

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

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

ДЖЕРЯ ТЕТЯНА ЕДУАРДІВНА

**УДК: 621.311**

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**ОПТИМІЗАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПОТОКІВ ПАРАМЕТРІВ**  
**РЕЖИМУ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ**

141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

14 Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

\_\_\_\_\_ Джеря Т.Е.

Науковий керівник:

Волошко Анатолій Васильович, доктор технічних наук, професор

Київ – 2024

## АНОТАЦІЯ

*Джеря Т.Е.* Оптимізація інформаційних потоків параметрів режиму електропостачання. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 14 – Електрична інженерія за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2024.

Моделювання та імітація спотворень якості електричної енергії стає фундаментальною методологією дослідження для забезпечення альтернативної оцінки продуктивності складних енергетичних систем та можливості тестування застосування різноманітних методів та засобів покращення якості електричної енергії шляхом своєчасної зміни параметрів моделювання.

Для цього розробка нових системних моделей та інструментів моделювання потребує в свою чергу створення моделей для генерації різноманітних сигналів спотворення якості електричної енергії із забезпеченням необхідної гнучкості моделювання та генерації від простих до складних сигналів, включаючи багатоступеневі, та у випадку одночасної наявності декількох сигналів спотворення, які виникають паралельно, або накладаються одні на одну.

Це потребує безперервного моніторингу та тривалого періоду часу для отримання та збору всіх типів сигналів параметрів якості електроенергії, оскільки виникнення спотворення є невизначеним. Враховуючи все це тема дисертаційної роботи є актуальною як з наукової так і практичної точок зору.

Дисертаційну роботу присвячено підвищенню ефективності функціонування систем електропостачання за рахунок збільшення швидкості отримання та обробки даних і своєчасне реагування (видача керуючих впливів) на основі аналізу отриманої інформації.

**Ключові слова:** якість електричної енергії (ЯЕЕ), моделювання, генерація спотворень ЯЕЕ, оптимізація інформаційних потоків, електричний шум, режими електроспоживання, провали напруги, перехідні процеси, короткі замикання, вплив к.з. на напругу, вейвлет-аналіз, просторовий вектор, Smart Grid, невизначеність інформації, функція Ферхюльста, метод Штейна.

## **ABSTRACT**

*Dzheria T.E.* Optimization of information flows of parameters of the power supply regime. – Qualifying scientific work on the rights of manuscripts. Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in the field of knowledge 14 – Electrical engineering by specialty 141 – Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics. – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, 2024.

Modeling and simulation of power quality distortions is becoming a fundamental research methodology to provide an alternative assessment of the performance of complex energy systems and the possibility of testing the application of various methods and means of improving the quality of electric power by timely changing the modeling parameters.

For this, the development of new system models and simulation tools requires, in turn, the creation of models for the generation of various power quality distortion signals with the necessary flexibility of modeling and generation from simple to complex signals, including multi-stage, and in the case of the simultaneous presence of several distortion signals that arise parallel, or superimposed on each other.

This requires continuous monitoring and a long period of time to acquire and collect all types of power quality parameter signals, as the occurrence of distortion is uncertain. Considering all this, the topic of the dissertation is relevant both from a scientific and a practical point of view.

The dissertation work is devoted to increasing the efficiency of power supply systems by increasing the speed of data acquisition and processing and timely

response (issuance of control influences) based on the analysis of the received information.

**Keywords:** quality of electrical energy (QEE), modeling, generation of QEE distortions, optimization of information flows, electrical noise, power consumption modes, voltage dips, transient processes, short circuits, short circuit effect on voltage, wavelet analysis, spatial vector, Smart Grid, information uncertainty, Verhulst function, Stein method.

**Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:**

[1] Волошко А.В., Бедерак Я.С., Джеря Т.Е. Визначення показника Херста при фрактальному аналізі електричних навантажень. ISSN 1813-5420 (Print). Енергетика: економіка, технології, екологія. 2020. № 3 - с. 22-26.

[2] Джеря Т.Е., Волошко А.В., Метод локального відновлення сегментів інформаційних сигналів. ISSN 2307-5732 Вісник Хмельницького національного університету, Том 1, №2, 2023 (319), с. 64-69. DOI: 10.31891/2307-5732-2023-319-1-64-69.

[3] Dzheria, T., Shevchuk, V., Forecasting electricity consumption using neural networks. ISSN 2073-7394 Системи управління, навігації та зв'язку. 2023. № 2, с. 42-44. DOI: 10.26906/SUNZ.2023.2.042.

[4] Джеря Т.Е., Волошко А.В., Generalized identifier of the presence of distortions in the quality of electricity. ISSN 1727-9895. Праці ІЕД НАН України. 2023. Вип. 64, с. 31-35. <https://doi.org/10.15407/publishing2023.64.031>.

[5] Джеря Т.Е., Волошко А.В., Research of information flows in the control of intelligent power system regimes. ISSN 1813-5420 (Print). Енергетика: економіка, технології, екологія. 2023. № 2, с. 33-37. DOI 10.20535/1813-5420.2.2023.279635.

[6] Джеря Т.Е., Волошко А.В., Simulation and research of single-phase short circuits in the electrical network. ISSN (print) 2519-2884. Збірник наукових праць ДДТУ № 2(43) 2023, с. 131-139. DOI 10.31319/2519-2884.43.2023.14.

### **Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:**

[7] Волошко А.В., Джеря Т.Е. Інформаційна модель кількісних параметрів режиму електроспоживання – графіку електричного навантаження. Матеріали хііі науково-технічної конференції енергетика. екологія. людина. 2021 (13-14 травня), с.47-53.

[8] Voloshko A.V. Dzheria T.E. Wavelet analysis and encryption of information signals. ISBN 978-950-9132-34-4. Scientific Collection «InterConf», (79):with the Proceedings of the 1 st International Scientific and Practical Conference «Modern Scientific Trends and Standards» (October 11-12, 2021). Santa Rosa, Argentina: Megafyn, 2021. pp. 111-119.

[9] Voloshko A. Shevchuk V. Dzheria T. The formation of the vector of classification features of electric power quality distortions. ISBN 978-0-216-01072-7. Scientific Collection «InterConf», (107): with the Proceedings of the 12th International Scientific and Practical Conference «Science and Practice: Implementation to Modern Society» (May 6-8, 2022). Manchester, Great Britain: Peal Press Ltd., 2022. pp. 510-516.

[10] Voloshko A. Shevchuk V. Dzheria T. Problems of determining the presence of distortions of electric power quality. ISBN 978-82-7346-353-1. Scientific Collection «InterConf», (106): with the Proceedings of the 5 th International Scientific and Practical Conference «Recent scientific investigation» (April 26-28, 2022). Oslo, Norway: Dagens næringsliv forlag, 2022. pp. 369-376.

[11] Шевчук В.В., Джеря Т.Е. Зниження впливу нелінійних навантажень на показники якості електричної енергії: основні способи управління параметрами енергетичних систем. Матеріали XIV науково-технічної конференції енергетика. екологія. людина. 2022 (2-3 червня). – 11-17 с.

[12] Волошко А.В. Стиснення інформаційних потоків для підвищення швидкості оперативного контролю та управління режимами електроспоживання/ А.В. Волошко, Т. Джеря//Наука і техніка сьогодні. – 2022. - № 8. – 65 – 74 с.

[13] Voloshko A. Dzheria T. Information flows between entities of the wholesale electricity energy market of ukraine. ISBN 979-1-293-10109-3. Scientific Collection «InterConf», (132): with the Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference «Challenges in Science of Nowadays» (November 16-18, 2022; Washington, USA) by the SPC «InterConf». EnDeavours Publisher, 2022. pp. 353-361.

[14] Dzheria, T., Shevchuk, V., Voloshko, A. (2023). Power Quality Monitoring System for Electrical Networks. In: Kyrylenko, O., Denysiuk, S., Derevianko, D., Blinov, I., Zaitsev, I., Zaporozhets, A. (eds) Power Systems Research and Operation. Studies in Systems, Decision and Control, vol 220. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-17554-1\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-031-17554-1_10).

**Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:**

[15] Метод дерева рішень для ідентифікації та класифікації інформаційних сигналів. ISSN 1560-9189 Реєстрація, зберігання і обробка даних, 2022, Т. 24, № 2, с. 53-61. DOI:10.35681/1560-9189.2022.24.2.275079.

[16] Voloshko A. Shevchuk V. Dzheria T. Generalized identifier of the presence of distortions in the quality of electricity. Section 1. Smart energy, power and energy engineering. 2022 IEEE 8th international conference on energy smart systems (October 12-14, 2022). Kyiv, Ukraine (report).

[17] Voloshko A. Shevchuk V. Dzheria T. Research of information flows in the control of intelligent power system regimes. Section 3. smart cities and buildings. 2022 IEEE 8th international conference on energy smart systems (October 12-14, 2022). Kyiv, Ukraine (report).

[18] Voloshko A. Shevchuk V. Dzheria T. Forecasting electricity consumption using neural networks. Section 1. smart energy power and energy engineering. 2022 IEEE 8th international conference on energy smart systems (October 12-14, 2022). Kyiv, Ukraine (report).

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	14
ВСТУП.....	15
РОЗДІЛ 1 ОПТИМІЗАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПОТОКІВ ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМУ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.....	16
1.1 Аналіз існуючих методів оптимізації інформаційних потоків.....	16
1.1.1 Класифікація.....	16
1.1.2 Стиснення.....	20
1.1.3 Видалення шумових компонент.....	27
1.2 Сучасні методи та засоби моніторингу якості електричної енергії.....	28
1.2.1 Параметри ЯЕЕ та їх спотворення.....	30
1.2.2 Математичні методи та способи оцінювання ЯЕЕ.....	33
1.3 Методи оптимізації інформаційних сигналів.....	37
1.3.1 Класифікація інформаційних сигналів.....	37
1.3.2 Стиснення інформаційних сигналів.....	38
1.3.3 Видалення шумових компонент.....	43
1.4 Основні задачі дослідження.....	45
1.5 Висновки до розділу 1.....	46
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ФОРМУВАННЯ СПОТВОРЕНЬ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ.....	48
2.1 Числові моделі формування спотворень якості електричної енергії.....	48
2.1.1 Основні математичні рівняння визначення спотворень ЯЕЕ та формування на їх основі графічних представлень.....	50
2.2 Структура побудови числової моделі формування спотворень якості електричної енергії.....	57
2.3 Моделювання та дослідження однофазних коротких замикань в електричній мережі.....	59
2.3.1 Методи моделювання та розрахунків коротких замикань.....	60
2.3.2 Моделювання однофазного короткого замикання.....	61

2.3.3 Визначення впливу місця розміщення короткого замикання на напругу в електричній мережі.....	64
2.4 Метод ідентифікації перехідних процесів в електричних мережах шляхом аналізу їх високочастотних характеристик.....	66
2.4.1 Частотний спектр перехідних процесів.....	67
2.4.2 Моделювання перехідних процесів.....	68
2.5 Висновки до розділу 2.....	71
<b>Розділ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТИПІВ ПРОВАЛІВ НАПРУГИ ТА ЇХ ХАРАКТЕРИСТИК НА РОБОТУ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ.....</b>	<b>73</b>
3.1 Структурна схема дослідження.....	73
3.2 Вплив різних характеристик провалів на роботу асинхронного двигуна.....	75
3.2.1 Вплив тривалості провалу напруги на роботу асинхронного двигуна.....	76
3.2.1.1 Вплив тривалості провалу напруги на піки крутного моменту та піки струму.....	78
3.2.1.2 Вплив глибини провалів напруги на піки струму асинхронного двигуна.....	80
3.2.1.3 Вплив провалів напруги на швидкість асинхронного двигуна...	82
3.3 Селективність захисту асинхронних двигунів під час наявності провалів напруги в електричній мережі.....	84
3.3.1 Вибір захисних пристроїв асинхронних двигунів під час провалів напруги.....	84
3.3.2 Стратегія захисту асинхронного двигуна.....	85
3.4 Висновки до розділу 3.....	85
<b>РОЗДІЛ 4 ОПТИМІЗАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПОТОКІВ В ПЛАНІ ВИДАЛЕННЯ КОМПОНЕНТ ЕЛЕКТРИЧНОГО ШУМУ.....</b>	<b>87</b>
4.1 Існуючі методи подавлення шумових компонент в інформаційних сигналах.....	87
4.1.1 Застосування порогових функцій.....	88



4.1.2 Розробка методу подавлення шумових компонент (електричного шуму) при визначенні параметрів якості електричної енергії.....	91
4.1.2.1 Модифікований метод подавлення шумових компонент.....	92
4.1.2.2 Структура побудови модифікованого методу видалення шумових компонент.....	94
4.1.2.3 Вибір адаптивного порогового значення відповідно до (4.4) та (4.5).....	97
4.2 Порівняльний аналіз відомих методів подавлення шуму та модифікованого в даній роботі.....	99
4.3 Висновки до розділу 4.....	104
ВИСНОВКИ.....	104
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	106

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ОЕС – об’єднана енергосистема України

ЯЕЕ – якість електричної енергії

ЄС – Європейський Союз

ЛП – лінійне програмування

НО – нелінійна оптимізація

ЕРД – емпіричний режим декомпозиції

ВП – вейвлет-перетворення

SURE – Stein unbiased risk estimation

PAT – Power Analysis Toolbox

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Моделювання та імітація спотворень якості електричної енергії стає фундаментальною методологією дослідження для забезпечення альтернативної оцінки продуктивності складних енергетичних систем та можливості тестування застосування різноманітних методів та засобів покращення якості електричної енергії шляхом своєчасної зміни параметрів моделювання.

Для цього розробка нових системних моделей та інструментів моделювання потребує в свою чергу створення моделей для генерації різноманітних сигналів спотворення якості електричної енергії із забезпеченням необхідної гнучкості моделювання та генерації від простих до складних сигналів, включаючи багатоступеневі, та у випадку одночасної наявності декількох сигналів спотворення, які виникають паралельно, або накладаються одні на одну.

Це потребує безперервного моніторингу та тривалого періоду часу для отримання та збору всіх типів сигналів параметрів якості електроенергії, оскільки виникнення спотворення є невизначеним. Враховуючи все це тема дисертаційної роботи є актуальною як з наукової так і практичної точок зору.

**Метою роботи** є підвищення ефективності функціонування систем електропостачання за рахунок збільшення швидкості отримання та обробки даних і своєчасне реагування (видача керуючих впливів) на основі аналізу отриманої інформації.

### **Основні задачі дослідження:**

1. Проаналізувати сучасний стан методів і засобів оцінювання якості електричної енергії.
2. Оцінити вплив сучасних математичних методів для побудови систем моніторингу якості електричної енергії.
3. Розробити математичну модель формування спотворень якості електричної енергії.

4. На основі розробленої математичної моделі формування спотворень якості електричної енергії розробити метод комп'ютерного моделювання електричної напруги в електричній мережі із заданими типами спотворень амплітуди і частоти.

5. Розробити або модифікувати метод ідентифікації типів перехідних процесів в системах живлення.

6. Розробити або модифікувати методи оптимізації інформаційних потоків в плані видалення шумових компонент перехідних процесів в системах живлення, адаптованих до гармонічного складу сигналів та їх сингулярності.

**Об'єктом дослідження** є процес оцінювання та моніторингу якісних характеристик режимів електропостачання.

**Предметом дослідження** є методи та засоби оптимізації інформаційного потоку параметрів режиму електропостачання.

**Методи дослідження.** Розв'язання поставлених задач виконано з використанням методів математичного аналізу, математичної статистики, методів математичного моделювання та цифрової обробки сигналів. З метою перевірки достовірності отриманих результатів і запропонованих алгоритмів обробки інформаційних сигналів у середовищі Matlab 6.5 SPI/7 + Simulink 5/6 виконувалось математичне моделювання та тестові розрахунки.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Дисертаційна робота виконана на кафедрі електропостачання КПІ ім. Ігоря Сікорського в рамках:

- Розпорядження Кабінету Міністрів України від 14 жовтня 2022 р. № 908-р «КОНЦЕПЦІЯ впровадження “розумних мереж” в Україні до 2035 року»;
- Національного плану з енергетики та клімату України 2025-2030;
- програми Міністерства освіти і науки України за наступними пріоритетними напрямками розвитку науки і техніки:
  - забезпечення енергоефективності та стійкості електропостачання;

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

**Наукова новизна роботи** обґрунтована наступним.

1. Удосконалено метод зменшення шумових компонент при визначенні параметрів якості електричної енергії за рахунок введення логістичної функції Ферхюльста з адаптивним коефіцієнтом крутизни кривої, що дозволило проводити знешумлення більшої різноманітності перехідних процесів в системах живлення та за різних рівнів шуму.

2. Розроблена математична модель формування спотворень якості електричної енергії, основою якої є синусоїдальний сигнал, модульований різноманітними типами математичних функцій, адаптованих до типу спотворення, що забезпечує необхідну достовірність та гнучкість моделювання та генерації від простих до складних типів спотворень.

3. Розроблено метод ідентифікації типів перехідних процесів у системах живлення шляхом визначення їх високочастотних характеристик, що дозволило згрупувати типи перехідних процесів на три основні групи: перемикання перехідних процесів, дугові замикання та удари блискавки. Також стало можливим проведення аналізу несправностей в електричній мережі, які викликані перехідними процесами.

4. Модифіковано метод селективності захисту асинхронного двигуна за рахунок визначення залежності пікового струму статора від тривалості та глибини провалу напруги і стрибка фазового кута, це дало можливість встановлювати селективність захисту двигуна від значень струму, як при проектувальних роботах так і в процесі його роботи.

**Практичне значення отриманих результатів:**

1. Розроблена математична модель формування спотворень якості електричної енергії адаптована до типу спотворення забезпечує необхідну достовірність та гнучкість моделювання та генерації від простих до складних типів спотворень для використання в системах моніторингу.

2. Удосконалений метод зменшення шумових компонент при визначенні параметрів якості в електричних мережах за рахунок введення логістичної функції Ферх'юльста з адаптивним коефіцієнтом крутизни кривої що дозволило адаптуватися до гармонічного складу інформаційного сигналу.

3. Розроблений метод комп'ютерного моделювання реалізацій електричної напруги із заданими типами спотворень амплітуди і частоти забезпечується альтернативна оцінка продуктивності складних енергетичних систем та можливості тестування застосування різноманітних методів та засобів покращення якості електричної енергії шляхом адаптивної зміни параметрів моделювання.

### **Особистий внесок здобувача.**

Доведено, що застосування емпіричного співвідношення для деяких вибірок електроспоживання призводить до значних похибок у визначенні показника Херста [1].

Запропоновано спосіб стиснення інформаційних потоків на основі застосування методів порогової фільтрації коефіцієнтів ортогонального перетворення графіків електричного навантаження [6].

Розроблена прогнозна модель споживання електроенергії з урахуванням додаткових факторів (температури навколишнього середовища, часу доби, святкових та робочих днів) [3].

Запропоновано спосіб обробки інформаційних потоків режимів споживання в системах електроспоживання для формування системи моніторингу та керування інтелектуальними енергетичними системами [4].

Розроблена модель інформаційного потоку в плані виявлення наявності спотворення якості електричної енергії для побудови системи їх моніторингу в реальному часі [5].

На основі розробленої моделі спотворення якості електричної енергії досліджено однофазні короткі замикання в трифазних електричних мережах шляхом переходу її до однофазної системи з двома проекціями  $\alpha$ - $\beta$  і вектором напруги нульової послідовності [6].

Досліджено переваги та ряд обмежень у застосуванні моделі інформаційного потоку режимів електропостачання для формування ієрархічної структури порівняльних частотно-впорядкованих та взаємопов'язаних вейвлет-коефіцієнтів [7].

Представлено метод шифрування інформаційних сигналів на основі застосування вейвлет-аналізу та порогових функцій [8].

Запропоновано модифікований вектор ознак класифікації спотворень якості електричної енергії на основі розподілу потужностей спотвореного сигналу відповідно до рівнів вейвлет-декомпозиції [9].

Запропонована структура побудови засобів зниження впливу нелінійних навантажень на якість електричної енергії на основі використання автоматизованої стабілізації форм напруги та струму [11].

Запропоновано спосіб обробки інформаційних потоків моніторингу режимів електроспоживання та керування інтелектуальними електричними системами, який передбачає поєднання інформаційно-математичних технологій та використання міжнародних стандартів відносно обробки даних [17].

Запропонована структуризація отриманих даних для формування кластерів прогнозування, що дозволило збільшити оперативність отримання прогнозних значень в декілька разів [18].

Запропоновано інформаційну модель визначення наявності спотворення якості електричної енергії та ідентифікувати його тип [14].

## РОЗДІЛ 1.

### ОПТИМІЗАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПОТОКІВ ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМУ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

#### 1.1 Аналіз існуючих методів оптимізації інформаційних потоків

Аналіз сучасного стану електроенергетичної галузі України свідчить, що її інтеграція з електроенергетичним сектором країн ЄС можлива тільки за умови дотримання жорстких вимог до параметрів якості електричної енергії, які повинні знаходитись у межах допустимих рівнів, встановлених у відповідних нормативних документах. При цьому слід зауважити, що якість електричної енергії в значній мірі впливає на надійність функціонування електроенергетики України, і є постійно діючим фактором, який може призводити до необґрунтованих економічних втрат як безпосередньо енергопостачальних компаній, так і багатьох споживачів електричної енергії.

Як слідує із аналізу наукових досліджень, методи ідентифікації та класифікації інформаційних сигналів або забезпечують задовільну точність, за умови досить складних алгоритмів їх використання, або на рівні із швидкодією та простотою алгоритмів навпаки не дозволяють досягти заданої точності. Тобто, вони можуть застосовуватись для вирішення тих чи інших вибіркових задач, але забезпечення оптимального співвідношення між точністю класифікації, швидкодією та простотою алгоритмів залишається досить складною проблемою.

##### 1.1.1 Класифікація

Оптимізація має незамінні застосування, і наразі неможливо назвати жодної галузі, яка б не використовувала процес оптимізації. Загалом, оптимізація з обмеженнями — це математичний процес знаходження мінімального або максимального значення цільової функції з урахуванням різноманітних обмежень, накладених на простір пошуку задачі, яку потрібно розв'язати. Коріння процесу оптимізації сягають ранніх робіт Ейлера та



Лагранжа, як це було знайдено у варіаційному численні. Загальну задачу оптимізації з обмеженнями можна математично описати так:

$$\begin{aligned} F(x) &= f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x), \\ g_i(x) &\leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, p, \\ h_j(x) &= 0, \quad j = 1, 2, \dots, q, \\ x_l^i &\leq x^i \leq x_u^i, \quad i = 1, 2, \dots, N, \end{aligned} \quad (1.1)$$

де  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in \Omega$  є варіантом рішення з  $n$  змінними рішення/дійсними параметрами,  $F(x)$  є функцією з  $m$  цілями,  $g_i(x) \leq 0$  є функціями, обмеженими нерівністю  $i$ ,  $h_j(x) = 0$  є функціями, обмеженими рівністю  $j$ , а  $x_l^i \leq x^i \leq x_u^i$  пов'язані з обмеженнями в просторі пошуку  $x$  [1].

Задача (1) називається задачею лінійного програмування (ЛП) або задачею лінійної оптимізації, якщо всі  $m$  цільових функцій і всі їхні відповідні функції з обмеженнями лінійні. Подібним чином, якщо всі  $m$  цільових функцій є квадратичними, а всі їхні відповідні функції обмежень є лінійними, то проблема (1) називається квадратичним програмуванням. Крім того, якщо  $m=1$ , то задача (1) стає одноцільовою задачею оптимізації, а якщо  $m \geq 2$ , то проблема (1) називається багатоцільовою задачею оптимізації (БЗО). Якщо всі цільові функції та функції з обмеженнями описані в дійсних значеннях, то задача (1) буде неперервною БЗО.

Задачу лінійного програмування або лінійної оптимізації порівняно легко вирішити порівняно з проблемами нелінійної оптимізації (НО). Існування обмежень рівності є досить складним і більш спірним під час вирішення проблем нелінійного програмування шляхом вгадування, які обмеження є активними, а які неактивними [2].

За останні два десятиліття були розроблені різні методи оптимізації, як показано на рис. 1 Проблеми ЛП мають багато переваг і недоліків. Це досить нереально, тому що більшість проблем у галузях науки та техніки природно моделюються як нелінійні проблеми [3].

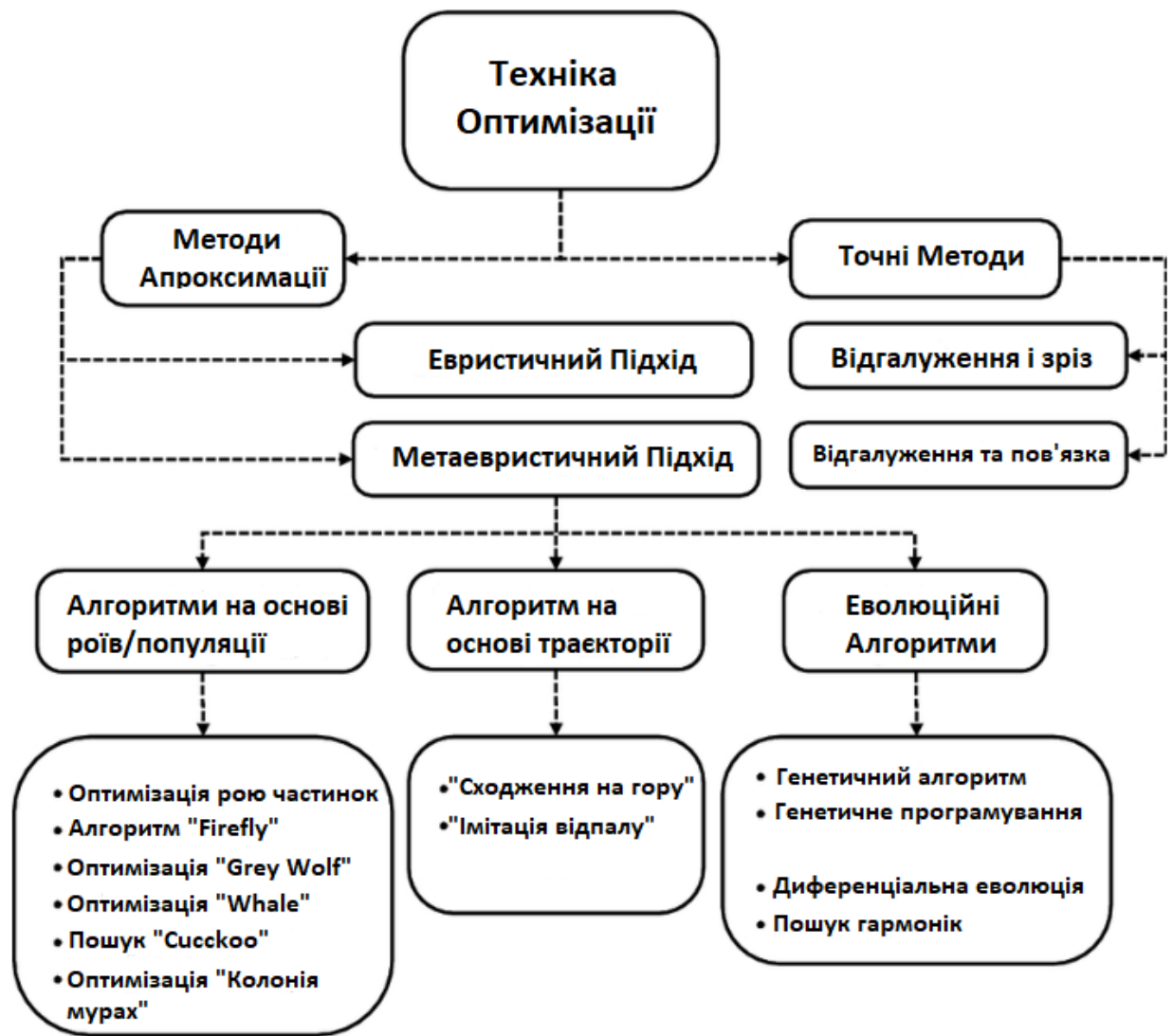


Рисунок 1.1 - Класифікація методів оптимізації

Підходи до нелінійної оптимізації далі поділяються на методи локальної та глобальної оптимізації [4]. Локальні методи пошуку забезпечують локальний оптимум із низькою обчислювальною вартістю порівняно з методами глобального пошуку. Метод Ньютона та послідовне квадратичне програмування зазвичай використовуються локальні методи оптимізації. Ці градієнтні методи можна використовувати як оптимізатори локального пошуку.

Однак вони не надто ефективні у вирішенні складних задач оптимізації, оскільки мають високу мультимодальність, розривність і галасливі ландшафти. Загалом, цільові функції проблем реального світу здебільшого недиференційовані, неперервні, нелінійні, зашумлені, плоскі та багатовимірні

або містять багато локальних мінімумів. Традиційні методи оптимізації здебільшого не можуть знайти якісне рішення для проблем із нелінійністю, мультимодальністю та високорозмірними структурами.

За останні два десятиліття були розроблені різні методи глобальної оптимізації, які успішно вирішували різні складні проблеми оптимізації та пошуку. Еволюційні алгоритми є значно просунутішою та багатообіцяючою альтернативою порівняно з градієнтними методами оптимізації. Еволюційні алгоритми є популяційними методами та забезпечують хороші наближені рішення в одній симуляції на відміну від традиційних методів математичного програмування. Еволюційні алгоритми — це метаевристики, що базуються на популяціях і загалом поділяються на дев'ять різних груп: біологічні, фізичні, соціальні, музичні, хімічні, спортивні, математичні, ройові та гібридні методи. Генетичний алгоритм, еволюційна стратегія, еволюційне програмування і генетичне програмування є класичними парадигмами еволюційних обчислень. Диференціальна еволюція, оптимізація рою частинок, оптимізація колонії мурах, пошук «Сисскао» та алгоритм оптимізації на основі викладання й навчання є найпопулярнішими та останніми розроблені еволюційні алгоритми [5-9].

Ройовий інтелект — це колективна поведінка децентралізованих, самоорганізованих систем, природних чи штучних. Концепція використовується в роботі над штучним інтелектом. Вираз було введено Бені та Вангом у 1989 році [10] у контексті клітинних роботизованих систем. Алгоритми, засновані на ройовому інтелекті, в основному натхненні поведінкою реальних роїв або колоній комах, показали покращену продуктивність у широкомасштабній оптимізації та проблемах прийняття рішень [11]. Вони можуть працювати колективно, дотримуючись певних правил. Децентралізація та самоорганізація є основними джерелами взаємодії між роєм та агентами. Ройовий інтелект отримав великий інтерес і увагу в зібранні праць. У спільнотах оптимізації, обчислювального інтелекту та інформатики, біоінспіровані алгоритми, особливо алгоритми на основі

ройового інтелекту, набули великої популярності. Натхненні природою метаевристичні алгоритми зараз є одними з найбільш широко використовуваних алгоритмів для оптимізації та обчислювального інтелекту [12]. Використання ансамблевих стратегій в рамках різних існуючих еволюційних алгоритмів привернули увагу дослідників у наукових колах та промислових додатках завдяки своїм можливостям. Дослідники еволюційного обчислення виявили великий інтерес до використання кількох операторів пошуку, таких як одноточковий, двоточковий і оператори рівномірного кросинговеру, симплексного кросоверу, турніру, рейтингу, стохастичного, оператора рівномірної вибірки, клірингу, скупчення, спільного використання методи ніші, адаптивний штраф, епсилон і перевага підходів до обробки можливих обмежень під час вирішення складних наборів тестів еталонних функцій і багатьох важливих проблем реального світу мали високу складність, галасливе середовище, неточність, невизначеність і нечіткість у своїх структурах [13].

### 1.1.2 Стиснення

Для оптимізації роботи електромереж необхідно передати значні обсяги даних. Розвиток передової інфраструктури вимірювання та контролю забезпечує зростання обсягу даних, що передаються в розумних мережах. Стиснення даних – це стратегія зменшення навантаження. Ця стаття представляє поточні виклики в області стиснення часових рядів даних. Новим внеском цієї статті є поділ даних у розумних мережах на дані в реальному часі, які використовуються для цілей контролю, і великі набори даних, які використовуються для некритичного до часу аналізу системи. Обидві ці програми мають різні вимоги до ефективного стиснення. Алгоритми, що використовуються на даний момент, перераховані та описані з їх перевагами та недоліками для обох цих програм. Також було надано деталі, необхідні для реалізації алгоритму. Комплексний аналіз і порівняння призначені для полегшення розробки методу стиснення даних, адаптованого для конкретної

програми. Важливим внеском є опис впливу методів стиснення даних на кібербезпеку, яка є однією з головних проблем сучасних електромереж.

Інформаційні потоки характеризуються великим обсягом. Були розроблені різні методи стиснення, їх використання стало необхідністю для зменшення обсягів інформаційних потоків. Стиснення можна використовувати як засіб підвищення інформаційної безпеки інформаційних потоків, особливо якщо під час стиснення застосовується пароль.

Ми розуміємо під стисненням перетворення потоку вхідних даних у коди. Рішення про відповідність «вхідні дані — вихідні коди» базується на попередньо обраній моделі [14]. У разі ефективного стиснення отриманий потік кодів є меншим за обсягом, ніж вхідні дані, але навіть якщо стиснення не є ефективним, файловий об'єкт матиме кращий захист від різних атак, оскільки вихідні дані будуть представлені кодами.

Пріоритезація даних є важливою проблемою в критично важливих системах, таких як керування електромережею. Дані в режимі реального часу, які включають інформацію про поточне енергоспоживання, стан мережі та продуктивність обладнання, можуть потребувати пріоритету над історичними даними для негайного прийняття рішень. Історичні дані, такі як довгострокові моделі споживання та записи про технічне обслуговування обладнання, можна зберігати та аналізувати окремо. Критичним даним, таким як інформація про збої в системі, порушення безпеки або надзвичайні ситуації, слід надавати найвищий пріоритет. Некритичні дані, як-от рутинна інформація моніторингу, можуть оброблятися з нижчим пріоритетом. Дані, пов'язані з прогнозуванням навантаження та прогнозними моделями, можуть потребувати особливої уваги для точного енергетичного планування. Оперативні дані, такі як стан мережі в реальному часі та стан обладнання, є важливими для ефективного управління [15]. Розділення даних вимірювань є критично важливим питанням у середовищах з інтенсивним об'ємом даних. В електромережах дані відокремлюються за допомогою сегрегації на основі правил або аналізу часових рядів. Системи на основі правил визначають критерії для класифікації

даних за різними рівнями пріоритету. Правила можуть базуватися на таких факторах, як джерело даних, терміновість і критичність. Методи аналізу часових рядів розрізняють дані в реальному часі та історичні тренди. Такі алгоритми, як ARIMA (авторегресійне інтегроване ковзне середнє), можуть допомогти у прогнозуванні та розділенні даних. Зовсім недавно була представлена архітектура периферійних обчислень і методи машинного навчання, щоб покращити якість і ефективність сегрегації даних. Алгоритми машинного навчання автоматично класифікують і пріоритезують дані на основі історичних моделей і умов реального часу. Алгоритми кластеризації можуть групувати подібні дані для ефективної обробки. Граничні обчислення використовують обробку даних локально в джерелі, зменшуючи потребу в передачі великих обсягів необроблених даних. Пристрої Edge можуть виконувати первинну сегрегацію даних і надсилати лише відповідну інформацію до центральних систем [16].

Популярність методів стиснення даних зростала разом із популяризацією розподілених обчислень і систем зберігання даних, оскільки це зменшувало співвідношення між вартістю та перевагами таких систем. У багатьох сферах стиснення даних є фундаментальною частиною їх розвитку. Складна та вимоглива до даних інформація, така як аудіо- чи відеофайли, протягом тривалого часу є предметом вивчення стиснення даних. Програми реального часу, такі як двостороння передача голосу, також існують у стільникових технологіях. У сфері енергетичних систем стиснення даних було нішевою темою більшу частину часу, але недавнє зростання складності сучасних енергетичних систем разом із потребою в детальних вимірюваннях вимагає оптимізації передачі даних [17].

За принципом роботи методи стиснення даних можна розділити на дві категорії — із втратами даних і без втрат.

Без втрат. Алгоритми стиснення без втрат розроблені для збереження всієї інформації, що міститься у вихідних даних. Це означає, що коли дані стискаються за допомогою цих методів, їх можна пізніше розпакувати, щоб

отримати точну копію вихідних даних без втрат або спотворень. Методи стиснення без втрат часто спираються на концепцію ентропії, яка є мірою інформаційного вмісту в даних. Основна ідея полягає в тому, щоб ідентифікувати та використовувати закономірності, надлишковість і статистичні властивості в межах даних для більш ефективного їх представлення. Найпоширеніші методи, які використовуються для стиснення даних без будь-яких втрат, базуються на статистичному кодуванні з метою зменшення ентропії в сигналі [16], таким чином зменшуючи кількість даних, або на словникових методах, які замінюють повторювані дані коротшими кодами.

З втратами. Методи стиснення даних із втратою даних — це методи, які використовуються для зменшення розміру цифрових даних шляхом вибіркового видалення деякої інформації, яка вважається менш важливою або перцепційно менш значущою. Ці методи зазвичай використовуються в таких програмах, як стиснення зображень і аудіо. У стисненні з втратами основною метою є досягнення високих коефіцієнтів стиснення шляхом усунення зайвих або менш важливих деталей. Це передбачає квантування, коли значення даних округлюються або відображаються на менший набір значень. Відкинуту інформацію не можна відновити під час декомпресії, що робить стиснення з втратами непридатним для додатків, де точність даних є критичною, наприклад, прийняття важливих рішень щодо стану електромережі. Ключовою проблемою при стисненні з втратами є досягнення балансу між досягненням значного стиснення при мінімізації погіршення сприйняття. Хоча стиснення із втратами даних забезпечує суттєве зменшення розміру, дуже важливо використовувати його з розумом у сценаріях, коли незначна втрата даних є прийнятною.

Розробка методу стиснення даних із втратами вимагає глибокого знання системи та інформації, що міститься в даних, що ускладнює реалізацію алгоритмів стиснення з втратами, але зрештою може запропонувати більш оптимізовану систему контролю інтелектуальної мережі [18].

У контексті електромереж стійкість до помилок в алгоритмах стиснення даних має вирішальне значення для систем реального часу. Це пов'язано з великим об'ємом даних, які генерують електромережі, що може призвести до перевантаження даних, якщо не керувати належним чином. Згенеровані дані включають інформацію про виробництво, передачу та розподіл електроенергії, а також інформацію про можливі несправності та збої в електромережі.

Одним із підходів до керування цими даними є використання стратегій стиснення енергетичних даних у реальному часі. Ці стратегії спрямовані на зменшення трафіку даних шляхом ефективного стиснення даних лічильників. Це особливо важливо в системах інтелектуальних електромереж, які мають розширену інфраструктуру вимірювання, яка автоматично збирає дані лічильників із широко розповсюджених датчиків.

Запропонований алгоритм стиснення енергетичних даних у реальному часі поєднує кілька існуючих алгоритмів стиснення та працює на 2–10% ефективніше, ніж раніше опубліковані алгоритми. Ця ефективність має вирішальне значення в системах реального часу, де дані повинні оброблятися та передаватися швидко, щоб уникнути затримок і потенційних збоїв системи.

Окрім стиснення даних, стійкість до помилок у системах електромереж також передбачає використання методів машинного навчання та штучного інтелекту для виявлення та діагностики несправностей. Ці методи можуть допомогти ідентифікувати та діагностувати несправності в електромережі в режимі реального часу, дозволяючи швидко виправляти та мінімізувати вплив цих несправностей на роботу електромережі.

Наприклад, гібридні моделі машинного навчання можна використовувати для підвищення стійкості електромережі шляхом виявлення та усунення несправностей у реальному часі. Ці моделі поєднують різні методи машинного навчання для підвищення точності та ефективності виявлення та діагностики несправностей.



Крім того, стійкість електромережі можна виміряти за допомогою моделі введення-виведення динамічної непрацездатності. Вона відображає здатність електромережі справлятися зі збуреннями та змінами рівноважного стану через здатність відновлення. Цю модель можна використовувати для вимірювання стійкості електромережі та для перевірки ефективності заходів, вжитих для підвищення стійкості електромережі.

Пряме виправлення помилок — це метод, який використовується в передачі даних для виявлення та виправлення помилок, які виникають під час передачі даних. Цей метод працює шляхом додавання надлишкових даних до вихідних даних перед їх передачею. Ці надлишкові дані використовуються для виявлення та виправлення помилок, що виникають під час передачі. Якщо виявлено помилку, надлишкові дані використовуються для виправлення помилки. Це дозволяє точно реконструювати вихідні дані, навіть якщо частина їх була втрачена або пошкоджена під час передачі.

Алгоритми стиснення не є нейтральними для безпеки. Застосування стиснення даних різними способами впливає на властивості безпеки систем.

### 1. Ефективність передачі даних

Стиснення даних часто використовується для зменшення розміру файлів або даних для більш ефективної передачі через мережі. Менші розміри даних означають швидший час передачі та меншу пропускну здатність. У контексті кібербезпеки ця ефективність має вирішальне значення для підтримки безпечної та оперативної мережі. Швидша передача може сприяти швидшому часу реакції на виявлення та запобігання загрозам безпеки.

### 2. Безпека мережі

Стиснуті дані можуть впливати на те, як пристрої безпеки, такі як брандмауери та системи виявлення вторгнень, аналізують мережевий трафік. Деяким інструментам безпеки може бути важко перевірити стислі дані, потенційно дозволяючи шкідливому вмісту залишатися непоміченим. Зловмисники можуть використовувати стиснення, щоб маскувати свої корисні

дані та ускладнювати системам безпеки ідентифікацію та блокування зловмисних дій.

### 3. Цілісність даних

Алгоритми стиснення, якщо вони не реалізовані або налаштовані належним чином, можуть створювати вразливості, якими можуть скористатися зловмисники. Погано розроблені алгоритми стиснення можуть призвести до пошкодження даних або навіть полегшити певні типи атак, наприклад атаки на основі стиснення.

### 4. Безпека зберігання

У середовищах зберігання стиснуті дані зазвичай використовуються для оптимізації простору для зберігання. Однак, якщо алгоритм стиснення небезпечний, виникають проблеми з безпекою. Якщо зловмисник може маніпулювати стиснутими даними таким чином, щоб використовувати вразливі місця в процесі декомпресії, це може призвести до порушень безпеки. Належний захист стиснутих даних під час зберігання є важливим для збереження конфіденційності та цілісності конфіденційної інформації.

### 5. Безпечна передача файлів

У безпечних протоколах передачі файлів стиснення часто інтегровано для оптимізації часу передачі даних. Однак безпека алгоритму стиснення та його впровадження стає першорядним у забезпеченні конфіденційності та цілісності переданих даних. Методи шифрування вводяться для зміни даних перед передачею, щоб зберегти конфіденційність сторін, які беруть участь у спілкуванні, або захистити конфіденційність даних від зловмисників. У багатьох випадках передані дані вимірювань мають форму двовимірної графіки, яка стискається за допомогою кодеків зображень. У таких випадках вкрай важливо стиснути дані зі збереженням якості, придатної для подальшої обробки даних, і зберегти властивості безпеки шифрування.

### 6. Сценарії атак із використанням методів стиснення

Стиснення даних приносить користь у вигляді більш ефективного спілкування; однак зміна властивостей даних може піддати систему експлуатації [19-20].

### 1.1.3 Видалення шумових компонент

Відновлення сигналу з спостережуваних даних із зашумленням зазвичай розглядається як важлива попередня обробка і є сферою досліджень протягом десятиліть. Досі в літературі було описано багато алгоритмів для зменшення шуму, включаючи традиційний лінійний фільтр, такий як фільтр низьких частот Баттерворта, фільтр Вінера та пороговий фільтр на основі вейвлетів [21]. Більшість із них виявилися ефективними у видаленні небажаних компонентів. Однак лінійні методи фільтрації не дуже ефективні, коли сигнали містять гострі краї та імпульси короткої тривалості [22]. Що стосується методів усунення шуму на основі вейвлетів, то важко вибрати основу вейвлету, масштаб, порогову функцію та оптимальне порогове значення.

Нещодавно вчені розробили емпіричний режим декомпозиції (ЕРД) для декомпозиції нелінійних і нестационарних сигналів на серію функцій внутрішнього режиму (ФВР). Головна перевага ЕРД полягає в тому, що він повністю залежить від самих даних. Отже, результати зберігають повну нестационарність характеристик цільових сигналів. У цьому світлі метод ЕРД є кращим за підхід вейвлет-аналізу, де базові функції є фіксованими і, таким чином, не обов'язково збігаються з усіма реальними сигналами. Властивість ЕРД вести себе як діагностичний банк фільтрів, подібний до вейвлетів, була корисною для усунення шуму сигналу та привертала все більше уваги [23-25].

Однак алгоритм ЕРД може зіткнутися з проблемою змішування режимів, коли сигнал містить переривчастість. Тому було введено ансамблеву емпіричну модову декомпозицію (АЕМД). Алгоритм визначає набір ФВР для ансамблю випробувань, кожне з яких отримано шляхом застосування ЕРД до цікавого сигналу з додаванням незалежного однаково розподіленого білого

шуму з однаковим стандартним відхиленням. Враховуючи властивості білого шуму, можна подолати проблему змішування мод. Завдяки вражаючим характеристикам АЕМД використовувався для вирішення кількох проблем у галузі науки та техніки. Його використовували для розрахунку залишкового сигналу з метою виявлення локалізованих несправностей коробки передач або пошкодження на ранній стадії. У [26] автори використовували його для прогнозування короткострокового пасажиропотоку за допомогою нейронних мереж зворотного поширення (НМЗП). Вчені розклали ехо-сигнали удару на інший спектральний склад для виділення сигналу дефекту.

Як більш надійну версію ЕРД із захистом від шуму, АЕМД можна використовувати як альтернативу методам усунення шумів на основі ЕРД. Крім того, нещодавно було вивчено використання процесу АЕМД як фільтра та його порівняння з методом ЕРД [27]. Покращена ефективність фільтрації може бути досягнута за допомогою АЕМД, ніж ЕРД з відповідним доданим шумом і достатньою пробною кількістю.

Видалення шумових компонент є одним із важливих етапів побудови моделі інформаційного сигналу, який передуює його аналізу. Найбільш відомими та застосовуваними методами видалення шуму та стиснення даних є методи, в яких використовується апроксимація базисними функціями різноманітних типів. Всі системи базисних функцій можна поділити на три групи:

- 1) глобальні ортогональні (базиси Фур'є, Хартлі, Чебишева);
- 2) локальні (кускові поліноми, базисні сплайни);
- 3) глобальні неортогональні (функції Котельникова, ступеневі) [28].

## 1.2 Сучасні методи та засоби моніторингу якості електричної енергії

Одним із найпростіших і основних методів вимірювання якості електроенергії є використання мультиметра або вольтметра для перевірки напруги та частоти джерела живлення. Це може допомогти визначити будь-які відхилення від номінальних значень, наприклад перевищення напруги,

зниження напруги або коливання частоти. Однак цей метод дає лише миттєвий знімок якості електроенергії в певний момент часу та не фіксує жодних перехідних чи динамічних подій, таких як стрибки, спади чи коливання. Крім того, цей метод не надає жодної інформації про форму сигналу або спотворення, які можуть вплинути на вміст гармонік і коефіцієнт потужності джерела живлення.

Інший метод вимірювання якості електроенергії полягає у використанні осцилографа або аналізатора форми сигналу для захоплення та відображення форми сигналів напруги та струму. Це може допомогти вам визначити будь-які аномалії або спотворення у формі сигналу, такі як гармоніки, інтергармоніки, виїмки, шуми або мерехтіння. Гармоніки — це частоти, кратні основній частоті, які можуть спричинити перегрів, втрати, перешкоди або резонанс у системі. Інтергармоніки — це частоти, не кратні основній частоті, і можуть спричиняти подібні проблеми, що й гармоніки. Виїмки — це раптові зниження форми сигналу напруги, які можуть виникнути внаслідок перемикання або випрямлення. Шум — це будь-який небажаний сигнал, який може заважати зв'язку або контролю системи. Мерехтіння — це швидка зміна амплітуди напруги, яка може спричинити відчутні коливання яскравості світла. Аналіз форми сигналу може надати більш детальну та точну інформацію про якість електроенергії, ніж вимірювання напруги та частоти, але для цього потрібне більш складне та дороге обладнання та програмне забезпечення.

Третій метод вимірювання якості електроенергії полягає у використанні вимірювача коефіцієнта потужності або аналізатора потужності для обчислення коефіцієнта потужності джерела живлення. Коефіцієнт потужності - це відношення реальної потужності до повної потужності та вказує, наскільки ефективно потужність використовується навантаженням. Низький коефіцієнт потужності означає наявність високої складової реактивної потужності, яка не сприяє корисній роботі, але викликає втрати та падіння напруги в системі. Низький коефіцієнт потужності також може бути

результатом високих гармонійних спотворень, що зменшує ефективну напругу та струм, доступні для навантаження. Вимірювання коефіцієнта потужності може допомогти вам оцінити ефективність і продуктивність вашої системи та визначити будь-які можливості для покращення або компенсації. Однак лише вимірювання коефіцієнта потужності не вказує на джерело або природу проблем з якістю електроенергії, наприклад, чи вони викликані гармоніками, коливаннями напруги або характеристиками навантаження.

Четвертий метод вимірювання якості електроенергії полягає у використанні вимірювача якості електроенергії або монітора якості електроенергії для запису та аналізу різних параметрів і показників якості електроенергії протягом певного періоду часу. Вимірювач якості електроенергії може вимірювати та відображати напругу, струм, частоту, форму хвилі, коефіцієнт потужності, гармоніки, інтергармоніки, мерехтіння, події напруги та споживання енергії джерелом живлення. Монітор якості електроенергії також може зберігати та передавати дані на комп'ютер або мережу для подальшої обробки та звітування. Вимірювання якості електроенергії може надати найповнішу та надійну інформацію про якість електроенергії та допомогти вам визначити причини, наслідки та рішення проблем із якістю електроенергії. Однак вимірювання якості електроенергії також потребує найсучаснішого та дорогого обладнання та програмного забезпечення, а також може знадобитися професійне встановлення та обслуговування.

#### 1.2.1 Параметри ЯЕЕ та їх спотворення

Намагаючись визначити: що таке якість електроенергії в електричних мережах, якими факторами вона визначається та за якими передумовами її оцінювати, необхідно уточнити власне значення терміну якість електроенергії. Цей термін часто використовується як синонім надійності електропостачання, щоб вказати на наявність адекватного та безпечного електропостачання. Інше,

ширше визначення описує якість послуг, що охоплює три аспекти: надійність постачання, якість пропонованої електроенергії та надання інформації.

Електроенергія як особливий продукт має певні характеристики, що дають можливість визначити її придатність для різних виробничих процесів. Цей набір характеристик, що дають змогу споживачам електроенергії виконувати призначені функції, узагальнюється поняттям "якість електроенергії". Останнім часом велику увагу приділяють підвищенню якості електроенергії. Це пов'язано з тим, що невідповідність якості електроенергії встановленим показникам може чинити негативний вплив на електроспоживання, режими роботи електрообладнання, системи релейного захисту, автоматики й телемеханіки, виробничі процеси та призвести до значних економічних утрат через зниження надійності електропостачання.

Проблема ощадливого використання всіх видів енергії, зокрема електроенергії, і підвищення ефективності роботи електрообладнання є важливою державною проблемою [29].

Якість електроенергії відображають такі групи показників.

1. Величини, що характеризують несинусоїдність напруги [30].

Коефіцієнт спотворення синусоїдності кривої напруги та коефіцієнт  $n$ -ї гармонічної складової напруги. Для обчислення останнього необхідно визначити значення напруги окремих гармонік, що генеруються нелінійним навантаженням. Нормально та гранично припустимі значення  $K_{Un}$  є нормованими величинами. Стандарт дає змогу не враховувати гармонічні складові порядків понад 40 або ті, значення яких менші за 0,3 %.

Небезпеку для електрообладнання становлять спотворення синусоїдності кривої напруги понад 8 % або наявність у кривій напруги її гармонічних складових непарного (парного) порядку з коефіцієнтом гармонік більшим за 5 %.

2. Величини, що характеризують несиметрію напруги основної частоти.

Коефіцієнт несиметрії напруг за зворотною послідовністю визначається відношенням діючого значення напруги зворотної послідовності основної

частоти трифазної напруги  $U_{-(1)}$  до номінальної лінійної напруги  $U_{L\text{НОМ}}$ , вираженим у відсотках.

Коефіцієнт несиметрії напруг за нульовою послідовністю трифазної чотирипровідної системи живлення (з нульовим проводом) визначається відношенням діючого значення напруги нульової послідовності основної частоти  $U_{0(1)}$  до номінальної фазної напруги  $U_{\text{НОМ}}$ , вираженим у відсотках.

Нормально та гранично припустимі значення коефіцієнтів несиметрії напруг за зворотною та нульовою послідовностями дорівнюють 2,0 та 4,0 % відповідно.

3. Величини, що характеризують гармонічні спотворення вхідного струму, це коефіцієнт загальних гармонічних спотворень струму, зважений коефіцієнт гармонічних спотворень вхідного струму, частково зважений коефіцієнт гармонічних спотворень струму [31].

У разі проходження струмів вищих гармонік елементами системи електропостачання виникають додаткові втрати електроенергії, насамперед в трансформаторах, двигунах і генераторах. У низці випадків ці втрати можуть призвести до неприпустимих порушень теплового режиму електрообладнання.

4. Величини, що характеризують співвідношення між активною та повною потужностями.

Активна потужність  $P$  дорівнює середньому значенню миттєвої потужності за період напруги живлення та визначає кількість електромагнітної енергії, що незворотно перетворюється за цей час в інші види енергії. Повна потужність є одним із базових понять теорії потужності, що визначається як максимальна активна потужність навантаження, що може бути досягнута за заданих напруг системи живлення та потужності втрат в лінії передачі [32].

Повна потужність  $S$  зазвичай більша, ніж активна потужність  $P$  через існування неактивних складових потужності, струми яких, не створюючи корисного ефекту передачі електроенергії споживачеві, призводять до



збільшення втрат енергії в лінії передачі. Виділяють три неактивні складові повної потужності [32]: реактивна потужність (потужність зсуву)  $Q$ , зумовлена фазовими зсувами між гармонічними складовими напруг та струмів; потужність спотворення  $R$ , зумовлена гармоніками струмів нелінійного навантаження, яких немає в спектрі напруг живлення; потужність несиметрії (небалансу)  $B$ , що виникає лише в багатофазних системах через несиметрію навантаження фаз.

### 1.2.2 Математичні методи та способи оцінювання ЯЕЕ

Належний аналіз якості електроенергії вимагає вимірювання досить великої кількості різних параметрів. Зазвичай вимірювання для оцінки якості електроенергії проводяться з використанням алгоритмів цифрової обробки сигналів. Але варто підкреслити, що аналіз гармоній і перехідних процесів (аналіз форми хвилі) справді вимагає набагато більшої обчислювальної потужності, ніж визначення інших показників якості електроенергії.

Традиційно перетворення Фур'є майже виключно використовувалося в енергетиці для виділення високочастотних компонентів. Тим не менш, в останній літературі з посиланням на потенційні застосування енергетичних систем обговорювалися три основні альтернативи [33, 34]. Це перетворення Уолша, Хартлі та Вейвлет. Особливо останній варто рекомендувати. Вейвлет-перетворення (ВП) забезпечує швидкий і ефективний спосіб аналізу нестационарних форм напруги та струму. Отже, можна сказати, що цей інструмент стає першорядним для виявлення та аналізу перехідних процесів.

Подібно до випадку Фур'є, ВП розкладає сигнал на його частотні складові, але на відміну від перетворення Фур'є, ВП може адаптувати роздільну здатність частоти. Вейвлет-перетворення має цифрову реалізовану версію, дискретне вейвлет-перетворення. У цьому виді перетворення змінні масштабу та трансляції дискретизуються.

В існуючій енергетичній системі форму сигналу можна отримати за допомогою вимірювань у точках загального зв'язку, а їх частотні компоненти

потім виводять за допомогою обробки сигналу. Цей процес стосується оцінки якості, реалізованої за допомогою пристроїв і систем моніторингу якості електроенергії.

Відповідна контрольно-вимірювальна апаратура для вирішення задачі оцінки якості електроенергії зазвичай складається з багатофункціональних мікропроцесорних приладів, а саме спеціалізованих аналізаторів якості електроенергії.

Моніторинг якості електроенергії передбачає захоплення та обробку сигналів напруги та струму в різних точках системи. Сигнали, які потрібно вловити, зазвичай мають високі рівні напруги та струму, і це використання трансформаторів струму та напруги є необхідним, перш ніж їх можна буде обробити приладами.

У [35] запропоновано інтегрований метод оцінки якості електроенергії на основі елементного аналізу речовини. Теорія матерії-елемента є методом протиріччя, встановлює модель складних проблем, щоб бути абстрактною, з кореляційною функцією для вираження речей з деякими властивостями, може описати стан з двох аспектів: якісного та кількісного. Метод оцінки, заснований на методі матерії-елемента, долає проблему складного вибору, коли приблизний ступінь приналежності до нечіткого оцінювання, встановлює модель складних проблем як абстрактну, використовуючи кореляційну функцію для опису речей з деякими властивостями, може описати стан з двох аспектів якісних і кількісних, але на них впливатиме фактор суб'єктивної ваги.

У [36] на основі статистики ймовірностей та векторної алгебри запропоновано метод оцінки якості електроенергії на основі добового циклу. Більш зручним для розрахунків є метод оцінки якості електроенергії на основі статистики ймовірностей і векторної алгебри. Метод математичних розрахунків більш систематичний, результат зрозумілий, а проблему невизначеності можна вирішити інтуїтивно. Основна ідея полягає в тому, щоб за певний проміжок часу використовуючи теорію ймовірності розподілу ймовірностей для кожного індексу на кожному рівні, а потім обчислити

індексний стандарт очікування та стандартне відхилення, щоб оцінити ситуацію щодо якості електроенергії шляхом порівняння очікування та стандартного відхилення. Однак вимога моніторингу даних у режимі реального часу показників якості електроенергії є вищою. Необхідно контролювати якість електроенергії в будь-який час протягом періоду часу та оцінювати стан якості електроенергії в цей час.

Генетичний алгоритм використовується для оцінки якості електроенергії, що робить оцінку якості електроенергії більш точною та конкретною. Принцип генетичного алгоритму в біології, дарвінівське виживання найпристосованішого, виживання найпристосованішого, засноване на основній операції багаторазового використання генетики для утримання групи можливих рішень, продовжує генерувати нову популяцію, популяція постійно розвивається, у той час як глобальний паралельний пошук техніка пошуку оптимального індивіда в групі, отримання оптимального рішення для задоволення вимог. Завдяки градієнтному спуску та алгоритму пошуку з моделюванням відпалу, генетичний алгоритм є простим, надійним і потужним [37].

Кластеризація – це неконтрольоване машинне навчання та методи аналізу даних, пошук для визначення обмеженого набору даних для опису, який може об'єктивно відображати реальний світ, залежний від суб'єктивних факторів, ступінь низький, і зручний обчислення. Останніми роками аналіз кластеризації широко вивчався та застосовувався до багатьох галузей, включаючи обробку зображень, аналіз даних, розпізнавання образів та багато інших областей. Відповідно до різних режимів вираження кластеризації, алгоритми аналізу кластеризації можна розділити на різні типи. Існують алгоритми кластеризації на основі розділення, алгоритм ієрархічної кластеризації, алгоритм кластеризації на основі сітки, алгоритм кластеризації на основі щільності, алгоритм кластеризації на основі моделі тощо. Використовується нечіткий синтетичний індекс для оцінки якості електроенергії та здійснення комплексної оцінки якості електроенергії. Для

того, щоб зробити процес оцінки більш об'єктивним і справедливим, метод аналітичного процесу ієрархії використовується для обробки ваги кожного індексу. Враховуючи, що оцінка якості електроенергії є індексом множинної оцінки та визначено низку факторів впливу, запропоновано комплексну методику оцінки якості електроенергії на основі теорії нечіткого багатоцільового прийняття рішень [38-39].

У деяких випадках розглядаються різні оціночні показники при оцінці якості електроенергії, запропоновано метод оцінки якості електроенергії, заснований на методі оскулюючої величини. Цей метод може виконувати комплексну оцінку та аналіз без суб'єктивних параметрів, таких як функція приналежності, тому результат є більш об'єктивним та ефективним. Ефект короткої дошки, заснований на теорії та на основі електромагнітної сумісності чутливого особливого попиту споживача рівень, рівень планування, рівень сумісності та рівень імунітету обладнання, висунутий метод оцінки якості електроенергії комплексного рівня, що сприяє розрізненню якості електроенергії та ступеня оцінки якості електроенергії. Також використовується груповий метод прийняття рішень аналітичної ієрархії для визначення ваги кожного індексу оцінки. На цій основі встановлюється модель і метод комплексної оцінки якості електроенергії за допомогою дерева моделей. Деколи висувається критерій достовірності якості електроенергії, заснований на методі нечіткої комплексної оцінки, встановлює комплексну оцінку ієрархічної моделі якості електроенергії, у моделі в умовах сталого та перехідного режимів якості електроенергії може залежати від комплексного розгляду [40-42].

Відсутність методу комбінованого зважування методу оцінки якості електроенергії, заснованого на методі подолання єдиного права, тиск може підвищити точність оцінки якості електроенергії. Було запропоновано визначати комбінацію вагових коефіцієнтів індексів якості електроенергії (тобто суб'єктивний метод зважування в поєднанні з об'єктивним методом зважування), а за допомогою методу загальнодоступної точки зв'язку нечіткої

синтетичної оцінки якості електроенергії ефективно покращувати об'єктивна та наукова нечітка комплексна оцінка якості електроенергії.

Також використовується нечіткий комплексний метод оцінки якості електроенергії, заснований на процесі аналізу ієрархії ентропійної ваги. Ентропійна вага, як метод об'єктивного зважування, належить до концепції теорії інформації. Ентропія являє собою міру невизначеності у випадковій події та може бути інтерпретована як ймовірність появи певної інформації. Чим менша ентропія, тим більший обсяг наданої інформації, тим більша роль в оцінці, тим більшою має бути вага. Навпаки, чим більша ентропія, тим менша вага [43].

### 1.3 Методи оптимізації інформаційних сигналів

Використання централізованих та децентралізованих схем електропостачання, введення зворотних зв'язків між споживачем електричної енергії та її виробником призвело до стрімкого збільшення інформаційних потоків на всіх етапах функціонування електроенергетичної галузі України, починаючи із виробництва електричної енергії і до її споживання. Це обумовлює необхідність обробки, зберігання та передачі великих масивів даних. З іншого боку, часові обмеження, які накладаються на обробку інформації та оперативність прийняття рішень, а також обмежена пропускна спроможність комунікаційних мереж потребує ефективної оптимізації інформаційних потоків у плані їх стиснення та компактного зберігання, передачі та відновлення без втрат.

#### 1.3.1 Класифікація інформаційних сигналів

Вирішення задачі класифікації інформаційного сигналу полягає у встановленні правил віднесення його до одного із класів за ознаками, які одержані на етапі створення його моделі, оцінки його параметрів і побудови опису класів. В загальному вигляді класифікація представляє собою процес віднесення досліджуваного об'єкту, представленого сукупністю дискретних

даних, до одного із альтернативних класів. Такий процес базується на існуючих відмінностях деякої упорядкованої сукупності ознак розпізнавання. Традиційно, вказані ознаки формуються на основі таких параметрів інформаційного сигналу, як коефіцієнти використання, завантаження, форми, максимуму та заповнення.

Класифікацією інформаційних сигналів є дискримінація, кластеризація та групування. При дискримінаційному аналізі класи видаються площинами ймовірностей або навчальними вибірками. Поняття дискримінації може також мати під собою такі синоніми: розпізнавання образів, діагностика, автоматична класифікація із вчителем, статистична класифікація і т. ін.

Найбільшого поширення набуло розпізнавання образів. Це означає: побудову кластерів на основі великої кількості навчальних даних, надання кожному з кластерів відповідної мітки, асоціювання кожного об'єкта, що надійшов на вхід алгоритму розпізнавання, з міткою відповідного кластера. Навпаки, при кластеризації та групуванні метою є ідентифікація та виділення класів. При групуванні досягається поділ елементів на групи, які не залежать від того, чи є межі поділу природними чи ні. Мета - знайти групи однорідних об'єктів, які схожі між собою, але "сусідні" групи можуть не мати різких відмінностей. При цьому завдання кластерного аналізу полягає в тому, щоб на основі емпіричних даних з'ясувати, наскільки елементи згруповані або розпадаються на ізольовані кластери, кластери. Іншими словами, мета полягає у виявленні груп однорідних об'єктів, схожих між собою (як у групуванні), коли ці групи різко відрізняються одна від одної (на відміну від групування) [44].

### 1.3.2 Стиснення інформаційних сигналів

Ефективне управління електромережою вимагає від оператора володіння точною інформацією про стан системи в якомога більшій кількості точок, щоб мати точні дані для керування системою. Спосіб здійснити це полягає в розробці вимірювальної інфраструктури, додаванні нових точок

вимірювання, збільшенні роздільної здатності за часом і амплітуди, збільшенні пропускної здатності зв'язку та використанні сучасних обчислювальних систем або сучасних приводів із швидшим часом реакції та меншими перешкодами, внесеними до дії системи [45]. Реалізація будь-якої з цих дій вимагає витрат. Водночас споживачі очікують найнижчої ціни на енергію, особливо на сучасних і розвинених ринках, які дозволяють торгівлю енергією, дозволяючи багатьом суб'єктам торгувати нею. Відповідно до теорії керування, роль вимірювальної системи полягає в зборі даних про стан контрольованої системи та передачі їх контролеру, який аналізує дані, витягує з них інформацію та дає команди виконавчому механізму діяти відповідно.

Однією з головних проблем у розвитку сучасних електромереж є забезпечення достатньої кількості даних вимірювань [46]. Враховуючи притаманну періодичність, яку демонструють сигнали в електромережах, процес стиснення сигнальних даних стає сприятливим підходом для збільшення пропускної здатності системи зв'язку та ефективного керування необхідним дисковим простором. Методи стиснення даних дуже популярні в таких областях, як обробка зображень (JPEG, GIF, PNG, WebP), відео (H.264, H.265, VP9) або аудіо (MP3, AAC, Opus), а також загальна інформація-оптимізація співвідношення даних (ZIP, Gzip, LZ77, LZ78).

У сфері теорії інформації та стиснення даних дві фундаментальні концепції, вихідне кодування та ентропійне кодування, відіграють ключову роль в оптимізації представлення та передачі даних. Вихідне кодування, яке часто називають стисненням даних або стисненням сигналу, служить основою для зменшення розміру наборів даних, зберігаючи їхню важливу інформацію. Цей процес передбачає усунення зайвих деталей і зайвої інформації. Наприклад, повсюдна техніка кодування Хаффмана призначає коди змінної довжини символам у текстовому документі на основі їх частоти появи. Найбільш часто використовувані значення отримують коротші коди, що призводить до ефективного стиснення текстових даних [47-48].

Ентропійне кодування, з іншого боку, являє собою спеціалізований підмножина вихідного кодування, яке заглиблюється в статистичні властивості та ймовірності, властиві джерелу даних. Він використовує переваги принципів теорії інформації та теорії ймовірностей для оптимізації ефективності стиснення. Наприклад, арифметичне кодування — це метод ентропійного кодування, який кодує дані на основі їх кумулятивного розподілу ймовірностей. Призначаючи більш короткі коди вірогіднішим символам, досягаються коефіцієнти стиснення, які наближаються до ентропії джерела даних. Це особливо цінно в програмах стиснення без втрат, таких як стиснення даних, пов'язаних із подіями, де важлива точна реконструкція.

Методи вихідного кодування, такі як кодування довжини серії, можуть ефективно зменшити розмір двійкових зображень шляхом кодування послідовних циклів ідентичних байтів як одне значення. Тим часом методи ентропійного кодування, включаючи кодування Хаффмана або арифметичне кодування, додатково стискають дані, використовуючи статистичні властивості значень вибірки. По суті, вихідне кодування та ентропійне кодування є основними інструментами в інструментарії стиснення даних, кожен з яких пропонує унікальні стратегії для оптимізації представлення та передачі інформації, із застосуваннями, що охоплюють текст і зображення, а також аудіо та відеодані.

Кодування довжини циклу — це алгоритм стиснення без втрат, який використовується в аналізі сигналів електромережі для ефективного представлення даних часових рядів від датчиків напруги та струму. Під час фази кодування послідовні ідентичні значення в сигналі стискаються в одне значення та підрахунок, зменшуючи вимоги до зберігання та передачі. Стиснені дані, що супроводжуються відповідними метаданими, зберігаються або передаються. На етапі декодування вихідний сигнал реконструюється для аналізу, що дозволяє ідентифікувати коливання напруги, перехідні процеси та цікаві шаблони в електромережі. RLE є простим алгоритмом; таким чином, його можна реалізувати за низьких витрат ресурсів.



Кодування Хаффмана, широко використовувана техніка стиснення даних, також знаходить застосування в стисненні сигналу електромережі. Він починається зі збору даних часових рядів із датчиків електромережі, а потім, на основі частотного розподілу даних, будує дерево Хаффмана, яке призначає коротші двійкові коди звичайним значенням сигналу та довші коди менш частим. Це адаптоване кодування значно зменшує розмір даних. Стислі дані разом з інформацією про структуру дерева Хаффмана зберігаються або передаються ефективно. Під час декодування дерево Хаффмана використовується для реконструкції початкових значень сигналу, зберігаючи точність даних для критично важливих програм електромережі, включаючи моніторинг мережі та виявлення несправностей.

Дискретне косинусне перетворення широко використовується в стисненні даних енергетичних систем. Дані з енергосистем, такі як електричні величини, такі як напруга, струм і потужність, часто мають високочастотну складову. Дискретне косинусне перетворення можна використовувати для стиснення цих даних шляхом перетворення їх у частотну область, де високочастотні компоненти можуть бути відкинуті, якщо вони не роблять значного внеску в загальні дані [49].

Вейвлет-перетворення є потужним інструментом для стиснення даних, особливо в системах реального часу. Процес вейвлет-перетворення включає поділ сигналу на різні частоти, які потім можуть бути стиснуті незалежно. Це особливо корисно для даних, пов'язаних з енергосистемою, де сигнали часто демонструють низькочастотні та високочастотні компоненти.

Швидке безперервне вейвлет-перетворення — це алгоритм із відкритим вихідним кодом, який розділяє незалежні від масштабу операції та операції, що залежать від масштабу, що є корисним для високоякісного, завадостійкого частотно-часового аналізу в реальному часі нестационарних шумових сигналів.

В енергетичних системах для стиснення записаних даних коливань можна використовувати метод стиснення даних на основі вейвлетів. Цей

метод вибирає оптимальну вейвлет-функцію та шкалу розкладання за критерієм мінімального композитного індексу спотворення стиснення. Найпопулярнішими вейвлет-функціями є сімейства Хаара, Добеші та Койфле. Це врівноважує ефективність стиснення та точність реконструкції.

Вейвлет-функцію та шкалу розкладання можна вибрати безпосередньо відповідно до частоти коливань, яка є найбільш суттєвою характеристикою коливань. Обсяг обчислень у цьому методі значно нижчий, ніж у методах, які вимагають стиснення та реконструкції сигналів з усіма кандидатами вейвлетів і масштабів. Це робить метод стиснення даних на основі вейвлетів для коливань в енергосистемах особливо ефективним. У методі стиснення даних на основі вейвлетів довжина вікна даних, що обробляються одночасно, заслуговує на уважний розгляд. Довжина вікна визначає компроміс між коефіцієнтом стиснення та рівнем спотворення [50].

Ступінь стиснення залежить від частоти коливань і може майже досягати межі ступеня стиснення шкали і. Коефіцієнт спотворення становить  $10^{-4}$  загалом і завжди не більше  $2 \times 10^{-3}$ . Обчислювальне навантаження невелике для стиснення в сховищі.

Вейвлет-стиск загалом є кращим рішенням для обробки перехідних процесів, що робить його більш ефективним для нестабільних мереж. Його можна використовувати як компонент гібридного методу разом з іншими алгоритмами, які краще працюють для передбачуваних періодичних даних, що є поширеним типом сигналу в стабільних електромережах.

Загалом, вибір правильного методу стиснення даних для системи базується на балансі коефіцієнта стиснення, викривлення даних і обчислювальної складності. Однак у сфері енергетичних систем дані, які використовуються для некритичних до часу цілей, здебільшого зосереджуються на досягненні високого коефіцієнта стиснення з низьким спотворенням даних. Складність алгоритму рідко є випадком для такого додатка, оскільки тривалий час обчислення є прийнятним, щоб зменшити

використання середовища зв'язку. Системи реального часу надають набагато більше обмежень на обраний метод.

### 1.3.3 Видалення шумових компонент

Як відомо, проблема впливу шуму є однією із найбільш актуальних і поширених проблем у сфері обробки інформаційних сигналів загалом і при стисненні сигналів зокрема. Локальна зашумленість сигналу при його стисненні може бути хибно прийнята за його характерні особливості, що призведе до значного ускладнення алгоритму стиснення, а також негативно вплине на якість стиснення. Вдосконалення методів видалення шумових компонент із інформаційного сигналу та подальшого його стиснення (відновлення) є актуальною науково-практичною проблемою.

Як уже зазначалось у розділі 1, усі системи базисних функцій можна поділити на три групи: глобальні неортогональні (функції Котельникова, ступеневі), глобальні ортогональні (базиси Фур'є, Хартлі, Чебишева), локальні (кусові поліноми, базисні сплайни).

Локальні системи застосовуються за наявності інформаційних потоків, які характеризуються специфічними властивостями (розриви першого та другого роду амплітуд спектральних, кореляційних та ентропійних характеристик). При певній якості стиснення даних видалення шумових компонент різко зменшується, а в окремих випадках призводить до значного збільшення обсягів даних стосовно початкових. Застосування функцій Котельникова (досягається найвищий коефіцієнт стиснення) призводить до суттєвого збільшення витрат на стиснення та розпакову. Для ортогональних базисів загальне число операцій на один відлік більше, ніж для кускових поліномів.

За останні десятиліття у сферу інтересів широкого кола науковців увійшов такий математичний апарат, як вейвлет-перетворення [51]. Аналіз властивостей цього математичного апарату відносно його застосування для

видалення шумових компонент і стиснення інформаційних сигналів дозволяє стверджувати наступне:

- інформаційний сигнал може бути представлено за допомогою ортогональних коефіцієнтів;
- моменти вейвлетів прямують до нуля і дозволяють сигналу аналізувати дрібномасштабні флуктуації і особливості високого порядку, ігноруючи найбільш регулярні поліноміальні складові;
- багаторівнева вейвлет-декомпозиція надає можливість застосовувати ефективну порогову обробку вейвлет-коефіцієнтів кожного рівня для отримання більшого ступеня стиснення.

У роботі [52] наведено функцію стиснення на основі вейвлет-аналізу, яка з використанням аналізу всередині масштабної кореляції між вейвлет-коефіцієнтами із застосуванням неупередженої оцінки ризику Штейна дозволяє досягти оптимальних параметрів стиснення. На відміну від методів, заснованих на оцінках Байеса, у запропонованому методі не використано жодних попередніх гіпотез щодо вейвлет-коефіцієнтів. Разом з тим, похибка (ризик) даного методу є достатньо значною і залежить від гармонічного складу сигналу.

У роботі [53] запропоновано метод реконструкції невідомої функції  $f$  на  $[0,1]$  з зашумленими даними із однаково розподіленими стандартними гаусовими випадковими змінними, в якому представлено оцінювач порогових значень, адаптивний до гладкості сигналу  $f$  в широкому спектрі.

Робота [54] присвячена основним принципам визначення вейвлет-порогу та порогових функцій традиційних структур. Для побудови нової основи традиційних порогових функцій вейвлетів введено коефіцієнти корегування. На основі аналізу властивостей фіксованого порогу введено логарифмічну функцію кількості рівнів розкладання вейвлетів для створення нової формули фіксованого порогу. Запропонований підхід покращує функції м'якого порогового значення з постійним відхиленням і жорсткого порогу з розривами функції.

Недолік такого підходу полягає в тому, що на різних рівнях розкладання приймається однакове порогове значення. При цьому не достатньо ефективно фільтрується шум (шуми можуть мати однакові закони розподілення, але із різними дисперсіями).

У роботі [55] дано оцінки ризику для широко вживаних порогових функцій, а саме SURE (Stein unbiased risk estimation) метод, методи універсального порогу та minimax. Показано, що алгоритм вибору вейвлетного порогового значення зазвичай використовується в ортогоналі декомпозиції, тобто для проведення аналізу з різною роздільною здатністю та перетворенням пакетних вейвлетів. Вирішено також питання підбору жорсткого або м'якого порогів, фіксованого або залежного від рівня композиції.

Недостатньо обгрунтовано вплив типу вейвлету на усунення шуму. Стверджується, що обчислення лише декількох ненульових коефіцієнтів має вирішальне значення для усунення шуму та зменшення складності обчислень. Але це не зовсім так. Вибір типу вейвлета з оптимальним обчисленням для отримання більшої кількості вейвлет-коефіцієнтів, близьких до нуля, не є вирішальним для більшості застосувань.

#### 1.4 Основні задачі дослідження

Моделювання та імітація спотворень якості електричної енергії стає фундаментальною методологією дослідження для забезпечення альтернативної оцінки продуктивності складних енергетичних систем та можливості тестування застосування різноманітних методів та засобів покращення якості електричної енергії шляхом своєчасної зміни параметрів моделювання.

Для цього розробка нових системних моделей та інструментів моделювання потребує в свою чергу створення моделей для генерації різноманітних сигналів спотворення якості електричної енергії із забезпеченням необхідної гнучкості моделювання та генерації від простих до

складних сигналів, включаючи багатоступеневі, та у випадку одночасної наявності декількох сигналів спотворення, які виникають паралельно, або накладаються одні на одну.

Це потребує безперервного моніторингу та тривалого періоду часу для отримання та збору всіх типів сигналів параметрів якості електроенергії, оскільки виникнення спотворення є невизначеним. Враховуючи все це тема дисертаційної роботи є актуальною як з наукової так і практичної точок зору.

Основні задачі дослідження:

1. Проаналізувати сучасний стан методів і засобів оцінювання якості електричної енергії.
2. Оцінити вплив сучасних математичних методів для побудови систем моніторингу якості електричної енергії.
3. Розробити математичну модель формування спотворень якості електричної енергії.
4. На основі розробленої математичної моделі формування спотворень якості електричної енергії розробити метод комп'ютерного моделювання електричної напруги в електричній мережі із заданими типами спотворень амплітуди і частоти.
5. Розробити або модифікувати метод ідентифікації типів перехідних процесів в системах живлення.
6. Розробити або модифікувати методи оптимізації інформаційних потоків в плані видалення шумових компонент перехідних процесів в системах живлення, адаптованих до гармонічного складу сигналів та їх сингулярності

### 1.5 Висновки до розділу 1

На основі аналізу сучасного стану методів оцінювання якості електричної енергії визначено найбільш критичні проблеми при ідентифікації типу спотворень електричної енергії, які не повністю вирішені на даний момент.

Процеси побудови та подальшого функціонування інтелектуальних електричних мереж потребують грамотної інтеграції та автоматизації процесів генерації, передачі, інформаційної платформи даних і основаної на ній узагальненої моделі інформаційних потоків електроспоживання. Після проведених розрахунків і аналізу доводиться, що існує можливість створення узагальненої моделі інформаційних потоків режимів електроспоживання, представлену ієрархічною структурою порівневого частотного обчислення локальних максимумів вейвлет-перетворення із зрушенням, яке є адаптивним до досліджуваного сигналу. В залежності від поставленої задачі створена модель дозволяє проводити аналіз та обробку інформації за окремими рівнями, що забезпечує проведення моніторингу кількісних та якісних характеристик електроспоживання у реальному часі; проведення експрес-моніторингу якості електричної енергії для своєчасного запровадження випереджуючих керуючих впливів та виявлення винуватця існуючого спотворення; проведення балансових розрахунків за спожиту електричну енергію і також у відповідності до її якості.

## РОЗДІЛ 2.

### РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ФОРМУВАННЯ СПОТВОРЕНЬ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Моделювання та імітація спотворень якості електричної енергії стає фундаментальною методологією дослідження для забезпечення альтернативної оцінки продуктивності складних енергетичних систем та можливості тестування застосування різноманітних методів та засобів покращення якості електричної енергії шляхом своєчасної зміни параметрів моделювання.

Розробка для цього нових системних інструментів моделювання потребує в свою чергу створення моделей спотворення якості електричної енергії із забезпеченням необхідної гнучкості моделювання від простих до складних сигналів, включаючи багатоступеневі, та для випадку одночасної наявності декількох сигналів спотворення, які виникають паралельно, або накладаються один на інший.

#### 2.1 Числові моделі формування спотворень якості електричної енергії

На даний час існує велика кількість засобів для моделювання систем електропостачання. Серед них найбільш часто в академічному середовищі використовуються наступні програмні засоби: версія АТР симулятора програми електромагнітних перехідних процесів (ЕМТ) [56]; ЕМТDC (симулятор електромагнітних процесів, включаючи постійний струм) - представляє та розв'язує диференціальні рівняння (для обох електромагнітних та електромеханічних систем) у часовій області та найбільш застосовується для моделювання миттєвих реакцій у часовій області (також відомих як електромагнітні перехідні процеси) електричних систем; симулятор PSCAD (Power Systems CAD) з ЕМТDC [57, 58] - моделюються збурення в системі розподілу електричної енергії, включаючи тільки провали/перевищення, перехідні процеси, гармоніки, перепади напруги та мерехтіння, які впливають на якість електроенергії; MATLAB з Power System Toolbox [59] – динамічне



модельовання, Power System Analysis Toolbox [60] - це інструментарій Matlab для статичного та динамічного аналізу і керування електроенергетичними системами; Simulink з SimPowerSystems (SPS) [61] – імітаційне модельовання електротехнічних пристроїв. На відміну від Simulink, в SPS моделях в якості початкових умов беруться результати попереднього розрахунку сталого режиму. Для задання нульових (або інших) початкових умов необхідне використання графічного середовища користувача. Power Analysis Toolbox (PAT) [62] - є дуже гнучким і модульним інструментом для аналізу потоків навантажень, перехідних процесів і слабких сигналів систем електроенергії (малих та середніх).

Аналіз застосування даних програм та засобів симуляції показує наступне. Всі вони, в основному, призначені для модельовання систем електропостачання, починаючи з генерації, передачі та розподілу електричної енергії, і мають одну загальну рису. Враховуючи їх потужний математичний апарат та технічні засоби, вони застосовуються для аналізу та модельовання електроенергетичних систем в академічному середовищі, або потужних навчальних закладах. Для широкого загалу науковців необхідні більш доступні та широко використовувані моделі генерації і обробки параметрів якості електричної енергії.

Першим дослідницьким кроком для вирішення даної проблеми було модельовання – як альтернативний спосіб отримання сигналів параметрів якості електричної енергії. Спочатку тип параметрів якості електричної енергії, які можна було змодельовати, обмежувався виключно можливостями програмного забезпечення для модельовання, доступністю моделей та знаннями користувачів [63]. Також, широко відоме використання загального набору математичних рівнянь [64, 65], числове модельовання та генерація спотворень якості електричної енергії для перевірки різноманітних алгоритмів аналізу якості електричної енергії.

Потрібно відмітити, що аналіз застосування даних методів модельовання спотворень якості електричної енергії (загальний набір числових моделей) був

обмежений лише декількома типами простих спотворень. На той час він не охоплював падіння напруги, спричинене запуском потужних двигунів та підключенням трансформаторів, імпульсні перехідні процеси, вплив демпферних контурів та електромагнітні перешкоди. Окремою групою при цьому є наявність декількох типів спотворень одночасно [66].

### 2.1.1 Основні математичні рівняння визначення спотворень ЯЕЕ та формування на їх основі графічних представлень

Провал напруги – тимчасове зменшення середньоквадратичної величини напруги в точці електричної системи електропостачання нижче визначеного стартового порогу. Стартовий поріг провалу вважають 90% від величини опорної напруги. Провал напруги є найпоширенішим типом PQ порушення, який триває від 0,5 до 10 циклів. Провали напруги зазвичай пов'язані з короткими замиканнями, такими як однопровідний контакт із землею (LG), лінія-лінія (LL), подвійна лінія-земля (LLG), трифазний (LLL), і замикання трьох фаз на землю (LLLG).

Провали напруги є нестационарними і можуть відбуватися час від часу упродовж доби через несправність енергосистеми, блискавку, потрапляння під напругу трифазного трансформатора та запуск електричних двигунів. Провал напруги, спричинений коротким замиканням, може бути змодельований за допомогою синусоїдальної функції, амплітудно-модульованої ступінчастими функціями. Числова модель провалу напруги, викликаного несправністю, може бути змодельована наступним чином [67, 67]:

$$U_A = A \left[ 1 - \alpha \left( u(t - t_1) - u(t - t_2) \right) \right] \sin(2\pi f_1 t + \theta_A), \quad (2.1)$$

де  $\alpha$  – глибина провалу у в.о.,  $0.1 \leq \alpha \leq 0.9$ ,  $T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$ ,  $f_1$  – основна частота,  $\theta_A$  – фазовий кут.

Тривалість падіння напруги визначається ступінчастими функціями  $u(t-t_1)$ ,  $u(t-t_2)$ ,  $t_1$  і  $t_2$  є часом початку та кінця падіння напруги. На рис. 2.1 представлений провал однофазної напруги, де  $t_1 = 0.06$  s,  $t_2 = 0.12$  s.

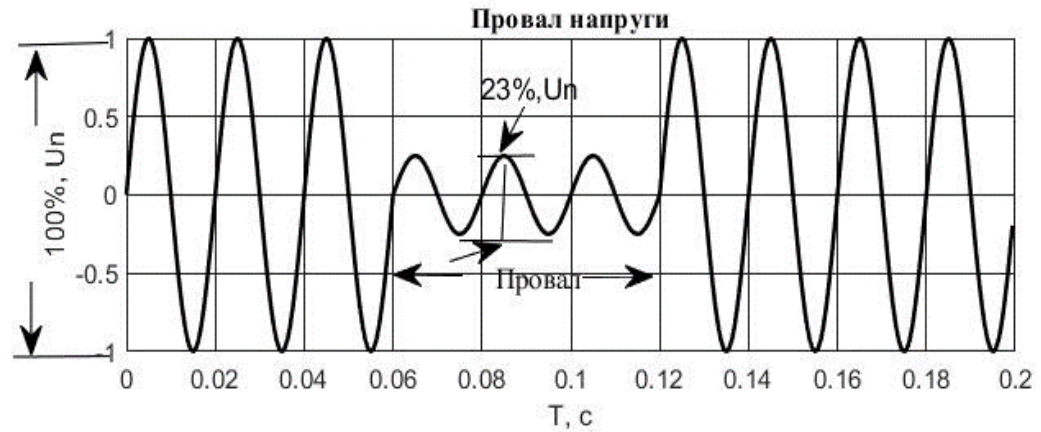


Рисунок 2.1 – Однофазний провал напруги

При цьому необхідно відмітити наступне. Перенапруга, тимчасове перевищення напруги електропостачання – тимчасове зростання середньоквадратичної величини напруги в точці електричної системи електропостачання вище, ніж визначений стартовий поріг. Стартовий поріг – 110% від величини опорної напруги. Для моделювання перенапруги використовується те саме рівняння (2.1), за винятком того, що глибина провалу позитивна в діапазоні від 1,1 в.о. до 1,8 в.о.

Провал трифазної напруги моделюється за допомогою фазового кута  $\theta_A = 0$ ,  $\theta_B = -120^\circ$ ,  $\theta_C = +120^\circ$ . Провали балансової та дисбалансової напруги моделюються шляхом маніпулювання його величиною для кожної фази. Симетричний компонент позитивної, негативної та нульової послідовності та стрибок його фазового кута також моделюється шляхом маніпулювання фазовим кутом  $\theta_A$ ,  $\theta_B$  та  $\theta_C$ . За допомогою числової моделі (2.1), можна моделювати та генерувати падіння напруги, викликане замиканням однієї лінії з землею, двома лініями з землею, міжлінійними замиканнями (типи провалів A, B, C, D, E, F, G [66]) та переривання. На рис.

2.2 представлено трифазний провал (просадка) напруги, викликаний шляхом замикання подвійна лінія-земля (LLG), створений за допомогою числової моделі.

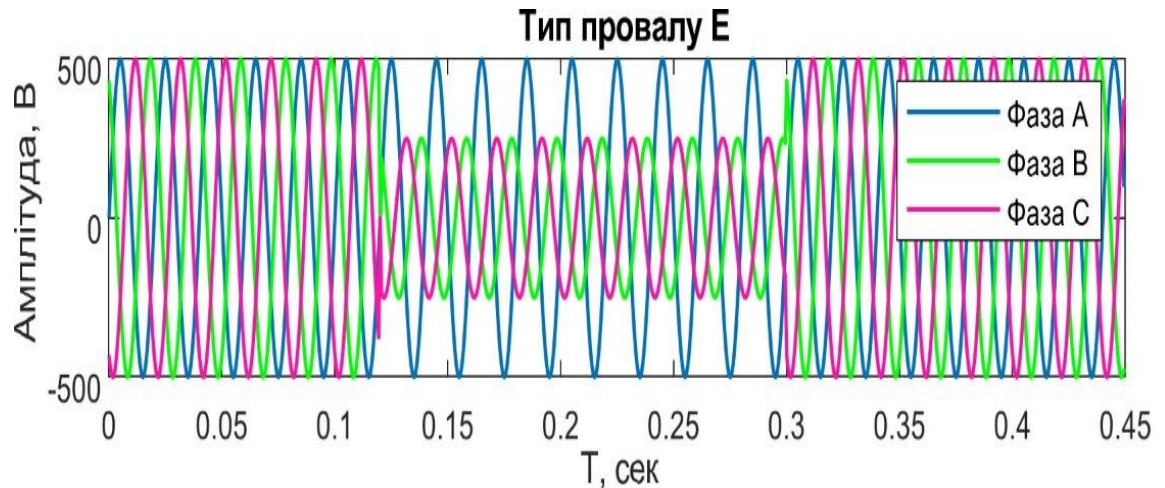


Рисунок 2.2 - Трифазний провал (просадка) напруги, викликаний шляхом замикання подвійна лінія-земля (LLG), створений за допомогою числової моделі

Числова модель, наведена в (2.1), добре підходить для моделювання несправності, що виникає в системі передачі, а провал напруги зазвичай має прямокутну форму. Однак у системі розподілу на провал напруги може впливати таке навантаження, як асинхронний двигун, який змінює форму провалу напруги на непрямокутну. Числова модель провалу напруги, на який впливає робота індукційної машини (двигуна) [68-69], можна моделювати наступним чином:

$$U_A = \left[ 1 - s \left( u_1 \left( 1 - e^{-\alpha t_1} \right) \right) - u_2 \left( 1 - e^{-\beta t_2} \right) \right] \sin(2\pi f_1 t + \theta_A), \quad (2.2)$$

де  $e$  — експоненціальна функція для моделювання падіння напруги під впливом індукційної машини,  $\alpha$  — швидкість спаду напруги провалу, а  $\beta$  —

швидкість зростання (відновлення) напруги після провалу,  $t_1$  – початок провалу,  $t_2$  – початок відновлення провалу

Трифазний провал напруги під впливом асинхронного двигуна та змодельований за допомогою (2.2) показаний на рис. 2.3.

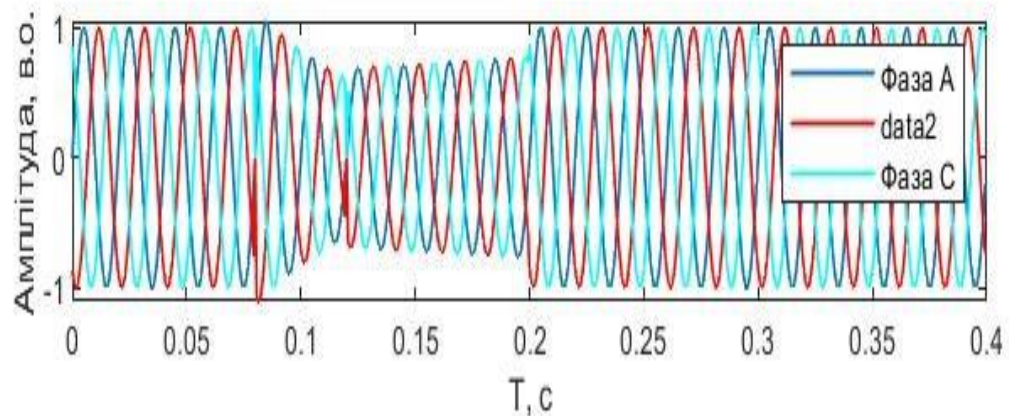


Рисунок 2.3 – Трифазний провал напруги, визваний запуском потужного асинхронного двигуна

Перехідний процес — це дуже короткочасний стрибок напруги або сплеск напруги на синусоїдальній формі. Це нестаціонарна подія якості електроенергії, яка може статися в будь-який час упродовж доби через перемикання в системі розподілу. Перехідний процес, викликаний діяльністю перемикання, як правило, є коливальним і може бути чисельно змодельований за рівнянням (2.3).

$$U_A = \sin(2\pi f_1 t + \theta_A) + [u_1 t_m \sin(2\pi f_{OSC} t_1) \cdot e^{-\rho t}], \quad (2.3)$$

де  $t_1$  - час початку перехідного процесу,  $t_m$  - величина перехідного процесу,  $f_{OSC}$  - частота перехідного коливання, а  $\rho$  - швидкість встановлення перехідного процесу

На рис. 2.4 показано перехідний процес системи живлення, спричинений перемиканням батареї конденсаторів і змодельований за допомогою (2.3). Його відповідний середньоквадратичний графік показує лише невелике зростання величини під час перехідного процесу, а спектр свідчить, що коливальна частота перехідного процесу становить приблизно 425 - 450 Гц [70, 71].

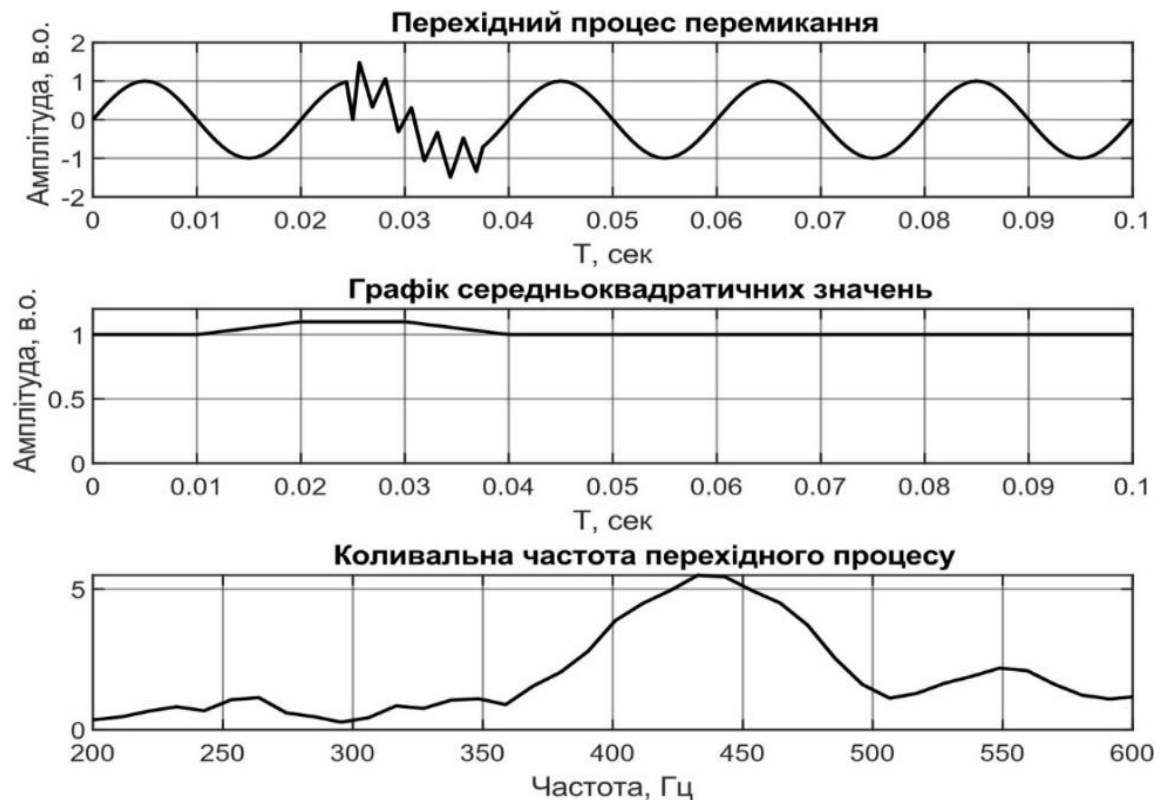


Рисунок 2.4 - Перехідний процес системи живлення, спричинений перемиканням батареї конденсаторів і змодельований за допомогою (2.3).

Флікер.

Флікер (мерехтіння) - відчуття нестійкості зорового сприйняття, спричинене світловим подразником, яскравість або спектральний розподіл якого коливається в часі. Виникає тривожний ефект мерехтіння у видимому світлі, який створює дискомфорт для людського ока. Інтенсивність мерехтіння вимірюється в  $P_{ST}$  (короткочасне мерехтіння) і  $P_{LT}$  (довготривале мерехтіння)

упродовж періоду часу 10 хвилин і 2 години відповідно. Частота мерехтіння знаходиться в межах 0.5 – 30 Гц.

В [72-74] розглядається сигнал основної частоти, змодульований синусоїдальними коливаннями напруги. Числова модель мерехтіння напруги моделюється за допомогою синусоїдальної функції з величиною мерехтіння  $A_m$  і частотою мерехтіння  $f_f$ :

$$U_A = \left[ 1 + A_m \sin(2\pi f_f t + \theta_f) \right] \sin(2\pi f_1 t + \theta_A), \quad (2.4)$$

На рис. 2.5 представлено коливання напруги, що спричиняє флікер упродовж періоду часу в 1 секунду з частотою мерехтіння 8,8 Гц і величиною  $(dU/U) = 16\%$ , згенерована такою числовою моделлю

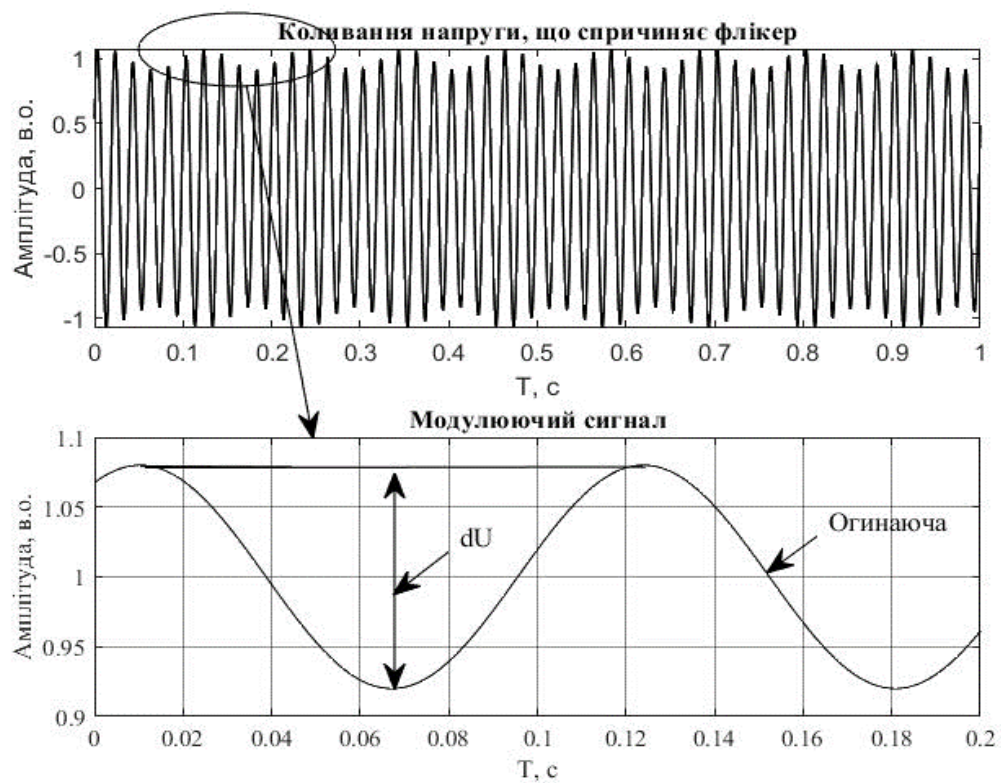


Рисунок 2.5 – Коливання напруги, що спричиняє флікер

### Електричний шум.

Електричний шум виникає через електромагнітні перешкоди, і вони є більш серйозними на промислових підприємствах із інтенсивною роботою машин. Згідно із нормативними документами, шум – це випадковий електричний сигнал із величиною менше 1% від номінальної величини. Він має широкосмуговий спектр, рівномірно розподілений за всіма діапазонами частот і моделюється за допомогою моделі білого шуму Гауса. Передбачається нормальний розподіл Гауса зі статистичними властивостями  $N(0,1)$ , де середнє значення дорівнює  $\mu=0$ , а значення дисперсії дорівнює  $\sigma^2=1$ . Модель шуму, додана до форми сигналу якості електроенергії виглядає наступним чином:

$$U_A = \sin(2\pi f_1 t + \theta_A) + (n_m \sigma(t)), \quad (2.5)$$

де  $\sigma(t)$  — білий гаусівський шум, а  $n_m$  — рівень шуму

Шум зазвичай вимірюється у відношенні сигнал/шум у дБ. Типовий рівень шуму в системі живлення становить приблизно від 50 дБ до 48 дБ, що відповідає приблизно 0,7% до 0,9% від його номінальної величини. На рис. 2.6 представлений синусоїдальний сигнал без шумової компоненти та з наявністю шуму в 15 дБ та його перетворення Фур'є.



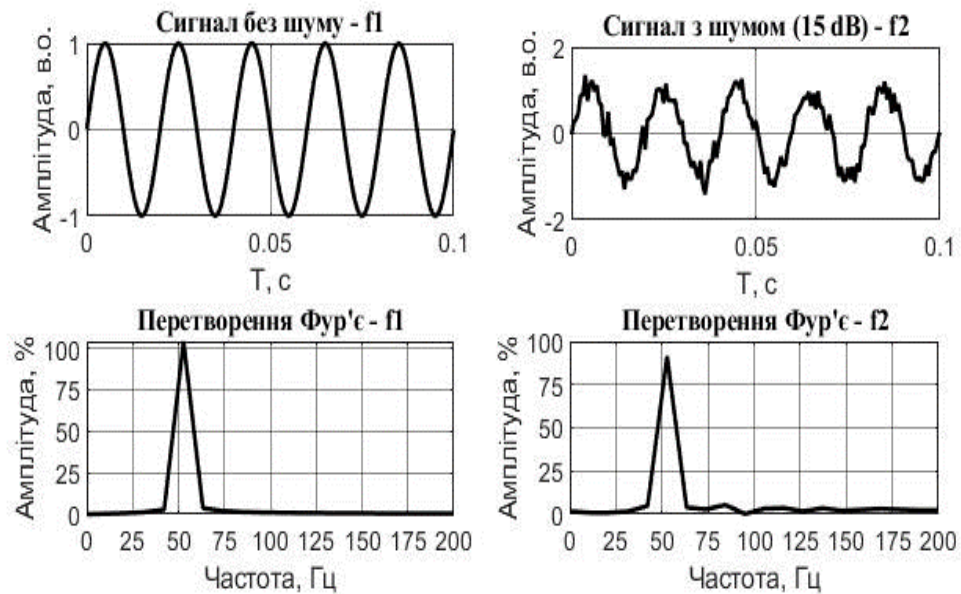


Рисунок 2.6 - Синусоїдальний сигнал без шумової компоненти та з наявністю шуму в 15 дБ та його перетворення Фур'є

## 2.2 Структура побудови числової моделі формування спотворень якості електричної енергії

Детальний аналіз представлених в роботі результатів досліджень дозволив сформувану узагальнену модель спотворень ЯЕЕ. Пропонована в статті модель будується на основі так званої архітектури фреймворк, яка задає структуру, визначає правила та представляє необхідний набір інструментів для створення моделі.

Структура моделі показана на рис. 2.7, де синусоїдальна функція енергосистеми множиться та/або підсумовується з функціями основних параметрів якості електроенергії для отримання числової моделі даного параметру якості електроенергії, при цьому,  $a(t)$  – функція додаткових параметрів якості електроенергії, наприклад перехідний процес, різниця напруги, гармоніка та шум [70, 75-76].

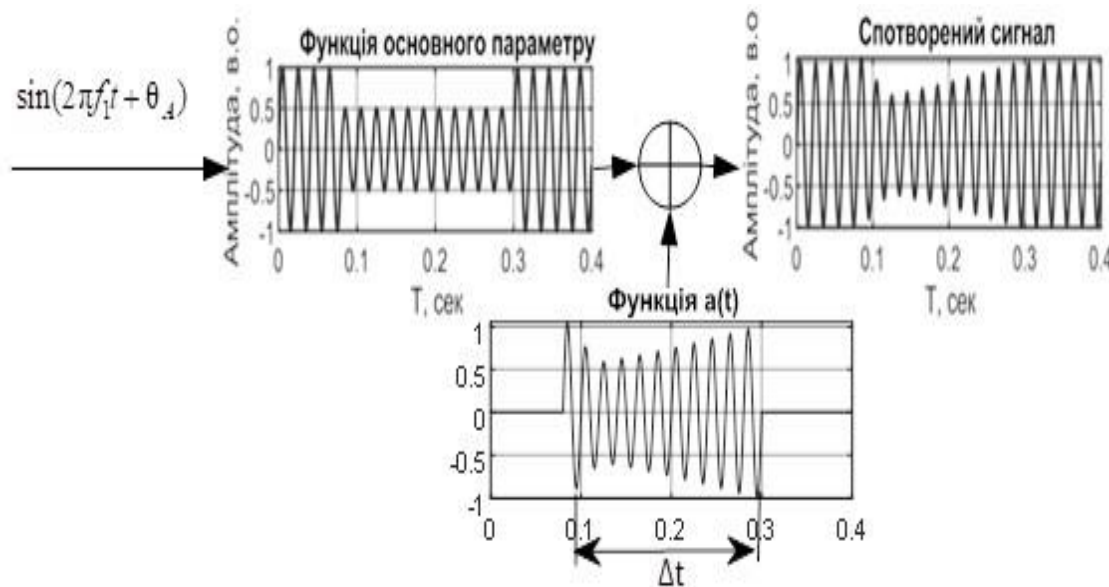


Рисунок 2.7 – Узагальнена структура побудови моделі формування спотворень якості електричної енергії

Як видно із проведених досліджень, основною функцією (частиною) математичних виразів визначення показників якості електричної енергії (ЯЕЕ) є синусоїдальний сигнал, в тій чи іншій мірі спотворений (в залежності від типу показника). Тобто, основою пропонованої моделі спотворень якості електричної енергії буде синусоїда, модульована різноманітними типами математичних функцій:

$$U_{PQ} = [n(t)] \sin(2\pi f_1 t + \theta_A) + [a(t)], \quad (2.6)$$

Для чіткості представлення числової моделі введені деякі позначення, а саме:

$$[1 + \alpha(u(t-t_1) - u(t-t_2))] = [n(t)], \quad (2.7)$$

де  $0.1 \leq \alpha \leq 0.9$  для моделювання провалів зі знаком «мінус» та  $0.1 \leq \alpha \leq 0.8$  для моделювання перенапруг,  $T \leq t_2 - t_1 \leq 7T$  та  $T/20 \leq t_2 - t_1 \leq T/10$  для імпульсних переривань, та для флікера

$$\left[1 + \beta \sin(\gamma 2\pi f_1 t + \theta_A)\right] = \left[n'(t)\right], \quad (2.8)$$

де  $0.1 \leq \beta \leq 0.2$  та  $0.1 \leq \gamma \leq 0.2(0.6)$

Функції представленої в статті моделі спотворень ЯЕЕ підсумовані в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Параметр якості електричної енергії	Функція числової моделі
Провал	$[n(t)] \cdot \sin(2\pi f_1 t + \theta_A)$
Перевищення	$[n(t)] \cdot \sin(2\pi f_1 t + \theta_A)$
Переривання	$[n(t)] \cdot \sin(2\pi f_1 t + \theta_A)$
Гармоніки	$\sin(2\pi f_1 t + \theta_A) + [a(t)]$
Імпульсні переривання	$[n(t)] \cdot \sin(2\pi f_1 t + \theta_A)$
Флікер, флуктуації	$[n'(t)] \cdot \sin(2\pi f_1 t + \theta_A)$
Електричний шум	$\sin(2\pi f_1 t + \theta_A) + [a(t)]$
Гармоніки+провал/перевищення*	$\sin(2\pi f_1 t + \theta_A) \cdot [[n(t)] + [a(t)]]$

### 2.3 Моделювання та дослідження однофазних коротких замикань в електричній мережі

В останні роки насичення електричних мереж потужними нелінійними навантаженнями, впровадження засобів перетворювальної техніки та відновлюваних джерел енергії призводять до необхідності систематичного аналізу та дослідження якості електричної енергії (ЯЕЕ). Одним із факторів, які суттєво впливають на роботу електрообладнання є короткі замикання. В даній роботі, на основі розробленої моделі формування спотворень ЯЕЕ досліджено однофазне коротке замикання в трифазній електричній мережі

шляхом переходу її до однофазної системи з двома проекціями  $\alpha$ - $\beta$  і вектором напруги нульової послідовності.

Дослідження впливу місця розташування точки короткого замикання на напругу в електричній мережі показали, що різниця у відстані від місця пошкодження до навантаження, типу короткого замикання призводить до різного ступеня зміни напруги. Результати моделювання та теоретичний аналіз показують, що запропонована модель та застосування методу просторового вектору добре імітують зміну напруги при короткому замиканні і можуть бути основою створення системи моніторингу ЯЕЕ в електричних мережах.

Як слідує із наукових праць в умовах експлуатації систем електропостачання серед основних причин виникнення різного роду перехідних процесів переважають короткі замикання, які суттєво порушують нормальний режим роботи електроустановок [77]. В електроустановках залежно від класифікаційних ознак електричних мереж (напруга, вид струму, кількість фаз чи полюсів, стан нейтралі або середньої точки) розрізняють такі типи коротких замикань: трифазне, двофазне, двофазне заземлення, однофазне заземлення [78]. Як показує аналіз наукових публікацій, більшість несправностей приносить у системах передачі і розподілу однофазне коротке замикання на землю. Воно призводить до коливань напруги в системах живлення, спричиняючи її падіння, переривання та її збільшення, а також призводить до збільшення струму [79].

### 2.3.1 Методи моделювання та розрахунків коротких замикань

Існує багато методів моделювання та розрахунків коротких замикань в електричних мережах. Серед них можна відмітити наступні. В [80] представлено метод розрахунків коротких замикань шляхом заміни реальної електричної мережі однофазною шляхом створення еквівалентних двопровідних однофазних мереж, подібних до трифазних. Метод дозволяє розраховувати на однофазній двопровідній основі струм короткого замикання

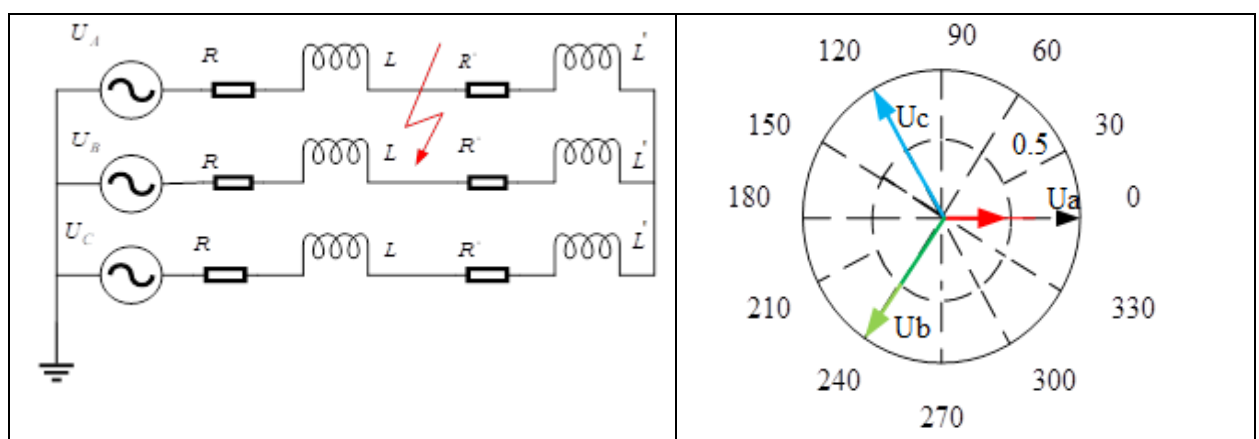
(стаціонарний стан) через землю на трифазній заземленій нейтралі. На основі виведення математичної моделі систем рівнянь [76], як універсального способу розробки режимів роботи системи, коли вона піддається пошкодженню під дією коротких замикань різного типу.

Для встановлення системи захисту в електричній мережі необхідно знати значення струму короткого замикання. Моделювання проводиться на платформі Matlab/Simulink [81-82]. В [83] представлено електричну напругу на основі мережі Петрі.

Складність даних систем та методів, використання в основному методів статистичного аналізу робить їх застосування для побудови систем моніторингу ЯЕЕ в реальному часі неефективним. У зв'язку з чим питання моделювання та ведення розрахунків параметрів перехідних процесів в електричних мережах є актуальним, особливо на етапі проектування та експлуатації систем електропостачання з метою отримання оцінок перспективних і досяжних їх характеристик.

### 2.3.2 Моделювання однофазного короткого замикання

Розглянемо принципову схему заземлення фази А в енергосистемі (рис. 2.8).



а)

б)

Рисунок 2.8 – Принципова схема однофазного замикання на землю – а) та його векторна діаграма – б)

Напруги лінії замикання становлять [1\_8]:

$$U_{A-D} = 0 \quad (2.9)$$

$$U_{B-D} = U_B - U_A = \sqrt{3} \cdot U_A e^{-j150^\circ}, \quad (2.10)$$

$$U_{C-D} = U_C - U_A = \sqrt{3} \cdot U_A e^{j150^\circ}, \quad (2.11)$$

У загальному вигляді при наявності короткого замикання кути зміщення напруг обчислюються наступним чином

$$\theta_B = \frac{5 \cdot \pi}{6} - n \cdot \frac{\pi}{3}$$

де  $n$  – номер фази,  $B = 2$ ,  $C = 3$ .

Тоді для фази  $B$  маємо  $\theta_B = \frac{5 \cdot \pi}{6} - n \cdot \frac{\pi}{3} = 150^\circ - 120^\circ = 30^\circ$

Также само і для фази  $C$ .  $150^\circ - 180^\circ = -30^\circ$ .

Моделювання однофазного короткого замикання на землю проводилось за допомогою розробленої автором моделі формування спотворень якості електричної енергії. Структура даної моделі побудована на основі так званої архітектури *framework*, яка задає структуру, визначає правила та представляє необхідний набір інструментів для створення моделі.

Для моделювання однофазного короткого замикання в основі даної моделі є синусоїди, амплітудно-модульовані різноманітними математичними функціями. В загальному вигляді маємо:

$$U = A \left[ 1 - \alpha \left( u(t - t_1) - u(t - t_2) \right) \right] \sin(2\pi f_1 t + \theta), \quad (2.12)$$

де  $A$  – амплітуда,  $\theta$  – фаза сигналу,  $\alpha$  – величина провалу/перевищення, тривалість падіння/перевищення напруги визначається ступінчастими функціями  $u(t - t_1)$ ,  $u(t - t_2)$ ,  $t_1$  і  $t_2$  є часом початку та кінця падіння/перевищення напруги

Подальші дослідження відповідно до рис.1, показали наступне. Коли у фазі  $A$  відбувається однофазне замикання на землю, напруга у фазі  $A$  дорівнює нулю, а напруга фаз  $B$  і  $C$  у місці замикання підвищується до початкової (рис.

2.9). Час моделювання вибраний  $T = 0.4$  с. Початок короткого замикання –  $t_1 = 0.11$  с, а його закінчення  $t_2 = 0.15$  с. Опір точки замикання, та точки пошкодження вибрано  $0.001$  Ом [84]. На рис. 2.9 представлено результати дослідження однофазного короткого замикання на землю.

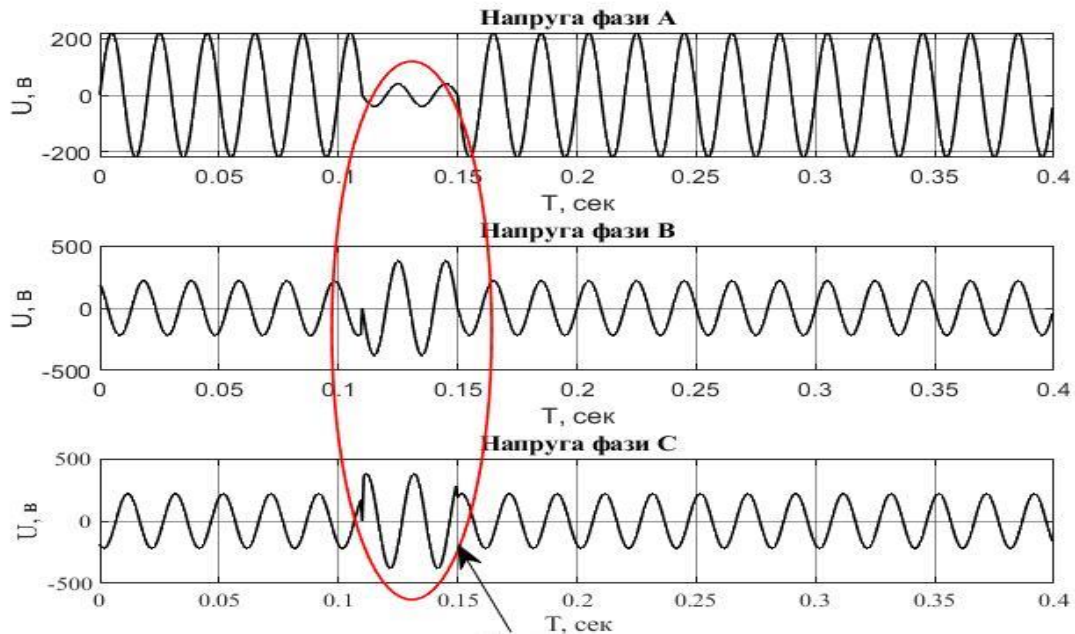


Рисунок 2.9 – Напруга на стороні живлення при однофазному замиканні на землю

Із рис. 2.9 слідує, що напруга фази А падає із «тремтінням», коли однофазне замикання відбувається з 0.11 с, напруга фаз В і С зростає. Зміна фазових струмів представлена на рис. 2.10.

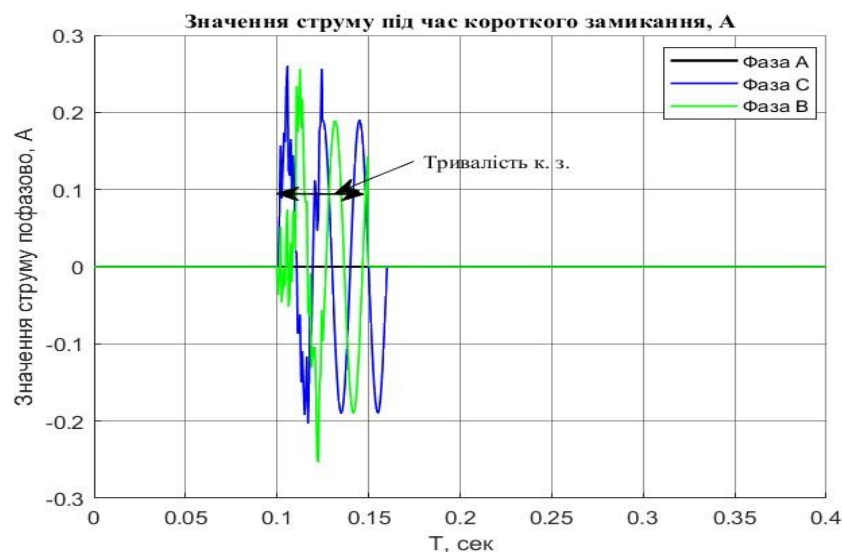


Рисунок 2.10 – Криві струму у точці однофазного замикання на землю

На рис. 3 видно, що струм фази  $A, B, C$  дорівнює 0 перед однофазним замиканням, струм фази  $A$  більше не дорівнює 0, коли відбувається замикання фази  $A$ , струм фази  $A$  сильно коливається за законом синусоїди і швидко падає до 0.

### 2.3.3 Визначення впливу місця розміщення короткого замикання на напругу в електричній мережі

Як відомо, різниця у відстані від пошкодження до навантаження (зміна параметрів лінії постачання/споживання), місця несправності та тип короткого замикання призводять до різного ступеня зміни напруги.

Розглянемо значення фазних напруг генераторів. Виміряні значення напруг фаз  $A, B, C$  до точки замикання, під час дії короткого замикання та після відновлення працездатності системи відповідно до (2.9) – (2.11) представлені на рис.2.11.

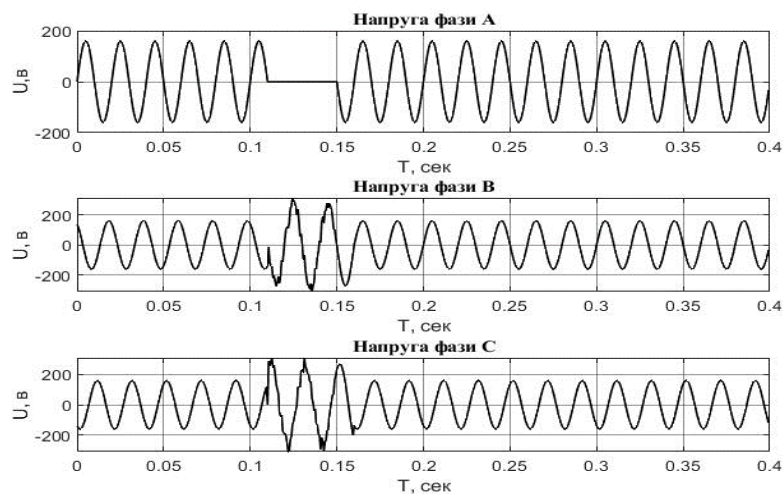


Рисунок 2.11 – Напруги трифазної системи в точці короткого замикання

Як показано на рис. 2.11, напруга фази  $A$  переривається, коли три генератори при короткому замиканні замикаються через 0,11 с. Напруга фази  $A$  дорівнює 0, тоді як напруга фаз  $B$  і  $C$  зростає. Напруга на землю фази  $B, C$  до короткого замикання становить 160 В, тоді як напруга зростає до 277 В після несправності, ( $277=160 \times \sqrt{3}$ ), які підходять до формул (2.1) - (2.3). Коли дія



короткого замикання закінчується (після 0,15 с), значення напруг фаз *A*, *B*, *C* повертаються до нормального.

Досліджувався також вплив типу короткого замикання на ступень зміни напруги [85]. На рис. 2.12 представлена трифазна система напруг на стороні живлення. Як видно із рис. 2.12 напруга всіх трьох фаз просідає на величину 0,8. У порівнянні з результатами дослідження однофазного короткого замикання (рис. 2.12) видно, що масштаб падіння напруги при трифазному короткому замиканні менший, ніж масштаб падіння напруги при однофазному замиканні.

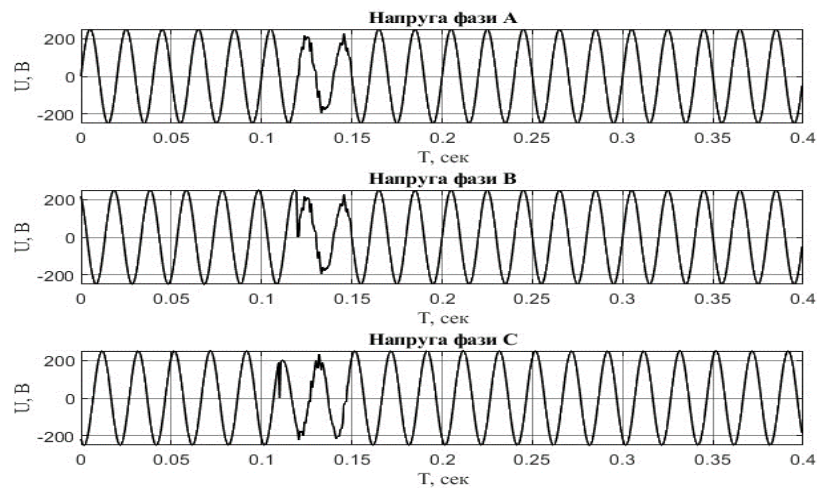


Рисунок 2.12 – Напруги трифазної системи в точці живлення у випадку трифазного короткого замикання

Як слідує із наведених результатів досліджень, в залежності від відстані від місця замикання значення напруг змінюється. Проведенні дослідження показали наступне. Чим менша відстань між навантаженням і точкою короткого замикання, тим більше падає напруга у фазі *A* і тим менше зростає напруга в двох інших фазах (шкала падіння напруги з 0,46 змінилася до 0,4, а шкала підвищення напруги у фазах *B* і *C* – з 1,3 до 1,6).

Проведені дослідження показали, що різний тип несправності та параметри електричної мережі в місці короткого замикання, спричиняють різні порушення електричної напруги в системі живлення. Наявність короткого замикання одного типу при різних його місцях знаходження,

призводить до різного падіння та перевищення напруги. Короткочасна зміна напруги є найпоширенішими спотвореннями якості електричної напруги в електричних мережах. Результати моделювання на основі розробленої моделі, узгоджуються з теорією і достовірно імітують зміну напруги в електричній мережі.

Представлена модель може допомогти створенню основи для ідентифікації та подальших заходів контролю порушень зміни напруги.

#### 2.4 Метод ідентифікації перехідних процесів в електричних мережах шляхом аналізу їх високочастотних характеристик

У більшості випадків умови системи живлення змінюються через різні умови навантаження або збої в системі. Усі зміни створюють перехідний стан у мережі до досягнення нового робочого стану. У зв'язку з цим слід визначити причину перехідного стану, оскільки це може вплинути на надійність і призвести до пошкоджень системи. Загальна класифікація для досліджень перехідних процесів в енергосистемах представлена на рис. 2.13, яка включає перемикання конденсаторів, подачу напруги на лінії та несправності в лініях електропередачі, серед іншого [86-88].



Рисунок 2.13 – Загальна класифікація для досліджень перехідних процесів в системах електропостачання

За останні десятиліття кількість схем захисту, заснованих на аналізі перехідних процесів, зростає. Однак ці схеми повинні бути оцінені за різних перехідних умов, оскільки вони можуть спричинити помилкове спрацювання, коли виникають збурення комутації або удари блискавки [89-91]. Таким чином, для того, щоб сприяти ідентифікації перехідних явищ, три типи перехідних явищ розглядаються, тобто дугові замикання, перемикання конденсаторів і підживлення лінії передачі.

#### 2.4.1 Частотний спектр перехідних процесів

Усі електромагнітні перехідні процеси в енергосистемах мають широкий частотний спектр, який відрізняється для умов несправності та перехідних процесів перемикання. Потім дослідження перехідних процесів

спонукали до проведення досліджень з метою охарактеризувати частотний спектр, створюваний різними перехідними процесами в енергосистемі

Крім того, деякі дослідження встановили максимальні частоти для різних перехідних явищ. Наприклад, для перехідних процесів, викликаних перемиканням конденсатора, очікується, що максимальна частота сигналів напруги та струму буде близькою до 46 кГц [92]. З іншого боку, частотний спектр із максимальною частотою 2 кГц створюється під час підживлення ліній електропередачі [93]. Нарешті, дугові замикання, які дуже поширені в енергосистемах, можуть створювати частоти до 1 кГц. Тобто, кожен тип перехідного процесу має подібні форми сигналів, які розрізняються за величиною, фазою та тривалістю. Судячи з цього, для проведення досліджень не потрібно мати великий набір перехідних сигналів.

#### 2.4.2 Моделювання перехідних процесів

Для проведення досліджень перехідних процесів, виходячи із попередніх їх частотних характеристик використовується частотна вибірка 92 кГц (частота дискретизації повинна бути у два рази більше досліджуваного сигналу) та їх моделювання виконується в еквівалентній системі живлення (рис. 2.14).

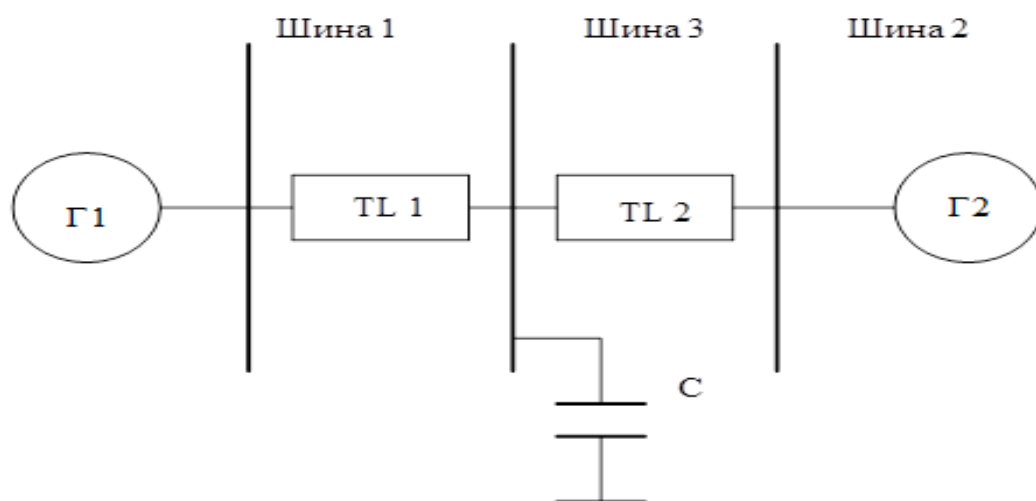


Рисунок 2.14 – Еквівалентна система живлення моделювання перехідних процесів [34]

Моделювання дугових замикань проводились на основі розробленої в роботі моделі спотворення якості електричної енергії вздовж лінії електропередачі TL1. В параметрах моделі враховувалась залежність її параметрів від часу (подібно [92,95]). При цьому враховувалися різні довжини ліній та різні часи виникнення дугових замикань. Живлення ліній здійснюється в лінії передачі електричної енергії TL2, яка живиться з боку шини 2.

На рис. 2.15 представлені перехідні сигнали напруги при дугових замиканнях (рис. 2.15,а) та сигнали з видаленням електричним шумом (рис. 2.15,б) за допомогою розробленого в роботі адаптивного методу вибору порогового значення та типу вейвлету.

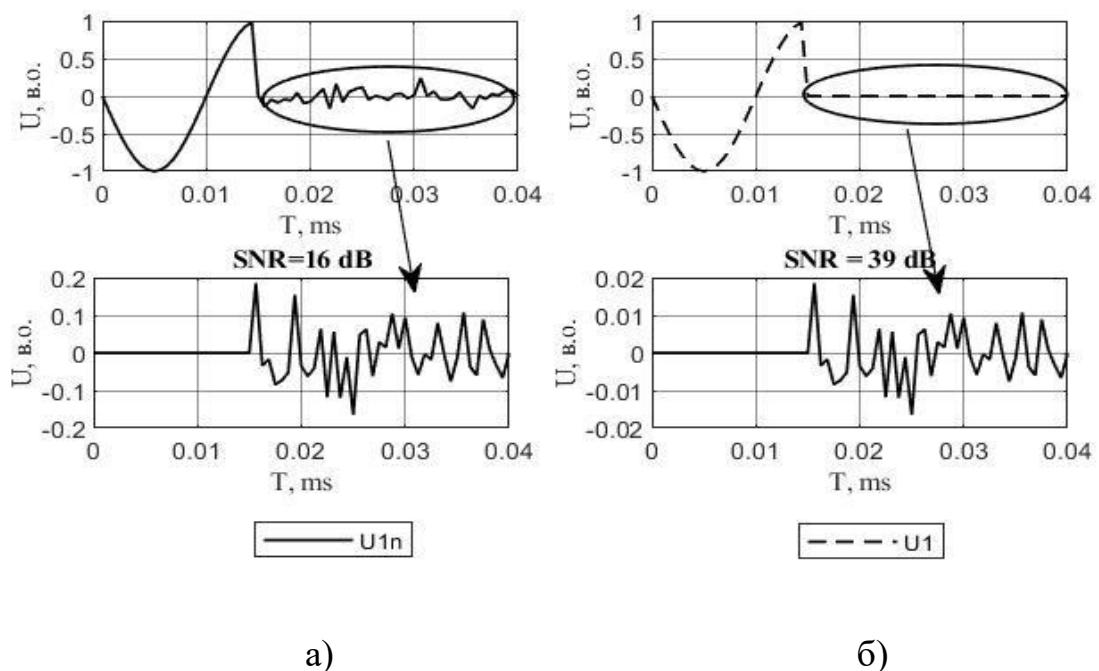


Рисунок 2.15 – Перехідний сигнал напруги дугового замикання

Перехідний сигнал напруги дугового замикання  $SNR = 16 \text{ dB}$  та з видаленням шумових компонент  $SNR = 39 \text{ dB}$ .

Розкладання перехідного процесу внаслідок подачі живлення на частотні компоненти (рис. 2.16) показав наявність трьох компонент:

низькочастотна – 418 Гц, дві високочастотні синусоїди швидкого затухання 1283 Гц та 1855 Гц.

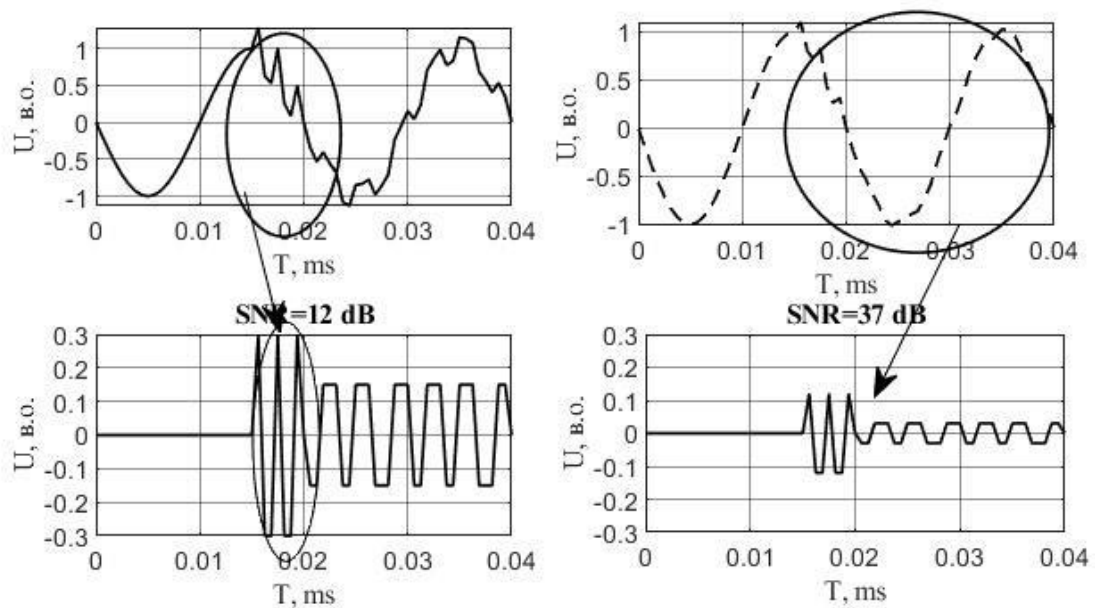


Рисунок 2.16 – Змодельований сигнал при подачі напруги в лінію розподілу

Слідє відмітити, що ці дві синусоїди спочатку вносять майже рівний внесок у максимум напруги, як і синусоїда нижчої частоти.

Висновок. Максимальна напруга у випадку подачі живлення на лінію виникає не через довготривалі низькочастотні коливання, а через прихід напруги від відкритого кінця лінії. Даний сигнал напруги швидко падає.

На рис. 2.17 представлений перехідний сигнал при комутації конденсаторної батареї.

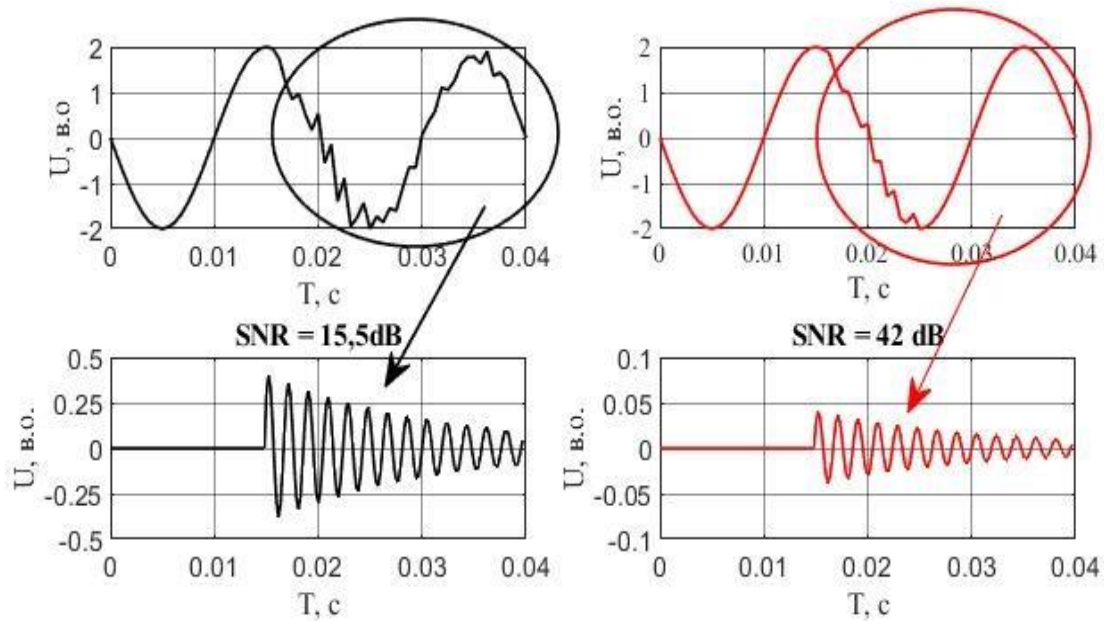


Рисунок 2.17 – перехідний сигнал при комутації конденсаторної батареї

При аналізі перехідного процесу внаслідок активації конденсатора з підсиленням напруги було виявлено, що частоти двох синусоїд становлять 477 Гц та 1742 Гц. При цьому, на початку перехідного процесу дві синусоїди перебувають у фазі, вносячи рівний внесок в результуючу перенапругу. Це явище в роботі використовується для ідентифікації процесу підсилення напруги. Подальший аналіз перехідного процесу внаслідок активації конденсатора без підсилення напруги, виявив наявність двох синусоїд з частотами 474 Гц та 1507 Гц з протилежними фазами. В зв'язку з чим, перенапруга значно нижча.

**Висновок.** Аналіз проведених в роботі досліджень дозволив запропонувати метод ідентифікації перехідних процесів в електричних мережах шляхом аналізу їх частотних характеристик, що дозволило оперативно виявляти несправності в електричній системі для уникнення пошкоджень електрообладнання шляхом своєчасного включення необхідних засобів захисту.

## 2.5 Висновки до розділу 2

1. Функція числової моделі спотворень якості електричної енергії служить основним будівельним блоком числової структури для отримання та моделювання більш складних спотворень якості електроенергії, наприклад генерації багатоступеневого сигналу та декількох параметрів якості електроенергії наявних одночасно.

2. Запропонована структура числової моделі дозволяє моделювати спотворення ЯЕЕ без необхідності розробки складної моделі енергооб'єкту (енергосистеми) або доступу до баз даних систем моніторингу енерговикористання.

3. Застосування числової моделі спотворень ЯЕЕ може сприяти розробці інтерактивного програмного забезпечення для викладання та навчання за темою ЯЕЕ у вищих навчальних закладах за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Особливо зважаючи на той факт, що з її допомогою можлива миттєва візуалізація форми спотворень ЯЕЕ та їх характеристик за допомогою інтерактивного керування числовими параметрами моделі.

4. Можливість керування характеристиками форми сигналу числової моделі шляхом зміни її параметрів дозволяє реалізувати числові моделі в будь-якому DSP процесорі - спеціалізованому програмованому мікропроцесорі, призначеному для маніпулювання в реальному масштабі часу потоком цифрових даних без необхідності застосування потужних засобів моделювання.



### РОЗДІЛ 3.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТИПІВ ПРОВАЛІВ НАПРУГИ ТА ЇХ ХАРАКТЕРИСТИК НА РОБОТУ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

Інтерес до провалів напруги зростає, тому що вони спричиняють шкідливий вплив на кілька чутливих пристроїв, таких як приводи з регульованою швидкістю, асинхронні та синхронні двигуни, обладнання для керування процесами, програмовані логічні контролери, робототехніка, комп'ютери та діагностичні системи, чутливі до перепадів напруги. Несправність цього обладнання може бути спричинена провалами напруги, що призведе до зупинки роботи або виробництва зі значними пов'язаними витратами [96-98].

Так як найбільші втрати виробництва від провалів напруги (60%) приходяться на асинхронні двигуни, в даній роботі розглядаються впливи провалів напруги на їх продуктивність.

Дослідження впливу провалів напруги на асинхронні двигуни проведемо застосуванням як симетричних, так і несиметричних трифазних провалів. Якщо провал є симетричним, тобто однаково глибоким у всіх трьох фазах, можна використовувати найнижчу залишкову напругу в будь-якій із фаз для характеристики провалу. Якщо провал є несиметричним, тобто провали не однакової глибини в усіх трьох фазах, для характеристики просідання використовується фаза з найменшою залишковою напругою [99]. В науково-технічній літературі також використовуються назви провалів – збалансовані та незбалансовані.

### 3.1 Структурна схема дослідження

Дослідження проводилися на основі розробленої в даній роботі моделі спотворень ЯЕЕ в плані наявності провалів напруги з різноманітними значеннями їх характеристик. Для аналізу роботи асинхронного двигуна була

застосована модель асинхронного двигуна в Mathlab/Simulink [96]. Числова модель формування провалів напруги представлена наступним чином:

$$U_A = A \left[ 1 - \alpha \left( u(t-t_1) - u(t-t_2) \right) \right] \sin(2\pi f_1 t + \theta_A), \quad (3.1)$$

де  $\alpha$  – глибина провалу у в.о.,  $0.1 \leq \alpha \leq 0.9$ ,  $T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$ ,  $f_1$  – основна частота,  $\theta_A$  – фазовий кут.

Тривалість падіння напруги визначається ступінчастими функціями  $u(t-t_1)$ ,  $u(t-t_2)$ ,  $t_1$  і  $t_2$  є часом початку та кінця падіння напруги. На рис. 3.1 представлений провал однофазної напруги, де  $t_1 = 0.06$  s,  $t_2 = 0.12$  s.

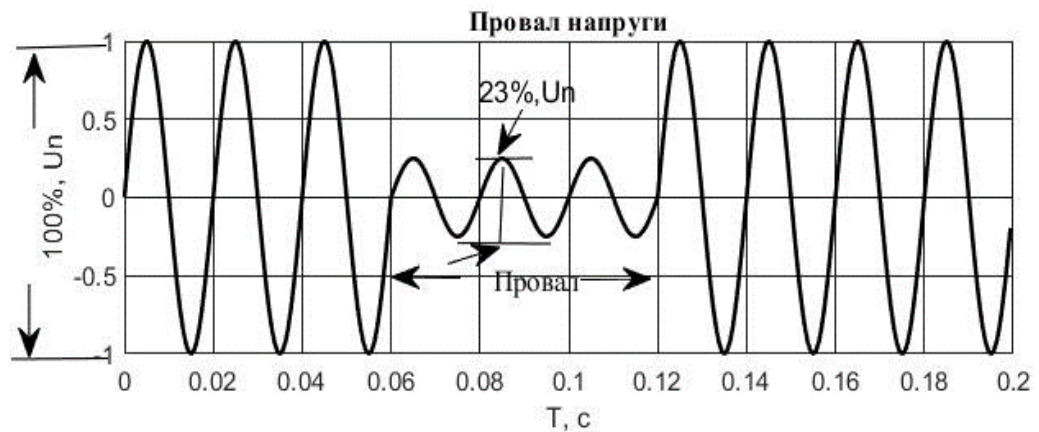


Рисунок 3.1 – Провал однофазної напруги

Числова модель провалу напруги, на який впливає робота індукційної машини (двигуна) [97]), можна моделювати наступним чином:

$$U_A = \left[ 1 - s \left( u_1 \left( 1 - e^{-\alpha t_1} \right) \right) - u_2 \left( 1 - e^{-\beta t_2} \right) \right] \sin(2\pi f_1 t + \theta_A), \quad (3.2)$$

де  $e$  — експоненціальна функція для моделювання падіння напруги під впливом індукційної машини,  $\alpha$  — швидкість спаду напруги провалу, а  $\beta$  — швидкість зростання (відновлення) напруги після провалу,  $t_1$  – початок провалу,  $t_2$  – початок відновлення провалу.

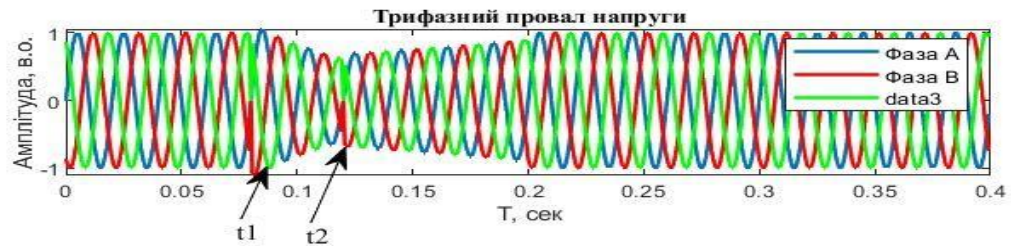


Рисунок 3.2 – Трифазний провал напруги, викликаний підключенням асинхронного двигуна

$t_1$  та  $t_2$  – точка початку та відновлення провалу напруги відповідно.

Структурна схема дослідження впливу різних характеристик провалів на роботу асинхронного двигуна представлена на рис. 3.3.

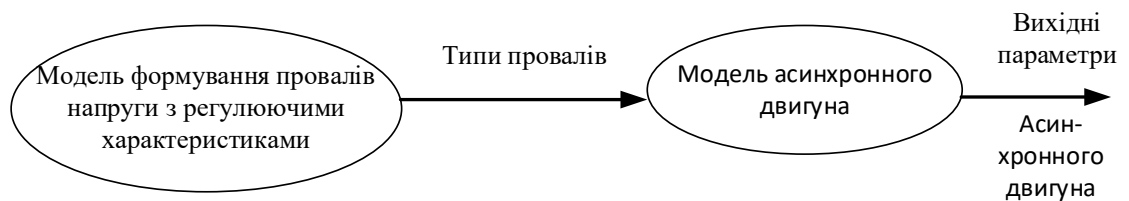


Рисунок 3.3 – Структурна схема дослідження впливу різних характеристик провалів на роботу асинхронного двигуна

Типи провалів напруги формувалися відповідно до їх класифікації [100] з різними характеристиками (тривалості та глибини провалу, стрибок фазового кута, точки початку та закінчення провалів). На виході моделі асинхронного двигуна аналізувалися такі його параметри: піки струмів, крутний момент, швидкість.

### 3.2 Вплив різних характеристик провалів на роботу асинхронного двигуна

Вплив різних провалів напруги на роботу асинхронного двигуна залежить від наступних факторів:

- глибини провалу напруги;
- тривалості провалу напруги;
- електричних параметрів асинхронного двигуна;
- навантаження та механічної інерції.

Відповідно до [101], асинхронний двигун може демонструвати дві різні поведінки при виникненні падіння напруги.

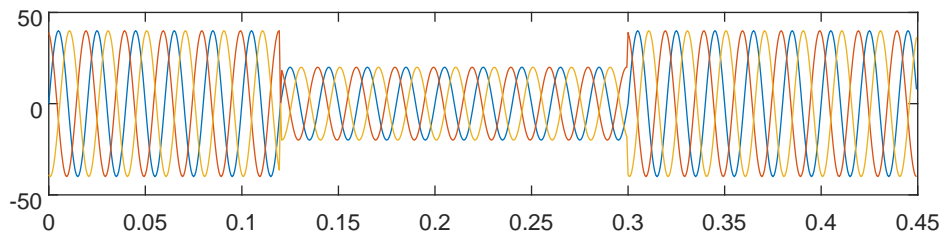
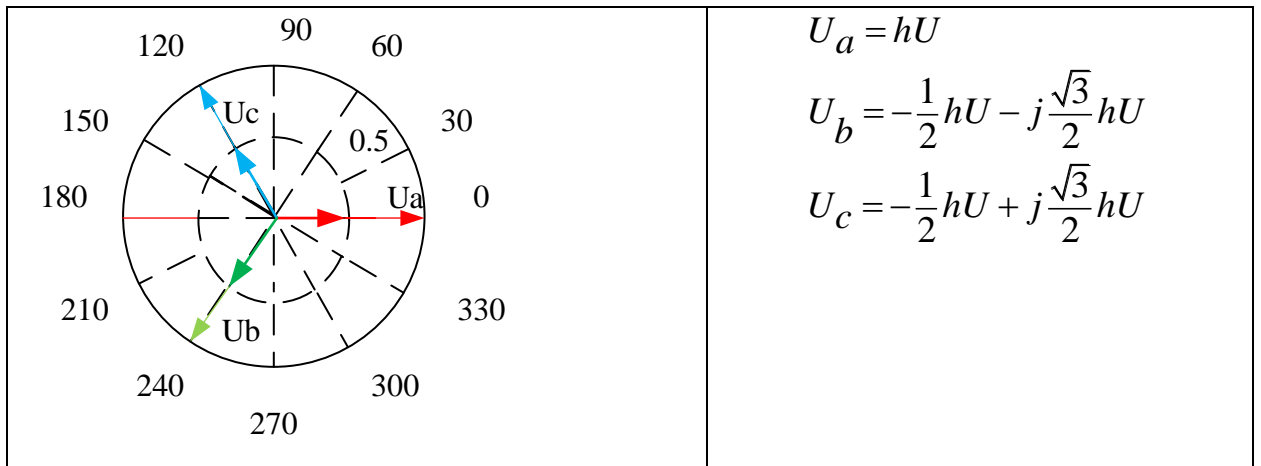
1. Асинхронний двигун зупиняється і не може прискоритися після відновлення напруги живлення до нормального. Це називається «зупинкою».
2. Асинхронний двигун втрачає швидкість і знову прискорюється після відновлення напруги живлення до нормального.

Провал напруги для асинхронного двигуна визначається як зниження напруги до 20-30% від номінального значення протягом менше ніж 10 циклів.

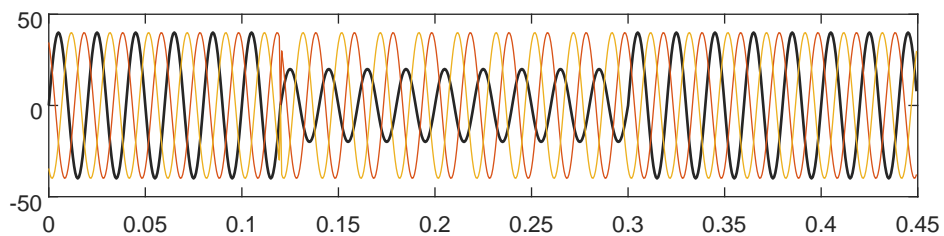
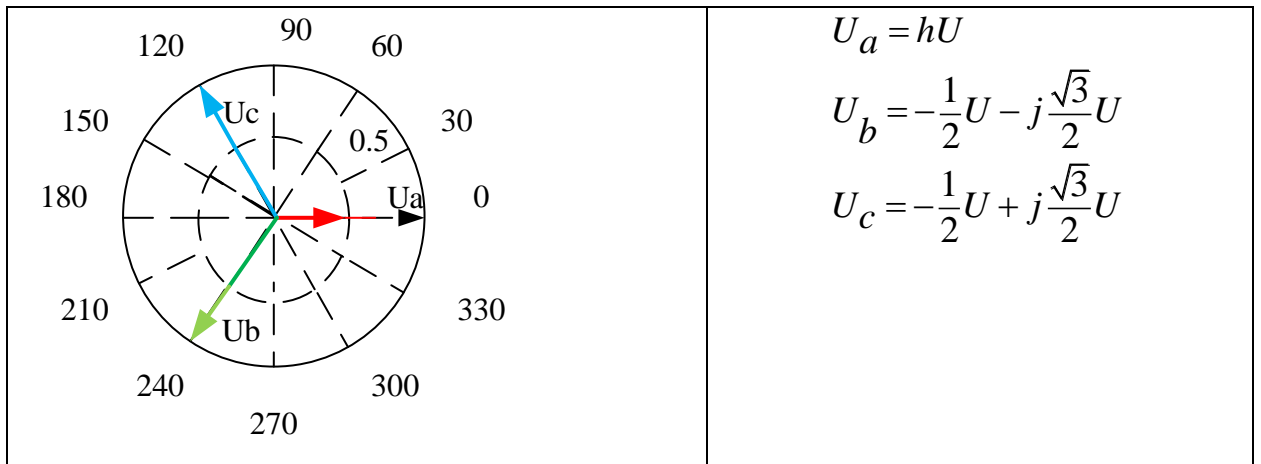
### 3.2.1 Вплив тривалості провалу напруги на роботу асинхронного двигуна

Тривалість провалу напруги сильно залежить від часу усунення несправності. У системах високої напруги несправності усуваються захисними пристроями та автоматичними вимикачами. Типовий час усунення несправності складає від 100 до 500 мс. Несправності в системах низької напруги усувається запобіжниками з часом усунення від 10 мс до декількох секунд.

Вплив тривалості провалу напруги на роботу асинхронного двигуна досліджувалася на прикладі двох типів провалу: збалансованого типу провалу А та незбалансованого – типу В (замикання фаза-земля). На рис. 3.4 а,б наведені векторні діаграми та форми сигналів напруги даних типів провалів.



а)



б)

Рисунок 3.4 – векторні діаграми та форми сигналів напруги типів провалу А – а) та В – б)

### 3.2.1.1 Вплив тривалості провалу напруги на піки крутного моменту та піки струму

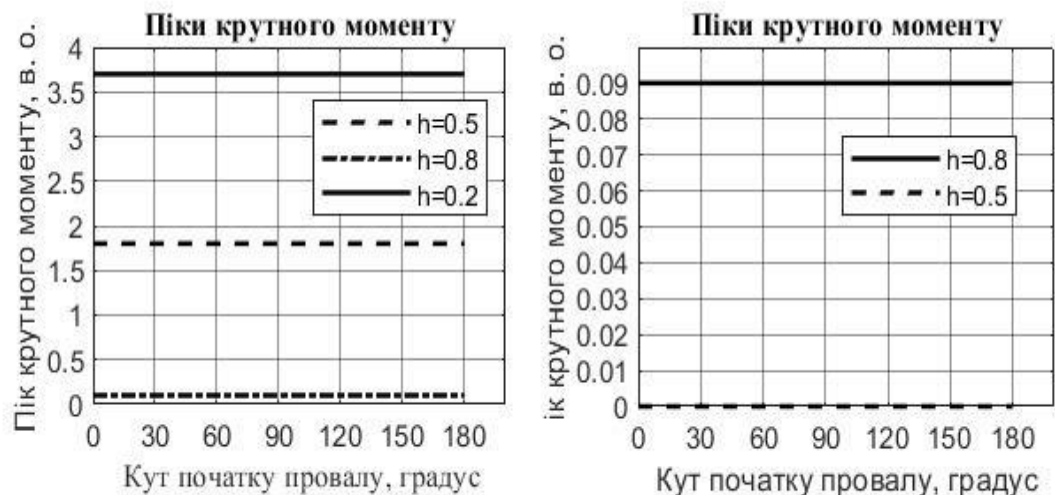
Для вивчення впливу тривалості провалу напруги на роботу асинхронного двигуна приймалися піки крутного моменту та піки струму. Ці значення розраховуються на одиницю як номінальний або номінальний струм і крутний момент за допомогою наступних рівнянь [102]:

$$I_{peak} = \frac{I_{peak}}{\sqrt{2} \cdot I_N} = \frac{\max \{|i(t)|\}}{\sqrt{2} \cdot I_N}, \quad (3.3)$$

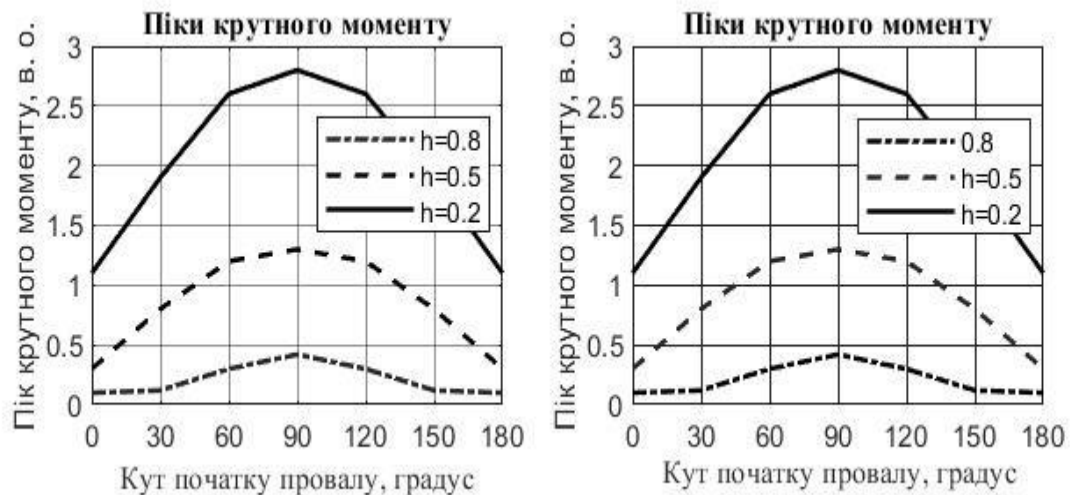
$$T_{peak} = \frac{T_{peak}}{T_N} = \frac{\max \{|T(t)|\}}{T_N}, \quad (3.4)$$

де  $T_N$  – номінальний крутний момент, а  $I_N$  – номінальний струм

На рис. 3.5 представлені результати дослідження піків крутного моменту асинхронного двигуна під час провалу напруги типу А та типу В при різних точках початку провалу напруги у випадках тривалості провалу 0,2 с і 1 с.



а)



б)

Рисунок 3.5 - Результати дослідження піків крутного моменту асинхронного двигуна під час провалу напруги типу А (рис. 3.5,а) та типу В (рис. 3.5,б) при різних точках початку провалу напруги у випадках тривалості провалу 0,2 с і 1 с [103],  $h$  – глибина провалу

Як видно із рис. 3.5, а, піки крутного моменту майже постійні для всіх початкових кутів для провалу типу А. Максимальні піки крутного моменту досягаються при куті початку провисання  $90^0$  для провалу типу В, а мінімальні піки спостерігаються при куті  $0^0$ . При провалу напруги типу А величиною 0,2 і тривалості падіння 1 с двигун зупиняється.

Тенденція до коливань крутного моменту на початку та в кінці зниження напруги є однією з основних проблем, пов'язаних із падінням напруги. Це явище може порушити процес або пошкодити двигун. Іншою проблемою, пов'язаною з провалом напруги та асинхронними машинами, є поведінка машини, коли провал напруги відбувається на початок падіння напруги, тому що крутний момент пропорційний квадрату напруги, і швидкість також впаде.

Двигун споживатиме значний пусковий струм під час стадії спаду напруги, насамперед для встановлення поля повітряного зазору, але також через повторне прискорення. У більшості практичних застосувань, коли

двигун сповільнюється, крутний момент навантаження падає, а крутний момент двигуна збільшується. Це зменшує проблему та полегшує легкий перезапуск двигуна. Подія часто відбувається настільки швидко, що крутний момент можна вважати постійним, а фактична втрата швидкості часто менша, ніж очікувалося. Двигун потребуватиме великого струму, як описано, для деяких навантажень з практично постійним крутним моментом або високою інерцією, а для деяких навантажень двигун не зможе перезапустити взагалі.

### 3.2.1.2 Вплив глибини провалів напруги на піки струму асинхронного двигуна

Двигун споживатиме значний пусковий струм під час стадії спаду напруги, насамперед для встановлення поля повітряного зазору, але також через повторне прискорення. У більшості практичних застосувань, коли двигун сповільнюється, крутний момент навантаження падає, а крутний момент двигуна збільшується. Це зменшує проблему та полегшує легкий перезапуск двигуна. Подія часто відбувається настільки швидко, що крутний момент можна вважати постійним, а фактична втрата швидкості часто менша, ніж очікувалося. Двигун потребуватиме великого струму, як описано, для деяких навантажень з практично постійним крутним моментом або високою інерцією, а для деяких навантажень двигун не зможе перезапустити взагалі.

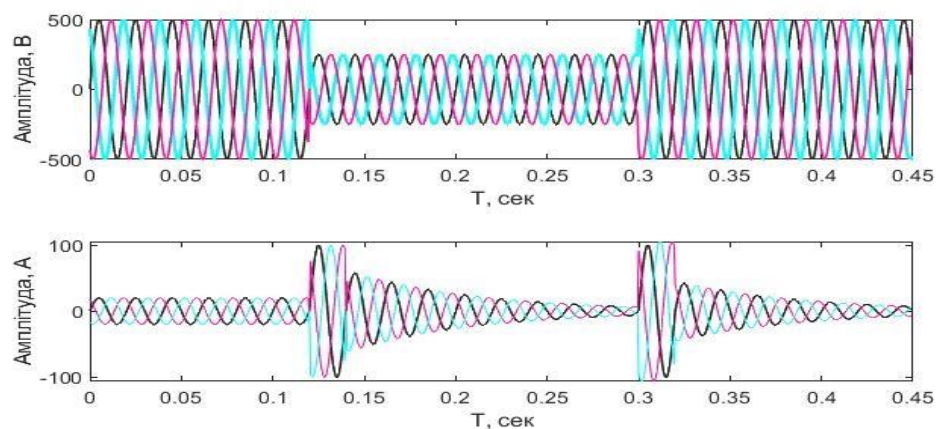


Рисунок 3.6 – Залежність пікового струму при початку провалу напруги та після відновлення провалу



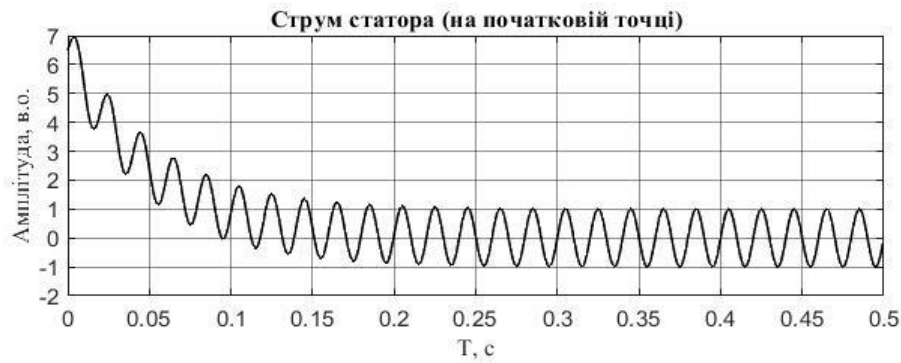


Рисунок 3.7 – Перехідний струм статора

Як відомо, провали напруги типу А є симетричними (збалансованими). Вплив їх на піки струму представлено на рис. 3.8.

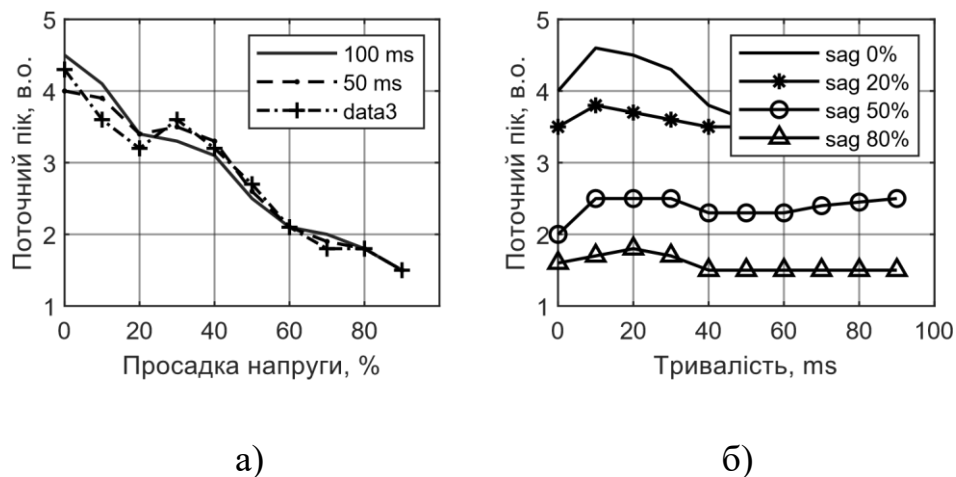


Рисунок 3.8 – Пік струму, спричинений падінням напруги типу А, (а) різна тривалість провалу, (б) різна глибина провалу

Піки струму — це максимальний струм, який споживає двигун з лінії, і він виникає в момент відновлення напруги. З рисунка 3.8, а можна помітити, що менші провали напруги призводять до більшого піку струму. Результати чітко показують, що піки струму лінійно залежать від величини провисання. Пік струму, отриманий під час переривання, може досягати більше 4 на одиницю. На рис. 3.8, б показано вплив тривалості падіння на піки струму при різних величинах падіння. Криві пікового струму мають тенденцію лінійчастості [104].

За винятком того, що пік струму, викликаний величиною падіння 20% і нижче, не є лінійним для коротшого падіння від 50 до 250 мс. У випадку переривання струм різко зростає протягом періоду від 50 до 250 мс, а потім поступово зменшується. Той самий результат шляхом моделювання було показано Pedra [105], коли асинхронний двигун піддавався просіданню величиною 10%. Поточний пік трохи вищий за тривалість менше 200 мс. Тому тривалість провалу має незначний вплив на піки струму, і воно відбувається лише в короткий період тривалості провалу.

### 3.2.1.3 Вплив провалів напруги на швидкість асинхронного двигуна

Втрата швидкості двигуна: поява падіння напруги зменшує крутний момент двигуна. Двигуни з низькою інерцією швидко сповільнюються і можуть зупинитися, тоді як двигуни з високою інерцією втрачають швидкість, але знову розганяються після відновлення. Після відновлення двигун згодом знову прискориться, залежно від втрати швидкості під час просідання, а також від напруги після відновлення. На рис. 3.9 представлені результати дослідження залежності швидкості двигуна від тривалості та глибини провалу напруги.

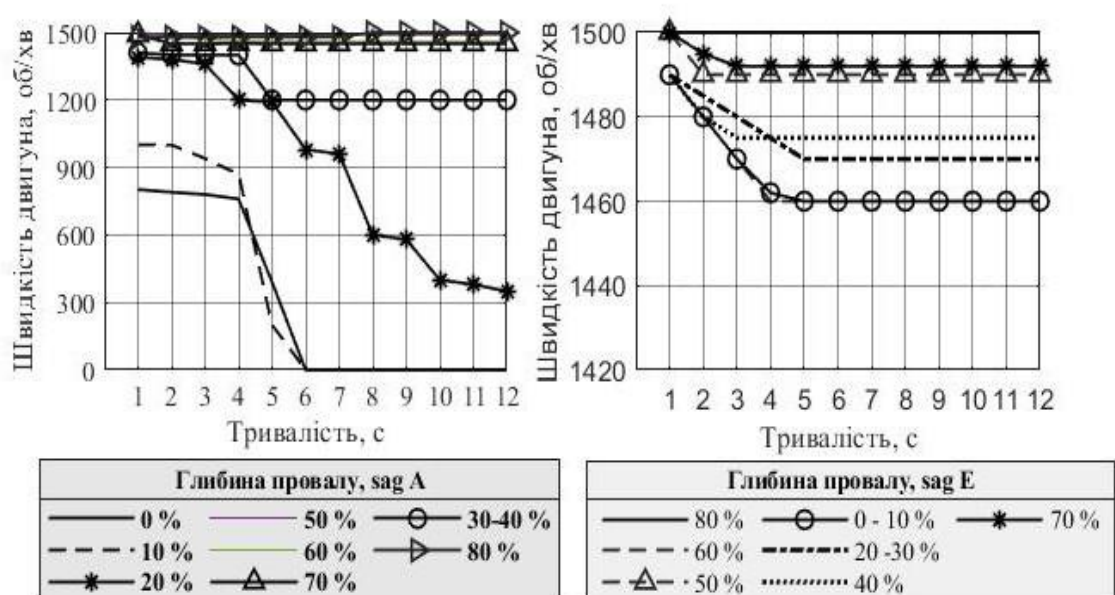


Рисунок 3.9 – Зміна швидкості двигуна, викликана провалами напруги, а) – тип провалу А, б) – тип провалу Б

З рисунка 3.9 (а) видно, що немає суттєвих причин зниження швидкості двигуна до величини провисання 40%. Лише чотири величини прогинів, тобто від 30% до 0%, призводять до значної втрати швидкості. Двигун припиняє працювати вперше, коли він піддається падінню напруги на 10% тривалістю 6 секунд і більше. Двигун зупиняється на менший час, коли він піддається падінню напруги 0% (переривання) із тривалістю падіння 4 с, але двигун не зупиняється прямо. Це тому, що доступний момент інерції, яким володіє двигун [106]. З цього явища можна пояснити, що величина та тривалість провисання істотно вплинули лише на низьку величину провисання та велику тривалість провисання.

Результати досліджень зведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. Результати досліджень впливу різних типів провалу напруги на асинхронний двигун [103]

Тип провалу напруги	Вплив на втрату швидкості	Вплив на струм двигуна	Вплив на крутний момент двигуна
Тип А	Мінімальний	Не впливає	Не впливає
Тип В	Макс. при $\varphi=90^0$	Макс. при $\varphi=90^0$	Не впливає
Тип С	Макс. при $\varphi=0^0$	Макс. при $\varphi=0^0$	Не впливає
Тип D	Макс. при $\varphi=90^0$	Макс. при $\varphi=90^0$	Не впливає
Тип Е	Макс. при $\varphi=0^0$	Макс. при $\varphi=0^0$	Не впливає
Тип F	Макс. при $\varphi=90^0$	Макс. при $\varphi=90^0$	Не впливає
Тип G	Макс. при $\varphi=0^0$	Макс. при $\varphi=0^0$	Не впливає

Вплив типів провалів С, Е, та G однаковий на втрату швидкості двигуна та на його струму (мають максимум при фазовому куті  $\varphi=0^0$ ). Для типів провалу напруги В, D та F макс. впливу був при  $\varphi = 90^0$ . Тип А – збалансований тип провалу, має мінімальний вплив.

### 3.3 Селективність захисту асинхронних двигунів під час наявності провалів напруги в електричній мережі

Селективність, яка також називається вибірковістю, — це координація автоматичних захисних пристроїв таким чином, що несправність, яка виникає в даній точці мережі, усувається захисним пристроєм, встановленим безпосередньо перед несправністю, і цим пристроєм. Відключення асинхронних двигунів через провали напруги збільшує незаплановану зупинку технологічних процесів, а селективний їх захист дозволяє промисловим підприємствам економити час, ефективно захищати обладнання та збільшувати середній час до виходу їх з ладу.

#### 3.3.1 Вибір захисних пристроїв асинхронних двигунів під час провалів напруги

Дослідження проводилися у плані визначення часу затримки та пікового перехідного струму статора, який зможе координувати схему захисту. В процесі дослідження впливу провалів напруги на роботу асинхронних двигунів (розділ 3.1), було виявлено, що зростання струму статора під час провалу напруги (в залежності від його тривалості та глибини) може перевищувати його номінальне значення до 18 разів. При цьому рекомендований час затримки захисту повинен бути встановлений між 100 та 200 мс.

Як слідує із науково-технічних джерел [107 ,108], асинхронні двигуни розроблені з інерційним захистом і здатні протистояти впливу напруги джерела живлення протягом короткого періоду, за винятком порушень через провали та короточасні перебої напруги. Дані порушення можуть спричинити відключення двигунів (втрата виробництва) та затримки із їх перезапуском [109, 110]. Також впливи провалів напруги залежать від виду навантажень в електричній мережі, швидкості двигуна [111], умов їх використання, зносу обладнання, несправністю ізоляції і т. і. Все це зменшує очікуваний термін служби машини і навіть незаплановані відключення по

струму через спрацьовування основних захисних пристроїв [112-113]. Подальші дослідження можливості роботи асинхронного двигуна під час провалів напруги або коротких переривань, показали, що пік струму статора і перехідний час можна вважати такими, що розрізняють всі засоби захисту асинхронного двигуна. Як слідує із аналізу технічної документації та наукової літератури [114-115] час провалу напруги, який може пройти асинхронний двигун, становить від 0,3 до 0,6 с, але дослідження в даній роботі проводилися з провалом напруги тривалістю 0.18 с і короткої перерви до 0.5с.

### 3.3.2 Стратегія захисту асинхронного двигуна

Згідно із піком струмів статора захист асинхронного двигуна повинен бути встановленим до 18 разів від значення струму статора на одиницю значення номінального струму із затримкою від 0.4 до 0.2 с. Період 0.1 або 0.2 с вибирається для уникнення будь-якого завершення роботи коли асинхронний двигун працює при більшій тривалості провалу напруги.

Встановлення пікового значення струму, який може захистити двигун під час роботи при наявності провалів напруги залежить від робочого типу асинхронного двигуна, характеристик засобів захисту. Час затримки реле залежить від періоду і рівня провалу напруги та перехідних процесів при роботі асинхронного двигуна. Проведені дослідження залежності піків струму статора від тривалості та глибини провалу дають змогу встановлювати селективність захисту асинхронного двигуна відповідно до значень струму статора.

### 3. 4 Висновки до розділу 3

1. На пік струму впливає глибина провалу напруги, яка для меншої величини падіння напруги призводить до вищих піків струму.
2. Тривалість провалу напруги істотно не впливає на поточний пік. Трохи вищі піки струму були отримані лише за коротшу тривалість і низьку глибину провалу.

3. Глибина та тривалість провалів напруги суттєво впливають на швидкість двигуна лише для низької глибини провалу і значній тривалості провалу напруги.

4. Встановлено, що селективність захисту асинхронного двигуна залежить від глибини та тривалості провалу напруги, інерційності двигуна та характеристик навантаження.

5. Струм статора в асинхронному двигуні є головною величиною для селективного захисту. При цьому потрібно враховувати тривалість перехідного пікового значення струму для безперервної роботи двигуна.

6. Запропонована схема селективного захисту дозволяє налаштувати рівень пристроїв захисту і час затримки реле. При цьому усуваються позапланові відключення і збільшується тривалість функціонування асинхронного двигуна.

7. При проектуванні установки, яка витримує провали напруги, розробник повинен оцінити асинхронні двигуни в порядку їх критичності для процесу. Потім потрібно оцінити джерело живлення, щоб визначити, скільки з цих двигунів можна запускати одночасно. Для цього набору двигунів необхідно внести відповідні контактори або відповідні модифікації існуючих контакторів, щоб гарантувати, що контактори залишаються ввімкненими. Тривалість часу, протягом якого вони повинні зберігатися, визначається тим, як на установку вплине втрата потужності. Це може бути порядку секунд.

8. Двигуни, що залишилися, повинні дозволяти відключення контакторів, а потім їх повторне застосування таким чином, щоб мінімізувати навантаження як на механічну систему, так і на електричну систему. Це означає, що або необхідно застосувати часову затримку, щоб переконатися, що потік у двигуні достатньо зменшився, або що двигун перемикається на джерело живлення, коли фаза між напругою двигуна та напругою живлення менша, скажімо,  $30^\circ$ .

## РОЗДІЛ 4.

### ОПТИМІЗАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПОТОКІВ В ПЛАНІ ВИДАЛЕННЯ КОМПОНЕНТ ЕЛЕКТРИЧНОГО ШУМУ

У зв'язку з широким використанням чутливого силового електронного обладнання та високим рівнем проникнення переривчастої відновлюваної енергії в енергосистему в останні роки питання якості електроенергії в перехідних процесах (PQ) привернуло значну увагу. Ефективне виявлення та аналіз нестаціонарних порушень якості електроенергії (PQD) має вирішальне значення для подальшого контролю за порушеннями. На практиці зібраний у реальному часі сигнал PQ буде сильно забруднений шумом, що ускладнить виявлення та аналіз характеристичної інформації реального сигналу [116–119]. Як наслідок, останніми роками спостерігається сплеск інтересу до досліджень зменшення шуму в PQD. Хороший алгоритм усунення шумів має здатність ефективно фільтрувати шум, зберігаючи характеристики перешкод реального сигналу [120]. Необхідно враховувати час, необхідний для зняття шумів, щоб його можна було використовувати для виявлення практичної техніки [121].

#### 4.1 Існуючі методи подавлення шумових компонент в інформаційних сигналах

Останніми роками були запропоновані методи усунення шуму сигналу, включаючи розкладання сингулярного значення (SVD) [121,122], розкладання емпіричного режиму (EMD) [123], математичну морфологію (MM) [124], фільтрацію Калмана (KF) [125], вейвлет-перетворення (WT) [126,127]. Всі ці методи демонструють необхідність наявності даних для оброблення більше половини виміряних даних (із наявністю шумових компонент). Як наслідок, усунення перешкод якості електроенергії за допомогою більшої кількості точок даних потребує значного часу, що не сумісно з практичним застосуванням.

Одним із ефективних способів подавлення шумових компонент є вейвлет-аналіз з подальшими математичними операціями над апроксимуючими та деталізуючими коефіцієнтами.

#### 4.1.1 Застосування порогових функцій

На початку застосування порогових функцій для шумоподавлення використовувалися так звані традиційні дві основні функції, запропоновані Донохо [121] – жорстка (hard) та м'яка (soft) (рис.4.1).

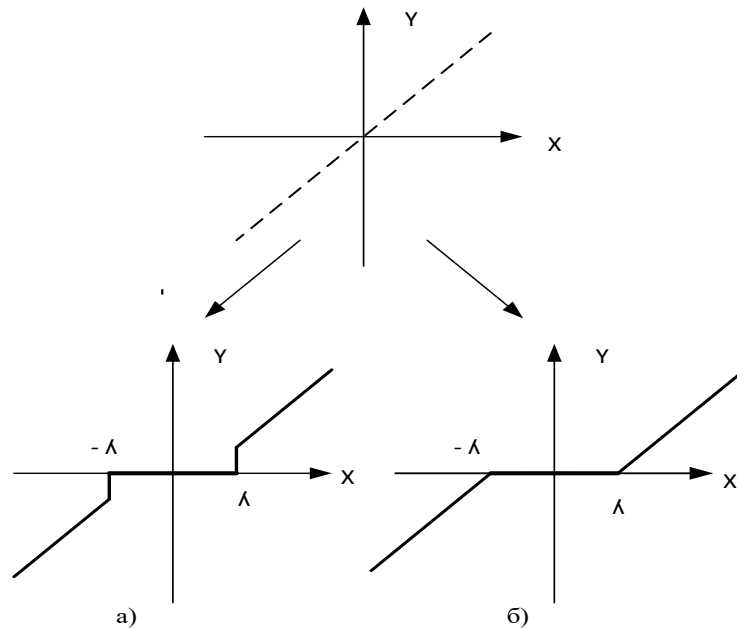


Рисунок 4.1 – Жорстка а) та м'яка б) порогові функції,  $\lambda$  - величина порогу

Вибір порогу, як ключового фактору вейвлет-порогового знешумлення, має великий вплив на якість фільтрації. Якщо порогове значення перевищено, то корисний сигнал буде відфільтровано як шум, якщо вибраний поріг занадто малий, велика кількість шумових сигналів буде змішано у вейвлет-коефіцієнти, що призведе до спотворення сигналу.

$$c\hat{D}_{j,k} = \begin{cases} cD_{j,k}, & |cD_{j,k}| \geq \lambda, \\ 0, & |cD_{j,k}| < \lambda. \end{cases} \quad (4.1)$$

де  $cD_{j,k}$  - деталізуючі коефіцієнти вейвлет-перетворення до порогової обробки,  $c\hat{D}_{j,k}$  - деталізуючі коефіцієнти після видалення шумових компонент



Основна роль жорсткої функції – утримання вейвлет-коефіцієнтів значення яких більші величини порогу  $\lambda$  і видалити (очистити) вейвлет-коефіцієнти значення яких не перевищують поріг  $\lambda$ . Жорстка порогова функція не змінює локальні характеристики сигналу, оскільки він є розривним на  $\lambda$ , шум буде змішано у вейвлет-коефіцієнтах, значення яких були  $> \lambda$ , що призводить до значної похибки в результаті видалення шуму.

Так як жорстка функція є розривною у всій області  $\pm \lambda$ , то реконструйований сигнал (після шумопоглинання) містить у собі деякі коливання.

Із наукових джерел добре відомо, що для фільтрації спотворень ЯЕЕ функція (ч) прагне зберегти більше інформації про сигнал, забезпечуючи вищий SNR і меншу помилку амплітуди (АЕ). Однак жорстка оцінка має розриви, оскільки вона не диференційована, що в кінцевому підсумку спричиняє проблеми з нестабільністю та чутливістю до невеликих змін у даних – прояви псевдо-ефекту Гіббса.

$$c\hat{D}_{j,k} = \begin{cases} \text{sgn}(cD_{j,k})(|cD_{j,k}| - \lambda), & |cD_{j,k}| \geq \lambda, \\ 0, & |cD_{j,k}| < \lambda. \end{cases} \quad (4.2)$$

$$\text{sgn}(cD_{j,k}) = \begin{cases} -1, & cD_{j,k} < 0 \\ 0, & cD_{j,k} = 0 \\ 1, & cD_{j,k} > 0 \end{cases} \quad (4.3)$$

Функція м'якого порогу має хорошу безперервність, але деякі моменти різкої зміни можуть потрапити в сигнал, що спричинить його спотворення. Крім того, постійне значення, яке використовується для стиснення вейвлет-коефіцієнтів більших за поріг, має великий вплив на точність відновлення сигналу. Необхідно також відмітити, що у функції м'якого порогу існує відхилення між  $i$  коли. Це призводить до відхилення між відновлювальним та реальним сигналом.

Функція Soft є слабо диференційованою та створює високе ослаблення коефіцієнтів  $i$ , отже, зменшення амплітуди результуючого сигналу. Також

М'яке порогове значення призводить до перевищення згладжування відновленого сигналу - завжди існує постійна похибка між відновленим і реальним сигналами.

Хоча м'які та жорсткі порогові методи сертифіковані як прості та здійсненні, вони все ж мають певну потенційну слабкість. Оцінений сигнал, отриманий жорсткою пороговою функцією є розривним при  $\pm\lambda$ , що спричинить феномен Псевдо-Гіббса. Параметр, отриманий за допомогою м'якої порогової функції, має кращу безперервність, а сигнал після зняття шумів відносно плавний, але постійне відхилення між  $w_{j,k}$  завжди виходить, що призводить до того, що сигнал буде занадто гладким у деяких гострих точках і таким чином втрачає деякі особливості вихідного сигналу.

Існує багато порогових функцій які є компромісними між жорсткою та м'якою пороговими функціями, які також мають свої переваги та недоліки і їх застосування залежить від сингулярності інформаційного сигналу. Основна ідея полягає в тому, щоб створити порогову функцію порядку високої похідної, що сприяє її використанню в алгоритмах оптимізації, які шукають оптимальні параметри для застосування в пороговій обробці кожного сигналу [127].

При цьому необхідно відмітити, така порогова функція повинна бути адаптивною до сигналу, що підлягає обробці, покращуючи якість знешумлення сигналу. Така функція повинна поєднувати в собі властивості як жорсткої так і м'якої порогових функцій (збереження коефіцієнтів і величин, наданих функцією Hard, а також диференціація та плавність, які забезпечує функція Soft). При цьому, важливо досягти кращого збереження величини сигналу (піка) і співвідношення шум/сигнал (SNR). Однак більшість функцій не можуть адаптуватися до різних сигналів через фіксовану криву переходу на порогове значення. У цих функціях все ще існує більша тенденція до згладжування коефіцієнтів, ніж до їх збереження.

Застосування вейвлет-перетворення для знешумлення інформаційного сигналу проводиться в три основні етапи [128]:

1. Розкладання (декомпозиція) сигналу на апроксимуючі (низькочастотні) та деталізуючі (високочастотні) коефіцієнти.
2. Застосування відповідних порогових функцій до вейвлет-коефіцієнтів на кожному рівні вейвлет-декомпозиції.
3. Відновлення сигналу (обернене вейвлет-перетворення) на основі вейвлет-коефіцієнтів, в яких видалили шумову складову.

4.1.2 Розробка методу подавлення шумових компонент (електричного шуму) при визначенні параметрів якості електричної енергії

За основу дослідження був взятий відомий метод подавлення шумових компонент – метод адаптивної корекції порогової функції [116]. Відповідно до даного методу вейвлет-коефіцієнти корисної інформації та шуму, оброблені за допомогою дискретного вейвлет-перетворення (DWT), мають ряд особливостей залежно від рівня вейвлет-декомпозиції. Енергія корисного сигналу зосереджена в декількох вейвлет-коефіцієнтах великої величини, тоді як енергія шуму розсіюється по всьому вейвлет-домену за допомогою великої кількості вейвлет-коефіцієнтів малої величини. Модуль вейвлет-коефіцієнтів шуму продовжує падати в міру збільшення кількості рівнів розкладання [101].

Зазвичай, типові підходи до порогового шуму вейвлету обробляють кожен рівень вейвлет-коефіцієнтів, використовуючи постійний поріг, що вносить значні відхилення в шумовий вплив. При вейвлет-коефіцієнтах з меншим масштабом розкладання обробляються з фіксованим порогом, недостатній шум видаляється і ефект шумозаглушення поганий, тоді як коли вейвлет-коефіцієнти з більшим масштабом розкладання обробляються з фіксованим порогом, відбувається фільтрація корисної інформації.

У світлі цієї характеристики поріг, що залежить від рівня розкладання, який використовує  $I_{n(j+1)}$  для корекції універсального порогу, запропоновано в [124]. Зі збільшенням  $j$  поріг поступово зменшується. Модуль вейвлет-

коефіцієнтів можна використовувати для опису кількості енергії, яку вони переносять. Коли зашумлений сигнал розкладається на менший масштаб, їх енергетичний вміст різко зростає. Таким чином, ієрархічні критерії оцінки, розглянуті раніше, які оцінюють тільки розподіл шуму, непридатні до зашумленого сигналу

#### 4.1.2.1 Модифікований метод подавлення шумових компонент

В результаті проведених досліджень в роботі запропоновано модифікувати відомий метод подавлення шумових компонент шляхом введення регульованого адаптивного порогу вейвлетів, який не тільки сумісний із розподілом шуму при кожному розмірі розкладання, але й із розподілом значущих інформацій, що міститься в різних формах сигналів спотворення на кожному рівні вейвлет композиції (логістичної функції Ферхюльста [129]):

$$f(x) = \frac{L}{1 + e^{-s(x-x_0)}}, \quad (4.4)$$

де  $L$  – максимум логістичної функції,  $x_0$  – значення аргументу, за якого функція дорівнює половині свого максимального значення  $L$ ,  $s$  – коефіцієнт крутизни кривої в точці  $x_0$ ,  $s > 0$ .

На рис. 4.2 представлений графік логістичної функції  $f(x)$ .

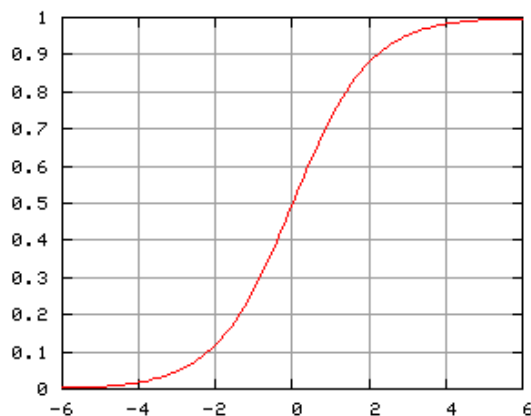


Рисунок 4.2 – Графік логістичної функції ( $s = 1$ ,  $x_0 = 0$ ,  $L = 1$ )

Як слідує із (4.4), чим більше значення коефіцієнта  $s$ , тим більш круто зростає логістична функція в т.  $x_0$ . Враховуючи властивості експоненційної функції, на практиці логістичну функцію обчислюють в певному діапазоні дійсних чисел, який є достатнім для забезпечення необхідної точності обчислення цієї функції під час наближення до крайніх її значень (0 і  $L$ ).

Оскільки метою процесу встановлення порогу є збереження коефіцієнтів вище порогового значення, легко побачити, що максимальне значення  $L$  буде розкладеним вейвлет-коефіцієнтом  $cD_{j,k}$  (що відповідає змінній  $x$ ). Таким чином, функція буде підтримувати симетрію, коли ми змінюємо константу нахилу  $s$  кривої. Адаптивна порогова функція буде мати наступний вигляд:

$$\eta_f(cD_{j,k}, \lambda, s) = \frac{cD_{j,k}}{1 + e^{-s(cD_{j,k} - \lambda)}} = \frac{cD_{j,k}}{1 + e^{s(-cD_{j,k} + \lambda)}}, \quad (4.5)$$

На рис. 4.3 приведена порогова функція з модифікованими коефіцієнтами.

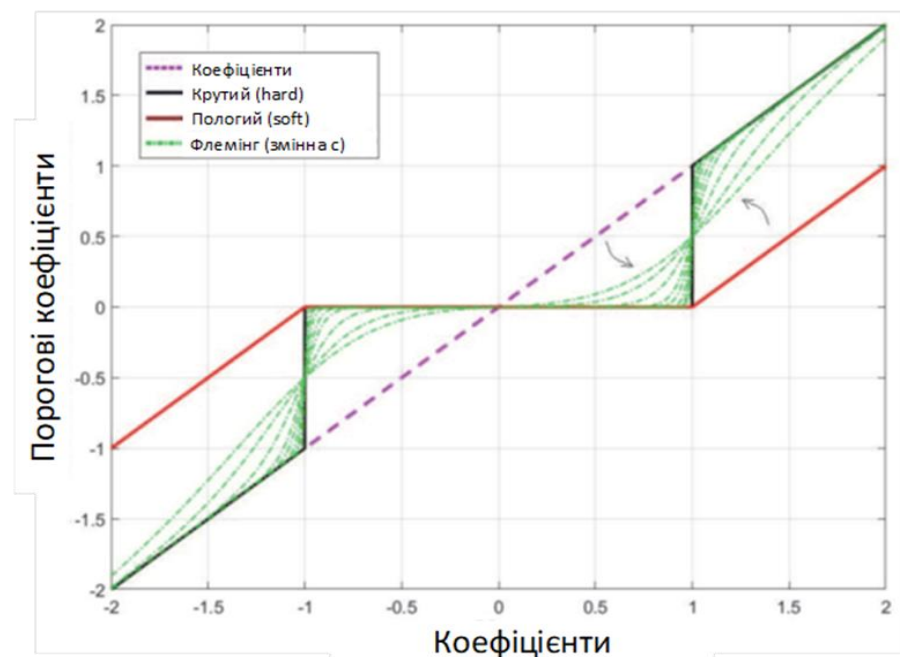


Рисунок 4.3 – Графік порогової функції з модифікованими коефіцієнтами

Так видно, що при високих значеннях  $S$  нахил кривої в пороговій точці такий, що наближається до жорсткої функції, але з більш плавним (диференційованим) переходом. При низьких значеннях коефіцієнта крутизни нахил функції буде діяти з меншою інтенсивністю на коефіцієнти нижче порогового значення і з більшою інтенсивністю на коефіцієнти вище цього значення. З відповідним вибором значення  $S$  для кожного типу сигналів можна отримати значне покращення результату зменшення шуму вейвлет-частотного результату відносно жорстких та м'яких порогових функцій.

#### 4.1.2.2 Структура побудови модифікованого методу видалення шумових компонент

Існує декілька типів вейвлет-перетворення [122] (дискретне вейвлет-перетворення (ДВП) - (алгоритм Маала), вейвлет-паketне перетворення (ВПП), стаціонарне вейвлет-перетворення (СВП), або комплексне вейвлет-перетворення з подвійним деревом. В даній роботі застосовується ДВП – алгоритм Маала.

Класична схема алгоритму Малла представляє собою послідовну фільтрацію вхідного сигналу за допомогою каскадно-з'єднаних блоків фільтрів низької  $Lo\_D$  та високої  $Hi\_D$  частоти (рис. 4.4) [120]:

$$f(t) \rightarrow \begin{cases} \rightarrow Hi\_D \rightarrow \downarrow 2 \rightarrow cD_{j=1,k} \\ \rightarrow Lo\_D \rightarrow \downarrow 2 \rightarrow cA_{j=1,k} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \rightarrow Hi\_D \rightarrow \downarrow 2 \rightarrow cD_{j=2,k} \\ \rightarrow Lo\_D \rightarrow \downarrow 2 \rightarrow cA_{j=2,k} \end{cases}$$

Рисунок 4.4 – Структурна схема ДВП

де  $Hi\_D$  - високочастотний фільтр,  $Lo\_D$  - низькочастотний фільтр,  $cA_{j=1,k}$  - коефіцієнт апроксимації,  $cD_{j=1,k}$  - коефіцієнт деталізації,  $j$  - рівень вейвлет-декомпозиції,  $k$  - кількість вейвлет-коефіцієнтів на відповідному рівні декомпозиції

Структурно-функціональна модель обробки сигналу по алгоритму Маала представляє собою ієрархічну структуру порівневих частотно-впорядкованих та взаємопов'язаних вейвлет-коефіцієнтів:

$$\{f[k]\}_{k=0}^{N-1} = \sum_{k=0}^{N-1} cA_J(k) + \sum_{j=1}^J \sum_{k=0}^{N-1} cD_j(k), \quad (4.6)$$

де  $\{f[k]\}_{k=0}^{N-1}$  – вихідні дані інформаційного сигналу (нульовий рівень вейвлет-декомпозиції),  $\sum_{k=0}^{N-1} cA_J(k)$  – апроксимуючі вейвлет-коефіцієнти останнього,  $J$  рівня вейвлет-декомпозиції,  $\sum_{j=1}^J \sum_{k=0}^{N-1} cD_j(k)$  – деталізуючі вейвлет-коефіцієнти з першого ( $j=1$ ) по останній ( $J$ ) рівень вейвлет-декомпозиції,  $N$  – число значень інформаційного сигналу, кратне 2, (роздільність  $2^J = N$ ).

На рис. 4.5 представлена структурно-функціональна модель обробки сигналу по алгоритму Маала.

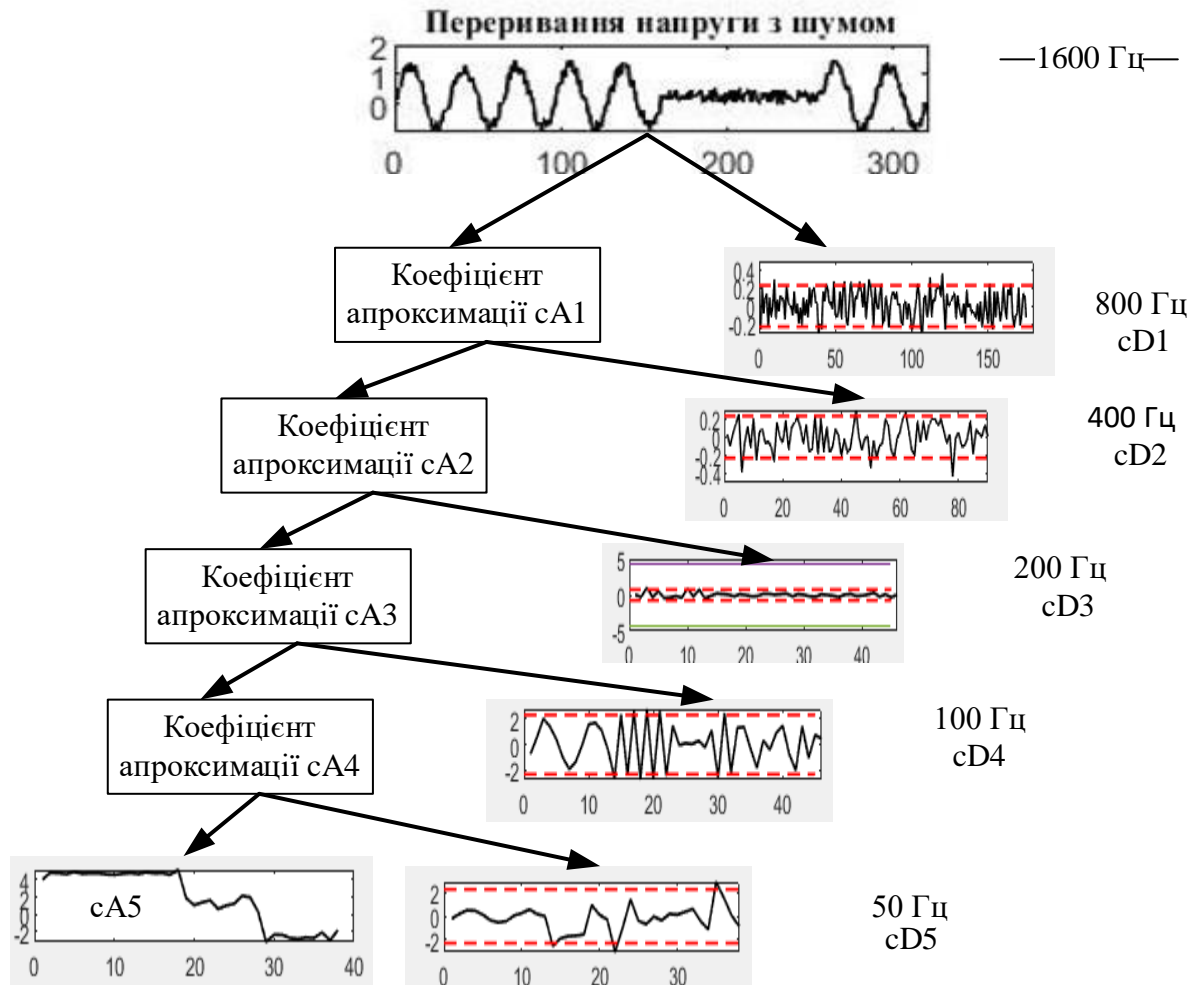


Рисунок 4.5 – структурно-функціональна модель обробки сигналу по алгоритму Маала

Частота дискретизації сигналу – 1600 Гц, Частотні складові вейвлет-декомпозиції знаходяться в наступних межах: 50 Гц ( $J = 5$ )  $\pm$  800 Гц ( $j=1$ ).

Вейвлет-коефіцієнти корисної інформації та шуму, оброблені за допомогою дискретного вейвлет-перетворення, мають ряд особливостей залежно від рівня вейвлет-декомпозиції. Енергія корисного сигналу зосереджена в декількох вейвлет-коефіцієнтах великої величини, тоді як енергія шуму розсіюється по всьому вейвлет-доміну за допомогою великої кількості вейвлет-коефіцієнтів малої величини [129].

Модуль вейвлет-коефіцієнтів шуму продовжує падати в міру збільшення кількості рівнів розкладання [120]. Як результат, типові підходи до порогового



шуму вейвлету обробляють кожен шар вейвлет-коефіцієнтів, використовуючи постійний поріг, що вносить значні відхилення в шумовий вплив. При вейвлет-коефіцієнтах з меншим масштабом розкладання обробляються з фіксованим порогом, недостатній шум видаляється і ефект шумозаглушення поганий, тоді як коли вейвлет-коефіцієнти з більшим масштабом розкладання обробляються з фіксованим порогом, відбувається фільтрація корисної інформації. У світлі цієї характеристики поріг, що залежить від рівня розкладання, який використовує  $I_{n(j+1)}$  для корекції універсального порогу, запропоновано в [127].

Зі збільшенням  $j$  поріг поступово зменшується. Модуль вейвлет-коефіцієнтів можна використовувати для опису кількості енергії, яку вони переносять. Коли сигнал розкладається на менший масштаб, їх енергетичний вміст різко зростає.

#### 4.1.2.3 Вибір адаптивного порогового значення відповідно до (4.4) та (4.5)

Як було раніше зазначено, після того, як вейвлет перетворення розкладає сигнал з наявністю шуму (шум домінує на малому рівні розкладання ( $j \leq j_0$ )), і вейвлет-коефіцієнти цих рівнів зменшуються зі збільшенням порівневої композиції, що означає, що енергія вейвлет-коефіцієнтів також зменшується зі збільшенням  $j$ . На більшому рівні розкладання ( $j > j_0$ ) корисний сигнал переважає, а енергія вейвлет-коефіцієнта велика [133]. Критичний масштаб можна оцінити за допомогою енергетичних характеристик вейвлет-коефіцієнта шуму та сигналу, що слідує за ВП. Перша екстремальна точка на кривій енергії вейвлет-коефіцієнта з'являється при збільшенні  $j$ , а рівень розкладання, відповідний екстремальній точці, вибирається як оптимальний критичний масштаб  $j_0$ .

Формула розрахунку енергії кожного рівня виглядає так:

$$E_j = \sum_{k=1}^{L_j} cD_{j,k}^2, \quad (4.7)$$

Покажемо ефективність використання запропонованого модифікованого методу зменшення шумових компонент на прикладі типу спотворення якості електричної енергії – переривання напруги з наявністю шуму в 20 dB. На рис. 4.6 представлена вейвлет-декомпозиція даного сигналу.

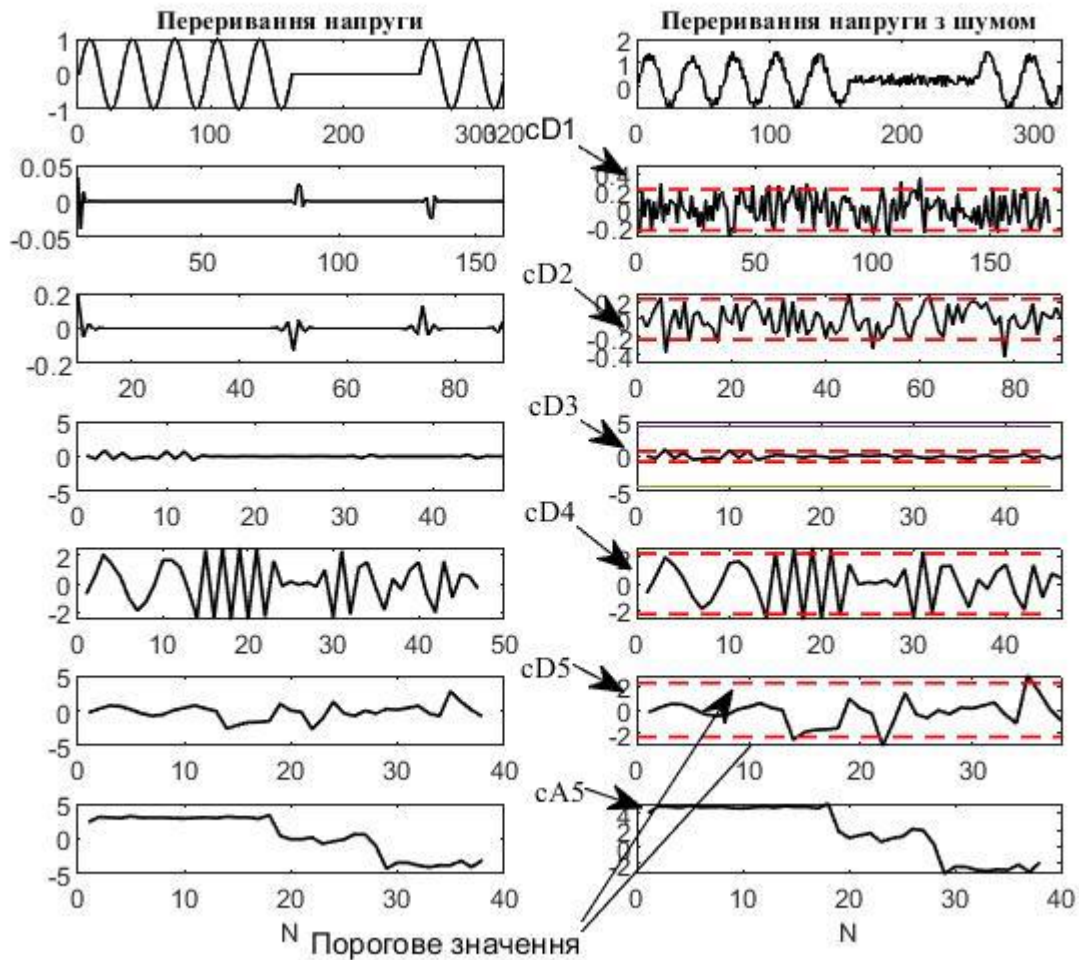


Рисунок 4.6 – Вейвлет-декомпозиція подавлення шуму в сигналі переривання напруги з наявністю шуму

Порогові значення для кожного рівня вейвлет-декомпозиції розраховувалися відповідно до (4.4), (4.5), (4.7).

Після корекції значень вейвлет-вейвлет-декомпозиції проводилася реконструкція сигналу [116-117].

## 4.2 Порівняльний аналіз відомих методів подавлення шуму та модифікованого в даній роботі

Порівняльний аналіз видалення електричного шуму модифікованого в роботі методу та відомих методів із застосуванням жорстких, м'яких, кореляційних та апроксимуючих методів. Для проведення відповідного порівняльного аналізу моделювалися спотворення показників якості електричної енергії з різним співвідношенням сигнал/шум (SNR) і підраховувалася середньоквадратична похибка (MSE):

$$SNR = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{signal}}{P_{noise}} \right), db \quad (4.8)$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |f(t) - f'(t)|^2, \quad (4.9)$$

де  $f(t)$  - зашумлений сигнал,  $f'(t)$  - сигнал з видаленим шумом,  $P_{signal}$  - потужність корисного сигналу,  $P_{noise}$  - потужність шуму

На рис. 4.7.1, 4.7.2 представлені результати порівняльного аналізу – сигнал перевищення номінального значення напруги з наявністю гармонік.

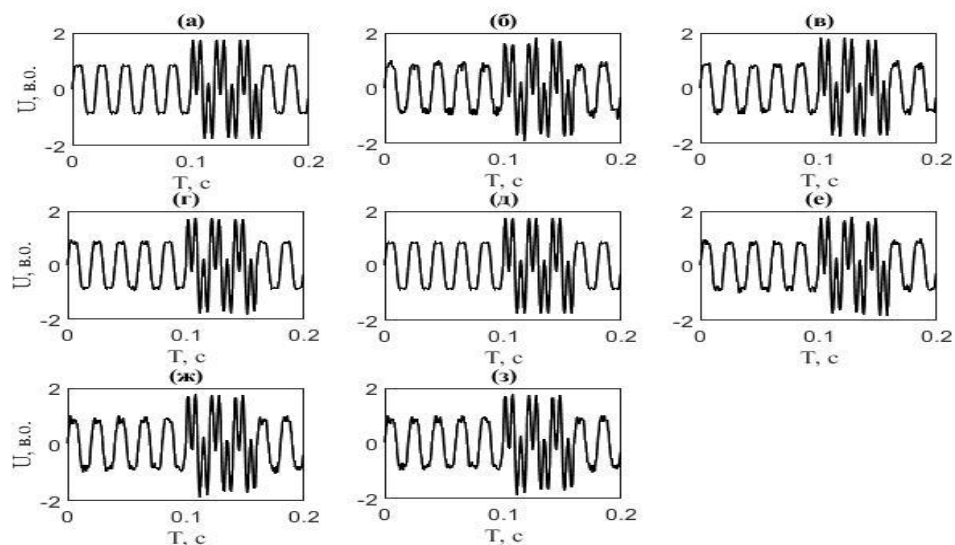


Рисунок 4.7.1 – Аналіз застосування різних методів подавлення шуму для сигналу з наявністю перевищення номінального значення та наявності гармонік

(а) - гармоніки без наявності шуму з перевищенням номінального значення; (б) - гармоніки з перевищенням і SNR 20 дБ; (в) - жорстке порогове усунення шумів; (г) - зменшення шуму з м'яким порогом; (д) зменшення шумів за методом, описаним у [130]; (є) - зменшення шумів за методом, описаним у [131]; (ж) - зменшення шумів за методом, описаним у [132]; (з) - зменшення шумів після обробки модифікованим методом.

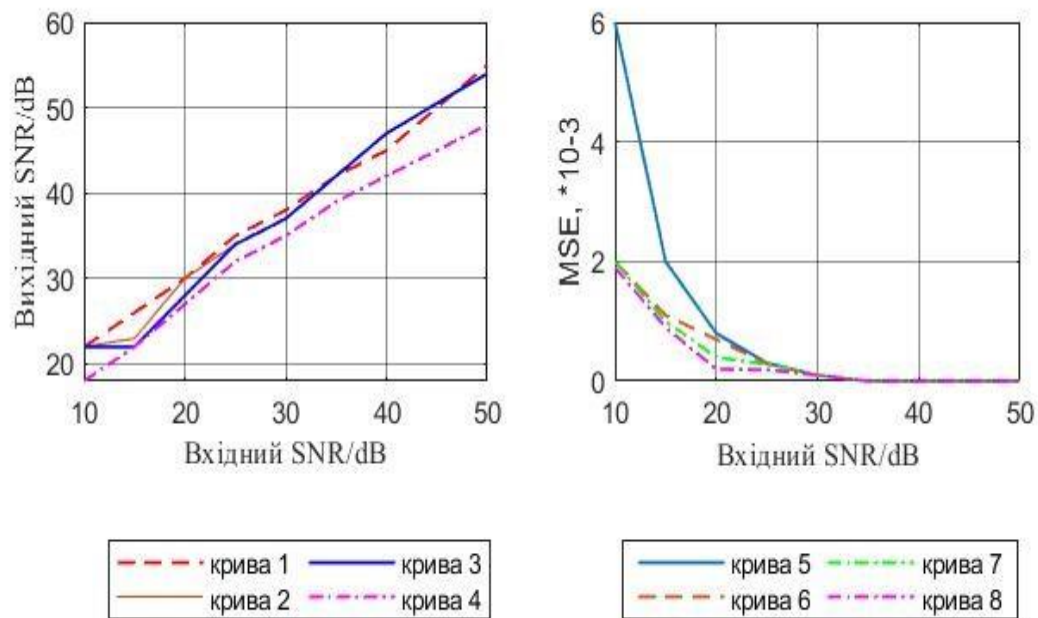


Рисунок 4.7.2 - Порівняння SNR і MSE для сигналу з перевищенням номінального значення та наявністю гармонік

Криві 1 - 6 - жорстке порогове усунення шумів; криві 2 – 5 - зменшення шуму з м'яким порогом;; криві 3 - 7 - зменшення шумів за методом, описаним у [116]; ; крива 4 – 8 – модифікований метод.

На рис. 4.7.3 – 4.7.4 представлені результати порівняльного аналізу – сигнал провалу напружності з наявністю гармонік.

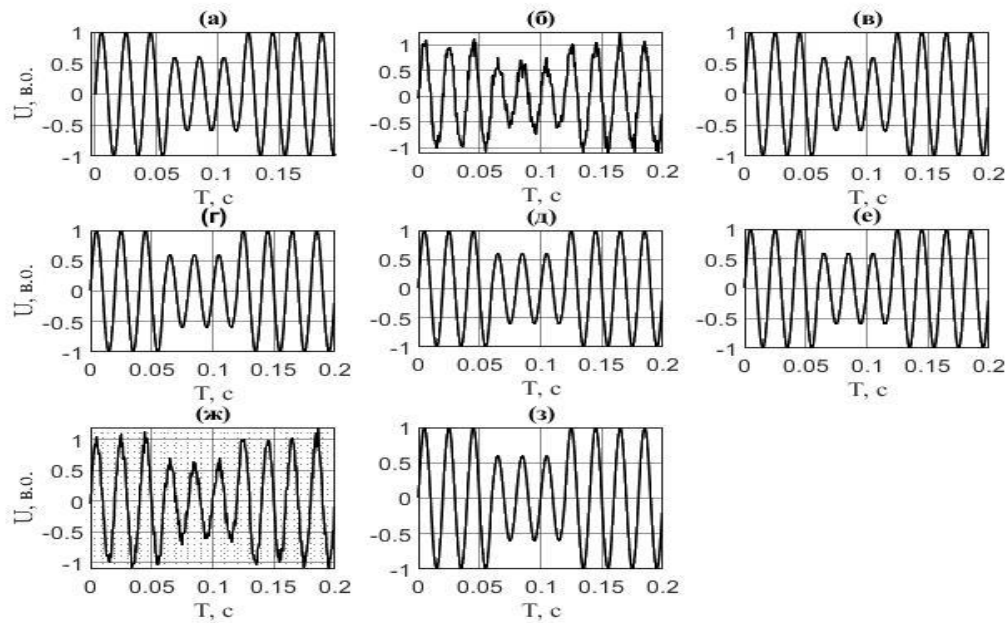


Рисунок 4.7.3 – Аналіз застосування різних методів подавлення шуму для сигналу з наявністю провалу номінального значення та наявності гармонік

(а) - безшумний провал напруги; (б) - провал напруги з SNR 20 дБ; (в) - жорсткий поріг шумозаглушення; (г) - зменшення шуму з м'яким порогом; (д) - зменшення шумів за методом, описаним у [130]; (е) - зменшення шумів за методом, описаним у [131]; (ж) - зменшення шумів за описаним методом у [132]; (з) - зменшення шумів після обробки запропонованим у роботі методом

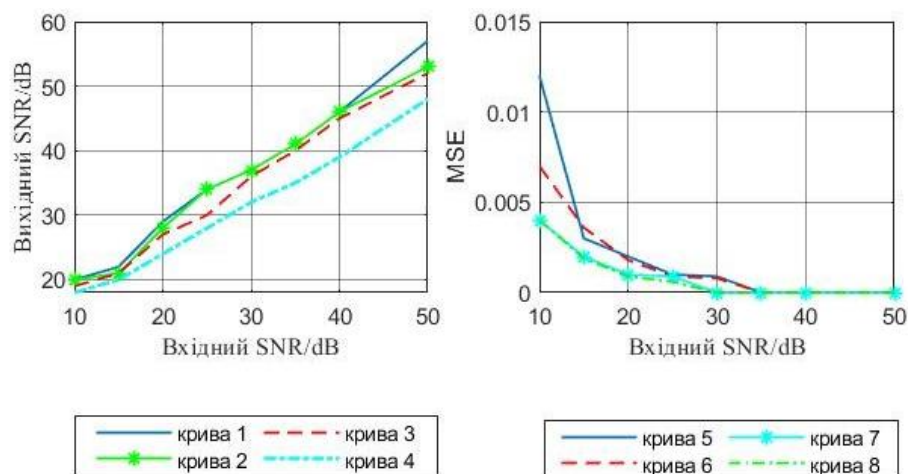


Рисунок 4.7.4 – Порівняння SNR і MSE для сигналу з провалом напруги та наявністю шумових компонент

Криві 1 - 6 – жорстке порогове усунення шумів; криві 2 - 5 – зменшення шуму з м'яким порогом; криві 3 - 7 – зменшення шумів за методом, описаним у [116]; ; крива 4 - 8 – модифікований метод

На рис. 4.7.5 – 4.7.6 представлені результати застосування різних методів подавлення шуму для сигналу з перехідним процесом - коливанням

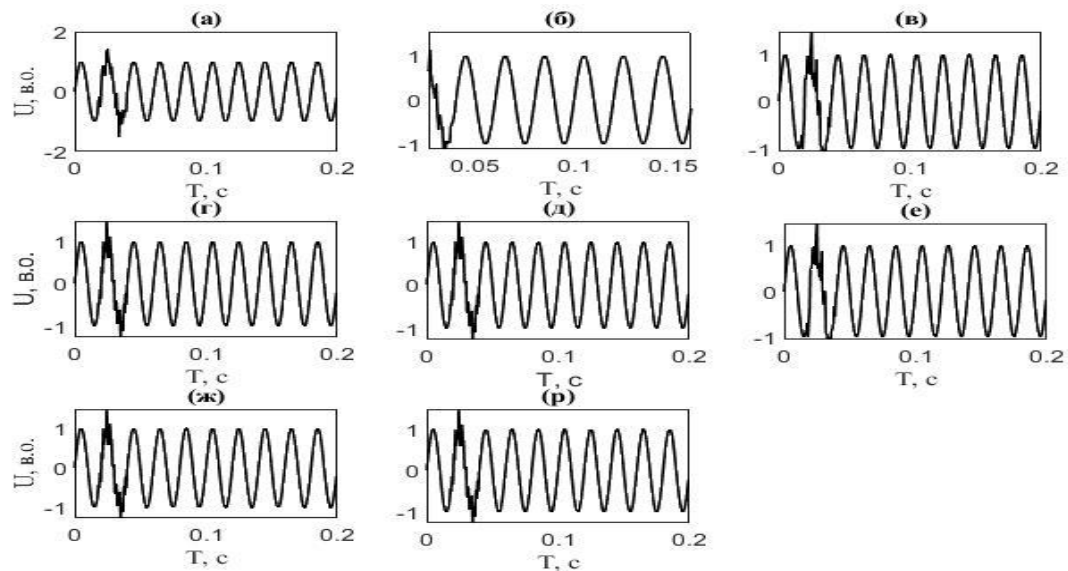


Рисунок 4.7.5 – Аналіз застосування різних методів подавлення шуму для сигналу з перехідним процесом – коливанням

(а) - перехідний процес безшумних коливань; (б) - перехідний процес коливань із SNR 20 дБ; (в) - жорсткий порогове зняття шумів; (г) - зменшення шуму з м'яким порогом; (д) - зменшення шумів за описаним методом в [130]; (е) - зменшення шумів за методом, описаним у [131]; (ж) - зменшення шуму за цим методом описано в [132]; (з) - зменшення шумів після обробки запропонованим методом.

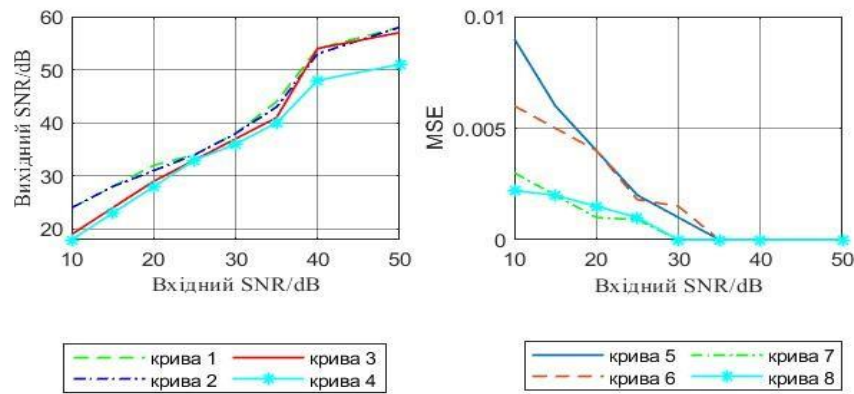


Рисунок 4.7.6 - Порівняння SNR і MSE сигналу з перехідним процесом - коливанням

Криві 1 - 6 - жорстке порогове усунення шумів; криві 2 – 5 - зменшення шуму з м'яким порогом; криві 3 - 7 - зменшення шумів за методом, описаним у [116]; ; криві 4 – 8 – модифікований метод .

Також були проведені порівняльні аналізи застосування відомих методів знешумлення сигналів з модифікованим в роботі на прикладі імпульсного перехідного процесу (рис. 4.7.7).

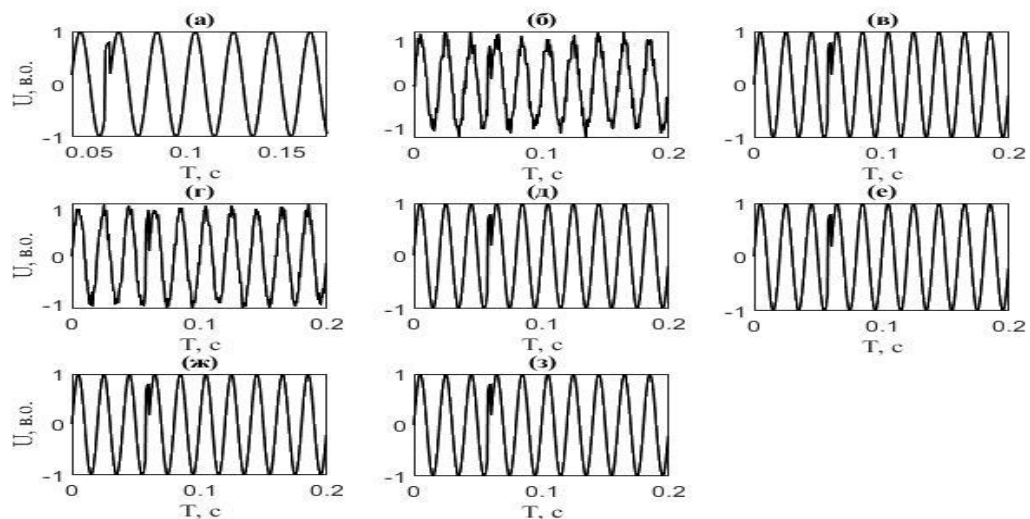


Рисунок 4.7.7 – імпульсний перехідний процес

(а) - безшумний імпульсний перехідний процес; (б) - імпульсний перехідний процес із SNR 20 дБ; (в) - жорсткий порогове зняття шумів; (г) -

зменшення шуму з м'яким порогом; (д) - зменшення шумів за описаним методом в [130]; (є) - зменшення шумів за методом, описаним у [131]; (ж) - зменшення шуму за цим методом описано в [132]; (з) - зменшення шумів після обробки запропонованим методом.

#### 4.3 Висновки до розділу 4

1. Розроблений модифікований відомий метод подавлення шумових компонент шляхом введення регульованого адаптивного порогу вейвлетів, який не тільки сумісний із розподілом шуму при кожному розмірі розкладання, але й із розподілом значущих інформацій, що міститься в різних формах сигналів спотворення на кожному рівні вейвлет композиції (логістичної функції Ферхюльста показав прийнятну точність та ефективність для видалення шумових компонент при аналізі перехідних процесів в енергетичних системах.

2. Швидкість, точність та достовірність при застосуванні модифікованого методу подавлення шумових компонент в значній мірі залежить від вибору материнського вейвлету.

### ВИСНОВКИ

1. На основі досліджень сучасного стану застосування методів і засобів оцінювання якості електричної енергії та побудови на їх основі автоматизованих систем моніторингу параметрів режиму електроспоживання в роботі запропонована математична модель формування спотворень якості електричної енергії, адаптована до типу спотворення і представляє необхідну і достовірність та гнучкість моделювання та генерації від простих до складних типів спотворень.

2. Для створення автоматизованої системи моніторингу якісних параметрів режиму електроспоживання в роботі на основі розробленої математичної моделі формування спотворень якості електричної енергії розроблений метод комп'ютерного моделювання реалізацій електричної



напруги із заданими типами спотворень якості електричної енергії, що забезпечує альтернативну оцінку продуктивності складних енергетичних комплексів та можливості тестування різноманітних методів та засобів покращення якості електричної енергії шляхом своєчасної зміни параметрів моделювання.

3. На основі досліджень впливу параметрів провалу напруги на продуктивність роботи асинхронного двигуна не тільки від тривалості та глибини провалу напруги, але і від додаткових характеристик провалів напруги, таких як стрибок фазового кута, точок початку та закінчення провалу, залишкової напруги в роботі розроблено модифікований метод побудови його селективного захисту асинхронного двигуна за рахунок визначення залежності струму статора від характеристик провалу напруги, як основних так і додаткових.

4. Моделювання однофазного короткого замикання на землю проводилось за допомогою розробленої автором моделі формування спотворень якості електричної енергії. Структура даної моделі побудована на основі так званої архітектури *framework*, яка задає структуру, визначає правила та представляє необхідний набір інструментів для створення моделі. Проведені дослідження показали, що різний тип несправності та параметри електричної мережі в місці короткого замикання, спричиняють різні порушення електричної напруги в системі живлення. Наявність короткого замикання одного типу при різних його місцях знаходження, призводить до різного падіння та перевищення напруги. Короткочасна зміна напруги є найпоширенішими спотвореннями якості електричної напруги в електричних мережах. Результати моделювання на основі розробленої моделі, узгоджуються з теорією і достовірно імітують зміну напруги в електричній мережі.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. W. K. Mashwani, R. Haider, S. B. Belhaouari, A Multiswarm Intelligence Algorithm for Expensive Bound Constrained Optimization Problems, *Hindawi, Complexity*, Volume 2021, Article ID 5521951.
2. A. Ruszczyński, *Nonlinear Optimization*, Princeton University Press, Princeton, NJ, USA, 2006.
3. R. E. Miller, *Optimization: Foundations and Applications*, John Wiley & Sons, London, UK, 1999.
4. L. Decastro, “Fundamentals of natural computing: an overview,” *Physics of Life Reviews*, vol. 4, no. 1, pp. 1–36, 2007.
5. A. E. Eiben and J. E. Smith, *Introduction to Evolutionary Computing*, Springer Publishing Company, Berlin, Germany, 2nd edition, 2015.
6. S. Akyol and B. Alatas, “Plant intelligence based metaheuristic optimization algorithms,” *Artificial Intelligence Review*, vol. 47, no. 4, pp. 417–462, 2017.
7. S. Hong, D. Han, K. Cho, J. S. Shin, and J. Noh, “Physics-based full-body soccer motion control for dribbling and shooting,” *ACM Trans. Graph.*, vol. 38, no. 4, 2019.
8. N. Siddique and H. Adeli, “Physics-based search and optimization: inspirations from nature,” *Expert Systems*, vol. 33, no. 6, pp. 607–623, 2016.
9. F. T. Silva, M. X. Silva, and J. C. Belchior, “A new genetic algorithm approach applied to atomic and molecular cluster studies,” *Frontiers in Chemistry*, vol. 7, p. 707, 2019.
10. G. Beni and J. Wang, “Swarm intelligence in cellular robotic systems,” in *Robots and Biological Systems: Towards a New Bionics*, P. Dario, G. Sandini, and P. Aebischer, Eds., pp. 703–712, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1993.
11. X.-S. Yang, “Swarm intelligence based Algorithms: a critical analysis,” *Evolutionary Intelligence*, vol. 7, no. 1, pp. 17–28, 2014.
12. C. Grosan and A. Abraham, “Hybrid evolutionary algorithms: methodologies, architectures, and reviews,” 2007.

13. W. K. Mashwani, “An introduction to the collective behaviour of swarm intelligence,” 2017.
14. David Salomon, *Data Compression: The Complete Reference*, Springer Verlag New York, Inc., 2004.
15. Ponnusamy, V.K.; Kasinathan, P.; Madurai Elavarasan, R.; Ramanathan, V.; Anandan, R.K.; Subramaniam, U.; Ghosh, A.; Hossain, E. A Comprehensive Review on Sustainable Aspects of Big Data Analytics for the Smart Grid. *Sustainability* 2021, 13, 13322. [Google Scholar] [CrossRef].
16. Zhang, Y.; Huang, T.; Bompard, E.F. Big data analytics in smart grids: A review. *Energy Inform.* 2018, 1, 8. [Google Scholar] [CrossRef].
17. Song, D.; Wen, B.; Yang, X.; Gu, Y.; Wei, S.; Ma, S. A New Method for Processing and Application of Wide Area Measurement Big Data in a Power System. In *Proceedings of the 2015 International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery*, Xi'an, China, 17–19 September 2015; pp. 137–140. [Google Scholar] [CrossRef].
18. Song, J.; Lee, Y.; Hwang, E. Adaptive Compressive Sensing based Data Compression on Energy Consumption in Smart Grid. In *Proceedings of the 2019 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, Jeju, Korea, 16–18 October 2019; pp. 568–570. [Google Scholar] [CrossRef].
19. Al-Hazaimah, O.; Al-Jamal, M.; Alomari, A.; Bawaneh, M.; Tahat, N. Image encryption using anti-synchronisation and Bogdanov transformation map. *Int. J. Comput. Sci. Math.* 2022, 15, 43. [Google Scholar] [CrossRef].
20. Kou, L.; Wu, J.; Zhang, F.; Ji, P.; Ke, W.; Wan, J.; Liu, H.; Li, Y.; Yuan, Q. Image encryption for offshore wind power based on 2D-LCLM and Zhou Yi eight trigrams. *Int. J. Bio-Inspired Comput.* 2023, 22, 53–64. [Google Scholar] [CrossRef].
21. Donoho DL. De-noising by soft-thresholding. *IEEE Transactions on Information Theory*. 1995;41(3):613–627. [Google Scholar].

22. Boudraa AO, Cexus JC. EMD-based signal filtering. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2007;56(6):2196–2202. [Google Scholar].
23. Flandrin P, Rilling G, Gonçalves P. Empirical mode decomposition as a filter bank. *IEEE Signal Processing Letters*. 2004;11(2):112–114. [Google Scholar].
24. Hasan T, Hasan MK. Suppression of residual noise from speech signals using empirical mode decomposition. *IEEE Signal Processing Letters*. 2009;16(1):2–5. [Google Scholar].
25. Kopsinis Y, McLaughlin S. Development of EMD-based denoising methods inspired by wavelet thresholding. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2009;57(4):1351–1362. [Google Scholar].
26. Qu CS, Lu TZ, Tan Y. A modified empirical mode decomposition method with applications to signal de-noising. *Acta Automatica Sinica*. 2010;36(1):67–73. [Google Scholar].
27. Esquef PAA, Welter GS. Audio de-thumping using Huang's empirical mode decomposition. *Proceedings of the International Conference on Digital Audio Effects*; 2011; Paris, France. pp. 19–23. [Google Scholar].
28. Волошко А.В., Рашед Алмаброк, Видалення шумових компонент інформаційних сигналів за допомогою ортогональних вейвлет-перетворень. 2020, Електрон. моделювання. 2020. Т. 42. № 5, с. 97—110.
29. Zhovtianskoho V. A., Kulyka M. M., Stohniia B. S. Energy saving strategy in Ukraine: Analytical and reference materials. Vol.1. Kyiv : Akadempriodyka, 2006. 580 p.
30. Characteristics of power supply voltage in general-purpose electrical networks: DSTU EN 50160:2014 (EN 50160:2010, IDT). K.: Derzhstandart Ukrainy, 2014. 27 p.
31. DSTU IEC 61000-3-12: 2009 "Electromagnetic compatibility. Part 3-12. Norms. Norms for current harmonics created by equipment with rated input current above 16A and up to 75A inclusive per phase connected to low voltage power supply systems of general purpose" (IEC61000-3-12: 2004, IDT): DSTU IEC 61000-3-12: 2009.

32. Emanuel A.E. Power definitions and the physical mechanism of power flow. John Wiley & Sons. IEEE Press. 2010. 274 p.
33. Mindykowski J., Tarasiuk T., “Measurement of supply voltage properties in ships’ electrical power systems”, Metrology and Measurement Systems. Polish Scientific Publishers PWN, vol. IX, No. 1/2002 Warsaw 2002, pp. 19-30.
34. Heydt GT, Electric Power Quality, Stars in a Circle Publications, West LaFayette (USA), 1991.
35. HUANG Jian,ZHOU Lin. Evaluation of power Quality Based on the Method of Matter-element[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition). 2007(06).
36. Hui J, Peng J, Yaping O U, et al. Power Quality Unitary Quantification and Evaluation Based on Probability and Vector Algebra[J]. Journal of Hunan University, 2003.
37. Li Q H, Zhou L, et al. Evaluation of power quality by accelerating genetic algorithm and shepard interpolation[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(7):139-143.
38. Jia Q, Song J, Lan H, et al. QUALITY OF ELECTRICITY COMMODITY AND ITS FUZZY EVALUATION[J]. Power System Technology, 2000.
39. Wang H, Zeng M, Chen S, et al. Comprehensive Evaluation Model for Power Supply Service Quality Based on Fuzzy Analytic Hierarchy Process[J]. Power System Technology, 2006, 30(17):92-96.
40. Huang J, Hong-Zhong M A, Hui J I. Application of intimate data method in synthetical evaluation about power quality[J]. Relay, 2008.
41. Huang J, Hong-Zhong M A, Hui J I. Application of intimate data method in synthetical evaluation about power quality[J]. Relay, 2008.
42. Tao S, Xiao X. Synthetic grading evaluation of power quality based on cask principle[C]// International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. IEEE, 2008:2353-2357.
43. Wang R, Fang J, Zhang K, et al. Fuzzy synthetic evaluation of power quality based on entropy and AHP[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2007.

44. Волошко А.В. Класифікація інформаційних сигналів за відносною ентропією по рівнях вейвлет-декомпозиції, Енергетика: економіка, технології, екологія. 2015. № 3, с. 20.
45. Kamwa, I. Dynamic Wide Area Situational Awareness: Propelling Future Decentralized, Decarbonized, Digitized, and Democratized Electricity Grids. IEEE Power Energy Mag. 2023, 21, 44–58. [Google Scholar] [CrossRef].
46. Dileep, G. A survey on smart grid technologies and applications. Renew. Energy 2020, 146, 2589–2625. [Google Scholar] [CrossRef].
47. Ergude, B.; Weisheng, L.; Dongrui, F.; Xiaoyu, M. A Study and Implementation of the Huffman Algorithm Based on Condensed Huffman Table. In Proceedings of the 2008 International Conference on Computer Science and Software Engineering, Wuhan, China, 12–14 December 2008; Volume 6, pp. 42–45. [Google Scholar] [CrossRef].
48. Huang, J.Y.; Liang, Y.C.; Huang, Y.M. Secure integer arithmetic coding with adjustable interval size. In Proceedings of the 2013 19th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC), Denpasar, Indonesia, 29–31 August 2013; pp. 683–687. [Google Scholar] [CrossRef].
49. Dong, Y.; Pan, W.D. A Survey on Compression Domain Image and Video Data Processing and Analysis Techniques. Information 2023, 14, 184. [Google Scholar] [CrossRef].
50. Bhuiyan, B.A.; Absar, M.W.; Roy, A. Performance comparison of various wavelets in compression of PMU generated data in smart grid. In Proceedings of the 2017 3rd International Conference on Electrical Information and Communication Technology (EICT), Khulna, Bangladesh, 7–9 December 2017; pp. 1–6. [Google Scholar] [CrossRef].
51. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов/ Пер. с англ. М.:Мир, 2005, 671 с.
52. Guo Q., Zhang C. A noise reduction approach based on Stein's unbiased risk estimate// Science Asia, 2012, Vol. 38(2), pp. 207—211.

53. Donoho D.L., Johnstone J. De-noising by soft thresholding //IEEE Transactions on Information Theory, 1995, Vol. 41, Issue 3, pp. 613—627.
54. Lu J., Hong L., Dong Y., Zhang Y. A New Wavelet Threshold function and Denoising Application //Mathematical Problems in Engineering, 2016, Vol. 49, pp. 1—9.
55. Luo G., Chang D. Wavelet Denoising //Advanced in Wavelet Theory and Their Applications in Engineering. Physics and Technology. [www.intechopen.com](http://www.intechopen.com).
56. Tejashree G. More, Pooja R. Asabe, Sandeep Chawda. Power Quality Issues and It's Mitigation Techniques. Int. Journal of Engineering Research and Applications. 2014. Vol 4. No 4( Version 4), Pp.170-177.
57. Adeoye, O.S., Folayan G.B. Power Quality Indices and Mitigation Techniques: A Review. International Journal of Latest Engineering Science (IJLES). 2019. Vol. 02. No 02. Pp. 66 - 71.
58. Ajinkya Sinkar, Huanfeng Zhao, Bolin Qu, Aniruddha M. Gole. A Comparative Study of Electromagnetic Transient Simulations using Companion Circuits, and Descriptor State-space Equations. Electric Power Systems Research. 2021. Vol. 198. Pp.20-26. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107360>
59. H. W. Dommel, Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single and Multiphase Networks, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-88, 1969. No. 4, Pp. 388 - 399.
60. Kok Wai Chan<sup>1</sup>, Rodney H. G. Tan, V. H. Mok. Simulation of Power Quality Disturbances Using PSCAD. Applied Mechanics and Materials Submitted. 2014. Vol. 785, Pp. 373 - 378. Doi: [10.4028/www.scientific.net/AMM.785.373](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.785.373).
61. Gheorghe CĂR0IN, Gheorghe GRIGORA, Elena-Crengu. Power system analysis using matlab toolboxes. 6th International Conference on Electromechanical and Power Systems, Oct. 4 – 6. 2007. Pp. 305 – 308.
62. Federico Milano. Power System Analysis Toolbox Quick Reference Manual for PSAT version 2.1.2, June 26, 2008. 105 p.
63. SimPowerSystems. User's Guide. Hydro-Québec and MathWorks. Inc. 2012. 411 p.

64. K. Schoder, A. Hasanovic, A. Feliachi. PAT: A Power Analysis Toolbox for MATLAB/Simulink. IEEE Power Engineering Review. 2002. Vol. 22. Issue: 11. DOI: 10.1109/MPER.2002.4311828. 2002. P. 54 – 58.
65. Wilsun Xu, Component Modeling Issues for Power Quality Assessment, IEEE Power Engineering Review. 2001. Pp. 12-17.
66. Raúl Igual, Carlos Medrano, Francisco Javier Arcega, Gabriela Mantescu. Integral mathematical model of power quality disturbances. 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). 2018. Ljubljana, Slovenia. Pp. 310 – 316. DOI: 10.1109/ICHQP.2018.8378902.
67. R. Igual, C. Medrano, F.J. Arcega, G. Mantescu. Mathematical model of power quality disturbances. Mendeley Data. 2017. Vol. 1. DOI: <https://dx.doi.org/10.17632/6kmkk9bjdx.1>.
68. Moises Vidal Ribeiro, Jose Luiz Rezende Pereira. Classification of Single and Multiple Disturbances in Electric Signals, EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. 2007. Pp. 1 – 18. DOI: <https://doi.org/10.1155/2007/56918>.
69. D. Saxena, S.N. Singh, K.S. Verma. Wavelet based denoising of power quality events for characterization. International Journal of Engineering, Science and Technology, 2011. Vol. 3. No. 3. Pp. 119 – 132.
70. Fayyaz Jandan, Suhail Khokhar, Zubair Ahmed Memon, Syed Abid Ali Shah. Wavelet Based Simulation and Analysis of Single and Multiple Power Quality Disturbances. Engineering, Technology & Applied Science Research. 2019. Vol. 9, No. 2, Pp. 3909-3914.
71. Pengfei Wei, Yonghai Xu, Yapen Wu, Chenyi Li. Research on classification of voltage sag sources based on recorded events. 24th International Conference & Exhibition on Electricity Distribution (CIRED) 12-15 June 2017. Is. 1. Pp. 846 – 850. DOI: 10.1049/oap-cired.2017.0907.
72. Math H. Bollen. Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions. Wiley-IEEE Press. 2000. 672 p.
73. David A. Elvira-Ortiz, Juan J. Saucedo-Dorantes, Roque A. Osornio-Rios, Daniel Morinigo-Sotelo, Jose A. Antonino-Daviu. Power Quality Monitoring



Strategy Based on an Optimized Multi-Domain Feature Selection for the Detection and Classification of Disturbances in Wind Generators. *Electronics* 2022, Vol. 11(2). Pp. 1 – 25. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics11020287>.

74. Azam Bagheri, Roger Alves de Oliveira , Math H. J. Bollen, Irene Y. H. Gu. A Framework Based on Machine Learning for Analytics of Voltage Quality Disturbances. *Energies* 2022. Vol. 15. Pp. 1 -14. <https://doi.org/10.3390/en15041283>.

75. Pavan Kumar Singh, Vahadood Hasan. Effect of voltage sag of induction motor. *International journal of engineering sciences & research technology*. 2018. Vol. 7(6). Pp. 11 – 23. DOI: 10.5281. Pp. 11 -23.

76. Rodney H.G. Tan, Ramachandaramurthy V.K. Numerical Model Framework of Power Quality Events. *European Journal of Scientific Research*. 2010. Vol. 43 No.1. Pp. 30-47.

77. Math H. J. Bollen, Emmanouil Styvaktakis, Irene Yu-Hua Gu. Categorization and Analysis of Power System Transients. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, VOL. 20, NO. 3, JULY 2005. *IEEE Transactions on Power Delivery* · August 2005. DOI: 10.1109/TPWRD.2004.843386 · Source: IEEE Xplore

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/3275167>

78. Hu M, Chen HG. Power quality and its analysis methods summarize. *Power grid technology*, 2000; 24(2):36-38.

79. Shi J. Research on location of transient power quality disturbance. Master thesis, Hunan University. Hunan, China; 2008.

80. Equivalent single-phase networks for calculating short-circuit currents due to grounds on three-phase star grounded systems *Journal of the A.I.E.E.* Volume: 43 Issue: 11 Roy A. Shetzline 1924, p. 1014-1020.

81. Development of the methods of calculation of the electrical installations working operation in case of quality supply disturbance *Sulaimani Journal for Engineering Sciences* Volume 7 - Number 3 – December 2020 Ismael Kareem Saeed1 Kamal Sheikh Younis1 p. 119-131.

82. Analysis and simulation of single phase-to-ground short circuit fault in Van 154 kV substation: An experimental assessment Sabir Rustemlia, Ilter Demirb urnal of Science and Technology BITLIS EREN UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY 9(2) (2019) p. 76-82.
83. Simulation of single-phase ground short circuit protection device. Aliya Zhumadirova, Vadim Markovskiy<sup>1</sup>, and Aleksandr Kislov<sup>1</sup> E3S Web of Conferences 288, 01038 (2021) SUSE-2021 p. 1-5.
84. Zhou YS, Peng Z, Wei XY, Kuang JH. Matlab simulation on single-phase-to-earth fault of small current grounding power system. Proceedings of the CSU-EPSA, 2009; 21(4), p. 50-52.
85. Wu Zhu, Wei-Ya Ma, Yuan Gui, Hua-Fu Zang. Modelling and Simulation of PQ Disturbance Based on Matlab. International Journal of Smart Grid and Clean Energy. 2012. - № 9. – p. 18-24.
86. Ignatova V., Granjon P., Bacha S. Space vector method for voltage dips and swells analysis. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24 (4), p. 2054-2061.
87. Bialobrzheskyi O. V., Vlasenko R. V. Interrelation of a Clarke and Fortescue transformation for the three-phase asymmetrical electrical network. Науковий вісник НГУ, 2016, № 5. С. 67-74.
88. Krasnykh A.A., Krivoshein I.L., Kozlov A.L. Research of single-phase faults in 6-35 KV branched overhead distribution network, 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 1-4 (2017).
89. Волошко А.В., Джеря Т.Е. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ОДНОФАЗНИХ КОРОТКИХ ЗАМИКАНЬ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ. Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. ЕлекЗбірник наукових праць ДДТУ № 2(43) 2023, С. 131-139 DOI: 10.31319/2519-2884.43.2023.14
90. IBRAHIM, A. I.—DOMMEL, H. W. : An Intelligent Support System for the Analysis of Power System Transients, Int. J. Electr. Power Energy Syst. 25 No. 1 (Jan 2003), 71–77.

91. PERERA, N.—RAJAPAKSE, A. D.: Design and Hardware Implementation of a Modular Transient Directional Protection Scheme using Current Signals, IET Gener. Transm. Distrib. 6 No. 6 (2012), 554–562.
92. CORY, D. V.—DOS SANTOS, C. J.—TAVARES, M. C. Transient Analysis Resulting from Shunt Capacitor Switching in an Actual Electrical Distribution System, In: 8th Int. Conf. On Harmonics and Quality of Power, Athens, Oct 1998, pp. 292–297.
93. IBRAHIM, A. I.—DOMMEL, W. : A Knowledge Base for Switching Surge Transients, In: Int. Conf. on Power Systems Transients, Montreal, June 2005.
94. Daniel Guill'en, Gina Id'arraga-Ospina, Camilo Cortes. A NEW ADAPTIVE MOTHER WAVELET FOR ELECTROMAGNETIC TRANSIENT ANALYSIS. Journal of ELECTRICAL ENGINEERING, VOL 67 (2016), NO1, 48–55. Pp. 48 – 55. DOI: 10.1515/jee-2016-0007.
95. FUNABASHI, T.OTOGURO, H.MIZUMA, Y.DUBE, L.KIZILCAY, M.AMETANI, A. : Influence of Fault Arc Characteristics on the Accuracy of Digital Fault Locators, IEEE Trans. Power Del. 16 No. 2 (Apr 2001), 195–199.
96. Модель асинхронного двигателя.  
<https://www.mathworks.com/help/sps/ug/three-phase-asynchronous-machine.html>.
97. Yang Han, Yu Feng, Ping Yang, Lin Xu, Yan Xu, Frede Blaabjerg. Cause, Classification of Voltage Sag, and Voltage Sag Emulators and Applications: A Comprehensive Overview. IEEE Open Access journal. 2020. No. 6. Pp. 1922 – 1934. DIO:10.1109/ACCESS.2019.2958965.
98. J. C. Das: Effects of momentary voltage dips on the operation of induction and synchronous motors. IEEE Transaction on Industry Applications, vol. 26. No.4, July/Augustus, (1990).
99. M. H. J. Bollen, Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions. New York: IEEE Press, 2000.
100. Elisa Espinosa Juarez and Araceli Hernandez, “An analytical approach for stochastic assessment of balanced and unbalanced voltage sags in large systems,” IEEE Transactions on Power Delivery, vol.21, No.3, pp.1493-1500,

July 2006.

101. Dong-Jun Wan, Sean-Ju Ahn and Yop Chung, “A new definition of voltage sag duration considering the voltage tolerance curve,” IEEE Bologna Power Tech. Conference, Bologna, Italy, vol.4, June 23-26, 2003
102. Magnus Ohrstrom and Lennart soder, “A comparison of two methods used for voltage dip characterization” IEEE Power Tech. Conference, Bologna, Italy, vol.4, June 23-26, 2003.
103. S. Mulukutla, and E. Gulachenski, “A critical survey of considerations in maintaining process continuity during voltage dips while protecting motors with reclosing and bus-transfer practices,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 7, no. 3, pp. 1299–1305, Aug., 1992.
104. Surya Hardi1, Muhd. Hafizi, Muzamir Isa1, Syafrudin Masri, Mohd Azrik bin Ruslan, 1Syafruddin Hasan, // Nisja applied Mechanics and Materials Vol. 793 (2015) pp 262-266 Submitted: 2015-02-08 © (2015) Trans Tech Publications, Switzerland.
105. J. Pedra, F. Coreles and L. Sainz: Effect of unsymmetrical voltage sags on squirrel cage Inductions motors. IET Gener. Transm. Distrib. pp. 769-775, (2007).
106. J. C. Gomez, M. Marcos, C. A. Reineri and G. N. Campetelli: Behavior of induction motor due to voltage sags and short interruptions. IEEE Transaction on Power Delivery, Vo. 17, No. 2, April (2002).
107. Guasch, L., Corcoles, F., Pedra, J., “Effects of unsymmetrical voltage sag types E, F and G on induction motors,” Harmonics and Quality of Power, Proceedings. Ninth International Conference, v. 3, 1 - 4 Oct. 2000, pp. 796 – 803.
108. T. ElShennawy, M. El-Gammal, and A. Abou-Ghaza, “Voltage sag effects on the process continuity of a refinery with induction motors loads,” Am. J. Appl. Sci., vol. 6, no. 8, pp. 1626–1632, 2009. DOI: 10.3844/ajassp.2009.1626.1632.
109. T. Key, “Predicting behavior of induction motors during service faults and interruptions,” IEEE Ind. Appl. Mag., vol. 1, no. 1, pp. 6–11, 32, 1995. Jan. DOI: 10.1109/2943.378057.

110. G. Newman, S. Perera, V. Gosbell, and V. Smith, "Voltage sag ride through improvement of modern ac drives: Review of methods and a case study," in Proc. AUPEC, Perth, Australia, pp. 304–309, Sep., 2001.
111. J. Das, "Effects of momentary voltage dips on the operation of induction and synchronous motors," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 26, no. 4, pp. 711–718, 1990. JulyDOI: 10.1109/28.55998.
112. Induction motors-An experimental study," IEEE Electrical and Electronics Engineering (ISEEE), 4th International Symposium, pp. 1–6, Oct. 2013.
113. Nsilulu Tresor Mbungu, Ramesh C. Bansal, Raj M. Naidoo & Mandangi Jean-Pierre Bazolana (2019) Discriminatory Protection Analysis of Three-Phase Asynchronous Motors During Power Disturbances, Electric Power Components and Systems,2019. Vol. 47 (4-5), pp. 431- 443,  
<https://doi.org/10.1080/15325008.2019.1602801>.
114. P. Gnacinski, and M. Peplinski, "Lowered voltage quality and load-carrying capacity of induction motors," IET Electr. Power Appl., vol. 10, no. 9, pp. 843–848, 2016. DOI: 10.1049/iet-epa.2016.0187.
115. Pavan Kumar Singh, Vahadood Hasan. EFFECT OF VOLTAGE SAG OF INDUCTION MOTOR. INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES & RESEARCH TECHNOLOGY. 7(6): June, 2018] DOI: 10.5281/zenodo.1255664. pp. 11 – 23.
116. Wang, W.; Dong, R.; Zeng, W.; Zhang, B.; Zheng, Y. A wavelet de-noising method for power quality based on an improved.  
threshold and threshold function. Trans. China Electrotech. Soc. 2019, 34, 409–418.
117. Wang, Y.; Xu, C.; Wang, Y.; Cheng, X. A comprehensive diagnosis method of rolling bearing fault based on CEEMDAN-DFAimproved.  
wavelet threshold function and QPSO-MPE-SVM. Entropy 2021, 23, 1142. [CrossRef] [PubMed].
118. Yang, H.; Liao, C. A de-noising scheme for enhancing wavelet-based power quality monitoring system. IEEE Trans. Power Deliv. 2001, 16, 353–360. [CrossRef] Energies 2022, 15, 3081 20 of 21.

119. Yang, Z.; Hua, H.; Cao, J. A novel multiple impact factors based accuracy analysis approach for power quality disturbance detection. *CSEE JPES* 2020, 1–12. [CrossRef].
120. Wang, Y.; Li, Q.; Zhou, F. Transient power quality disturbance denoising and detection based on improved iterative adaptive kernel regression. *J. Mod. Power Syst. Clean Energy* 2019, 7, 644–657. [CrossRef].
121. Laurent, G.; Gilles, P.; Woelffel, W.; Barret-Vivin, V.; Gouillart, E.; Bonhomme, C. Denoising applied to spectroscopies—Part II: Decreasing computation time. *Appl. Spectrosc. Rev.* 2020, 55, 173–196. [CrossRef].
122. Ye, B.; Zhou, K.; Huang, Y.; Liu, L.; Zhang, Q. A white noise suppression method for partial discharge based on AWM and OSVD. *Proc. CSEE* 2021, 41, 3978–3987.
123. Hu, W.; Su, H.; Luan, Y. Power quality signals' de-noising method based on singular value decomposition (SVD). *Power Syst. Prot. Control* 2010, 38, 30–33.
124. Shukla, S.; Mishra, S.; Singh, B. Power quality event classification under noisy conditions using EMD-based de-noising techniques. *IEEE Trans. Ind. Inform.* 2014, 10, 1044–1054. [CrossRef].
125. Wang, L.; He, Z.; Zhao, J.; Zhang, H. Wavelet transform and mathematical morphology's application in power disturbance signal denoising. *Power Syst. Prot. Control* 2008, 36, 30–35.
126. Xi, Y.; Li, Z.; Tang, X.; Zeng, X. Classification of power quality disturbances based on KF-ML-aided S-transform and multilayers feedforward neural networks. *IET Gener. Transm. Distrib.* 2020, 14, 4010–4020. [CrossRef].
127. Chen, W.; Li, J.; Wang, Q.; Han, K. Fault feature extraction and diagnosis of rolling bearings based on wavelet thresholding denoising with CEEMDAN energy entropy and PSO-LSSVM. *Measurement* 2021, 172, 108901. [CrossRef].
128. Donoho, D.L. (1995) Denoising by Soft-Thresholding. *IEEE Transactions on Information Theory*, 41, 613–627. <http://dx.doi.org/10.1109/18.382009>.
129. Ray, P.; Maitra, A.K.; Basuray, A. A new threshold function for de-noising partial discharge signal based on wavelet transform. In *Proceedings of the*

International Conference on Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition, Coimbatore, India, 7–8 February 2013.

130. Srivastava, M.; Anderson, C.L.; Freed, J.H. A new wavelet denoising method for selecting decomposition levels and noise thresholds. *IEEE Access* 2016, 4, 3862–3877.

131. Srivastava, M.; Georgieva, E.R.; Freed, J.H. A new wavelet denoising method for experimental time-domain signals: Pulsed dipolar electron spin resonance. *J. Phys. Chem. A* 2017, 121, 2452–2465.

132. Verhulst, P. F., (1838). Notice sur la loi que la population poursuit dans son accroissement. *Correspondance mathématique et physique*, 10, 113—121.

133. Malla S. (2005). «Wavelets in signal processing» : Trans. From English. - M.: Mir. - 671 p.