

УДК 621.311

ВПЛИВ ЦИФРОВОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ СИГНАЛІВ НА РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ НИЗЬКОЧАСТОТНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ КОЛИВАНЬ В ОБ'ЄДНАНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ

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

¹ – Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна. E-mail: butkevych@ied.org.ua

² – Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”,

пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна.

У статті наведено деякі результати досліджень впливу цифрової фільтрації сигналів на результати аналізу низькочастотних електромеханічних коливань в об'єднаних енергосистемах. Для аналізу сигналів, вимірюваних пристроями векторних вимірювань, використовуються в режимі реального часу відібрані і налаштовані методи аналізу сигналів. Показано, що попередня цифрова фільтрація сигналів підвищує надійність зазначених результатів аналізу. Бібл. 11, табл. 2, рис. 1.

Ключові слова: об'єднана електроенергетична система, низькочастотні електромеханічні коливання, мода, методи аналізу сигналів, цифрова фільтрація сигналів.

Вступ. Розв'язанню задач актуальної для об'єднаних електроенергетичних систем (ОЕС) проблеми демпфування низькочастотних електромеханічних коливань (НЧК) присвячено значну кількість досліджень, частина яких, наприклад, [6, 7, 9-11], – задачі визначення параметрів домінантних мод НЧК (небезпечними в аспекті порушення стійкості ОЕС є НЧК, які характеризуються зростанням амплітуд погано демпфованих мод, такі моди називатимемо *домінантними*). Не дивлячись на наявність деяких відмінностей в існуючих класифікаціях мод коливань, зокрема і у визначенні їхніх частотних діапазонів (наприклад, [5] та [8]), усі класифікації вказують на те, що за певних умов небезпеку для функціонування ОЕС можуть становити моди, частоти яких знаходяться в діапазоні 0–1 Гц (вони асоціюються з коливаннями у протифазі роторів синхронних машин, що знаходяться в різних частинах ОЕС).

В [1, 2] показано, що для одержання надійного та адекватного розв'язку цієї задачі доцільно використовувати ансамбль спеціально відібраних методів аналізу сигналів (тут і далі маються на увазі програмні реалізації відповідних методів), оскільки окремо взятий метод не завжди може задовольнити вимогам надійності виявлення зазначених мод НЧК та адекватності визначення їхніх параметрів. У даному випадку під *надійністю виявлення* розумітимемо здатність виявляти усі домінантні моди НЧК, а під *адекватністю визначення* – здатність забезпечити задовільну (в аспекті можливості практичного використання результатів) точність визначення (оцінювання) параметрів домінантних мод НЧК. Ансамбль утворюють дві групи методів: загальних найменших квадратів Ганкеля, пучка матриць, Проні та Проні модифікованого входять до основної групи, а модифікованого перетворення Гільберта-Хуанга та дискретного перетворення Фур'є – до допоміжної. Результати, одержані з використанням методів зазначеного ансамблю, підлягають обробленню спеціальною *процедурою узагальнення*, головне із призначень якої – забезпечити адекватність оцінок параметрів виявлених низькочастотних мод електромеханічних коливань в ОЕС. Разом з тим, не скасовуючи потреби використання такої процедури, питання підвищення надійності виявлення низькочастотних мод НЧК та адекватності визначення в реальному часі їхніх параметрів залишається актуальним. Тому **метою досліджень**, окремі результати яких наведено нижче, було визначення впливу цифрової фільтрації сигналів, вимірюваних на об'єктах ОЕС пристроями векторних вимірювань, на результати виявлення домінантних мод НЧК та визначення їхніх параметрів.

Результати досліджень. Відомо, що методи аналізу сигналів мають різну чутливість до наявності у вхідних сигналах будь-якого шуму, який апіорі не сприяє покращенню результатів визначення параметрів мод НЧК. Приміром, високою чутливістю до наявності у сигналах шуму вирізняється метод Проні, а за невеликого SNR погіршення якості результатів визначення параметрів низькочастотних складових коливань спостерігається у разі використання будь-якого із методів ансамблю [1, 2] (SNR – узвичаєна англійська аббревіатура відношення *сигнал/шум* – *Signal-to-Noise Ratio*, яке в децибелах визначають як $SNR=10\lg(P_{\text{сигнал}}/P_{\text{шум}})$ або $SNR=20\lg(A_{\text{сигнал}}/A_{\text{шум}})$, де індексом P та A відповідно позначено потужність та середньоквадратичне значення амплітуд сигналу та шуму). У нормальних режимах ОЕС сигнали (параметри режиму), що реєструються (вимірюються) вітчизняними електровимірювальними реєструвальними приладами (ЕВРП) “Регіна-Ч” та подібними пристроями закордонного виробництва, характеризуються наявністю шумів, які зумовлюють значення SNR у діапазоні 80...120 дБ. І якщо наявність у сигналі шуму може призводити до викривлення результатів визначення певних параметрів складових НЧК, отриманих з використанням окремих методів ансамблю (наприклад, того ж методу Проні), то в кінцевому підсумку таке викривлення усувається вищезгаданою спеціальною *процедурою узагальнення* під час оброблення результатів, одержаних з використанням усіх методів ансамблю. Однак, якщо внаслідок невеликого значення SNR матиме місце викривлення результатів, одержаних з використанням *кожного* із методів ансамблю, то застосування *процедури узагальнення* не матиме значного впливу на одержані результати в аспекті їхнього покращення. Тому ще до використання методів аналізу сигналів слід вжити заходи, які б зменшили вплив шуму на результати виявлення доміантних мод НЧК та визначення їхніх параметрів, враховуючи, що аналіз сигналів відбувається у режимі реального часу.

За результатами досліджень встановлено, що до заходів, які сприяють покращенню результатів аналізу сигналів, належить застосування цифрової фільтрації до кожної із вибірок даних (відповідних ширині вікна спостереження) перед обробленням їх зазначеними методами ансамблю. За частоти формування вибірки даних (f_d), рівної 50 Гц (відповідно до частоти запису інформації до бази даних ЕВРП “Регіна-Ч”), мінімальна ширина вікна спостереження сигналу (часовий відрізок, “охоплюваний” вибіркою даних), за якої забезпечується виявлення доміантних мод НЧК та визначення їхніх параметрів, становить 2 с [2]. Вибір цифрового фільтра повинен відповідати певним вимогам, обумовленим як частотним спектром доміантних мод НЧК, так і потребою визначення їхніх параметрів у режимі реального часу, а саме:

- смуга пропускання фільтра – 0÷3 Гц, складові з іншими частотами мають максимально подавлятися;
- амплітудний спектр вихідного сигналу не повинен зазнавати суттєвих змін у порівнянні з вхідним в межах смуги пропускання (для забезпечення можливості адекватного визначення амплітуд мод НЧК);
- фазовий зсув вихідного сигналу по відношенню до вхідного має бути мінімальним;
- порядок фільтра має бути невисоким (застосування фільтра високого порядку збільшує час фільтрації, тим самим збільшуючи і загальний час визначення параметрів мод НЧК, та подовжує спричинений фільтром перехідний процес вихідного сигналу).

Оскільки визначення оптимальних типу та значень параметрів цифрового фільтра, призначеного для фільтрації сигналів (режимних параметрів ОЕС), вимірних ЕВРП “Регіна-Ч”, є окремою оптимізаційною задачею, то у даному разі сам факт використання цифрової фільтрації (навіть у разі деякого квазіоптимального фільтра) повинен був підтвердити її доцільність в аспекті визначення параметрів доміантних мод НЧК. Враховуючи зазначені вище вимоги, було синтезовано фільтр Чебишева другого роду, у якого: верхня межа смуги пропускання ($f_{c,n}^p$) – 3 Гц; нижня межа смуги затримування ($f_{c,n}^z$) – 5 Гц; нерівномірність у смузі пропускання (A_p) – 1 дБ; ослаблення у смузі затримування (A_s) – 80 дБ; частота дискретизації фільтра ($f_{d,\phi}$) – 100 Гц.

Вибір значення $f_{c,n}^z$ обумовлено верхньою границею (з істотним запасом) діапазону частот електромеханічних коливань, який підлягає аналізу. Значення A_s було обрано, виходячи з потреби забезпечення SNR вибірки даних сигналу на рівні, не нижчому від 80 дБ. Частоту дискретизації фільтра було взято мінімально допустимою (згідно з теоремою Котельникова $f_{d,\phi} \geq 2f_d$). Значення решти параметрів фільтра було обрано, виходячи з потреби мінімізації його порядку і водночас для забезпечення виконання наведених вище вимог.

Відомо [3], що мінімальний порядок фільтра Чебишева другого роду, який відповідає заданим параметрам, може бути визначено так:

$$N_{\text{min}}^{\psi_{II}} = \text{arch}[(10^{0.1A_s} - 1)^{0.5} \cdot (10^{0.1A_p} - 1)^{-0.5}] / \text{arch}(f_{\text{сз}}^{\text{н}} / f_{\text{сн}}^{\text{н}}). \quad (1)$$

Згідно з (1), зазначений порядок дорівнює 10. Коефіцієнти чисельника та знаменника передавальної функції $H(s)$ секцій цього фільтра було розраховано на підставі виразу (2) для його передавальної функції (передавальну функцію фільтра описано, наприклад, у [4]):

$$H(s) = \frac{\prod_{k=1}^{N-r} \left(s^2 + \cos^{-2} \left(\frac{2k-1}{2N} \pi \right) \right)}{\left(s + \text{sh}^{-1} \left(\frac{1}{N} \text{arsh} \left(\sqrt{10^{0.1A_s} - 1} \right) \right) \right)^r \prod_{k=1}^{N-r} \left(s^2 - 2\sigma_k s + \sigma_k^2 + \omega_k^2 \right)}, \quad (2)$$

де r – коефіцієнт, який може набувати значень 0 або 1; σ_k, ω_k – відповідно, дійсна та уявна складові полюса фільтра Чебишева другого роду, розраховані за виразами

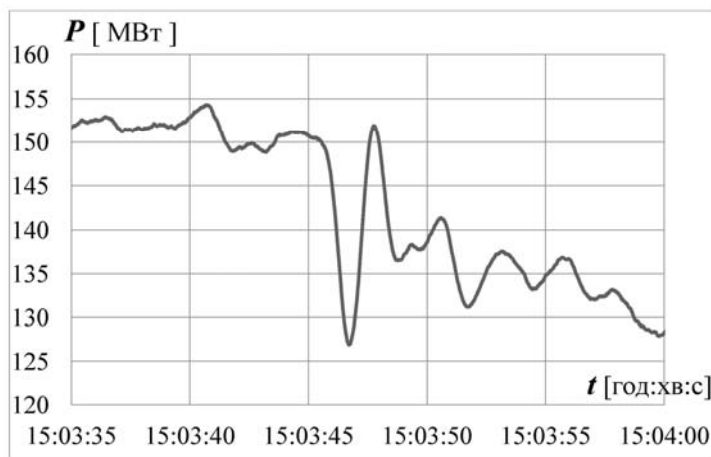
$$\sigma_k = \frac{-\sin \left(\frac{2k-1}{2N} \pi \right) \text{sh} \left(\frac{1}{N} \text{arsh} \left(\sqrt{10^{0.1A_s} - 1} \right) \right)}{\cos^2 \left(\frac{2k-1}{2N} \pi \right) \text{ch}^2 \left(\frac{1}{N} \text{arsh} \left(\sqrt{10^{0.1A_s} - 1} \right) \right) + \sin^2 \left(\frac{2k-1}{2N} \pi \right) \text{sh}^2 \left(\frac{1}{N} \text{arsh} \left(\sqrt{10^{0.1A_s} - 1} \right) \right)}; \quad (3)$$

$$\omega_k = \frac{\cos \left(\frac{2k-1}{2N} \pi \right) \text{ch} \left(\frac{1}{N} \text{arsh} \left(\sqrt{10^{0.1A_s} - 1} \right) \right)}{\cos^2 \left(\frac{2k-1}{2N} \pi \right) \text{ch}^2 \left(\frac{1}{N} \text{arsh} \left(\sqrt{10^{0.1A_s} - 1} \right) \right) + \sin^2 \left(\frac{2k-1}{2N} \pi \right) \text{sh}^2 \left(\frac{1}{N} \text{arsh} \left(\sqrt{10^{0.1A_s} - 1} \right) \right)}.$$

У кінцевому результаті було синтезовано п'ятисекційний фільтр Чебишева другого роду, коефіцієнти якого наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Коефіцієнти передавальної функції секції фільтра		Номер секції фільтра				
		1	2	3	4	5
чисельника	s^2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	s^1	-1,899719037	-1,877478403	-1,808902552	-1,565979412	0,024774884
	s^0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
знаменника	s^2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	s^1	-1,910443862	-1,813880000	-1,709041083	-1,603519124	-1,530184081
	s^0	0,952174021	0,856903129	0,756118487	0,656188497	0,587227951
підсилення		0,416132423	0,351147313	0,246352865	0,121352245	0,028172944



Рисунок

Проілюструємо вплив цифрової фільтрації з використанням синтезованого фільтра на результати визначення параметрів низькочастотних мод коливань потоку активної потужності по лінії електропередачі (фаза А) номінальної напруги 500 кВ “Електрична підстанція Донбаська – Нововоронезька АЕС”, вимірюваного 21.09.2011 р. ЄВРП “Регіна-Ч” (графік наведено на рисунку: на осі абсцис зазначено відліки часу, а на осі ординат – відліки активної потужності).

Вибірки даних потоку активної потужності, щодо яких було застосовано цифрову фільтрацію, “охоплювали” часовий відрізок [15 год. : 03 хв. : 45 с , 15 год.

: 03 хв. : 55 с]. З метою мінімізації фазового зсуву між вхідним та вихідним сигналами фільтрацію кожної (поточної) вибірки даних було виконано у два “проходи”: спочатку здійснювалася фільтрація “від початку – до кінця”, а потім одержані результати фільтрувалися повторно – “з кінця – до початку”. Час виконання такої фільтрації у разі використання комп’ютера з процесором Intel Core i3 370M не перевищував 0,04 с, що свідчить про можливість її застосування у режимі реального часу.

Таблиця 2

Часовий відрізок, с	Узагальнені результати, одержані методами ансамблю (без попередньої фільтрації сигналу)			Результати, одержані методом Проні (з попередньою фільтрацією сигналу)		
	f , Гц	A , МВт	Характер демпфування	f , Гц	A , МВт	ξ
0–2	0,49	27,7	від’ємний	0,51	3,2	-0,214
1–3	0,51	14,2	від’ємний	0,55	9,6	0,010
2–4	0,52	4,3	додатний	0,47	14,9	0,253
3–5	0,53	5,7	від’ємний	0,52	8,7	0,577
4–6	0,55	5,5	від’ємний	0,57	1,1	-0,142
5–7	0,51	2,4	додатний	0,53	3,0	-0,019
6–8	0,42	2,2	додатний	0,44	2,9	0,200
7–9	0,42	2,0	додатний	0,46	5,2	0,327

риць, загальних найменших квадратів Ганкеля та модифікованим методом Проні – свідчать про деяке зменшення частоти виявленої низькочастотної моди після 6-ї секунди.

У табл. 2 наведено результати визначення частоти та амплітуди виявленої моди внаслідок використання процедури *узагальнення результатів*, одержаних методами ансамблю без попередньої цифрової фільтрації вибірок даних, які для часового відрізка [1, 3] с близькі до вищезазначених результатів, одержаних з використанням методу Проні, причому, підкреслимо, що вищезазначену низькочастотну моду було виявлено цим методом лише у одному вікні спостереження – на часовому відрізку [1, 3] с. Серед *узагальнених результатів* у табл. 2 зазначено “характер демпфування”, щодо якого наведено якісні оцінки: “додатний” та “від’ємний”. Крім цього, табл. 2 містить також і результати визначення частоти, амплітуди та показника демпфування низькочастотної моди, одержані внаслідок використання методу Проні з попередньою цифровою фільтрацією відповідних вибірок даних сигналу.

Порівняння результатів аналізу сигналів, зокрема сигналу, графік якого показано на рисунку, одержаних без попередньої фільтрації вибірок даних, з результатами, одержаними після фільтрації цих самих вибірок даних, дає підстави для таких **висновків**.

Цифрова фільтрація сигналів – режимних параметрів ОЕС, вимірних пристроями векторних вимірювань, підвищує надійність виявлення у режимі реального часу домінуючих мод НЧК (насамперед, завдяки підвищенню надійності визначення домінуючих частот) спеціально відібраними та налаштованими методами аналізу сигналів. Для зазначеної фільтрації можливо використання п’яти-секційного фільтра Чебишева другого роду, синтезованого з урахуванням поставлених вимог.

Достатньо показовим є вплив цифрової фільтрації на результати аналізу сигналів у разі використання методу Проні. Під час досліджень з використанням низки тестових сигналів за відсутності шуму цей метод показав (у порівнянні з іншими методами) кращі результати як за надійністю виявлення складових сигналів (не було випадків як “виявлення” неіснуючих складових, так і невиявлення наявних у сигналі складових), так і за точністю визначення їхніх параметрів, а за наявності шуму – найгірші. Що ж стосується результатів аналізу відповідних вибірок даних сигналу, графік якого показано на рисунку, з використанням методу Проні (без попередньої цифрової фільтрації), то було виявлено моду з частотою (f) 0,52 Гц, амплітудою (A) 15,2 МВт та показником демпфування (ξ) 0,571, але лише у одному вікні спостереження, що стосувалося часового відрізка [1, 3] с. Саме цю моду було виявлено іншими методами ансамблю на часовому відрізку [0, 3] с (у двох вікнах спостереження), а на решті часових відрізків – методами: Проні модифікованим, пучка матриць, загальних найменших квадратів Ганкеля та модифікованим перетворенням Гільберта-Хуанга. Результати аналізу вибірок даних (відповідних ширині вікон спостереження), одержані трьома методами ансамблю – пучка матриць, загальних найменших квадратів Ганкеля та модифікованим методом Проні – свідчать про деяке зменшення частоти виявленої низькочастотної моди після 6-ї секунди.

Завдяки підвищенню надійності виявлення у режимі реального часу доміантних мод НЧК підвищується і надійність виявлення небезпеки коливного порушення стійкості ОЕС, яка може виникати внаслідок виникнення НЧК.

1. Буткевич О.Ф., Чижевський В.В. Деякі питання побудови інтегрованої системи запобігання коливному порушенню стійкості об'єднаної енергосистеми // Энергетика: економіка, технології, екологія. – 2015. – № 3 (41). – С. 28-36.
2. 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.
3. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. – М.: Мир, 1978. – 848 с.
4. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. – СПб.: Питер. – 2011. – 758 с.
5. *Electric Power Engineering Handbook*, 2nd edition. The Power System Stability and Control. – Boca Raton, London, New York: Taylor & Francis Group, LLC, 2006. – 352 p.
6. 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.
7. 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.
8. Power Systems Dynamics Tutorial. Final Report (1016042), July 2009 / Electric Power Research Institute. USA. – 2009. – 1010 p.
9. Shofiqul I., Shahnaz C., Hoque Z. Spectral Analysis of Synthetic Power Signals of Different Regions Using Parametric Methods and Spectrogram Representations // IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering. – 2014. – Vol. 9. – Iss. 5, Ver. II. – Pp. 28–39.
10. Vanfretti L. Estimation of Electromechanical Modes in Power Systems using Synchronized Phasor Measurements and Applications for Control of Inter-Area Oscillations / CIGRE WG B5-14 “Wide Area Protection and Control Technologies”, 4 August, 2013. – 32 p.
11. Wang H., Su X. Generation Unit Correlativity-Based Prony Analysis on Multi-Signal Classification of Low-Frequency Oscillation // Power System Technology. – 2011. – Vol. 35. – No 6 – Pp. 128–133.

УДК 621.311

ВЛИЯНИЕ ЦИФРОВОЙ ФИЛЬТРАЦИИ СИГНАЛОВ НА РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА НИЗКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В ОБЪЕДИНЕННЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

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

¹ – Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина,

E-mail: butkevych@ied.org.ua

² – Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”,
пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина.

В статье представлены некоторые результаты исследований влияния цифровой фильтрации сигналов на результаты анализа низкочастотных электромеханических колебаний в объединенных энергосистемах. Для анализа сигналов, измеренных устройствами векторных измерений, используются в режиме реального времени отобранные и настроенные методы анализа сигналов. Показано, что предварительная цифровая фильтрация сигналов повышает надежность указанных результатов анализа. Библиограф. 11, табл. 2, рис. 1.

Ключевые слова: объединенная электроэнергетическая система, низкочастотные электромеханические колебания, мода, методы анализа сигналов, цифровая фильтрация сигналов.

AN INFLUENCE OF DIGITAL FILTERING OF SIGNALS AT ANALYSIS RESULTS OF LOW-FREQUENCY ELECTROMECHANICAL OSCILLATIONS IN INTERCONNECTED 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-57, 03680, Ukraine,

E-mail: butkevych@ied.org.ua

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

This article presents some results of studies on the influence of digital signal filtering at the analysis results of low-frequency electromechanical oscillations in interconnected power systems. Selected and prepared methods of signal analysis are used to analyse in real-time the signals measured by phasor measurement units. It is shown that preliminary digital filtering of signals improves the reliability of mentioned analysis results. References 11, tables 2, figure 1.

Key words: Interconnected power system, low-frequency electromechanical oscillations, mode, methods of signal analysis, digital filtering of signals.

1. Butkevych O.F., Chyzhevskiy V.V. Some problems of integrated system construction for prevention of interconnected power system's oscillatory instability // Power engineering: economics, technique, ecology. – 2015. – No 3 (41). – Pp. 28-36. (Ukr)

2. 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)

3. Rabiner L., Gould B. Theory and application of digital signal processing. – Moskva: Mir, 1978. – 848 p. (Rus)

4. Sergienko A.B. Digital signal processing. – St. Petersburg: Piter. – 2011. – 758 p. (Rus)

5. Electric Power Engineering Handbook. The Power System Stability and Control. – Boca Raton, London, New York: Taylor & Francis Group, LLC, 2006. – 352 p.

6. 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.

7. 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.

8. Power Systems Dynamics Tutorial. Final Report (1016042), July 2009 / Electric Power Research Institute. USA. – 2009. – 1010 p.

9. Shofiqul I., Shahnaz C., Hoque Z. Spectral Analysis of Synthetic Power Signals of Different Regions Using Parametric Methods and Spectrogram Representations // IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering. – 2014. – Vol. 9. – Iss. 5, Ver. II. – Pp. 28–39.

10. Vanfretti L. Estimation of Electromechanical Modes in Power Systems using Synchronized Phasor Measurements and Applications for Control of Inter-Area Oscillations / CIGRE WG B5-14 “Wide Area Protection and Control Technologies”, 4 August, 2013. – 32 p.

11. Wang H., Su X. Generation Unit Correlativity-Based Prony Analysis on Multi-Signal Classification of Low-Frequency Oscillation // Power System Technology. – 2011. – Vol. 35. – No 6 – Pp. 128–133.

Надійшла 05.08.2016
Остаточний варіант 01.09.2016