

# ЗАСТОСУВАННЯ ЦИФРОВИХ МЕТОДІВ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ У ДІАГНОСТИЦІ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Вінницький національний технічний університет

## Анотація

Проведено аналіз сучасних цифрових методів обробки сигналів для діагностики високовольтних вимірювальних трансформаторів. Розглянуто переваги та обмеження застосування вейвлет-перетворення, дискретного перетворення Фур'є та фільтрації Калмана для виявлення дефектів магнітопроводу та ізоляції. Обґрунтовано необхідність створення комбінованого підходу, що інтегрує різні методи обробки електричних та акустичних сигналів для підвищення точності діагностики. Запропоновано напрямки удосконалення існуючих алгоритмів шляхом застосування адаптивної фільтрації для зменшення впливу електромагнітних завад.

**Ключові слова:** цифрова обробка сигналів, вейвлет-перетворення, діагностика трансформаторів, спектральний аналіз, фільтр Калмана.

## Abstract

An analysis of modern digital signal processing methods for diagnostics of high-voltage measuring transformers has been conducted. The advantages and limitations of using wavelet transform, discrete Fourier transform, and Kalman filtering for detecting magnetic core and insulation defects are examined. The necessity of creating a combined approach integrating various electrical and acoustic signal processing methods to improve diagnostic accuracy is substantiated. Directions for improving existing algorithms through adaptive filtering to reduce electromagnetic interference impact are proposed.

**Keywords:** digital signal processing, wavelet transform, transformer diagnostics, spectral analysis, Kalman filter.

## Вступ

Розвиток технологій цифрової обробки сигналів відкриває нові можливості для підвищення точності та інформативності діагностики високовольтного вимірювального обладнання. Вимірювальні трансформатори струму та напруги є критично важливими елементами енергосистем, оскільки забезпечують вимірювання параметрів мережі та живлення релейного захисту. За даними міжнародних досліджень, відмови вимірювальних трансформаторів становлять близько дванадцяти відсотків від загальної кількості пошкоджень обладнання підстанцій, що підкреслює актуальність розробки ефективних методів діагностування їх технічного стану. Традиційні методи періодичного контролю, такі як вимірювання опору ізоляції та коефіцієнта трансформації, не завжди дозволяють виявити дефекти на ранніх стадіях розвитку.

## Основна частина

Аналіз літературних джерел показує, що сучасні підходи до діагностики вимірювальних трансформаторів базуються на обробці різних типів сигналів. Метод дискретного перетворення Фур'є широко застосовується для спектрального аналізу вихідних сигналів трансформаторів, дозволяючи виявити гармонічні спотворення, що свідчать про дефекти магнітопроводу або несиметрію обмоток. Дослідження Zhang та Li демонструють, що аналіз амплітудно-частотних характеристик дозволяє ідентифікувати міжвиткові замикання та часткове пошкодження осердя. Однак цей метод має обмеження при роботі в умовах нестационарних сигналів та наявності імпульсних завад.[1]

Вейвлет-перетворення надає переваги при аналізі нестационарних процесів, оскільки забезпечує одночасну локалізацію сигналу у часовій та частотній областях. Згідно з дослідженнями Garcia та Santos, застосування вейвлет-аналізу дозволяє виявляти короткочасні аномалії у сигналах часткових розрядів, які є індикаторами деградації ізоляційної системи. Метод особливо ефективний для ідентифікації початкових стадій розвитку дефектів, коли амплітуда аномальних складових є

незначною. Проте складність вибору оптимального базису вейвлет-функцій та високі обчислювальні вимоги обмежують застосування методу в системах моніторингу реального часу.

Фільтрація Калмана знаходить застосування для оцінювання параметрів технічного стану на основі зашумлених вимірювань. Цей метод дозволяє прогнозувати динаміку зміни діелектричних характеристик ізоляції та виявляти тренди деградації обладнання. Основною перевагою є можливість роботи в умовах значних електромагнітних завад, характерних для підстанцій високої напруги. Водночас ефективність фільтра Калмана залежить від точності математичної моделі об'єкта діагностування, побудова якої для складних систем вимірювальних трансформаторів є нетривіальною задачею.[2]

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз цифрових методів обробки сигналів у діагностиці трансформаторів

Метод обробки	Переваги	Обмеження	Область застосування	Складність реалізації
Дискретне перетворення Фур'є	Простота реалізації, ефективність для стаціонарних сигналів	Низька роздільна здатність у часі	Аналіз гармонічного складу	Низька
Вейвлет-перетворення	Локалізація у часі та частоті, виявлення нестационарностей	Високі обчислювальні витрати, вибір базису	Виявлення часткових розрядів	Висока
Фільтрація Калмана	Стійкість до завад, прогнозування параметрів	Необхідність точної моделі об'єкта	Оцінювання стану ізоляції	Середня
Адаптивна фільтрація	Самоналаштування під умови середовища	Потреба у навчальних даних	Придушення завад	Середня

Перспективним напрямком є розробка комбінованих підходів, що інтегрують переваги різних методів цифрової обробки сигналів. Зокрема, попереднє застосування адаптивної фільтрації для зменшення впливу електромагнітних завад з подальшим вейвлет-аналізом може суттєво підвищити співвідношення сигнал-шум. За оцінками фахівців, такий підхід дозволить досягти покращення точності ідентифікації дефектів на двадцять п'ять відсотків порівняно з використанням окремих методів.

Додатковим напрямком удосконалення є інтеграція обробки електричних сигналів з аналізом акустичних коливань корпусу трансформатора. Акустичні методи дозволяють виявляти механічні дефекти обмоток та ослаблення пресування магнітопроводу, які не завжди проявляються в електричних характеристиках. Застосування кореляційного аналізу між електричними та акустичними сигналами може забезпечити комплексну оцінку технічного стану обладнання.[3]

### Висновки

Аналіз існуючих цифрових методів обробки сигналів показує, що кожен з них має специфічні переваги та обмеження. Дискретне перетворення Фур'є забезпечує ефективний аналіз стаціонарних процесів, вейвлет-перетворення оптимальне для виявлення нестационарних аномалій, а фільтрація Калмана надає можливості прогнозування деградації параметрів. Перспективним є створення інтегрованих систем діагностики, що комбінують різні методи обробки електричних та акустичних сигналів з застосуванням адаптивних алгоритмів для підвищення стійкості до завад. Подальші дослідження повинні бути спрямовані на розробку критеріїв вибору оптимального методу залежно від типу діагностованого дефекту та умов експлуатації вимірювальних трансформаторів.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Zhang H., Li J. Digital signal processing techniques for transformer condition monitoring // *Journal of Electrical Engineering Technology*. – 2024. – Vol. 19, № 3. – P. 1245–1263.
2. Garcia M. E., Santos P. R. Wavelet analysis applications in power system diagnostics // *IEEE Access*. – 2023. – Vol. 11. – P. 89456–89472.
3. Martin D., Saha T. A review of condition assessment techniques for power transformers // *Electric Power Systems Research*. – 2023. – Vol. 215. – P. 108–126.

***Чорний Олександр Сергійович*** – аспірант факультету електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця

***Chorny Oleksandr S.*** – Faculty of Electricity and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, [chorny\\_oleksandr@ukr.net](mailto:chorny_oleksandr@ukr.net)