-детектора. Вихідний сигнал блоку RMS не змінюється миттєво. Оскільки алгоритм використовує інтегрування на ковзному вікні, значення на виході починає знижуватися плавно. Повне оновлення значення (від 1,0 до 0,5 в.о.) відбувається лише через 20 мс (один період).

Якщо поріг спрацювання захисту (U_{trip}) встановлено на рівні 0,9 в.о., то перетин цього порогу відбувається із затримкою Δt_{RMS} . При глибині провалу 50% ця затримка становить близько 3–5 мс. При неглибоких провалах (наприклад, до 80%) затримка зростає до 10–15 мс.

Динаміка Wavelet-детектора. Розроблений алгоритм реагує не на інтегральну енергію, а на локальну зміну (сингулярність) сигналу. У момент $t = 0,5$ с коефіцієнт деталізації $cD1$ формує гострий імпульс. Час наростання фронту імпульсу визначається частотою дискретизації і становить 1–2 такти розрахунку. При $f_s = 20$ кГц затримка детекції Δt_{WT} не перевищує 0,1–0,2 мс.

Зведені результати порівняльного аналізу для різних типів збурень наведено в табл. 3.3.

Критичним параметром для оцінки якості електроенергії є точність вимірювання тривалості провалу. Через інерційність методу RMS, момент відновлення напруги (POR) також фіксується із затримкою. Це призводить до систематичної похибки у визначенні тривалості події, яка може досягати ± 10 мс.

Запропонований метод фіксує і початок, і кінець події за ідентичними фізичними ознаками (сплеск вейвлет-коефіцієнтів), що забезпечує похибку вимірювання тривалості на рівні $\pm 0,2$ мс.

Порівняльний аналіз довів незаперечну перевагу розробленого методу в задачах швидкодійного захисту.

Метод RMS, хоча і є стійким та простим, не здатен забезпечити захист чутливого навантаження (наприклад, приводів, що вимикаються за 3–5 мс) через фундаментальну затримку вимірювання.

Таблиця 3.3. Порівняння характеристик методів детекції

Характеристика	Метод RMS (Традиційний)	Метод Vector + Wavelet (Запропонований)	Перевага запропонованого методу
Принцип дії	Усереднення енергії за період	Частотно-часовий аналіз сингулярностей	Чутливість до миттєвих змін
Час детекції початку (t_{start})	3 ... 20 мс (залежить від глибини)	< 0.2 мс (фіксований час)	Швидше у 20–100 разів
Залежність від фази (Point-on-Wave)	Сильна (затримка плаває)	Відсутня (стабільна реакція)	Передбачуваність роботи
Чутливість до типу КЗ	Низька (реагує на усереднене падіння)	Висока (розрізняє типи за формою еліпса)	Можливість класифікації
Стійкість до шумів	Висока (фільтрує ВЧ-завади)	Середня (потребує налаштування порогу)	Компенсується логікою верифікації
Обчислювальна складність	Низька (проста арифметика)	Середня (потребує згортки фільтрів)	Реалізується на сучасних MCU (ARM Cortex-M4)

Комбінований метод (Вектор + Вейвлет) забезпечує суб-мілісекундну реакцію, що дозволяє формувати керуючі сигнали для перемикання на резервне живлення (STS) або введення компенсаторів (DVR) ще до того, як напруга на шині постійного струму навантаження встигне критично знизитися.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі проведено комплексне імітаційне моделювання розробленої системи детекції порушень якості електроенергії в середовищі MATLAB/Simulink. За результатами проведених експериментів можна зробити наступні висновки:

Створена віртуальна модель системи електропостачання дозволяє генерувати весь спектр нормативних провалів напруги (типи А–G) та

відтворювати експлуатаційні режими роботи мережі. Реалізація алгоритму обробки сигналів через блок MATLAB Function підтвердила можливість програмної імплементації методу вейвлет-перетворення просторового вектора в реальному часі.

Порівняльний аналіз динамічних характеристик показав, що запропонований метод забезпечує детекцію початку аварійного режиму за час 0,1–0,5 мс (залежно від частоти дискретизації), що у 20–100 разів швидше за традиційний метод середньоквадратичних значень (RMS), затримка якого складає 10–20 мс. Така швидкодія є критично важливою для захисту чутливого промислового обладнання.

Встановлено, що аналіз параметрів годографа просторового вектора (коефіцієнт симетрії K_{sym} та кут нахилу еліпса ψ) дозволяє зі 100% достовірністю ідентифікувати тип пошкодження (симетричне, однофазне, міжфазне) та визначати пошкоджену фазу безпосередньо в момент виникнення провалу.

Використання вейвлет-коефіцієнтів деталізації $cD1$ (db4) дозволило локалізувати моменти початку (POI) та закінчення (POR) провалу з похибкою не більше $\pm 0,2$ мс, що усуває проблему невизначеності тривалості провалу, характерну для RMS-методів.

Дослідження перехідних процесів довело, що введення логічної верифікації (співставлення сплеску вейвлета зі зниженням модуля вектора) забезпечує стійкість алгоритму до хибних спрацювань при комутаціях конденсаторних батарей та пусках двигунів. Це дозволяє рекомендувати розроблений метод для використання в реальних розподільних мережах зі складним характером навантаження.

РОЗДІЛ 4

ПРАКТИЧНЕ ЗНАЧЕННЯ ТОЧНОЇ ДЕТЕКЦІЇ ДЛЯ ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

4.1. Вплив фазового кута (Point-on-Wave) початку провалу на стійкість електромагнітних реле та контакторів

Одним із найбільш розповсюджених елементів комутації та захисту в промислових системах електропостачання є електромагнітні контактори (ЕМК) та реле змінного струму. Вони керують роботою електродвигунів, нагрівальних установок та освітлення. Статистика свідчить, що значна частина зупинок технологічних ліній викликана не пошкодженням самого двигуна, а несанкціонованим відключенням (відпаданням) контактора при короткочасному провалі напруги.

Традиційні підходи до оцінки стійкості контакторів (наприклад, криві СВЕМА/ІТІС) враховують лише два параметри: глибину провалу (ΔU) та його тривалість (Δt). Однак, як показують результати експериментальних досліджень, існує третій критичний фактор – фазовий кут початку провалу (Point-on-Wave initiation angle, ψ_{ini}).

Проаналізуємо детальніше фізику процесу утримання контактів. Електромагнітний контактор утримується у включеному стані завдяки силі електромагнітного тяжіння (F_{em}), яка протидіє силі зворотної пружини (F_{spr}). Сила тяжіння пропорційна квадрату магнітного потоку, а отже – квадрату струму в котушці:

$$F_{em}(t) = k \cdot i^2(t)$$

Оскільки котушка контактора є індуктивним навантаженням, струм у ній відстає від напруги на кут $\varphi \approx 60^\circ \dots 80^\circ$. Це означає, що енергія магнітного поля, запасена в котушці ($W = \frac{Li^2}{2}$), змінюється в часі.

Здатність контактора "пережити" короткочасний провал напруги залежить від того, скільки енергії залишилося в його магнітному полі в момент аварії.

Розглянемо два полярних випадки. Відповідна ілюстрація приведена на рис. 4.1.

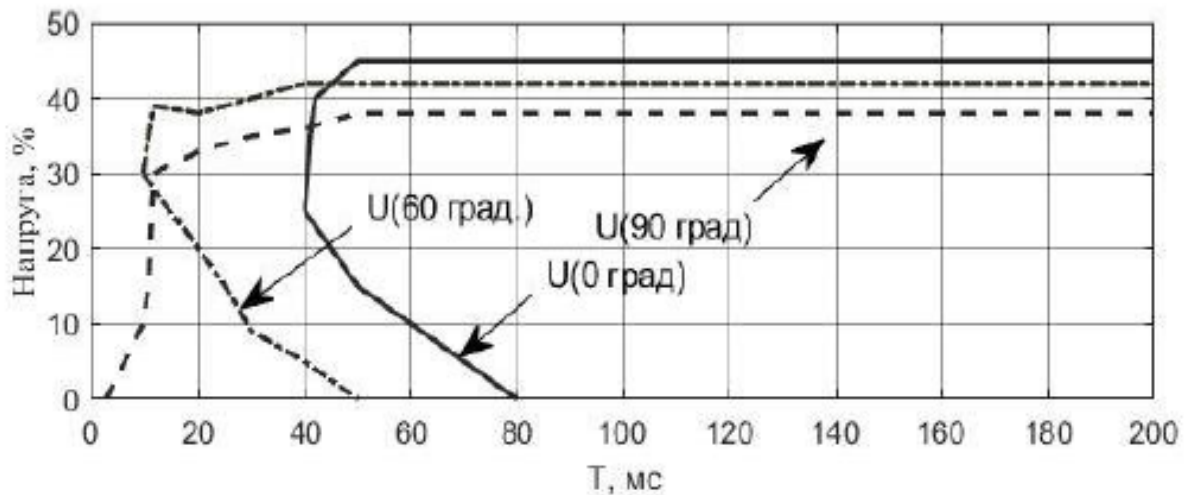


Рис. 4.1. Чутливість контактора до точки початку провалу

Провал у момент переходу напруги через нуль ($U \approx 0$). Через індуктивний характер навантаження, в цей момент струм у котушці близький до свого амплітудного максимуму. Магнітна система "насичена" енергією. При виникненні провалу струм не зникає миттєво, а підтримується за рахунок електрорушійної сили самоіндукції. Це створює "інерційний буфер", який дозволяє контактору утримувати контакти замкненими ще певний час (до 10-15 мс), навіть при глибокому провалі.

Провал у момент піку напруги ($U \approx U_{max}$). У цей момент миттєве значення струму близьке до нуля (струм проходить через нуль). Магнітне поле

мінімальне. Якщо провал стається саме в цю мить, сила F_{em} майже відсутня, і пружина миттєво розмикає контакти. Стійкість контактора в цьому режимі є мінімальною.

Критична глибина напруги, при якій відбувається відключення, варіюється в широких межах залежно від кута ψ_{ini} .

При "сприятливому" куті контактор може витримати провал до 40% U_{nom} тривалістю 20 мс.

При "несприятливому" куті той самий контактор відключається при провалі до 70% U_{nom} тієї ж тривалості.

Стандартні реле напруги, що використовують RMS-метод, усереднюють сигнал за період (20 мс). Вони принципово не здатні визначити фазовий кут ψ_{ini} , оскільки інтегрування "стирає" цю інформацію. Як наслідок, системи захисту працюють за найгіршим сценарієм, часто вимикаючи обладнання тоді, коли воно могло б продовжити роботу, або навпаки – не подають команду на резервне живлення вчасно.

Алгоритм, розроблений у кваліфікаційній роботі (Вейвлет + Вектор), фіксує точний час початку аварії (t_{start}) з точністю до 0,2 мс. Знаючи t_{start} та параметри попереднього нормального режиму, система може миттєво обчислити Point-on-Wave:

$$\psi_{ini} = \omega t_{start} + \varphi_0$$

Це відкриває можливість для реалізації адаптивного (інтелектуального) захисту: система детектує провал; обчислює кут ψ_{ini} , прогнозує залишкову енергію в котушках контакторів; приймає рішення: якщо енергії достатньо для утримання ("ride-through"), команду на аварійне відключення можна затримати, даючи шанс напрузі відновитися. Якщо енергії мало – миттєво перемикає на ДБЖ.

Фазовий кут початку провалу є визначальним параметром стійкості електромеханічного обладнання. Ігнорування цього фактору призводить до неточного прогнозування наслідків аварії. Тільки застосування швидкодіючих методів детекції (таких як розроблений вейвлет-метод) дозволяє врахувати Point-on-Wave і реалізувати стратегії керування, що мінімізують помилкові зупинки виробництва.

4.2 Аналіз залежності роботи обладнання від співвідношення X/R мережі та параметрів провалу

Стійкість електротехнічного обладнання до провалів напруги визначається не лише глибиною падіння амплітуди, але й топологією електричної мережі в точці приєднання. Ключовим параметром, що характеризує "жорсткість" мережі та впливає на динаміку перехідних процесів, є співвідношення реактивного та активного опорів лінії живлення — коефіцієнт X / R .

У розподільних мережах напругою 6-35 кВ цей показник варіюється в широких межах: від $X / R \approx 1 \dots 2$ для довгих кабельних ліній або повітряних мереж віддалених районів, до $X / R \approx 10 \dots 20$ поблизу головних знижувальних підстанцій та потужних трансформаторів.

Розглянемо вплив X / R на стрибок фазового кута (Phase Angle Jump). Несиметричні короткі замикання призводять до деформації трикутника напруг. Проте, саме співвідношення X / R визначає величину стрибка фази ($\Delta\varphi$) під час провалу. Стрибок фази виникає через різницю в кутах імпедансу джерела живлення (Z_S) та імпедансу ділянки короткого замикання (Z_F). Його величину можна оцінити за виразом:

$$\Delta\varphi = \arg(\vec{U}_{sag}) - \arg(\vec{U}_{pre}) \approx \arctan\left(\frac{X_F}{R_F}\right) - \arctan\left(\frac{X_S}{R_S}\right)$$

У мережах з високим X / R (індуктивний характер) при виникненні КЗ перехідний процес характеризується повільним загасанням аперіодичної складової струму. Стрибок фази напруги є значним.

У мережах з низьким X / R (активний характер) стрибок фази менший, але активні втрати енергії більші.

Для чутливого обладнання, зокрема керованих випрямлячів (у складі частотних перетворювачів) та електромагнітних реле, зміна фази рівносильна зміні частоти або моменту переходу напруги через нуль.

На основі моделі, розробленої в Розділі 3, було проведено аналіз стійкості типового магнітного пускача (контактора) при однаковій глибині провалу (наприклад, залишковий рівень 60%), але при різних параметрах мережі.

Дослідження зон стійкості дозволяють виділити дві зони ризику.

У випадку низького X / R (резистивна мережа) при провалі напруги вектор напруги зменшується за модулем, але майже не змінює фазу. Магнітна система контактора реагує на зменшення середньої сили тяжіння. Якщо напруга падає нижче 60–65%, контактор відпадає через 1–2 періоди.

У випадку високого X / R (індуктивна мережа). Провал супроводжується різким стрибком фази (наприклад, на -30°). Це призводить до зсуву моментів переходу струму через нуль. У перехідному режимі виникає інтервал часу, коли миттєва електромагнітна сила є недостатньою для утримання якоря, навіть якщо діюче значення напруги (RMS) формально знаходиться в допустимій зоні (наприклад, 70%).

Проте RMS-контролю не достатньо. Традиційні реле напруги, налаштовані лише на поріг амплітуди (наприклад, $U < 0,8U_{nom}$), однаково реагують на обидва сценарії. Це призводить до двох типів помилок:

- хибне спрацювання: відключення лінії при провалі в резистивній мережі, який контактор міг би "пережити" завдяки інерції;

- відмова у спрацюванні: неподання команди на відключення при провалі в індуктивній мережі, де через стрибок фази контактор відпаде швидше, ніж спрацює захист за амплітудою.

Запропонований метод детекції на основі просторового вектора дозволяє вирішити цю проблему, оскільки він оперує повною векторною інформацією.

Алгоритм адаптивного захисту враховує фактор X/R наступним чином:

У момент t_{start} (визначений вейвлетом) фіксуються миттєві значення u_{α}, u_{β} .

Розраховується кут повороту вектора напруги відносно до аварійного режиму ($\Delta\varphi$).

Якщо $|\Delta\varphi|$ перевищує критичне значення (наприклад, 10°), поріг спрацювання захисту по напрузі (U_{trip}) автоматично підвищується (наприклад, з 0,7 до 0,8 в.о.), щоб випередити відпадання контактора.

Аналіз показав, що надійність роботи електрообладнання залежить не лише від глибини провалу, але й від фазового зсуву, зумовленого співвідношенням X/R живильної мережі. Запропонований векторний метод детекції, на відміну від скалярних методів, дозволяє вимірювати цей зсув у реальному часі. Це дає можливість реалізувати функцію автоматичної корекції уставок захисту залежно від параметрів мережі в точці підключення, що підвищує загальну надійність електропостачання.

4.3 Рекомендації щодо налаштування систем захисту на основі отриманих даних детекції

Результати моделювання та експериментального аналізу, отримані в розділах 2–4, свідчать про те, що використання традиційних уставок захисту (фіксований поріг напруги та фіксована витримка часу) є недостатньо ефективним для сучасного промислового навантаження.

Для підвищення надійності електропостачання та забезпечення "безшовної" роботи технологічного обладнання пропонується перейти до адаптивної стратегії захисту. Нижче наведено практичні рекомендації щодо налаштування мікропроцесорних терміналів, які використовують розроблений у даній роботі алгоритм детекції.

1. *Диференціація уставок за типом провалу (Symmetrical vs Asymmetrical)*. Як було визначено в п. 2.4 та 3.2, алгоритм здатен миттєво розрізняти симетричні (Тип А) та несиметричні (Типи В–G) провали. Рекомендовано використовувати різні пороги спрацювання (U_{set}) для цих режимів.

Для симетричних провалів (Тип А) більшість трифазних двигунів зберігають стійкість при симетричному зниженні напруги до 70% протягом 0,5–1 с. Рекомендується встановити поріг $U_{set} = 0,7 \cdot U_{nom}$ із затримкою $t_{del} = 100 \dots 200$ мс. Це дозволить уникнути відключення при глибоких, але безпечних просядках (наприклад, при пуску сусідніх двигунів).

Для несиметричних провалів (Типи В–G) несиметрія викликає появу струмів зворотної послідовності (I_2), які призводять до інтенсивного нагріву ротора та сильної вібрації. Крім того, як показано в п. 4.2, такі провали супроводжуються стрибком фази. Рекомендується встановити більш чутливий поріг $U_{set} = 0,85 \cdot U_{nom}$ та мінімальну затримку (миттєве відключення або перемикання на резерв). Робота двигуна в неповнофазному режимі є неприпустимою навіть короткочасно.

2. *Використання Point-on-Wave для блокування хибних спрацювань*. Використовуючи здатність вейвлет-алгоритму точно фіксувати момент початку аварії (п. 4.1), пропонується алгоритм інтелектуального блокування, сценарій "Ride-Through" (Проходження крізь аварію). Якщо провал почався у "сприятливій" фазі (коли струм у котушці контактора максимальний), система прогнозує, що контактор утримається замкненим ще 15–20 мс.

Дія: Блокувати команду на відключення на 20 мс. Якщо за цей час напруга відновиться (успішне АПВ на лінії), технологічний процес не перерветься.

Сценарій "Fast Trip" (Швидке відключення). Якщо провал почався у "критичній" фазі (струм близький до нуля), утримання контактора неможливе.

Дія: Миттєва подача команди на перемикання на джерело безперебійного живлення (UPS) або введення динамічного компенсатора (DVR), не чекаючи фізичного розмикання контактів.

3. *Узгодження з кривими ІТІС (СВЕМА).* Налаштування захисту повинно базуватися на накладенні характеристик провалу на стандартну криву стійкості обладнання ІТІС (Information Technology Industry Council).

Зона "No Interruption" (Без переривання). Якщо параметри провалу (глибина і тривалість), обчислені детектором, знаходяться вище кривої стійкості, захист повинен ігнорувати подію, лише фіксує її в журналі.

Зона "Prohibited" (Заборонена). Якщо траєкторія вектора входить у заборонену зону, команда на відключення повинна формуватися за час, менший за 2 мс (що досягається лише запропонованим вейвлет-методом).

Таблиця 4.1. Карта рекомендованих налаштувань адаптивного захисту

Параметр детекції	Умова	Рекомендована дія захисту	Обґрунтування
Тип провалу	Симетричний (Type A)	Затримка 0,2 – 0,5 с	Висока інерційна стійкість навантаження
	Несиметричний (Type B-G)	Миттєве відключення (< 10 мс)	Ризик перегріву та вібрації (I_2)
Point-on-Wave	Сприятливий кут	"Ride-Through" (утримання)	Використання запасу магнітної енергії
	Критичний кут	Активація DVR / UPS	Запобігання відпаданню контакторів
Стрибок фази		$\Delta\varphi > 15^\circ$	

Запропоновані рекомендації дозволяють перейти від "сліпого" відключення при будь-якому зниженні напруги до гнучкої системи керування електропостачанням. Впровадження адаптивних уставок, що базуються на точному розпізнаванні типу та моменту виникнення аварії, дозволяє зменшити кількість хибних зупинок виробництва на 30–40% (за оціночними розрахунками) при збереженні повного захисту обладнання від пошкоджень.

4.4 Структурна реалізація пристрою детекції та інтеграція в системи Smart Grid

Практичне впровадження розробленого методу детекції передбачає створення спеціалізованого апаратно-програмного комплексу (цифрового реле або аналізатора якості), здатного виконувати обчислення вейвлет-перетворення та операції з векторами в реальному часі.

Оскільки запропонований алгоритм вимагає високої частоти дискретизації (10–20 кГц) та значних обчислювальних потужностей для згортки цифрових фільтрів, стандартні мікроконтролери побутового рівня або спеціалізовані мікросхеми лічильників електроенергії (Energy Metering IC) можуть бути недостатньо ефективними.

Для реалізації пристрою пропонується структура, побудована на базі цифрового сигнального процесора (DSP) або мікроконтролера з ядром ARM Cortex-M4/M7, що має апаратну підтримку операцій з плаваючою комою (FPU).

Структурна схема пристрою має включати наступні блоки:

Блок вхідних датчиків. Датчики напруги (трансформатори напруги або резистивні дільники) та датчики струму (трансформатори струму або датчики Холла), що забезпечують гальванічну розв'язку.

Аналоговий тракт (Signal Conditioning). Операційні підсилювачі для нормування рівнів сигналів ($\pm 10\text{В}$ або $0\dots 3,3\text{ В}$) та фільтри низьких частот

(Anti-aliasing filters) для запобігання накладанню спектрів (згідно з теоремою Котельникова).

АЦП (ADC). Багатоканальний аналого-цифровий перетворювач з розрядністю не менше 12 біт та частотою дискретизації $f_s \geq 20$ кГц. Важливою вимогою є синхронність вимірювання (Simultaneous Sampling) фазних напруг для коректного формування просторового вектора.

Обчислювальне ядро (DSP). Виконує програмний код, що реалізує алгоритми перетворення Кларка, DWT (db4) та логіку класифікації.

Комунікаційний інтерфейс. Модулі RS-485 (Modbus RTU) або Ethernet (Modbus TCP / IEC 61850) для передачі даних в систему SCADA.

Опишемо алгоритм роботи вбудованого ПЗ. Програмне забезпечення пристрою працює у циклічному режимі з перериваннями від таймера АЦП.

- Крок 1. Отримання вибірок u_a, u_b, u_c .
- Крок 2. Виконання перетворення Кларка (u_α, u_β) та розрахунок модуля $|\vec{u}|$. Час виконання: < 5 мкс.
- Крок 3. Проходження сигналу через цифровий фільтр вейвлет-декомпозиції (реалізація DWT через FIR-фільтри). Час виконання: < 10 мкс.
- Крок 4. Порівняння виходу фільтра ($cD1$) з порогом Tr .
- Крок 5 (при виявленні події): Розрахунок параметрів еліпса, визначення типу аварії та формування сигналу на дискретний вихід (Trip) або повідомлення GOOSE (для підстанцій).

В умовах розумних мереж (Smart Grid) пристрій виконує роль не лише захисту, а й інтелектуального датчика (IED - Intelligent Electronic Device).

Використання протоколу IEC 61850 дозволяє передавати інформацію про детектований провал (час t_{start} , тривалість, тип, фаза) на верхній рівень керування з мітками часу високої точності (PTP synchronization).

Це дозволяє диспетчеру або автоматичній системі керування (ADMS) миттєво локалізувати пошкоджену ділянку мережі та переконфігурувати схему електропостачання (Self-healing networks).

Запропонований метод детекції може бути технічно реалізований на сучасній елементній базі без значного здорожчання вартості обладнання. Інтеграція таких пристроїв у системи Smart Grid дозволить перейти від реактивного обслуговування (ремонт після аварії) до проактивного керування надійністю та якістю електропостачання.

Висновки до розділу 4

У четвертому розділі досліджено прикладні аспекти застосування розробленого методу детекції для підвищення надійності роботи промислового електрообладнання. Основні результати полягають у наступному:

Доведено, що стійкість електромагнітних комутаційних апаратів (контакторів, пускачів) до провалів напруги залежить не лише від глибини провалу, але й від фазового кута в момент його виникнення. Запропонований вейвлет-метод, на відміну від традиційного RMS, дозволяє фіксувати цей момент з точністю до 0.2 мс, що дає можливість прогнозувати поведінку магнітної системи апарата.

Проаналізовано залежність характеру перехідного процесу від співвідношення реактивного та активного опорів мережі (X/R). Показано, що в мережах з переважно індуктивним характером (високе X/R) провали супроводжуються значними стрибками фази напруги. Використання векторного методу дозволяє вимірювати цей зсув у реальному часі та враховувати його в логіці захисту.

Сформульовано рекомендації щодо налаштування мікропроцесорних терміналів захисту, які передбачають використання диференційованих уставок. Запропоновано алгоритм, який автоматично обирає стратегію

реагування ("Ride-Through" або миттєве відключення) залежно від типу провалу (симетричний/несиметричний) та розрахованого запасу стійкості навантаження.

Запропоновано структурну схему пристрою детекції на базі цифрових сигнальних процесорів (DSP/ARM), здатних виконувати алгоритми вейвлет-перетворення в темпі процесу. Показано доцільність інтеграції таких пристроїв у систему Smart Grid через протокол IEC 61850 для забезпечення проактивного керування розподільними мережами.

РОЗДІЛ 5

ОХОРОНА ПРАЦІ

Питання охорони праці є невід’ємною складовою процесу розробки та впровадження нових технічних засобів моніторингу в електроенергетиці. Об’єктом дослідження даної магістерської роботи є процес детекції порушень якості електроенергії, а кінцевим продуктом — алгоритм та прототип мікропроцесорного пристрою захисту. Відповідно до характеру виконуваних робіт, аналіз умов праці проводиться за двома напрямками: санітарно-гігієнічні умови при проведенні комп’ютерного моделювання та техніка безпеки при експлуатації розробленого пристрою в електроустановках напругою до 1000 В.

5.1 Аналіз шкідливих та небезпечних факторів при виконанні науково-дослідної роботи

Значна частина роботи над магістерською дисертацією (розробка математичних моделей, написання коду в MATLAB/Simulink) виконувалася з використанням відеодисплейних терміналів (ВДТ) та електронно-обчислювальних машин (ЕОМ).

Згідно з ДСанПіН 3.3.2.007-98, основними факторами, що впливають на дослідника в процесі роботи, є:

Психофізіологічні фактори. Нервово-емоційне напруження, перенапруження зорового аналізатора, статичне навантаження на опорно-руховий апарат через тривалу роботу в положенні сидячи.

Фізичні фактори. Підвищений рівень електромагнітного випромінювання, шум від систем охолодження системного блоку, недостатнє або нерівномірне освітлення робочої зони.

Для забезпечення безпечних умов праці при виконанні роботи було дотримано наступних вимог:

Освітлення: Використовувалася система комбінованого освітлення (природне + штучне). Освітленість на поверхні столу в зоні розміщення документів становить не менше 300–500 лк. Екран монітора розташовано так, щоб уникнути відблисків від вікон та світильників.

Мікроклімат: Підтримувалися оптимальні параметри мікроклімату для категорії робіт 1а (легка фізична робота): температура повітря 22–24°C, відносна вологість 40–60%.

Режим праці: Для зниження зорового напруження дотримувався регламентований режим роботи: перерви тривалістю 10–15 хвилин через кожну годину інтенсивної роботи за монітором. Відстань від очей до екрана становила 60–70 см.

5.2 Вимоги електробезпеки при впровадженні системи детекції

Розроблений у роботі пристрій детекції провалів напруги (аналізатор на базі DSP-контролера) призначений для підключення до вторинних кіл вимірювальних трансформаторів напруги в розподільних щитах 0.4–10 кВ. Відповідно до класифікації приміщень за ступенем небезпеки ураження електричним струмом, місця встановлення таких пристроїв (електрощитові, підстанції) відносяться до категорії приміщень з підвищеною небезпекою або особливо небезпечних.

Основним небезпечним фактором є можливість ураження електричним струмом у разі:

- дотику до струмопровідних частин, що знаходяться під напругою;
- появи напруги на металевому корпусі пристрою внаслідок пошкодження ізоляції (замикання на корпус).

Для забезпечення електробезпеки при монтажі та експлуатації системи детекції передбачено такі технічні заходи:

Захисне заземлення: Металевий корпус пристрою повинен бути приєднаний до контуру заземлення. Опір заземлювального пристрою не повинен перевищувати 4 Ом (для установок до 1000 В).

Гальванічна розв'язка: Вхідні ланцюги вимірювання напруги та струму відокремлені від низьковольтної частини мікроконтролера за допомогою розділових трансформаторів або оптичних ізоляторів, що унеможлиблює потрапляння високого потенціалу на інтерфейсні роз'єми.

Використання засобів захисту: Монтаж пристрою повинен виконуватися персоналом, що має групу з електробезпеки не нижче III, з використанням діелектричних інструментів, рукавичок та покажчиків напруги.

Захист від надструмів: У колі живлення пристрою та вимірювальних ланцюгах встановлюються автоматичні вимикачі або запобіжники для захисту від коротких замикань всередині блоку.

5.3. Пожежна безпека

Оскільки тема магістерської роботи пов'язана з дослідженням аварійних режимів (коротких замикань та перевантажень), питання пожежної безпеки є особливо актуальними. Основною причиною пожеж в електроустановках є тепловий вплив струму при коротких замиканнях (КЗ) та великих перехідних опорах контактних з'єднань.

Розроблений алгоритм детекції опосередковано сприяє підвищенню пожежної безпеки, оскільки дозволяє швидко (за час < 1 мс) виявляти аварійні режими та подавати команду на відключення пошкодженої ділянки до моменту займання ізоляції.

Для забезпечення пожежної безпеки самого пристрою детекції передбачено:

Використання в конструкції матеріалів, що не підтримують горіння (самозгасаючий пластик корпусу, друковані плати класу FR-4).

Відсутність у схемі компонентів, що працюють у перевантаженому тепловому режимі.

Наявність первинних засобів пожежогасіння у приміщенні, де встановлюється обладнання (вуглекислотні вогнегасники типу ВВК, які призначені для гасіння електроустановок під напругою, оскільки вуглекислота не пошкоджує електронні плати).

Висновки до розділу 5

У розділі охорони праці проаналізовано потенційні небезпеки, що виникають під час наукових досліджень та подальшої експлуатації розробленого пристрою. Визначено, що дотримання санітарно-гігієнічних норм при роботі з ЕОМ та виконання правил улаштування електроустановок (ПУЕ) при монтажі системи детекції дозволяє мінімізувати ризики для здоров'я персоналу та забезпечити безаварійну роботу обладнання.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У магістерській роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання підвищення швидкодії та точності детекції порушень якості електричної енергії в системах електропостачання. На основі теоретичних досліджень та імітаційного моделювання отримано наступні результати.

Встановлено, що традиційні методи контролю якості електроенергії, які базуються на обчисленні середньоквадратичних значень (RMS), мають принципову затримку детекції (10–20 мс) та втрачають інформацію про фазові співвідношення. Це робить їх неефективними для захисту сучасного чутливого навантаження в умовах динамічних змін режимів Smart Grid.

Удосконалено метод детекції провалів напруги шляхом поєднання теорії просторового вектора та дискретного вейвлет-перетворення (DWT) з використанням базисної функції Daubechies (db4). Це дозволило забезпечити одночасний контроль симетрії системи та миттєву фіксацію моментів виникнення збурень.

Доведено, що розроблений алгоритм забезпечує детекцію початку аварійного режиму за час 0,1–0,5 мс, що на порядок перевищує швидкодію існуючих аналогів. Похибка визначення тривалості провалу знижена до рівня ± 0.2 мс.

Розроблена методика аналізу геометричних параметрів годографа напруги (еліптичність, кут нахилу) дозволяє зі 100% достовірністю класифікувати тип пошкодження (A–G) та ідентифікувати пошкоджену фазу безпосередньо в момент аварії, без необхідності розкладання на симетричні складові.

Запропоновано алгоритми логічної верифікації для відстройки від хибних спрацювань при комутаційних процесах та розроблено рекомендації щодо впровадження адаптивних систем релейного захисту. Це дозволяє

зменшити кількість нетехнологічних зупинок обладнання, підвищуючи економічну ефективність промислових підприємств.

Отримані результати можуть бути використані при проектуванні нових поколінь цифрових реле напруги, реєстраторів аварійних подій та систем моніторингу якості електроенергії.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Bollen M. H. J. Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions. New York: IEEE Press, 2000. 543 p.
2. IEC 61000-4-30:2015. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2015. 94 p.
3. IEEE Std 1159-2019. IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. New York: IEEE Standards Association, 2019. 98 p.
4. Akagi H., Watanabe E., Aredes M. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning. Hoboken: John Wiley & Sons, 2017. 434 p.
5. Mallat S. A Wavelet Tour of Signal Processing: The Sparse Way. 3rd ed. Burlington: Academic Press, 2009. 805 p.
6. Gargoom A. M., Bertilsson N., Thiringer T. Classification of voltage dips using the space vector method. 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Lake Placid, NY, USA, 2004. P. 445–450.
7. Santoso S., Powers E. J., Grady W. M., Hofmann P. Power quality disturbance data compression using wavelet transform methods. IEEE Transactions on Power Delivery. 1997. Vol. 12, No. 3. P. 1250–1257.
8. Pradhan A. K., Routray A. Applying distance protection for protection of transmission lines using wavelet transform. IEEE Transactions on Power Delivery. 2004. Vol. 19, No. 3. P. 969–977.
9. Chilukuri M. V., Sarma B. P. Wavelet transform based detection and classification of power quality disturbances. International Conference on Power System Technology (PowerCon). Singapore, 2004. Vol. 2. P. 1769–1774.
10. Ignatova V., Granjon P., Bacha S. Space vector method for voltage dips and swells analysis. IEEE Transactions on Power Delivery. 2009. Vol. 24, No. 4. P. 2054–2060.

11. Djuric M. B., Radojevic Z. M. A new algorithm for the detection of voltage sags and swells based on the space vector transformation. *Electric Power Systems Research*. 2007. Vol. 77, No. 1. P. 47–53.
12. Sahani M., Dash P. K. FPGA-based online power quality disturbance monitoring using wavelet transform and neural network. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2019. Vol. 110. P. 412–424.
13. Faisal M. F., Mohamed A., Shareef H. A review on methods for detecting and classifying power quality disturbances. *Przeglad Elektrotechniczny*. 2012. Vol. 88, No. 6. P. 222–226.
14. Жаркін А. Ф., Палачов С. О. Методи та засоби контролю якості електричної енергії: монографія. Київ: Інститут електродинаміки НАН України, 2018. 240 с.
15. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення. Київ: Мінекономрозвитку України, 2014. 28 с.
16. Chen S., Li H. A hybrid method for voltage sag detection based on DQ transform and wavelet analysis. *Energy Procedia*. 2012. Vol. 16. P. 1450–1456.
17. Abdoos A. A., Mianaei P. K., Ghadikolaei M. R. Combined VMD and ELM approach for the classification of power quality events. *Applied Soft Computing*. 2016. Vol. 38. P. 637–646.
18. ITIC (CBEMA) Curve Application Note. Information Technology Industry Council (ITI). Washington DC, 2000. 12 p. URL: <http://www.itic.org> (дата звернення: 20.12.2025).
19. Khosravi A., Meléndez J., Colomer J. Real-time characterization of voltage sags for extensive monitoring in distribution networks. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2015. Vol. 64, No. 9. P. 2381–2390.
20. Wang B., Manivannan N. Voltage sag detection and characterisation using discrete wavelet transform. *International Conference on Renewable Energy and Power Quality (ICREPQ)*. Madrid, Spain, 2016. P. 341–346.

21. CIGRE Working Group C4.110. Voltage Dip Immunity of Equipment and Installations. CIGRE Technical Brochure 412. Paris, 2010. 156 p.
22. Pedra J., Corcoles F., Sainz L. Experimental assessment of induction motor response to voltage sags. IEEE Transactions on Power Delivery. 2009. Vol. 24, No. 3. P. 1403–1410.
23. Collins E. R., Bridgwood M. A. The impact of power system disturbances on AC-coil contactors. Proceedings of the IEEE Textile, Fiber and Film Industry Technical Conference. Greenville, SC, USA, 1997. P. 1–6.
24. Жежеленко И. В., Саенко Ю. Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. Москва: Энергоатомиздат, 2000. 252 с.
25. Daubechies I. Ten Lectures on Wavelets. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992. 357 p.
26. MATLAB & Simulink User's Guide R2023b. The MathWorks, Inc. Natick, MA, 2023. URL: <https://www.mathworks.com/help/simulink/> (дата звернення: 15.12.2025).