

УДК 621.3.049.77

ЗАСТОСУВАННЯ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ НЕСПРАВНОСТЕЙ В АНАЛОГОВИХ ЕЛЕКТРОННИХ СХЕМАХ

Гаврилова А.А.

e-mail: anastasiia.havrylova@nure.ua

Науковий керівник – канд. фіз.-мат. наук, доц. Онищенко А.А.
Харківський національний університет радіоелектроніки, каф. Фізики
м. Харків, Україна

This paper presents a fault diagnosis method for analog electronic circuits combining Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD) with Multifractal Detrended Fluctuation Analysis (MF-DFA). Unlike FFT- and wavelet-based techniques, it detects changes in nonlinear circuit dynamics before clear spectral deviations appear, without requiring signal stationarity. Extracted multifractal parameters form a compact feature vector for automated fault classification. Recent studies suggest that EEMD with multifractal analysis enhances soft fault detection and offers a promising approach for early-stage diagnostics.

Аналогові електронні схеми є невід'ємною складовою сучасних технічних систем – від медичної апаратури до засобів промислової автоматизації. Попри домінування цифрових архітектур, аналогові вузли (підсилювачі, перетворювачі, сенсорні інтерфейси) залишаються критичною точкою вразливості, маючи частку близько 20% від загального об'єму схемотехніки, вони спричиняють понад 80% системних відмов [1].

Особливу діагностичну складність становлять так звані м'які несправності (soft faults) – поступові відхилення параметрів компонентів від номінальних значень: резистор змінює опір на 20–30%, конденсатор втрачає частину ємності внаслідок деградації діелектрика, транзистори ж зазнають поступового старіння, що призводить до відхилення критичних параметрів схеми від номінальних значень [2]. Схема при цьому зберігає функціональність, проте якість вихідного сигналу поступово погіршується. Небезпека таких несправностей полягає в їхній прихованості: деградація може тривати місяцями, непомітно наближаючи систему до критичної відмови. Отже, раннє виявлення м'яких несправностей є важливим завданням діагностики електронних схем.

Розв'язання цього завдання ускладнюється специфікою сигналів аналогових схем, які характеризуються нелінійністю та нестационарністю, тобто їхні статистичні характеристики змінюються в часі, особливо у перехідних режимах роботи.

Найпоширеніші методи аналізу: перетворення Фур'є (FFT) та вейвлет-аналіз. FFT та вейвлет-аналіз мають спільне фундаментальне обмеження: обидва описують лише частотно-часову структуру сигналу, залишаючи поза увагою його структурну складність – характеристику, яка реагує на м'яку

несправність раніше за будь-які спектральні зміни. Додатково, FFT передбачає стаціонарність сигналу, а вейвлет-аналіз істотно залежить від вибору базисного вейвлету. Альтернативні методи на основі нейронних мереж усувають ці обмеження лише частково – вони потребують великої навчальної вибірки і погано узагальнюються на нові класи несправностей.

Фрактальний аналіз ґрунтується на принципово іншій концепції: замість пошуку конкретних частот або часових патернів він вимірює ступінь структурної складності та самоподібності сигналу в різних часових масштабах. Ключова властивість фрактальних характеристик – інваріантність до стаціонарності, забезпечує їхню коректність як для усталених, так і для перехідних режимів роботи схеми.

Найбільш розвиненим методом цієї групи є мультифрактальний детрендовий флуктуаційний аналіз (MF-DFA). Метод досліджує поведінку сигналу одночасно на різних часових масштабах. Його принцип полягає в розбитті часового ряду вихідного сигналу на відрізки, усуненні поліноміального тренду на кожному з них та аналізі флуктуацій залишків у різних масштабах. Результатом є мультифрактальний спектр $f(\alpha)$ – крива, що описує розподіл структурної складності сигналу між масштабами. Для справної схеми цей спектр має характерну форму, м'яка несправність змінює його параметри кількісно і відтворювано [3].

Діагностично значущими є чотири параметри спектру: ширина $\Delta\alpha$, сингулярний показник α_0 , різниця розмірностей Δf та узагальнений показник Херста $\Delta h(q)$ – разом вони утворюють чотиривимірний вектор діагностичних ознак, чутливий до змін параметрів компонентів на ранніх стадіях деградації, саме ширина та асиметрія мультифрактального спектру є найчутливішими індикаторами зміни структурних властивостей сигналу, а застосування методу коригуючої функції дозволяє знизити похибку оцінювання узагальненого показника Херста [4].

Практична реалізація методу передбачає чотири послідовні етапи. На першому вихідний сигнал розкладається методом ансамблевої емпіричної модової декомпозиції (EEMD) на набір власних модових функцій, що усуває модальне змішування й відокремлює інформативні компоненти від шумів. На другому до отриманих компонент застосовується MF-DFA з ковзаючою віконною функцією. На третьому з мультифрактального спектру витягуються чотири параметри ($\Delta\alpha$, α_0 , Δf , $\Delta h(q)$), що утворюють «сигнатуру» стану схеми. На четвертому вектор ознак подається на вхід попередньо навченого класифікатора (метод опорних векторів або k-NN), результатом роботи якого є ідентифікований клас несправності або висновок про справний стан схеми.

Описаний підхід апробовано в роботі Xinmiao Lu [5], на смуговому фільтрі з десятима класами м'яких несправностей при відхиленні параметрів понад 30% від номіналу. Метод EEMD + MF-DFA забезпечив точність розпізнавання 97,87%, тоді як метод на основі вейвлет-пакетів з аналізом

незалежних компонент (WP-ICA) досяг 95,70%, а EEMD у поєднанні з машиною найменших квадратів (EEMD-LSSVM) – 96,67%. Принципово важливим є те, що перевага збереглась при верифікації на трьох різних топологіях схем (точність 96,31–97,79%), що свідчить про узагальнювальну здатність методу – властивість, критичну для практичного застосування в умовах різноманітності реального обладнання.

Метод MF-DFA у поєднанні з попередньою обробкою EEMD є ефективним і теоретично обґрунтованим інструментом ранньої діагностики м'яких несправностей в аналогових схемах. На відміну від FFT і вейвлет-аналізу, він фіксує зміни нелінійної динаміки схеми раніше, ніж змінюється її частотний склад, є інваріантним до стаціонарності сигналу та не залежить від апіорної моделі схеми. Компактний чотиривимірний вектор ознак забезпечує придатність для автоматизованої класифікації, а практична ефективність підтверджена точністю 97,87% при верифікації на трьох різних топологіях схем. Подальші дослідження доцільно спрямувати на визначення мінімального порогу відхилення параметрів та оцінювання стійкості методу в умовах реального промислового шуму.

Список використаних джерел:

1. Binu D., Kariyappa B. S. A survey on fault diagnosis of analog circuits: taxonomy and state of the art. *AEU - international journal of electronics and communications*. 2017. Vol. 73. P. 68–83. URL: <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2017.01.002>
2. Maricau E., Gielen G. Transistor aging-induced degradation of analog circuits: impact analysis and design guidelines. *ESSCIRC 2011 - 37th european solid state circuits conference*, Helsinki, Finland, 12–16 September 2011. 2011. URL: <https://doi.org/10.1109/esscirc.2011.6044952>
3. Du W., Kang M., Pecht M. Fault diagnosis using adaptive multifractal detrended fluctuation analysis. *IEEE transactions on industrial electronics*. 2020. Vol. 67, no. 3. P. 2272–2282. URL: <https://doi.org/10.1109/tie.2019.2892667>
4. Lazorenko O. V., Onishchenko A. A., Chernogor L. F. Multifractal analysis of model fractal and multifractal signals. *Radiotekhnika*. 2022. № 211. С. 72–83. URL: <https://doi.org/10.30837/rt.2022.4.211.05>
5. Soft Fault Diagnosis of Analog Circuit Based on EEMD and Improved MF-DFA / X. Lu et al. *Electronics*. 2022. Vol. 12, no. 1. P. 114. URL: <https://doi.org/10.3390/electronics12010114>