

**МІНІСТЕРСТВО ОБОРОНИ УКРАЇНИ
ВІЙСЬКОВА АКАДЕМІЯ (М. ОДЕСА)**

**ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА
ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА:
застосування, дослідження, освіта**

**Збірник тез доповідей
Всеукраїнської наукової конференції**

15 квітня 2021 року

м. Одеса

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПІЗНАВАЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ МЕТОДІВ ЦИФРОВОГО ОБРОБЛЕННЯ СИГНАЛІВ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

д.т.н., проф. Рудик А.В., Ковальчук П.В.

Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне

Оброблення результатів вимірювань потребує точності при визначенні частоти та амплітуд складових сигналу. Під час розвитку аварії в енергосистемі виникає нагальна потреба відстежування динаміки зміни параметрів режиму. В зв'язку з цим дуже важливо точно визначати компоненти сигналу при малій тривалості його спостереження.

Тому що такі дії з сигналами потребують порівняно високої швидкодії, то моделі, які реалізують функцію аналізу сигналу, мають проводити його розпізнавання незалежно від структури та характеристичних параметрів окремих складових, що відповідає тільки адаптивним структурам. Такі адаптивні структури враховують багатозначність сигналу переходного режиму електричної системи та дозволяють розпізнавати структуру системи.

Такі властивості притаманні методу Проні, а особливості його використання та математична реалізація для структурного аналізу сигналу електричної системи описані в [1, 2]. Крім того, в теорії систем, комп'ютерній алгебрі та при обробленні сигналів частот використовується метод найменших квадратів, зокрема апроксимація Ганкеля, математичне описание якої представлено в роботі [3].

До складу сигналів реальних процесів завжди входить шум, тому результати оброблення за різними моделями будуть давати різні результати, центровані навколо дійсних та залежні від співвідношення сигнал/шум (SNR, Signal to Noise Ratio). Тому що на практиці неможливо точно врахувати характер шуму, до сигналів додається компонента білого шуму, рівномірно розподіленого у всій смузі частот або по всій довжині сигналу. При реалізації в програмному середовищі MatLab до сигналу додається адитивний білий нормальній шум.

Для досліджень вибрано такі моделі сигналів:

$$y(t) = 20\sin(2\pi \cdot 50t) + 2\sin(2\pi \cdot 1.8t) + 4\sin(2\pi \cdot 0.72t); \quad (1)$$

$$y(t) = 20\sin(2\pi \cdot 50t) + 2\sin(2\pi \cdot 1.8t) + 4\sin(2\pi \cdot 0.72t) + WN(SNR_{80}). \quad (2)$$

Порівняння результатів оброблення функцій (1) та (2) методами Проні (МП) та найменших квадратів Ганкеля (НКГ) представлено в табл. 1.

Таблиця 1 – Результати виявлення складових сигналів (1) та (2)

Метод аналізу сигналу	Параметри виявлення складових незашумленого сигналу (1)		Параметри виявлення складових зашумленого сигналу (2)	
	амплітуда, в.о.	частота, Гц	амплітуда, в.о.	частота, Гц
МП	20; 2; 4	50; 1.8; 0.72	20; 5.8	50; 1.05
НКГ	20; 2; 4	50; 1.8; 0.72	20; 2; 4	50; 1.8; 0.72

За даними табл. 1 робимо висновок, що наявність шуму погіршує роздільну здатність методу Проні. Тому що саме амплітуда затухаючої чи нарastaючої складових сигналу є визначальною для типу процесів в енергосистемі, то досліджувані методи аналізу мають бути спрямовані на максимальну точну її оцінку. Необхідно враховувати, що закон або тип зміни амплітуди з часом і є непрямим показником стійкості енергосистеми.

Проаналізуємо роздільну здатність методів оброблення сигналів (3) та (4) зі змінною в часі складовою, а результати занесемо до табл. 2.

$$y(t) = 20\sin(2\pi \cdot 50t) + (1.2 + 0.02t)\sin(2\pi \cdot 1.8t) + 4\sin(2\pi \cdot 0.72t); \quad (3)$$

$$y(t) = 20\sin(2\pi \cdot 50t) + (1.2 + 0.02t)\sin(2\pi \cdot 1.8t) + 4\sin(2\pi \cdot 0.72t) + WN(SNR_{80}). \quad (4)$$

Таблиця 2 – Результати виявлення складових сигналів (3) та (4) при наявності змінних з часом складових

Метод аналізу сигналу	Порядок методу аналізу	Ширина вікна спостереження, с	Параметри виявлення складових незашумленого сигналу (3)		Параметри виявлення складових зашумленого сигналу (4)	
			амплітуда	частота, Гц	амплітуда	частота, Гц
МП	10	1 – 6	20; 1.2; 4	50; 1.8; 0.72	20; 10.4	50; 0.76
НКГ	10	1 – 6	20; $9.3 \cdot 10^3$; $9.3 \cdot 10^3$; 4	50; 1.8; 1.8; 0.72	20; 1.2; 1.4; 8	50; 1.8; 1.8; 0.72
МП	10	0.001 – 2	20; 1.2; 4	50; 1.8; 0.72	20; 10.2	50; 0.77
НКГ	10	0.001 – 2	20; $2.04 \cdot 10^3$; $2.04 \cdot 10^3$; 4	50; 1.8; 1.8; 0.72	20; 1.4; 8	50; 1.8; 0.72
МП	10	1 – 10	20; 1.2; 4	50; 1.8; 0.72	20; 9	50; 0.76
НКГ	10	1 – 10	20; $16.3 \cdot 10^3$; $16.3 \cdot 10^3$; 4	50; 1.8; 1.8; 0.72	20; 1; 1.2; 8	50; 1.8; 1.8; 0.72

За даними табл. 2 робимо висновок, що за методом Проні з достатньою точністю виявлено складові незашумленого сигналу (3) при порядку методу аналізу 10 і незалежно від ширини вікна спостереження, однак із зашумленим сигналом (4) результати виявлення значно гірші. В табл. 3 представлено результати пошуку мінімального порядку аналізу методом Проні та мінімальної ширини вікна спостереження для виявлення всіх гармонік незашумленого сигналу (3).

Таблиця 3 – Результати пошуку мінімального порядку аналізу методом Проні та мінімальної ширини вікна спостереження

Метод аналізу сигналу	Порядок методу аналізу	Ширина вікна спостереження, с	Параметри виявлення складових незашумленого сигналу (3)	
			амплітуда, в.о.	частота, Гц
МП	10	1 – 6	20; 1.2; 4	50; 1.8; 0.72
МП	6	1 – 6	20; 1.2; 4	50; 1.8; 0.72
МП	5	1 – 6	20; 3.6; 1.4	50; 1.26; 0
МП	6	1 – 2	20; 1.2; 4	50; 1.8; 0.72

За даними табл. 3 для повного виявлення трикомпонентного сигналу достатньо застосування методу Проні шостого порядку з шириною вікна спостереження 1 с.

За даними табл. 2 видно, що методом НКГ було виявлено відсутні у сигналах (3) та (4) компоненти з неприродно величими амплітудами. Причиною даного ефекту є те, що порядок використованого методу НКГ не може бути більшим подвоєної кількості компонент сигналу, що представлено в табл. 4. Тому при обробленні трикомпонентного сигналу використання методу НКГ з порядком більше шостого приводить до отримання недостовірних за амплітудою результатів. Тому що при аналізі сигналів енергосистем кількість компонент заздалегідь невідома, то використання методу НКГ є недоцільним.

В зв'язку з цим для подальшого визначення амплітуд компонент сигналу будемо використовувати метод Проні. Однак тому що даний метод характеризується чутливістю до шумів, то проведемо дослідження впливу цифрової фільтрації на розпізнавальну здатність.

Таблиця 4 – Залежність розпізнавальної здатності методу НКГ від його порядку

Метод аналізу сигналу	Порядок методу аналізу	Ширина вікна спостереження, с	Параметри виявлення складових незашумленого сигналу (3)	
			амплітуда, в.о.	частота, Гц
НКГ	6	1 – 3	20; 1.2; 4	50; 1.8; 0.72
НКГ	8	1 – 3	20; $2.0506 \cdot 10^3$; $2.0512 \cdot 10^3$; 4	50; 1.8; 1.8; 0.72
НКГ	10	1 – 3	20; $2.0422 \cdot 10^3$; $2.0428 \cdot 10^3$; 4	50; 1.8; 1.8; 0.72

Також потрібно оцінити максимальну кількість компонент сигналу, яка може бути розпізнана за методом Проні протягом вікна спостереження, тому що тільки після оцінки роздільної здатності методу доцільним буде пошук методу оптимальної фільтрації.

Для оцінки мінімальної роздільної здатності методу Проні проведено аналіз сигналу (5) тривалістю 2 с.

$$y(t) = 100\sin(2\pi \cdot 50t) + 0.8\sin(2\pi \cdot 0.3t) + 0.6\sin(2\pi \cdot 0.5t) + 1\sin(2\pi \cdot 2t). \quad (5)$$

Для визначення загальних особливостей методу Проні розглянуто ідеалізовану задачу розпізнавання структури незашумленого сигналу, в результаті розвязання якої має бути отримана повна відповідність сигналу та моделі.

За методом Проні проведено оброблення сигналу з кількістю компонент від 1 до 3. При неможливості розрізnenня компонент збільшувався порядок методу, а результати досліджень представлені в табл. 5 і табл. 6.

Таблиця 5 – Результати оброблення сигналу за методом Проні 5-го порядку

Кількість компонент у складі сигналу	Параметри виявленіх складових	
	амплітуда, в.о.	частота, Гц
1	100	50
2	100; 0.8	50; 0.3
3	100; 1.3; 0.4	50; 0.44; 0

Таблиця 6 – Результати оброблення сигналу за методом Проні 10-го порядку

Кількість компонент у складі сигналу	Параметри виявленіх складових	
	амплітуда, в.о.	частота, Гц
3	100; 0.6; 0.8	50; 0.5; 0.3
4	100; 1; 1.4	50; 2; 0.39

За результатами, представленими в таблиці 6, методом Проні точно виявлено дві компоненти сигналу з чотирьох з амплітудами 100 в.о. та 1 в.о., а компоненти з близькими за частотою та амплітудами значеннями не розпізнані. Для точного оброблення такого сигналу потрібно застосувати метод Проні з порядком більше 80. За допомогою програмного пакету MatLab час оброблення сигналу методом Проні склав 1.13 с для 10-го та 3.69 с для 80-го порядків відповідно.

Тому що близькі за частотою компоненти сигналу ускладнюють розпізнавання, проведено дослідження розпізнавання компонент сигналу (6), складові якого істотно рознесені за частотою. Результати оброблення такого сигналу представлені в табл. 7.

$$y(t) = 100\sin(2\pi \cdot 50t) + 5\sin(2\pi \cdot 20t) + 0.6\sin(2\pi \cdot 0.5t) + 1\sin(2\pi \cdot 2t) + 10\sin(2\pi \cdot 15t). \quad (6)$$

Таблиця 7 – Результати оброблення сигналу за методом Проні 10-го порядку

Кількість компонент у складі сигналу	Параметри виявлених складових	
	амплітуда, в.о.	частота, Гц
4	100; 5; 1; 0.6	50; 20; 2; 0.49
5	100; 5; 10; 1.2	50; 20; 15; 1.98

Використання методу Проні 10-го порядку є виправданим у випадку, коли складові сигналу істотно рознесені за частотою, однак їх кількість 4 або менше. За отриманими даними можна зробити висновок, що розпізнавальна здатність методу Проні істотно залежить від частотного діапазону компонент та відстані між ними.

Оцінимо вплив шумових компонент на якість оброблення сигналів при додаванні складової білого шуму, а результати досліджень занесемо до табл. 8 і табл. 9.

Таблиця 8 – Результати оброблення зашумленого сигналу з SNR 80 дБ за методом Проні 10-го порядку

Кількість компонент у складі сигналу	Параметри виявлених складових	
	амплітуда, в.о.	частота, Гц
4	100; 5.1	50; 20

Таблиця 9 – Результати оброблення зашумленого сигналу з SNR 80 дБ за методом Проні 100-го порядку та вибіркою 2 с

Кількість компонент у складі сигналу	Параметри виявлених складових	
	амплітуда, в.о.	частота, Гц
4	100; 5; 0.5; 0.5; 0.3; 0.3	50; 20; 2; 2; 0.5; 0.5

Таким чином, при використанні методу Проні 10-го порядку для зашумленого сигналу компоненти з мінімальними частотами не розпізнані. Однак якщо збільшити порядок методу до 100, то розпізнавальна здатність зменшується з 4 компонент до 2, а всі інші компоненти отримані як дві складові з половинними амплітудами відносно реального сигналу.

1. Антонов В.И. Теория и приложения адаптивного структурного анализа сигналов в интеллектуальной электроэнергетике: дис. докт. техн. наук: 05.14.02. – Чебоксары, 2018. – 330 с.
2. Чижевський В.В. Оцінювання в режимі реального часу загрози коливного порушення стійкості енергооб'єднання: дис. канд. техн. наук: 05.14.02. – Київ, 2016. – 297 с.
3. Bart L.R. De Moor. Structured total least squares for Hankel matrices. URL: <ftp://ftp.esat.kuleuven.be/sista/ida/reports/95-54.pdf> (Last accessed: 18.01.2021).

ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА:
застосування, дослідження, освіта

**Збірник тез доповідей
Всеукраїнської наукової конференції**

15 квітня 2021 року

Редакційна група за якість матеріалів відповідальності не несе.

**Матеріали доповідей авторів надано у вигляді, відповідно
до заявок на участь у конференції.**

Дякуємо авторам за дотримання рекомендованого шаблону та обсягу виступів.

Відповідальний за випуск – Букарос А.Ю.