

УДК 621.311

ІДЕНТИФІКАЦІЯ В РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ НИЗЬКОЧАСТОТНИХ МОД ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ КОЛИВАНЬ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ

О.Ф. Буткевич^{1,2}, докт.техн.наук, В.В. Чижевський², канд.техн.наук

¹ Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,

e-mail: butkevych@ied.org.ua

² Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського”,
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна.

У статті наведено порівняльні результати ідентифікації низькочастотних складових сигналів у разі використання їхніх діючих та миттєвих значень. Показано, що використання миттєвих значень параметрів режиму електроенергетичної системи, що вимірюються пристроями векторних вимірювань, підвищить надійність виявлення низькочастотних мод електромеханічних коливань, однак таке використання в режимі реального часу потребуватиме високої продуктивності процесора, тому для надійного виявлення низькочастотних мод доцільно збільшити ширину вікна спостереження, використовуючи діючі значення параметрів режиму електроенергетичної системи. Бібл. 10, табл. 3, рис. 6.

Ключові слова: електроенергетична система, електромеханічні коливання, низькочастотні моди, вибірки даних, миттєві значення.

Вступ. Враховуючи обчислювальну потужність та цінову доступність сучасних мікропроцесорів, дослідження питань практичного використання миттєвих значень режимних параметрів електроенергетичних систем (ЕЕС) засобами захисту та керування ЕЕС заслуговує на більшу увагу. До задач, на результати розв’язання яких може впливати використання миттєвих значень режимних параметрів ЕЕС, належить і задача ідентифікації низькочастотних (до 1 Гц) мод електромеханічних коливань в ЕЕС (НЧК), які асоціюються з коливаннями у протифазі роторів груп синхронних машин, що знаходяться в різних частинах ЕЕС чи їхніх об’єднань. Оскільки енергооб’єднання – це ЕЕС, що внаслідок об’єднання набули додаткових властивостей, то далі, щоб уникнути певного “квазідублювання” позначень, обмежимося використанням однієї аббревіатури ЕЕС, поширюючи її і на енергооб’єднання. Зазначені моди характерні для міжсистемних (міжзональних) НЧК. Наявність таких мод становить латентну загрозу функціонуванню ЕЕС, оскільки за певних умов може призводити до посилення НЧК (збільшення амплітуди коливань) з наступним вимкненням ліній електропередачі, блоків електростанцій, знеструмленням споживачів електроенергії на значних територіях.

В ЕЕС багатьох країн світу для ідентифікації мод НЧК використовують системи моніторингу НЧК, вхідною інформацією для яких є результати вимірювання режимних параметрів на об’єктах ЕЕС пристроями векторних вимірювань (Phasor Measurement Units – PMUs); в Україні такими пристроями є електровимірювальні реєструючі прилади (ЕВРП) “Регіна-Ч”, розроблені в Інституті електродинаміки НАН України. Слід зазначити, що стосовно моніторингу НЧК наразі відсутні усталені (“еталонні”) рішення: навіть в одній і тій самій країні можуть використовувати системи моніторингу НЧК різних розробників (наприклад, на сході Австралії використовують дві такі системи: “Oscillatory System Monitor”, розроблену в Квінслендському університеті, та “StormMinder system”, розроблену Pysmetrix [5]), а для ідентифікації домінуючих мод НЧК у подібних системах використовують різні методи аналізу сигналів. Наприклад, в електричних мережах Китаю в багатьох системах моніторингу та аналізу НЧК використовують метод Проні та засоби, засновані на авторегресійній моделі і рекурсивних алгоритмах, а поряд з цим у провінціях Zhejiang та Sichuan впроваджувалися системи (на час підготовки статті для опублікування [9] вони перебували на стадії перевірки), в яких реалізовано метод Гільберта-Хуанга. Наведеними прикладами не вичерпується ні перелік наявних в ЕЕС різних країн систем моніторингу НЧК, ні перелік методів аналізу сигналів, реалізованих у таких системах. Така розмаїтість засобів, як і численні публікації останніх років, наприклад, [4,6,7,10], є свідченням того, що задача ідентифікації мод НЧК відповідними системами залишається актуальною. Своєчасне виявлення зазначених мод дозволяє вжити заходи, щоб запобігти порушенню функціонування ЕЕС, спричинене-

ному НЧК. В [1] показано, що виявленню доміантних мод НЧК сприяє використання спеціально підготовленого ансамблю методів аналізу сигналів та цифрової фільтрації сигналів (режимних параметрів ЕЕС) [2], вимірних РМУs на об'єктах ЕЕС. А чи матиме суттєвий вплив на результати зазначеної ідентифікації використання вибірок даних, сформованих не із діючих, а із миттєвих значень сигналів, і якою повинна бути продуктивність обчислювальних засобів систем моніторингу НЧК для реалізації такого використання? **Метою досліджень**, результати яких наведено у даній статті, було з'ясувати ці питання, попередньо уточнивши умови, які сприяють одержанню адекватних результатів ідентифікації мод НЧК у разі використання вибірок даних, сформованих із діючих значень сигналу (лише за таких умов видається коректним порівнювати результати ідентифікації мод, одержані внаслідок опрацювання вибірок діючих та вибірок миттєвих значень сигналу). Із ансамблю методів аналізу сигналів [1] у дослідженнях використано такі: загальних найменших квадратів Ганкеля – HTLS, пучка матриць – МР, Проні “класичний” та Проні модифікований.

Результати досліджень. Оскільки реалізація повноцінної системи моніторингу НЧК в ОЕС України можлива лише на базі ЄВРП “Регіна-Ч” (така система є основою інтегрованої системи демпфування НЧК [1]), а до бази даних ЄВРП “Регіна-Ч” записуються (з дискретністю 0,02 с) діючі, а не миттєві значення параметрів режиму ЕЕС (напруги та струму), то у дослідженнях довелося використовувати миттєві значення не реальних (зареєстрованих ЄВРП “Регіна-Ч”, але не записаних до бази даних), а синтезованих сигналів, складові яких мали частоти, характерні для мод НЧК. Один із таких сигналів, частоти складових якого відповідають частотам як *локальних станційних коливаль* (від 1 до 2 Гц), так і *міжсистемних (міжзональних)* та *внутрішньосистемних* коливаль (до 1 Гц), подано наступним виразом

$$y = 100 + (1+t)\sin(2\pi \cdot 0,10t) + (1+1,1t)\sin(2\pi \cdot 0,15t) + (1+1,3t)\sin(2\pi \cdot 1,5t) + (1+1,1t)\sin(2\pi \cdot 1,9t). \quad (1)$$

Графік сигналу (1) показано на рис. 1, де на осі абсцис зазначено відліки часу (t , с), а на осі ординат – відліки миттєвих значень синтезованого сигналу (y), що не мають фізичних одиниць вимірювання [б.в.]. Хоча з плином часу змін зазнають лише амплітуди (A) складових зазначеного сигналу, що лінійно зростають зі зміною часу (рис. 2), він не є тривіальним з точки зору ідентифікації цих складових, оскільки дві із них мають близькі частоти (0,10 та 0,15 Гц), що належать частині спектру частот, характерних для *міжсистемних (міжзональних)* НЧК, і така “близькість” ускладнює ідентифікацію цих складових, оскільки потребує від методів аналізу сигналів відповідної роздільної здатності.

Уточнення умов, які сприяють одержанню адекватних результатів ідентифікації мод НЧК у разі використання вибірок діючих значень сигналу. Перш ніж перейти до питання оцінювання впливу використання миттєвих значень сигналу на результати ідентифікації його складових у порівнянні з використанням діючих значень, було уточнено ширину вікна спостереження та відібрано методи зі складу зазначеного вище ансамблю, використання яких давало кращі (за надійністю виявлення низькочастотних складових та точністю визначення їхніх параметрів) результати ідентифікації складових сигналу у разі використання вибірок даних, сформованих із його діючих значень. З цією метою з частотою дискретизації, рівною 50 Гц (відповідає частоті запису інформації до бази даних ЄВРП “Регіна-Ч”), із діючих значень сигналу (1) було сформовано вибірку даних, яка “охоплювала” часовий відрізок [0, 10] с.

Результати аналізу сформованої вибірки даних підтвердили залежність частоти складових сигналу, які можуть бути виявлені, від ширини вікна спостереження. Наприклад, на відміну від виявлення складових з частотами 1,5 та 1,9 Гц (про це йтиметься далі), надійне виявлення складових з частотами 0,10 та 0,15 Гц стало можливим лише з використанням методів HTLS та МР у разі, коли ширина вікна спостереження даних сформованої вибірки складала 10 с. З використанням вікон спостереження шири-

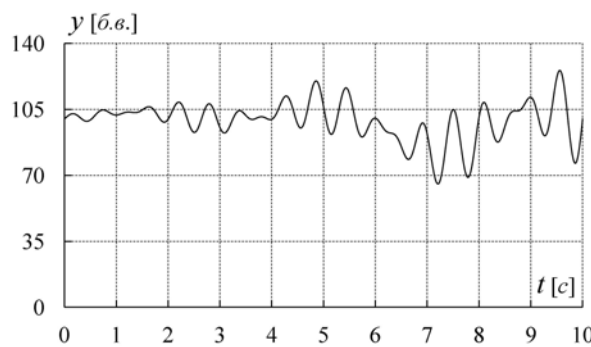


Рис. 1

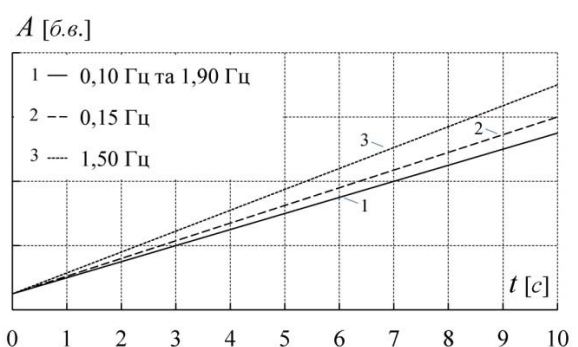


Рис. 2

ною від 2 с окремі методи ансамблю дали змогу виявити наявність низькочастотних складових сигналу (за 1-секундної ширини вікна не було виявлено жодної складової), але замість двох складових з частотами 0,10 та 0,15 Гц було “виявлено” одну, частота якої є “умовно наближеною” до 0,15 Гц. Деяку увагу про результати визначення частоти та амплітуди такої складової за даними 2-секундних вікон спостереження окремими методами ансамблю дають змогу одержати рисунки 3, 4 (результати зведено до середини часових відрізків, “охоплених” відповідними вікнами спостереження).

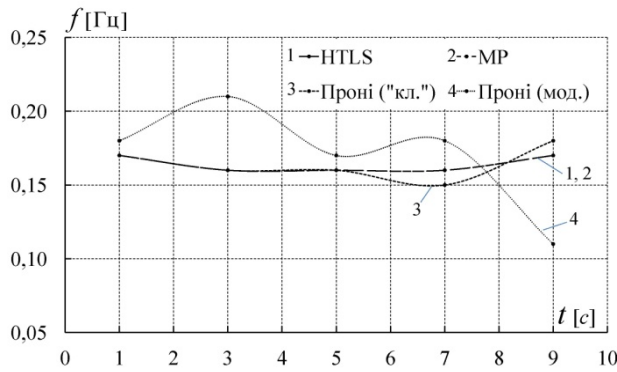


Рис. 3

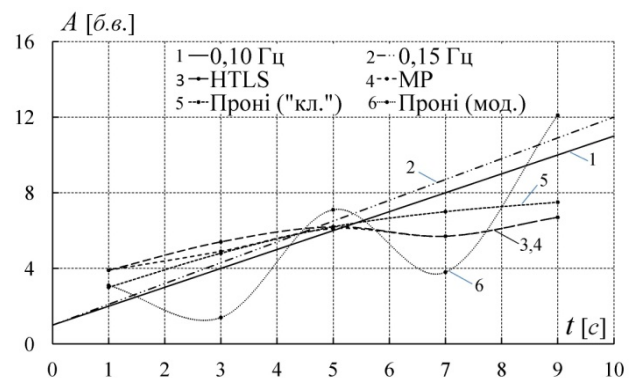


Рис. 4

З рис. 3 видно, що під час визначення частоти найбільшу “індивідуальність” виявив модифікований метод Проні — відповідний графік не збігався з жодним із графіків, одержаних з використанням інших трьох методів, тоді як метод Проні (“класичний”) почав проявляти свою “індивідуальність” лише після 5-ї секунди, а до цього збігався з графіками, одержаними з використанням методів HTLS та МР (останні два графіки збігалися у кожному із вікон спостереження). Такою ж мірою прояви “індивідуальності” методу Проні (як модифікованого, так і “класичного”) спостерігаються і на рис. 4, де для порівняння також наведено дві прями, що мають спільну точку “витоку” і є графіками зростання у часі амплітуд коливань складових з частотами 0,10 та 0,15 Гц згідно з виразом (1). Що ж стосується відповідних графіків, одержаних з використанням методів HTLS та МР, то незначна розбіжність між ними, яка має місце до 5-ї секунди, далі, практично, зникає.

На відміну від “виявлення” однієї складової сигналу замість двох з близькими частотами 0,10 та 0,15 Гц, виявлення складових з частотами 1,50 та 1,90 Гц забезпечується (як і слід було очікувати у випадку використання вікон спостереження шириною ≥ 2 с), але точність визначення окремих параметрів зазначених складових різними методами теж різна. Про це свідчать відповідні графіки зміни частоти (рис. 5) та амплітуди (рис. 6), побудовані для складової з частотою 1,50 Гц (подібна “картина”, яку тут не наводимо, спостерігається і для складової з частотою 1,90 Гц).

З рис. 5 видно, що кращі результати (за точністю визначення частоти) одержано з використанням методів HTLS та МР, а з використанням методу Проні “класичного” одержано кращі результати у порівнянні з використанням методу Проні модифікованого. Результати ж порівняння графіків, наведених на рис. 6, свідчать, що використання методу Проні “класичного” забезпечило найкращі результати до 7-ї секунди, після якої результати, одержані з використанням методів Проні “класичного” та Проні модифікованого, збігаються. У той же час графіки зміни амплітуди цієї складової сигналу, побудовані за резуль-

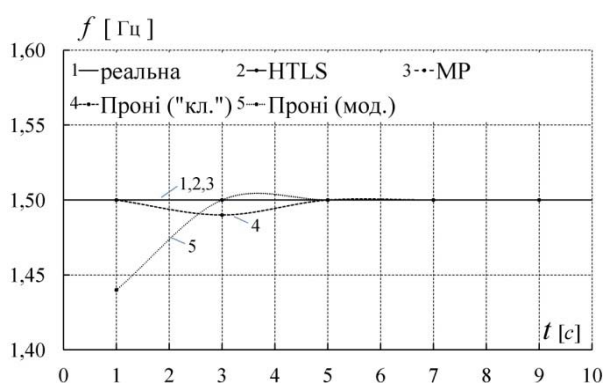


Рис. 5

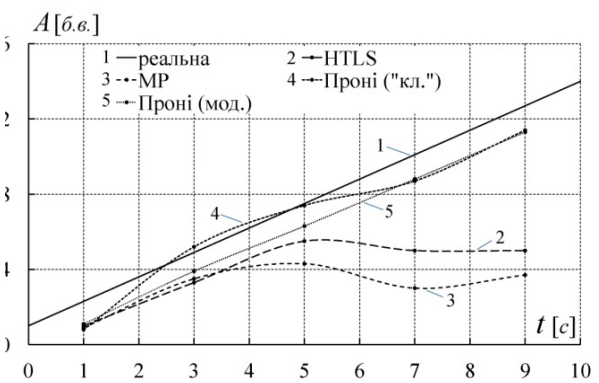


Рис. 6

татами використання методів HTLS та МР, мають найбільші відхилення від суцільної прямої, яка вказує на зміну у часі амплітуди коливань цієї складової згідно з виразом (1).

Наведені результати є додатковим свідченням того, що використання лише якогось одного із зазначених методів не забезпечує бажаної точності визначення усіх параметрів складових сигналу (1), тому для одержання якомога адекватніших результатів визначення таких параметрів доцільно використовувати ансамбль методів аналізу сигналів, про який йшлося вище.

З огляду на потребу використання зазначеного ансамблю в режимі реального часу слід брати до уваги, що зі збільшенням ширини вікна спостереження збільшується і тривалість опрацювання відповідної інформації. В деяких системах моніторингу НЧК вибір ширини вікон спостереження відбувається з урахуванням передбачуваних частот доміантних мод НЧК, що іноді дає змогу забезпечити процес моніторингу НЧК (з ідентифікацією доміантних мод включно) з бажаною періодичністю (циклічністю), використовуючи наявні обчислювальні ресурси. Наприклад, у [3] зазначено, що для виявлення мод НЧК, частота яких становить приблизно 0,3 Гц, використовується вікно спостереження шириною у 6 с і забезпечується застосування методу Проні кожні 20 мс. Слід також брати до уваги, що зі збільшенням ширини вікна спостереження можуть виникати “фантомні” ефекти (“виявлення” неіснуючих складових), наприклад, використання вікон спостереження шириною від 3 с може призводити до “виявлення” близьких за частотою пар складових (замість однієї). Наприклад, під час аналізу того самого сигналу (1) у разі використання “класичного” методу Проні на часовому відрізку [0, 3] с було “виявлено” дві складові з частотами 1,49 та 1,51 Гц (замість однієї з частотою 1,50 Гц), а у разі використання методів МР та HTLS на часовому відрізку [5, 10] с “виявлено” дві складові з частотами 0,15 та 0,16 Гц (замість однієї з частотою 0,15 Гц).

Дослідження з використанням миттєвих значень сигналу. Для визначення впливу використання миттєвих значень сигналу (1) на результати ідентифікації його складових було сформовано з частотою дискретизації 500 Гц відповідну вибірку даних. Результати опрацювання вибірок даних з використанням вікон спостереження шириною 2 с та двох методів аналізу сигналів зі складу зазначеного ансамблю наведено в табл. 1, де параметри складових сигналу позначено: f – частота [Гц], A – амплітуда, ξ – показник демпфування. Затемнені клітини таблиць вказують на те, що відповідну складову не виявлено (в табл. 1 це стосується виключно складової з частотою 0,10 Гц), а курсивом зазначено параметри “виявлених” складових.

Таблиця 1

Часовий відрізок, с	Результати опрацювання вибірок даних сигналу (1) з використанням методів:											
	HTLS						МР					
	вибірки діючих значень сигналу			вибірки миттєвих значень сигналу			вибірки діючих значень сигналу			вибірки миттєвих значень сигналу		
	f	A	ξ	f	A	ξ	f	A	ξ	f	A	ξ
0–2	-	-	-	0,08	5,9	0,366	-	-	-	0,08	5,6	0,455
	0,17	3,9	-0,045	0,16	5,7	-0,059	0,17	3,7	-0,122	0,16	5,5	-0,069
	1,50	0,9	0,001	1,50	1,0	0,002	1,50	0,9	0,014	1,50	1,0	0,002
	1,90	0,7	0,000	1,90	0,7	0,000	1,91	0,3	0,001	1,90	0,6	0,000
2–4	-	-	-	0,09	4,7	-0,014	-	-	-	0,09	4,4	-1,000
	0,16	8,3	-0,075	0,16	9,4	-0,098	0,16	7,3	-0,064	0,16	9,1	-0,092
	1,50	0,6	0,000	1,50	3,4	0,003	1,50	2,5	0,008	1,50	3,3	0,002
	1,90	1,1	0,000	1,90	4,5	0,001	1,90	2,3	0,002	1,90	4,3	0,002
4–6	-	-	-	0,11	12,0	-0,328	-	-	-	0,09	8,0	-0,226
	0,16	6,4	-0,049	0,17	9,9	-0,130	0,16	7,6	-0,052	0,17	7,5	-0,078
	1,50	3,3	0,000	1,50	5,7	0,002	<i>1,49</i>	<i>11,0</i>	<i>-0,001</i>	1,50	6,5	0,002
	1,90	3,2	0,000	1,90	5,2	0,001	<i>1,51</i>	<i>12,2</i>	<i>-0,001</i>	1,90	5,9	0,001
6–8	-	-	-	0,08	4,9	-0,112	-	-	-	0,06	7,5	-0,708
	0,16	5,7	-0,040	0,16	8,0	-0,004	0,16	5,7	0,011	0,19	8,2	-0,039
	1,50	3,9	0,000	1,51	5,8	0,002	<i>1,49</i>	<i>10,3</i>	<i>-0,005</i>	1,50	4,3	1,000
	1,90	6,6	0,000	1,90	10,2	0,001	<i>1,52</i>	<i>11,1</i>	<i>-0,005</i>	1,90	8,8	1,000
8–10	-	-	-	0,11	7,1	0,050	-	-	-	0,12	5,3	0,138
	0,17	6,7	-0,072	0,16	12,3	-0,159	0,18	4,9	-0,072	0,16	10,3	-0,190
	1,50	2,9	0,000	1,50	10,5	0,002	<i>1,48</i>	<i>15,4</i>	<i>-0,009</i>	1,49	10,0	0,003
	1,90	7,8	0,000	1,90	5,8	0,000	<i>1,52</i>	<i>14,5</i>	<i>-0,010</i>	1,90	5,7	0,000

Аналіз результатів, наведених у табл. 1, свідчить, що опрацювання вибірок даних, сформованих із миттєвих значень сигналу, на відміну від вибірок даних, сформованих із діючих значень, надало змогу виявити усі наявні у цьому сигналі складові, хоча значення їхніх параметрів, зокрема і параметрів складової з частотою 0,10 Гц, одержано на різних часових інтервалах (у різних вікнах спостереження) з помітними похибками. Точніші значення одержано методом HTLS: мінімальна похибка у визначенні частоти зазначеної складової становила 10%, а максимальна – 20%, у той час як з використанням методу МР – відповідно 10 та 40%. Що ж стосується використання вибірок даних, сформованих із діючих значень сигналу, то методами HTLS та МР одержано близькі результати, але, знову таки, починаючи з 4-ї секунди, на усіх часових відрізках методом МР “виявлено” складові (їхні параметри в табл. 1 зазначено курсивом), частоти яких близькі до 1,50 Гц, у той саме час методом HTLS параметри складової з частотою 1,50 Гц визначено чітко, без будь-яких “фантомних” ефектів.

Використання миттєвих значень сигналу (1) з шириною вікна спостереження у 2 с надало змогу виявити (з певними похибками) методами HTLS та МР наявність складової з частотою 0,1 Гц (методом HTLS в окремих вікнах спостереження одержано дещо точніші результати визначення частот, ніж методом МР), у той час, як з використанням методу Проні (як “класичного”, так і модифікованого) складову з частотою 0,10 Гц не було виявлено.

Однак, перш ніж зробити остаточні висновки, слід взяти до уваги, що в нормальних режимах ЕЕС сигнали (параметри режиму ЕЕС), які вимірюються ЕВРП “Регіна-С” чи подібними РМУs закордонного виробництва, характеризуються наявністю шумів, що зумовлюють відношення *сигнал/шум* (*SNR*) порядку 80÷120 дБ (*SNR* – узвичаєна англійська аббревіатура відношення *сигнал/шум* – *Signal-to-Noise Ratio*). Тому з метою перевірки впливу такого шуму на результати зазначеної ідентифікації було синтезовано сигнал (2) та сформовано з використанням миттєвих значень відповідну вибірку даних для 10-секундного часового відрізка [0, 10] с

$$x = 100 \sin(2\pi \cdot 50t) + (1+t) \sin(2\pi \cdot 0,10t) + (1+1,5t) \sin(2\pi \cdot 0,15t) + (1+1,3t) \sin(2\pi \cdot 1,5t) + (1+1,1t) \sin(2\pi \cdot 1,9t) + (1+t) \sin(2\pi \cdot 10t) + \text{БШ}. \quad (2)$$

До складу сигналу (2) крім білого шуму (БШ), що зумовлює *SNR* = 80 дБ, увійшли чотири складові, частоти яких відповідають частотам складових сигналу (1), та дві складові, частоти яких знаходяться за межами низькочастотного діапазону електромеханічних коливань в ЕЕС.

Результати ідентифікації низькочастотних складових сигналу (2), одержані внаслідок опрацювання сформованої вибірки даних окремими методами ансамблю для випадків використання вікон спостереження різної ширини, наведено в табл. 2, де курсивом, як і в табл. 1, виділено параметри складових сигналу, які було хибно “виявлено” разом з виявленням близьких за частотою одиночних складових, а два затемнених рядка табл. 2 містять значення параметрів хибно “виявлених” (неіснуючих) складових сигналу.

Використання вибірки миттєвих значень сигналу (2) надало змогу виявити у його складі низькочастотну складову (її частоту визначено з похибкою: 0,08 Гц замість 0,1 Гц) методами HTLS та МР, але лише у разі збільшення ширини вікна спостереження від 5 с (у табл. 2 наведено результати, які одержано з використанням 5-секундної ширини вікна спостереження).

Оскільки у загальному випадку оптимальний порядок моделі сигналу (*оптимальний* – в аспекті забезпечення адекватного визначення параметрів низькочастотних мод) апріорі невідомий, то для його визначення доцільно використовувати *принцип мінімальної довжини опису* (MDL) [8]. Наявний досвід використання принципу MDL свідчить, що у разі синтезованих сигналів він може давати дещо завищений порядок моделі, не призводячи до викривлення визначених параметрів низькочастотних мод. Це мало підтвердження і у випадку сигналу (2), для якого визначений порядок моделі теж був дещо завищеним (дорівнював 14 під час використання вікна спостереження шириною у 3 с) у разі використання методів HTLS та МР. Однак у разі використання методу Проні (“класичного” та модифікованого), чутливого до наявності шуму в сигналі, виникли похибки, пов’язані з обумовленістю матриць, наслідком чого стало “виявлення” лише складової, частота якої в різних вікнах спостереження набувала значень від 1,72 до 1,76 Гц. Використання ж апріорі суттєво заниженого порядку моделі сигналу (2), який було задано рівним 4, принципово не вплинуло на результати ідентифікації складових сигналу (в табл. 2 крім результатів, одержаних модифікованим методом Проні у разі використання 14-го порядку моделі сигналу, напівжирним шрифтом наведено і результати, одержані у

разі використання 4-го порядку моделі сигналу). Отже, визначальний вплив на результати ідентифікації складових сигналу (2) методом Проні ("класичним" та модифікованим) мав *БШ* з $SNR = 80$ db.

Таблиця 2

Часовий відрізок, с	Результати опрацювання вибірки миттєвих значень сигналу (2) методами:											
	HTLS			MP			Проні ("класичний")			Проні модифікований		
	<i>f</i>	<i>A</i>	ζ	<i>f</i>	<i>A</i>	ζ	<i>f</i>	<i>A</i>	ζ	<i>f</i>	<i>A</i>	ζ
Ширина вікна спостереження становить 2 с												
0-2	0,16	10,7	-0,524	0,16	10,7	-0,524	-	-	-	-	-	-
	1,42	3,1	-0,041	1,42	3,1	-0,041	-	-	-	-	-	-
	1,57	2,6	-0,208	1,57	2,6	-0,207	-	-	-	-	-	-
2-4	1,95	2,1	-0,029	1,95	2,1	-0,029	1,76	2,1	-0,039	-	-	-
	0,14	6,5	-0,114	0,14	6,5	-0,114	-	-	-	-	-	-
	1,49	5,5	-0,025	1,49	5,5	-0,025	-	-	-	-	-	-
4-6	1,91	4,4	-0,017	1,91	4,4	-0,017	1,73	6,3	0,026	1,72 / 1,67	8,5 / 9,4	-0,043 / -0,053
	0,14	9,5	-0,077	0,14	9,5	-0,077	-	-	-	-	-	-
	1,49	9,0	-0,020	1,49	9,0	-0,020	-	-	-	1,35	4,7	0,038
6-8	1,76	3,9	-0,047	1,76	3,9	-0,047	1,72	4,2	0,000	1,72	9,6	0,009
	0,15	6,6	0,221	0,15	6,6	0,221	-	-	-	-	-	-
	1,50	13,5	-0,015	1,50	13,5	-0,015	-	-	-	1,67	5,5	0,071
8-10	1,90	11,7	-0,011	1,90	11,7	-0,011	1,73	50	-0,032	1,72	6,0	0,062
	2,03	10,8	-0,332	2,04	10,8	-0,331	-	-	-	-	-	-
	0,23	3,0	0,28	0,23	3,0	0,28	-	-	-	-	-	-
0-3	1,50	14,6	-0,012	1,50	14,6	-0,012	-	-	-	1,65	2,00	0,134
	1,90	12,8	-0,008	1,90	12,8	-0,008	1,73	17,5	-0,029	-	-	-
	Ширина вікна спостереження становить 3 с											
0-3	0,18	3,7	-0,138	0,18	3,7	-0,138	-	-	-	-	-	-
	1,45	4,6	-0,024	1,45	4,6	-0,024	-	-	-	1,63	1,6	0,0470
	1,59	5,9	-0,040	1,6	5,9	-0,041	-	-	-	-	-	-
	1,91	3,8	-0,026	1,91	3,8	-0,026	1,73	2,1	-0,040	-	-	-
3-6	1,98	1,1	0,028	1,99	1,0	0,029	-	-	-	-	-	-
	0,14	10,1	-0,101	0,14	10,1	-0,101	-	-	-	-	-	-
	0,61	2,0	-0,202	0,61	1,9	-0,199	-	-	-	-	-	-
	1,49	9,1	-0,02	1,49	9,1	-0,020	-	-	-	1,46	3,2	0,054
6-9	1,77	6,8	-0,028	1,77	6,7	-0,028	1,73	7,7	0,006	-	-	-
	1,91	5,8	-0,014	1,91	5,8	-0,014	-	-	-	-	-	-
	0,18	3,2	0,148	0,18	3,1	0,152	-	-	-	-	-	-
	1,50	12,7	-0,012	1,50	12,7	-0,012	-	-	-	1,68	9,7	0,002
5-10	1,76	0,3	0,026	1,76	0,3	0,026	1,73	4,6	-0,002	-	-	-
	1,90	10,5	-0,009	1,90	10,5	-0,009	-	-	-	-	-	-
	Ширина вікна спостереження становить 5 с											
0-5	0,08	4,8	0,014	0,08	4,8	0,014	-	-	-	-	-	-
	0,17	4,7	-0,026	0,17	4,7	-0,026	-	-	-	-	-	-
	1,50	0,8	0,001	1,50	0,7	0,000	-	-	-	1,29	1,30	0,020
	1,90	1,0	0,001	1,90	1,0	0,001	1,73	2,1	-0,046	-	-	-
5-10	0,08	5,1	-0,329	0,08	5,1	-0,329	-	-	-	-	-	-
	0,16	6,7	-0,058	0,16	6,7	-0,058	-	-	-	-	-	-
	1,50	6,6	0,001	1,50	6,6	0,001	-	-	-	1,50	8,90	0,009
	1,90	6,0	0,001	1,90	6,0	0,001	1,73	14,3	-0,016	-	-	-

Наведені вище результати дають підстави для попереднього висновку, що використання вибірок миттєвих значень сигналів покращуватиме результати ідентифікації низькочастотних мод електромеханічних коливань в ЕЕС, але за умови, що опрацювання відповідних вибірок даних відбуватиметься з використанням методів ансамблю, менш чутливих до наявності шуму (наприклад, HTLS чи

MP). Використання ж, наприклад, методу Проні, який теж входить до складу ансамблю, додатково потребуватиме попередньої фільтрації сигналу [2], хоча наявний досвід опрацювання вибірок даних, сформованих із діючих значень параметрів режиму ЕЕС, має і приклади одержання методом Проні результатів, які добре збігаються з результатами, одержаними методами HTLS та MP. Такі приклади дають підстави для висновку: під час вимірювання ЕВРП “Регіна-Ч” параметрів режимів ЕЕС фактичний рівень *БШ* не завжди є критичним, тому і визначення методом Проні параметрів мод НЧК у таких випадках відбувається без суттєвого викривлення результатів.

Розглянемо питання доцільності використання миттєвих значень параметрів режиму ЕЕС у системах моніторингу НЧК, обмежившись аналізом часових витрат, пов’язаних з опрацюванням вибірок даних у режимі реального часу засобами ідентифікації мод НЧК (тут під “засобами ідентифікації” розуміємо програмну реалізацію відповідних методів ансамблю, а “вибірку даних” ототожнюватимемо з інформацією ковзного вікна спостереження). Частота дискретизації сигналів, незалежно від її значення (500, 800, 5000 Гц чи будь-якого іншого), значно перевищує частоту основної гармоніки (50 Гц), наслідком чого буде збільшення кількості “точок” у вибірці миттєвих значень сигналу та збільшення часу, необхідного для опрацювання відповідної інформації (у разі використання діючих значень параметрів режиму ЕЕС, визначених ЕВРП “Регіна-Ч”, частота формування вибірок даних становить 50 Гц).

Табл. 3 містить дані щодо витрат часу, яких потребувало опрацювання різних (за кількістю “точок”) вибірок миттєвих значень сигналу у разі ідентифікації низькочастотних мод методами ансамблю з використанням процесора Intel Core i3 370M (двоядерний процесор середнього класу з тактовою частотою 2.4 ГГц).

Таблиця 3

Метод аналізу сигналів	Час [с] опрацювання вибірок даних залежно від кількості “точок”					
	500 “точок”	1000 “точок”	1500 “точок”	2000 “точок”	2500 “точок”	5000 “точок”
HTLS	0,055	0,257	0,789	1,739	3,622	24,984
MP	0,053	0,253	0,717	1,640	3,210	23,640
Проні “класичний”	0,067	0,265	0,781	1,736	3,346	23,911
Проні модифікований	0,316	4,453	15,024	35,988	71,01	567,248

Якщо виходити з того, що ширина вікна спостереження обумовлюватиметься потребою адекватного визначення параметрів усіх мод НЧК і буде заданою, то кількість “точок” вибірки миттєвих значень сигналу залежатиме від частоти її формування (частоти дискретизації). Якщо частота формування вибірки буде такою самою, як і частота реєстрації-вимірювання миттєвих значень сигналу, то усі миттєві значення сигналу будуть “точками” вибірки даних. Формувати вибірку миттєвих значень сигналу можливо і з меншою частотою дискретизації, ніж частота реєстрації-вимірювання миттєвих значень сигналу: тут важливо, щоб кількість “точок” вибірки миттєвих значень сигналу була достатньою для надійного виявлення низькочастотних мод електромеханічних коливань в ЕЕС (наведені в табл. 1 результати свідчать, що внаслідок використання вибірки миттєвих значень сигналу, частота формування якої становила 500 Гц, виявлено складову з частотою 0,1 Гц, чого не було досягнуто у разі опрацювання вибірки діючих значень сигналу, частота формування якої становила 50 Гц), а продуктивність процесора була достатньою, щоб опрацьовувати такі вибірки даних методами ансамблю в режимі реального часу із заданою періодичністю (циклічністю). Наприклад, якщо виходити з 5-секундної ширини вікна спостереження і частоти формування вибірки, рівної 500 Гц, то вибірка матиме 2500 “точок”. Час опрацювання такої вибірки методами ансамблю зазначено напівжирним шрифтом у затемнених клітинах табл. 3. Якщо виходити з вимоги, наприклад, щосекундного опрацювання методами ансамблю таких вибірок даних, то очевидно, що продуктивності процесора Intel Core i3 370M явно недостатньо (тут навіть не торкаємося питання потреби виконання протягом цього самого часу інших процедур попереднього опрацювання інформації, що безпосередньо не стосуються ідентифікації мод НЧК методами ансамблю). У разі ж використання для ідентифікації мод НЧК діючих значень параметрів режиму ЕЕС кожне 5-секундне ковзне вікно спостереження міститиме 250 “точок”, що дає змогу щосекундного їх опрацювання методами ансамблю навіть з використанням комп’ютера з процесором середнього класу (подібного Intel Core i3 370M), однак надійність виявлення низькочастотних мод електромеханічних коливань в ЕЕС внаслідок такого використання може бути нижчою.

Підсумуємо одержані результати в аспекті досягнення мети досліджень і зробимо остаточні висновки.

Уточнено вплив ширини вікна спостереження та методів зі складу ансамблю (HTLS, МР, Проні “класичний” та Проні модифікований) на результати ідентифікації мод НЧК у разі використання (опрацювання) вибірок діючих значень режимних параметрів ЕЕС. Для виявлення низькочастотних ($\geq 0,1$ Гц) мод електромеханічних коливань в ЕЕС слід використовувати 10-секундну ширину ковзного вікна спостереження з опрацюванням відповідних вибірок діючих значень параметрів режиму ЕЕС методами ансамблю (преференції щодо використання надається методам HTLS та МР). Визначення параметрів мод НЧК з 1-секундною періодичністю (циклічністю) може забезпечуватися на базі використання процесора середнього класу, подібного Intel Core i3 370M.

За однакової ширини ковзних вікон спостереження опрацювання засобами системи моніторингу НЧК відповідних вибірок миттєвих значень параметрів режиму ЕЕС сприятиме надійнішому виявленню низькочастотних мод та точнішому визначенню параметрів мод НЧК у порівнянні з використанням вибірок діючих значень параметрів режиму ЕЕС. У разі використання вибірок миттєвих значень параметрів режиму ЕЕС для виявлення низькочастотних ($\geq 0,1$ Гц) мод та визначення з необхідною (для практичних цілей [1]) точністю їхніх параметрів ширина ковзного вікна спостереження має бути більшою 5 с. Для опрацювання таких вибірок з 1-секундною періодичністю (циклічністю) продуктивність процесора повинна бути значно вищою від продуктивності процесорів середнього класу.

1. Буткевич О.Ф., Чижевський В.В. Оцінювання та зменшення в режимі реального часу небезпеки коливного порушення стійкості об'єднаної енергосистеми // Техн. електродинаміка. – 2015. – № 6. – С. 46–52.
2. Буткевич О.Ф., Чижевський В.В. Вплив цифрової фільтрації сигналів на результати аналізу низькочастотних електромеханічних коливань в об'єднаних електроенергетичних системах // Техн. електродинаміка. – 2016. – № 6. – С. 54–59.
3. Agüero J.L., Molina R.D., Barbero J.C, Issouribehere F. Poorly damped electromechanical oscillation in the 345 kV interconnection between Argentina and Chile. Identification based on sliding Prony analysis // 2016 CIGRE Session Proceedings. – Paris, CIGRE Session from 21 till 26 August 2016. – Paper C2-205. – 9 p.
4. Gong Y., Guzmán A. Synchrophasor-Based Online Modal Analysis to Mitigate Power System Interarea Oscillation // Journal of Reliable Power. – 2011. – Vol. 2. – No 2. – Pp. 42–47.
5. Identification of Electromechanical Modes in Power Systems. IEEE Task Force Report. Special Publication TP462. June 2012 / IEEE Power & Energy Society. IEEE 2012. The Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc. – 2012. – 282 p.
6. Jakpattanajit C., Hoonchareon N., Yokoyama A. On-line Estimation of Power System Low Frequency Oscillatory Modes in Large Power Systems // Journal of International Council on Electrical Engineering. – 2011. – Vol. 1. – No 3. – Pp. 352–358.
7. Lauria D., Pisani C. On Hilbert transform methods for low frequency oscillations detection // IET Generation, Transmission & Distribution. – 2014. – Vol. 8. – Iss. 6. – Pp. 1061–1074.
8. Lin T.-H., Soo V.-W. Pruning Fuzzy ARTMAP Using the Minimum Description Length Principle in Learning from Clinical Databases // Ninth IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence. Proceedings. – 1997, November 3-8, Newport Beach, California. – Pp. 396–403.
9. Lu C., Shi B., Wu X., and Sun H. Advancing China's Smart Grid // IEEE power & energy magazine. – 2015. – Vol. 13. – No 5. – Pp. 60–71.
10. Patil V. S., Jambhulkar P.P., Kamble V.P. Real-time Identification of Electromechanical Modes using Controlled Window-size Multi-Prony Analysis // International Journal of Engineering Research & Technology. – 2014. – Vol. 3. – Iss. 4. – Pp. 1627–1634.

УДК 621.311

ИДЕНТИФИКАЦИЯ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ НИЗКОЧАСТОТНЫХ МОД ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

А.Ф. Буткевич^{1,2}, докт.техн.наук, В.В. Чижевский², канд.техн.наук

¹– Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина,

e-mail: butkevych@ied.org.ua

²– Национальный технический ун-т Украины “Киевский политехнический институт им. И. Сикорского”, пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина.

В статье приведены сравнительные результаты идентификации низкочастотных составляющих сигналов в случае использования их действующих и мгновенных значений. Показано, что использование мгновенных значе-

ний параметров режима электроэнергетической системы, измеряемых устройствами векторных измерений, повысит надежность выявления низкочастотных мод электромеханических колебаний, однако такое использование в режиме реального времени потребует высокой производительности процессора. Поэтому для надежного выявления низкочастотных мод целесообразнее увеличить ширину окна наблюдения, используя действующие значения параметров режима электроэнергетической системы. Библиограф. 10, табл. 3, рис. 6.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, электромеханические колебания, низкочастотные моды, выборки данных, мгновенные значения.

ON-LINE IDENTIFICATION OF LOW-FREQUENCY MODES OF ELECTROMECHANICAL OSCILLATIONS IN POWER SYSTEMS

O.F. Butkevych^{1,2}, V.V. Chyzhevskiy²

¹ – Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine, e-mail: butkevych@ied.org.ua

² – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”,
pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine.

The article presents comparative identification results of low-frequency components of the signals in the cases of using their both effective and instantaneous values. It is shown that using of instantaneous values of power system operational condition parameters measured by phasor measurement units will increase a detection reliability of low-frequency modes of electromechanical oscillations, however, such use in real time will require a high processor speed. Therefore, for reliable detection of low-frequency modes it is more expedient to increase the observation window's width and to use the effective values of the power system operational condition parameters. References 10, tables 3, figures 6.

Key words: power system, low-frequency modes, electromechanical oscillations, data sampling, instantaneous values.

1. Butkevych O.F., Chyzhevskiy V.V. Evaluation and decrease in real time of risk of oscillatory loss of Interconnected Power System stability // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2015. – No 6. – Pp. 46–52. (Ukr)
2. Butkevych O.F., Chyzhevskiy V.V. An influence of digital filtering of signals at analysis results of low-frequency electromechanical oscillations in interconnected power systems // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2016. – No 6. – Pp. 54–59. (Ukr)
3. Agüero J.L., Molina R.D., Barbero J.C., Issouribehere F. Poorly damped electromechanical oscillation in the 345 kV interconnection between Argentina and Chile. Identification based on sliding Prony analysis // 2016 CIGRE Session Proceedings. – Paris, CIGRE Session from 21 till 26 August 2016. – Paper C2-205. – 9 p.
4. Gong Y., Guzmán A. Synchrophasor-Based Online Modal Analysis to Mitigate Power System Interarea Oscillation // Journal of Reliable Power. – 2011. – Vol. 2. – No 2. – Pp. 42–47.
5. Identification of Electromechanical Modes in Power Systems. IEEE Task Force Report. Special Publication TP462. June 2012 // IEEE Power & Energy Society. IEEE 2012. The Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc. – 2012. – 282 p.
6. Jakpattanajit C., Hoonchareon N., Yokoyama A. On-line Estimation of Power System Low Frequency Oscillatory Modes in Large Power Systems // Journal of International Council on Electrical Engineering. – 2011. – Vol. 1. – No 3. – Pp. 352–358.
7. Lauria D, Pisani C. On Hilbert transform methods for low frequency oscillations detection // IET Generation, Transmission & Distribution. – 2014. – Vol. 8. – Iss. 6. – P. 1061–1074.
8. Lin T.-H., Soo V.-W. Pruning Fuzzy ARTMAP Using the Minimum Description Length Principle in Learning from Clinical Databases // Ninth IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence. Proceedings. – 1997, November 3-8, Newport Beach, California. – Pp. 396–403.
9. Lu C., Shi B., Wu X., and Sun H. Advancing China's Smart Grid // IEEE power & energy magazine. – 2015. – Vol. 13. – No 5. – P. 60–71.
10. Patil V. S., Jambhulkar P.P., Kamble V.P. Real-time Identification of Electromechanical Modes using Controlled Window-size Multi-Prony Analysis // International Journal of Engineering Research & Technology. – 2014. – Vol. 3. – Iss. 4. – Pp. 1627–1634.

Надійшла 28.04.2017
Остаточний варіант 30.06.2017