

В. В. Чижевський, асп.

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ПРОНІ ДЛЯ АНАЛІЗУ РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕНЕРГООБ'ЄДНАНЬ В РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

Запропоновано підхід до оперативного виявлення низькочастотних коливань режимних параметрів об'єднаних енергосистем з використанням методу Проні. Наведено результати аналізу синтезованих вибірок даних, що імітують виникнення таких коливань.

Вступ

З утворенням потужних енергооб'єднань (ЕО) виникають і нові проблеми керування режимами їх функціонування, зумовлені властивостями таких утворень, які є наслідком об'єднання (на паралельну роботу) електроенергетичних систем слабкими електричними зв'язками. Під час функціонування ЕО можуть виникати низькочастотні коливання режимних параметрів, які призводять до порушення стійкості ЕО [1, 2]. З метою запобігання зазначеним процесам застосовують різні засоби демпфірування таких коливань. Разом з тим, отримання своєчасної інформації щодо загрози розвитку зазначених коливних процесів необхідно і диспетчерському персоналу ЕО, який у багатьох випадках теж може вжити заходи, щоб запобігти порушенню стійкості ЕО. Від оперативності та надійності виявлення загрози коливного порушення стійкості ЕО значною мірою залежить і ефективність заходів, які може вживати оперативно-диспетчерський персонал ЕО. Для виявлення зазначеної загрози доцільно застосовувати найпридатніші для цього методи.

Завдання з виявлення загрози коливного порушення стійкості ЕО можна вирішити, аналізуючи певні режимні параметри ЕО (сигналів), з використанням методів спектрального аналізу. Визначення спектра певного сигналу в загальному випадку можна здійснити за допомогою будь-якого методу спектрального аналізу (наприклад, найпоширенішого з них — методу швидкого перетворення Фур'є (ШПФ)). Проте, особливості аналізованих сигналів (одночасна наявність низькочастотних (у більшості випадків нижче 1 Гц) та високочастотних (вище 50 Гц) складових) та вимоги, що висувають безпосередньо до методів спектрального аналізу (швидкодія з одночасною здатністю виявлення компонент в усьому, характерному для роботи ЕО, діапазоні частот) обмежують можливість застосування деяких методів. Так, наприклад, у випадку аналізу сигналу, тривалість якого не перевищує 1 с, метод ШПФ не забезпечує можливості виявлення у цьому сигналі складових з частотами, меншими за 1 Гц [3]. Таким чином, можливість застосування певного методу для ефективного виявлення загрози коливного порушення стійкості ЕО потребує глибокого дослідження.

У статті подано результати досліджень, пов'язаних з визначенням можливості застосування методу Проні для оперативного виявлення (у реальному часі) загрози коливного порушення стійкості ЕО внаслідок виникнення низькочастотних коливань режимних параметрів.

Метод дослідження

Сутність методу Проні полягає у такому. Для отриманої в результаті цифрової реєстрації певних сигналів (режимних параметрів ЕО) вибірки даних, що містить N комплексних значень $x[1], \dots, x[N]$, оцінюють послідовність $\{x[n]\}$ за допомогою певної p -членної моделі комплексних експонент:

$$\{x[n]\} = \sum_{k=1}^p A_k \exp[(\alpha_k + j2\pi f_k)(n-1)T + j\theta_k],$$

де $1 \leq n \leq N$, T — інтервал відліків [с]; A_k та α_k — амплітуда та коефіцієнт затухання [с^{-1}] k -ї комплексної компоненти; f_k та θ_k — частота [Гц] та початкова фаза [рад] k -ї синусоїди.

Необхідно зазначити, що апроксимацію даних тут виконують з використанням певної детермінованої експоненціальної моделі, порядок якої може змінюватися у широких межах.

З метою дослідження можливості застосування методу Проні для оперативного виявлення загрози коливного порушення стійкості ЕО виконано аналіз вибірок ряду синтезованих та реальних сигналів, знятих за допомогою приладу реєстрації. Синтезовані сигнали моделюють сигнали ЕО, що містять у своєму складі низькочастотні компоненти. Тривалість вибірок усіх сигналів складає 10 с, частота дискретизації вибірок — 200 Гц. Обрана частота дискретизації сигналу, з одного боку, забезпечує можливість виявлення компонент з частотою до 100 Гц включно (відповідно до теореми Котельникова), а з іншого — відповідає технічним можливостям існуючих приладів реєстрації (наприклад, електровимірювальний реєструвальний прилад «Регіна-Ч» дозволяє зняти дані з частотою дискретизації до 5000 Гц [4]). Застосовані у дослідженні тестові сигнали (ТС) дають змогу всебічно оцінити придатність методу Проні.

Аналіз та оцінка можливостей методу Проні щодо моніторингу параметрів ЕО

ТС-1 є синтезованим сигналом, що містить компонент промислової частоти 50 Гц з незмінною амплітудою і два низькочастотних компонента 0,6 Гц і 0,7 Гц, амплітуди яких збільшуються лінійно до 10 % та 20 % від амплітуди компонента 50 Гц відповідно. Такий склад сигналу дає змогу одночасно дослідити роздільну здатність методу Проні та можливість застосування його для моніторингу за динамікою процесів, що розвиваються в ЕО під час певних нестационарних режимів роботи. У загальному вигляді ТС-1 можна представити залежністю $y_1(t) = \sin(2\pi \cdot 50t) + 0,01t \cdot \sin(2\pi \cdot 0,6t) + 0,02t \cdot \sin(2\pi \cdot 0,7t)$. Фрагмент графіка ТС-1 та графіки зміни амплітуди його низькочастотних компонент показані на рис. 1.

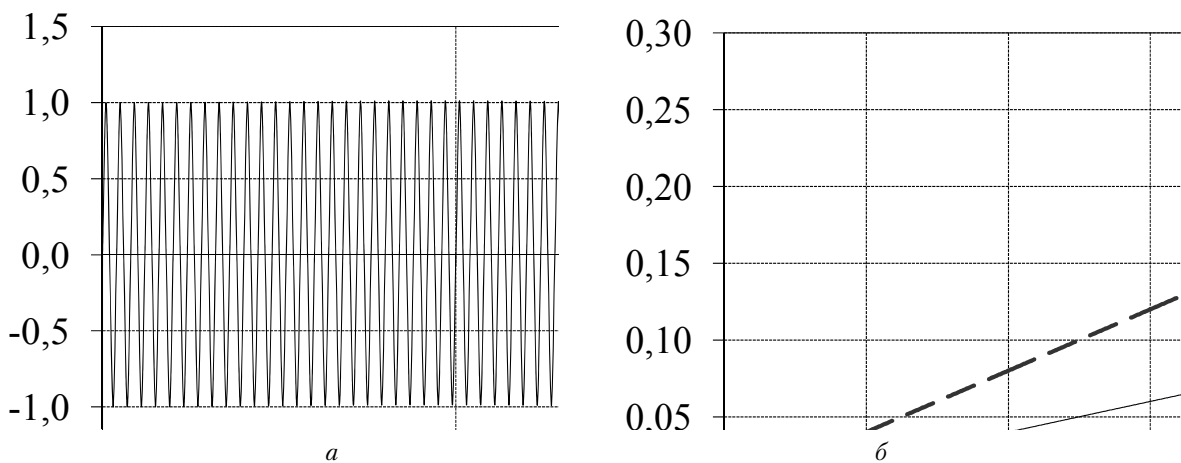


Рис. 1: а — графік сигналу ТС-1; б — графік зміни амплітуд компонент 0,6 Гц (суцільна лінія) та 0,7 Гц (пунктирна лінія) сигналу ТС-1

ТС-2 є синтезованим сигналом, що імітує сигнал ЕО під час системної аварії, наслідком якої є зниження частоти. Цей сигнал містить компонент промислової частоти з незмінною амплітудою, частота якого знижується з 50 Гц до 49,5 Гц, компонент низької частоти 0,6 Гц, амплітуда якого змінюється за експонентою, та «білий» шум, амплітуда якого складає 5 % від амплітуди компоненти промислової частоти. Сигнал дає змогу дослідити можливість застосування методу Проні для моніторингу за виникненням низькочастотних коливань під час розвитку системної аварії. На часових відрізках [0; 3]с та [7; 10]с ТС-2 змінюється за законами $y_2(t) = \sin(2\pi \cdot 50t)$ і $y_2(t) = \sin(2\pi \cdot 49,6t)$ відповідно, а на інтервалі (3; 7)с — за законом $y_2(t) = \sin(2\pi(50 + 0,3 - 0,05t) + (\exp(0,08(t - 3)) - 1)) \cdot \sin(2\pi \cdot 0,6t)$. Графік зміни частоти промислової компоненти та амплітуди компоненти 0,6 Гц показані на рис. 2.

ТС-3 є реальним сигналом про потік потужності по лінії 330 кВ. Відомо, що к. з., яке відбулося на шинах електрично близької до лінії підстанції, спричинило появу нетривалих коливань з частотою біля 1 Гц. Таким чином, ТС-3 дає змогу перевірити придатність методу Проні для моніторингу за низькочастотними коливаннями, що виникають в умовах роботи реального ЕО. Фрагмент графіку ТС-3 наведений на рис. 3.

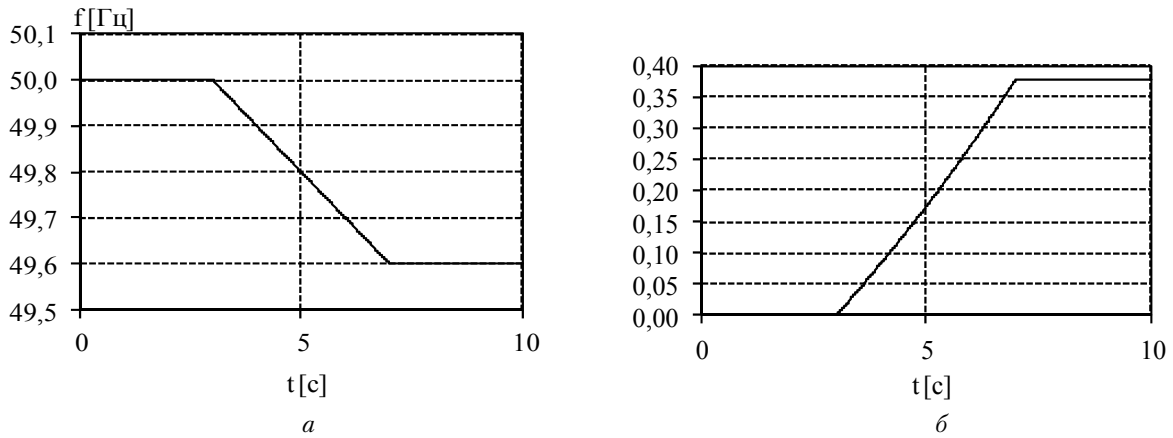


Рис. 2: а – графік зміни частоти промислової компоненти сигналу ТС-2; б – графік зміни амплітуди компоненти 0,6 Гц сигналу ТС-2

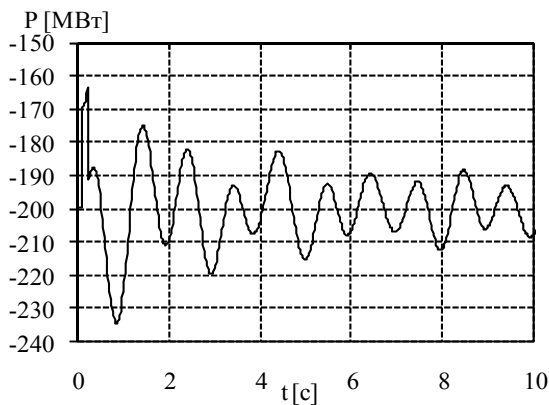
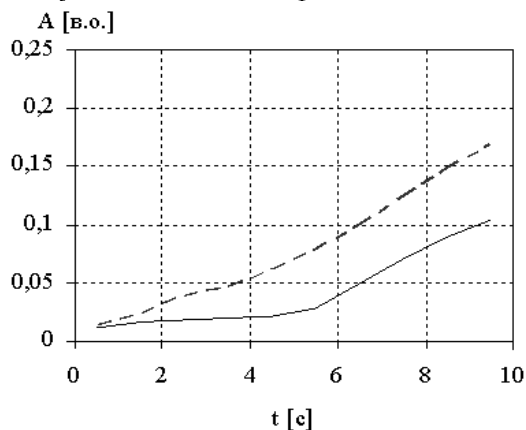


Рис. 3. Графік сигналу ТС-3

Під час аналізу ТС моделювалася робота системи моніторингу у режимі реального часу. З цією метою для кожного ТС послідовно оброблялися вибірки даних тривалістю в 1 с.

Дослідження ТС за допомогою методу Проні показало важливість правильного вибору порядку експоненційної моделі, оскільки недостатній її порядок не дає змоги виявити усі компоненти досліджуваного сигналу, а надлишкова складність моделі суттєво знижує швидкість аналізу. Для аналізу застосовано експоненційну модель 10-го порядку, що дає змогу виявити 5 пар комплексно-спряжених за частотою компонент ТС, тобто присуття певна надлишковість порядку моделі.

Результати аналізу ТС-1, ТС-2 та ТС-3 наведено на рис. 4–6 та у табл. 1–3. Оскільки аналіз був виконаний з використанням вікон «шириною» в 1 с, то значення на графіках зведені до середини цих вікон, а амплітуди виявлених компонент наведені у в. о. по відношенню до амплітуди компоненти промислової частоти.

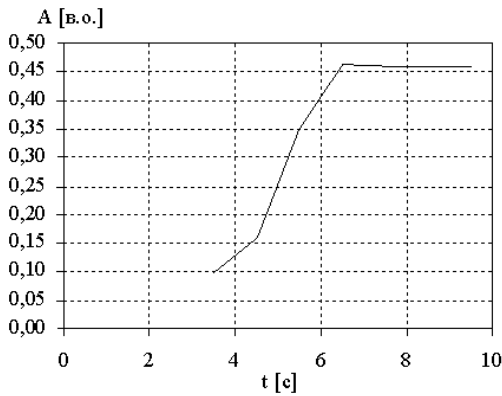


Час [с]	Виявлені компоненти					
	0,6 Гц		0,7 Гц		50 Гц	
	A [в.о.]	f [Гц]	A [в.о.]	f [Гц]	A [в.о.]	f [Гц]
0,5	0,012	0,594	0,014	0,742	1	50
1,5	0,016	0,582	0,024	0,739	1	50
2,5	0,018	0,548	0,038	0,736	1	50
3,5	0,02	0,544	0,047	0,73	1	50
4,5	0,022	0,548	0,061	0,723	1	50
5,5	0,028	0,574	0,077	0,718	1	50
6,5	0,049	0,595	0,099	0,713	1	50
7,5	0,071	0,601	0,124	0,709	1	50
8,5	0,089	0,603	0,147	0,707	1	50
9,5	0,104	0,604	0,169	0,705	1	50

Рис. 4. Результати аналізу ТС-1: компонента 0,6 Гц – суцільна лінія, та 0,7 Гц – пунктирна лінія

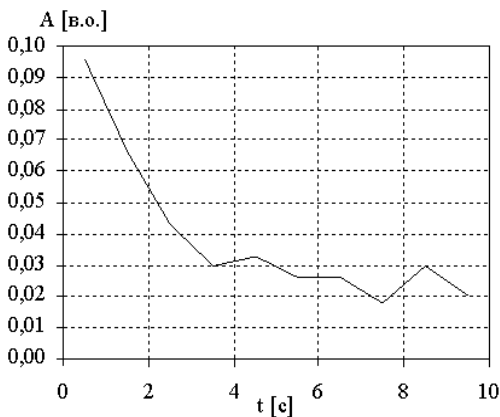
Графік та таблиці на рис. 4 демонструють, що метод Проні спроможний розділяти близькі за частотою компоненти та відслідковувати їхню динаміку. Слід відзначити, що середні значення частот виявлених компонент ТС-1 складає 0,576 Гц та 0,722 Гц відповідно з максимальним відхиленням 0,056 Гц, що забезпечує прийнятну точність аналізу.

Слід зазначити, що безпосередній аналіз ТС-2 ускладнений наявністю у його складі білого шуму, який спотворює результати аналізу, тому ТС-2 був попередньо профільтрований. Графік та таблиця на рис. 5 показують, що амплітуди та частоти компонент цього сигналу визначені вірно, проте також виявлені певні побічні компоненти.



Час [с]	Виявлені компоненти							
	0,6 Гц		50 Гц		Шум			
	A [в.о.]	f [Гц]	A [в.о.]	f [Гц]	A [в.о.]	f [Гц]	A [в.о.]	f [Гц]
0,5			1	50,000				
1,5			1	50,000				
2,5			1	50,000				
3,5	0,098	0,633	1	49,950	0,399	50,060	0,157	49,793
4,5	0,160	0,616	1	49,849	0,404	50,006	0,155	49,692
5,5	0,350	0,600	1	49,750	0,402	49,907	0,155	49,593
6,5	0,462	0,599	1	49,650	0,401	49,807	0,156	49,494
7,5	0,460	0,600	1	49,600				
8,5	0,460	0,600	1	49,600				
9,5	0,460	0,600	1	49,600				

Рис. 5. Результати аналізу ТС-2 (на графіку вказана зміна у часі амплітуди компоненти 0,6 Гц)



Час [с]	Виявлені компоненти							
	н/ч компонента		50 Гц		Шум			
	A [в.о.]	f [Гц]	A [в.о.]	f [Гц]	A [в.о.]	f [Гц]	A [в.о.]	f [Гц]
0,5	0,096	1,058	1	50	0,027	10,82	0,02	17,81
1,5	0,066	0,921	1	50				
2,5	0,043	1,011	1	50				
3,5	0,030	1,061	1	50				
4,5	0,033	0,988	1	50				
5,5	0,026	1,073	1	50				
6,5	0,026	0,947	1	50				
7,5	0,018	0,999	1	50				
8,5	0,030	1,017	1	50				
9,5	0,020	1,007	1	50				

Рис. 6. Результати аналізу ТС-3 (на графіку вказана зміна у часі амплітуди низькочастотної компоненти)

Графік та таблиця на рис. 6 демонструють, що виявлена частота та динаміка зміни амплітуди коливань на цій частоті відповідають дійсним процесам, що відбувалися у системі.

Висновки

Таким чином, метод Проні можна вважати придатним для виявлення загрози коливного порушення стійкості ЕО, хоча його застосування ускладнюється впливом низки обставин: високою чутливістю методу до наявності шуму, необхідністю правильної оцінки порядку моделі, наявністю деяких побічних компонентів у результатах та значними витратами машинного часу на виконання аналізу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Duan G., Wu J., Yang D. et. al. Advanced low frequency oscillation analysis based on WAMS in a provincial dispatching centre / International Conference on Relay Protection and Substation Automation of Modern Power Systems (9—13 September 2007, Cheboksary). P. 4—3.
2. Naoto K. Monitoring of interarea oscillation mode by synchronized phasor measurement / K. Naoto, S. Masahiro, M. Touru, T. Katsuyuki // IEEE Trans on Power Systems. — 2006. — 21(1). — P. 260—268.
3. Марпл-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / С. Л. Марпл-мл. — М. : Мир, 1990. — 584 с.
4. Буткевич О. Ф. Моніторинг та діагностування електроенергетичних об'єктів та систем України на базі комплексів «Регіна» / О. Ф. Буткевич, В. Л. Тутик // Гідроенергетика України. — 2010. — № 3 — С. 46—49. — ISSN 1812-9277.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем

Стаття надійшла до редакції 10.10.11
Рекомендована до друку 8.11.11

Чижевський Володимир Валерійович — асистент кафедри електричних мереж та систем.
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ