

О.Ф. Буткевич<sup>1</sup>, докт. техн. наук, В.В. Чижевський<sup>2</sup>

<sup>1</sup> – Інститут електродинаміки НАН України

<sup>2</sup> – Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут»

## ДЕЯКІ ПИТАННЯ ПОБУДОВИ ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ ЗАПОБІГАННЯ КОЛИВНОМУ ПОРУШЕННЮ СТІЙКОСТІ ОБ'ЄДНАНОЇ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

*Викладено деякі особливості побудови інтегрованої системи демпфування (ІСД) електромеханічних низькочастотних коливань (НЧК) в Об'єднаній енергосистемі (ОЕС) України. Джерелом інформації для ІСД НЧК є програмні засоби ідентифікації домінуючих мод НЧК. Такі засоби в режимі реального часу оцінюють небезпеку коливного порушення стійкості ОЕС. Первинним джерелом інформації для ІСД НЧК є пристрої векторних вимірювань. Показано, що селекція методів аналізу сигналів, придатних для використання в ІСД НЧК, базується на всебічному тестуванні цих методів.*

**Ключові слова:** об'єднана енергосистема, електромеханічні низькочастотні коливання, демпфування, пристрій векторних вимірювань, методи аналізу сигналів.

**Вступ.** Об'єднанням енергосистемам (ОЕС), до яких належать і транснаціональні енергооб'єднання (ЕО), властиве виникнення внутрішньосистемних та міжсистемних низькочастотних електромеханічних коливань (НЧК). Такі НЧК пов'язані з наявністю у складі коливань режимних параметрів низькочастотних (до 1 Гц) складових вільних коливань (мод), обумовлених коливаннями у протифазі на власних частотах ОЕС роторів певних груп синхронних генераторів (СГ). Амплітуди зазначених складових коливань можуть збільшуватися як у разі значних збурень режиму, так і у разі дії навіть малих збурювальних сил, періодична зміна яких відбувається з частотами, що відповідають власним частотам ОЕС (такі частоти називатимемо *модальними*). Небезпечно зростання амплітуд НЧК та їх поширення в ОЕС може призводити до вимкнення ліній електропередачі, блоків електростанцій, знеструмлення споживачів електроенергії. Логічним наслідком посилення таких НЧК є коливне порушення стійкості ОЕС.

Дослідженню умов виникнення та питанням ідентифікації і демпфування НЧК присвячено численні публікації, наприклад [1-6], однак сама проблематика залишається актуальною протягом досить тривалого часу, оскільки в ОЕС в різних частинах світу, зокрема і в енергооб'єднанні країн Європи (ENTSO-E), час від часу виникають аварії, “ініційовані” НЧК, наслідками яких є значні економічні збитки.

Для ОЕС України проблема демпфування небезпечних НЧК набуде особливої актуальності у разі її переходу до паралельної роботи з ENTSO-E, оскільки у “розширеному” (за рахунок ОЕС України) ENTSO-E з'являться і додаткові групи СГ, і додаткові слабкі електричні зв'язки, тому у разі “розширеного” ENTSO-E зазнають певних змін як параметри, так і склад домінуючих мод НЧК. В окремих частинах ENTSO-E це викличе потребу певного переналаштування засобів демпфування НЧК, до яких, крім системних стабілізаторів (PSS) у складі систем автоматичного керування збудженням (САКЗ) СГ, належить ряд інших засобів, зокрема гнучкі системи передачі змінного струму – *FACTS* (аббревіатура від *Flexible Alternating Current Transmission System*), функціональні можливості яких не обмежуються демпфуванням НЧК.

Наразі ОЕС України ще не готова до паралельної роботи з ENTSO-E (“Бурштинський острів” не слід брати до уваги: це лише виокремлена частинка ОЕС України з модернізованими системами регулювання на електростанції, яка, крім СГ, має і асинхронізовані турбогенератори), і, на відміну від того ж ENTSO-E, єдиними засобами демпфування НЧК в ОЕС України залишаються САКЗ СГ з автоматичними регуляторами збудження сильної дії, хоча вже з'являються і САКЗ інофірм-виробників з конструктивно незалежними регуляторами напруги (AVR) та PSS. За таких умов, не дуже сприятливих для вирішення зазначеної проблеми з точки зору наявних технічних можливостей, слід забезпечити готовність ОЕС України до запобігання системним аваріям, пов'язаним з виникненням НЧК, ще до її переходу на паралельну роботу з ENTSO-E.

**Мета та завдання статті.** Метою даної статті є висвітлення окремих результатів виконаних досліджень, підпорядкованих вирішенню проблеми запобігання коливному порушенню стійкості ОЕС, загроза якого обумовлюється виникненням небезпечних для функціонування ОЕС НЧК.

## Матеріал і результати досліджень.

## Демпфування небезпечних для функціонування ОЕС НЧК на базі інтегрованої системи.

Незалежно від наявних в ОЕС засобів автоматичного демпфування НЧК та їх ефективності, інформація щодо виникнення загрози коливного порушення стійкості ОЕС є вкрай важливою для диспетчерського персоналу ОЕС. Дані щодо випадків виникнення НЧК в ОЕС свідчать, що тривалість процесів зростання амплітуди НЧК до небезпечних для функціонування ОЕС значень іноді може вимірюватися хвилинами, а в окремих випадках і десятками хвилин, наприклад [5]. За таких умов своєчасна ідентифікація небезпечних НЧК дозволить диспетчерському персоналу вжити необхідних заходів, щоб запобігти аварійному розвитку подій.

Вирішенню проблеми демпфування небезпечних для функціонування ОЕС НЧК сприяє використання технології векторних вимірювань, реалізованої на рівні об'єктів ОЕС пристроями векторних вимірювань напруги, відомих за англійською аббревіатурою *PMUs* (від *Phasor Measurement Units*). Вітчизняним аналогом кращих світових зразків *PMUs* є розроблений в Інституті електродинаміки НАН України і впроваджуваний в ОЕС України електровимірювальний ресструвальний прилад (ЕВРП) "Регіна-Ч". Для ефективного демпфування небезпечних для функціонування ОЕС НЧК потрібно створити з використанням ЕВРП "Регіна-Ч" інтегровану систему демпфування (ІСД) НЧК у вигляді трьох складових, які умовно можна назвати *превентивною*, *автоматичною* та *оперативною*. Джерелом інформації для усіх трьох складових є засоби ("інформаційне ядро"), що використовують в режимі *on-line* попередньо опрацьовані методи аналізу сигналів – вимірюваних ЕВРП "Регіна-Ч" параметрів режиму ОЕС. Мета такого аналізу – виявлення домінантних мод НЧК, визначення їхніх параметрів та оцінювання небезпека коливного порушення стійкості ОЕС. У разі існування такої небезпеки відповідна інформація надається вищезазначеним складовим ІСД НЧК. Слід зауважити, що безпосереднє застосування в режимі *on-line* з цією ж метою (визначення параметрів домінантних мод) традиційного для режиму *off-line* підходу, який передбачає використання математичної моделі ОЕС (у вигляді системи лінеаризованих рівнянь динаміки ОЕС) та апарату модального аналізу, потребує забезпечення адекватності математичної моделі ОЕС та відповідності її параметрів поточному стану ОЕС, що в аспекті практичного виконання є досить проблематичним завданням.

Вищезазначені три складові ІСД НЧК підпорядковано розв'язанню задач однієї проблеми, але у різному вимірі часу. Засоби *автоматичної* складової в реальному часі автоматичного керування визначають і реалізують керівні впливи (сигнали) для демпфування небезпечних НЧК (ця складова ІСД, за сутністю, є інтегрованою системою керування САКЗ СГ, окремі питання побудови та функціонування якої розглянуто в [7]). Засоби *оперативної* складової ІСД НЧК інформують диспетчерський персонал ОЕС і надають йому рекомендації щодо оперативної реалізації керуючих дій, спрямованих на "знесення" НЧК (наприклад, перерозподіл навантаження відповідних СГ електростанцій) на випадок, якщо дії САКЗ СГ (елементів *автоматичної* складової ІСД НЧК) щодо демпфування НЧК виявляться недостатньо ефективними. Для надання адекватних рекомендацій диспетчеру засоби *оперативної* складової ІСД НЧК також опрацьовуватимуть поточну інформацію щодо стану ОЕС, одержувану від наявної в центрі диспетчерського керування системи моніторингу. Інформація, що стосується визначених параметрів домінантних мод НЧК, надходить від *оперативної* складової ІСД НЧК до *превентивної* складової, засобами якої в режимі *off-line* визначають вірогідні умови виникнення небезпечних НЧК (для знаходження причинно-наслідкових зв'язків залучають також всю наявну інформацію щодо стану ОЕС, за якого виникають небезпечні НЧК), щоб їх уникнути (враховуючи) ще на етапі планування режимів, а також готують необхідні інструктивні матеріали для їх використання засобами *оперативної* складової ІСД НЧК, яка виконуватиме функції дорадника диспетчера щодо його дій у разі виникнення НЧК.

Однією із умов забезпечення ефективності ІСД НЧК є мінімізація витрат часу, пов'язаного з ідентифікацією домінантних мод НЧК та оцінюванням загрози коливного порушення стійкості ОЕС. Оскільки характеристики використовуваних в ОЕС України каналів передавання інформації далекі від бажаних (в аспекті забезпечення можливості розв'язання низки актуальних задач керування ОЕС), то для мінімізації загальних витрат часу, пов'язаних з оцінюванням небезпеки коливного порушення стійкості ОЕС, засоби вищезазначеного "інформаційного ядра" (у вигляді рівноправних примірників) повинні знаходитися на верхньому, "серверному" рівні приладів "Регіна-Ч", встановлених на різних об'єктах ОЕС. Ці засоби являють собою програмну реалізацію ансамблю визначених в результаті досліджень методів аналізу сигналів і забезпечують надійне оцінювання небезпеки виникнення НЧК, які можуть призвести до коливного порушення стійкості ОЕС (саме ці засоби, що функціонують в режимі реального часу, є тим "інформаційним ядром", яке на базі спільної інформації об'єднує складові ІСД НЧК в одну систему). Такі засоби визначають в реальному часі показники демпфування домінантних мод коливань. Результати оцінювання надходять від "інформаційного ядра" ("серверний" рівень ЕВРП "Регіна-Ч") в "Концентратор-аналізатор", який одночасно є і керуючим ядром розподіленої *автоматичної* складової ІСД НЧК, що виконує кілька функцій: 1) визначає потребу введення керуючих дій (сигналів) в САКЗ певних СГ електростанцій для демпфування виявлених домінантних мод коливань (визначення "адрес" потрібних СГ

здійснюється на підставі “географії” знаходження відповідного “інформаційного ядра” ІСД НЧК, засоби якого виявили небезпечні домінантні складові НЧК); 2) формує та надсилає сигнали керування для демпфування домінантних складових НЧК; 3) передає засобам *оперативної* складової ІСД НЧК всю необхідну інформацію щодо виявлених небезпечних домінантних мод НЧК. Загальну структуру ІСД НЧК показано на рис. 1, де позначено:

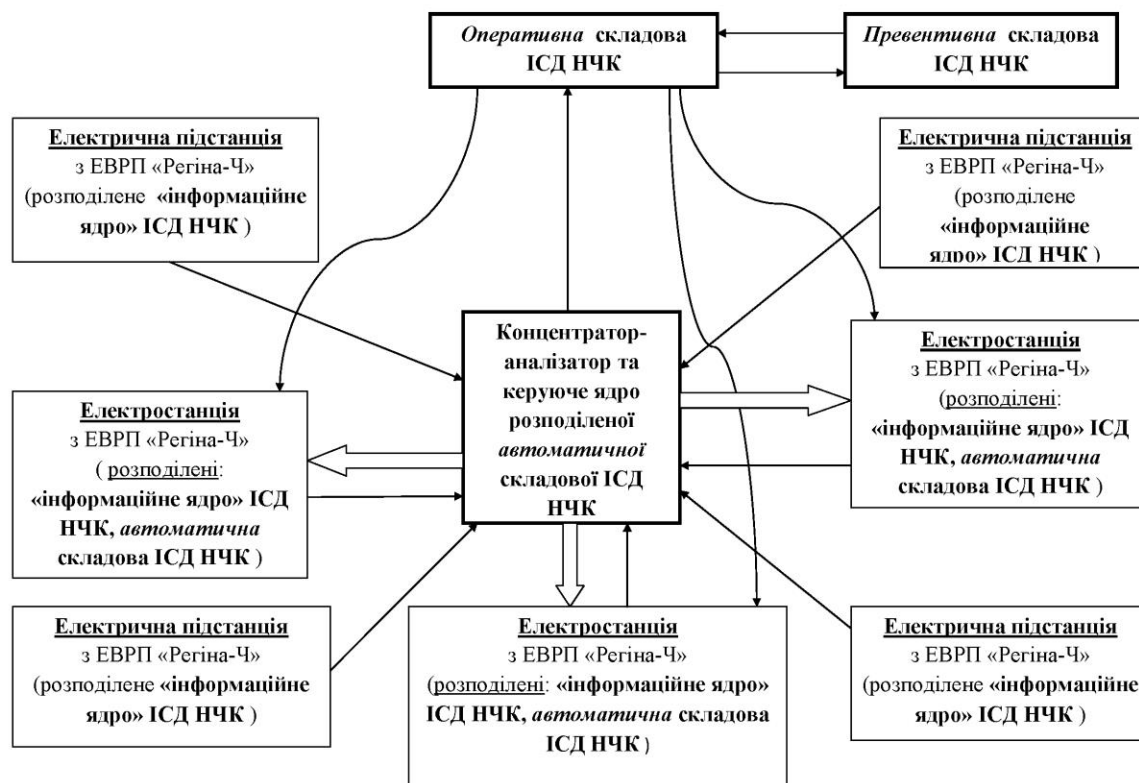


Рисунок 1 – Загальна структура ІСД НЧК

1) тонкими прямими зі стрілками – напрями передавання інформації щодо визначених параметрів домінантних мод НЧК (виняток становить пряма зі стрілкою у напрямі від *превентивної* до *оперативної* складової, якою позначено надходження інструктивних матеріалів щодо дій з демпфування відповідних складових НЧК за конкретних схиемо-режимних умов); 2) широкими стрілками – керівні сигнали ядра *автоматичної* складової ІСД НЧК; 3) непрямыми лініями зі стрілками – керівні дії диспетчерського персоналу, що використовує інформацію *оперативної* складової ІСД НЧК.

На електростанціях “виконавчими елементами” розподіленої *автоматичної* складової ІСД НЧК є САКЗ СГ, причому, можливі варіанти САКЗ як з PSS, так і з модульно-фазовим автоматичним регулятором збудження [7, 8].

#### Засоби “інформаційного ядра” ІСД НЧК

Під час розв’язання різних прикладних задач, пов’язаних з обробленням сигналів, широко використовують методи спектрального аналізу. Таке використання є коректним по відношенню до стаціонарних випадкових процесів, тривалість яких не обмежена. Що ж стосується процесів, пов’язаних з функціонуванням ОЕС, то їх можна вважати стаціонарними лише на окремих часових відрізках. Це викликає і певні обмеження щодо застосування методів спектрального аналізу під час розв’язання задач, пов’язаних з аналізом процесів в ОЕС. Не дивлячись на те, що процеси, внаслідок яких виникають НЧК ОЕС, у більшості випадків є нелінійними і нестационарними, в практиці експлуатації ОЕС для ідентифікації та визначення параметрів домінантних мод НЧК широко використовують різні методи аналізу сигналів (зокрема і в режимі реального часу), більшість з яких не орієнтовано на оброблення даних, що стосуються нелінійних і нестационарних процесів. Засоби “інформаційного ядра” повинні забезпечувати надійність та адекватність ідентифікації та визначення параметрів домінантних мод НЧК в режимі *on-line*. Далеко не всі методи аналізу сигналів придатні для використання в ІСД НЧК. В [9] наведено окремі результати досліджень низки методів, які свідчать, що кращими в аспекті розв’язання поставленої задачі виявилися такі: найменших квадратів Ганкеля (МНКГ), пучка матриць та Проні

модифікований. Певною “універсальністю” серед методів аналізу сигналів вирізняється метод (перетворення) Гільберта-Хуанга (ПГХ) – комбінація емпіричного методу розкладання Хуанга та спектрального аналізу Гільберта, який, на відміну від інших, придатний для аналізу нестационарних і нелінійних процесів (сигналів) [10-12]. З урахуванням цієї обставини та результатів виконаного тестування, ПГХ теж введено до складу ансамблю відібраних методів, що входять до “інформаційного ядра” ІСД НЧК. Тут слід підкреслити, що відбору кожного із методів (відповідних програмних засобів) для застосування у складі “інформаційного ядра” передувала їх всебічна перевірка. Крім використання результатів реальних вимірювань параметрів режиму, одержаних від ЕВРП “Регіна-Ч”, для зазначеної перевірки було також синтезовано різні тестові сигнали, що містили низькочастотні складові (зокрема і близькі за частотами), які призводили до зростання амплітуди коливань результуючого сигналу. Нижче розглянемо один із таких сигналів та результати його аналізу з використанням ПГХ.

#### Аналіз тестового сигналу з використанням ПГХ

Тестовий сигнал, як і одержувані від ЕВРП “Регіна-Ч” результати синхронізованих вимірювань режимних параметрів, подавався у вигляді вибірки дискретних значень. До складу синтезованого сигналу було введено складові з частотами 0,05 Гц, 0,09 Гц та 1,2 Гц, а також складову основної частоти (50 Гц) та дві складові з частотами 150 і 250 Гц. Крім того, до складу сигналу вводився білий шум (БШ), максимальний рівень якого не перевищував 5% від амплітуди складової основної частоти. Амплітуда складової, що відповідала частоті 50 Гц, залишалася незмінною на часових відрізках [0, 10,0]с та [10,5, 20]с, а в інтервалі [10,0, 10,5]с вона змінювалася за законом  $A(t)=1+0.5\sin(2\pi(t-10))$ . Частота основної складової сигналу змінювалася протягом 20 с від 50 до 49 Гц лінійно. Графіки зміни амплітуд окремих складових тестового сигналу (за винятком складової основної частоти) показано на рис. 2, де, залежно від частоти складових, використано різні лінії: для 0,05 Гц – суцільна лінія, для 0,09 Гц – штрихова, для 1,2 Гц – штрих-пунктирна, для 150 Гц та 250 Гц – пунктирна лінія.

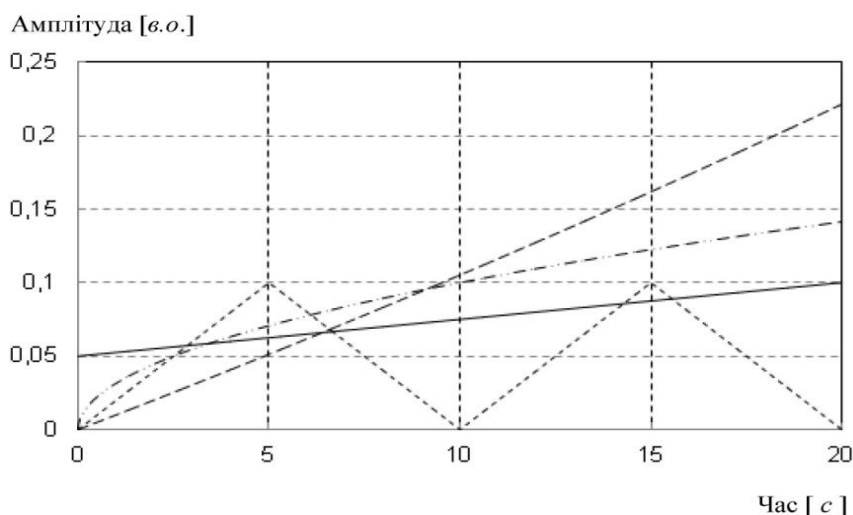


Рисунок 2 – Зміна амплітуд складових тестового сигналу

Відразу зазначимо, що оскільки ставилася задача виявлення у тестових сигналах насамперед низькочастотних складових, то під час оброблення вибірки даних цього сигналу високочастотні складові з частотами 150 та 250 Гц було “вилучено” за допомогою обмежуючого фільтра. Під час аналізу тестових сигналів перевірявся вплив кількох чинників (частоти дискретизації, яка використовується під час формування вибірки даних, ширини вікна стеження та його зсуву) на результати ідентифікації складових сигналу.

#### Аналіз тестового сигналу з використанням ПГХ

Перетворення Гільберта-Хуанга дозволяє використовувати його для дослідження нестационарних процесів, якими є режими функціонування ОЕС. Сутність методу розкладання певного сигналу  $x(t)$  на емпіричні моди полягає у послідовному розрахунку емпіричних мод  $c_j$  та залишків  $r_j = r_{j-1} - c_j$ , де  $j = \overline{1, n}$ ;  $r_0 = x(t)$ . Результат такого розкладання можна подати у вигляді (1)

$$x(t) = \sum_{i=1}^{i=n} c_i(t) + r_n(t), \quad (1)$$

де  $n$  – кількість емпіричних мод, що встановлюється під час обчислень.

Перетворення Гільберта-Хуанга у порівнянні, наприклад, з методом Проні, дозволяє забезпечити високу швидкодію відповідних обчислювальних процедур, однак має і суттєвий недолік – точність перетворення за частотою  $f_p$  [Гц] залежить від ширини вікна стеження  $t_b$  [с]:  $f_p \approx (t_b)^{-1}$ . Тобто, для того, щоб можна було виявити складову, якій відповідає частота 0,09 Гц, ширина вікна стеження повинна бути не меншою від 11,1... с, а для виявлення складової, якій відповідає частота 0,05 Гц, потрібно мати ширину вікна стеження не меншою 20 с. За меншої ширини вікон стеження виявлення зазначених складових не гарантовано. Наприклад, у разі використання вікна стеження шириною у 10 с повинно забезпечуватися виявлення складової, якій відповідає частота 1,2 Гц, також існує ймовірність виявлення складової, якій відповідає частота 0,09 Гц, оскільки значення ширини вікна у 10 с близьке до 11,1...с, однак надія виявлення складової, якій відповідає частота 0,05 Гц, є досить примарною. Такі попередні судження підтверджуються основними результатами аналізу тестової вибірки, наведеними в табл. 1 для випадку, коли ширина та зсув вікна стеження становили відповідно 10 с та 1 с (частину інформації, що міститься у стовпцях “Сміття”, в табл. 1 не наведено). У стовпці “Час” вказано час [с], що відповідає середині кожного вікна стеження. У стовпцях “Частоти”, позначених числами, що відповідають значенням частот [Гц] складових тестового сигналу, які підлягають виявленню (50 → 49; 1,2; 0,09; 0,05), містяться значення “виявлених” (визначених) частот (“Визначена частота” [Гц]) та амплітуд (“Амплітуда” [в.о.] відповідних складових сигналу. Разом з тим, під час оброблення вибірки даних було одержано хибні компоненти (назвемо їх обчислювальним “сміттям”), які не є складовими тестового сигналу, відповідна інформація щодо них знаходиться у стовпцях “Сміття”.

Таблиця 1 – Визначені параметри виявлених складових сигналу з використанням ПГХ

Час	Частоти						«Сміття»	
	50 → 49		1,2		0,09			
	Визначена частота	Амплітуда	Визначена частота	Амплітуда	Визначена частота	Амплітуда	Визначена частота	Амплітуда
5	49.773	1	0.950	0.061	-	-	3.000	0.056
6	49.700	1	1.087	0.052	0.092	0.043	3.894	0.029
7	49.664	1	-	-	0.092	0.036	2.541	0.062
8	49.600	1	1.282	0.086	-	-	<b>1.053</b>	<b>0.081</b>
9	49.536	1	1.243	0.081	-	-	3.199	0.068
10	49.500	1	1.199	0.093	-	-	0.188	0.072
11	49.436	1	1.432	0.102	-	-	0.150	0.061
12	49.400	1	1.277	0.105	0.092	0.024	0.191	0.063
13	49.365	1	1.282	0.110	0.100	0.060	0.192	0.045
14	49.300	1	1.347	0.118	0.092	0.063	1.050	0.109
15	49.246	1	1.351	0.119	-	-	1.044	0.125

Як і очікувалося, складову тестового сигналу, якій відповідає частота 0,05 Гц, не було виявлено, тоді як складову з частотою, близькою до 1,2 Гц, впевнено виявлено, хоча і з деякою похибкою за частотою, викликаною, насамперед, зміною частоти основної складової тестового сигналу (від 50 до 49 Гц). Звернімо увагу на те, що у четвертому вікні стеження (середині цього вікна відповідає восьма секунда) виявлено складову сигналу з частотою 1.053 Гц та амплітудою 0.081 в.о. (ці дані знаходяться у стовпцях “Сміття” табл. 1, їх виділено напівжирним шрифтом). Очевидно, зазначені дані “належать” складовій тестового сигналу, якій відповідає частота 1,2 Гц і яку не було виявлено у попередньому вікні стеження (його середині відповідає сьома секунда). Що ж стосується виявлення складової тестового сигналу, якій відповідає частота 0,09 Гц, то її присутність у тестовому сигналі виявлено лише у п’яти із 11 вікон стеження, що можна вважати непоганим результатом, якщо брати до уваги, що ширина вікна стеження становила 10 с.

У випадку, коли ширину вікна стеження було зменшено до 2 с, складову тестового сигналу, якій відповідає частота 1,2 Гц, теж було виявлено – у тринадцяти із 19 вікон стеження (рис. 3), хоча і з помітними похибками (визначені значення частоти знаходилися, переважно, на рівні 1,42 Гц). Порівняння графіка зміни амплітуди складової з частотою 1,2 Гц, наведеного на рис. 2 (штрих-пунктирна лінія), з відповідним графіком на рис. 3, вказує також на наявність локальних похибок і у визначенні амплітуди цієї складової (“провали” у значеннях амплітуди), хоча, не дивлячись на “провали”, загальна тенденція зростання амплітуди на 20-секундному інтервалі чітко простежується.

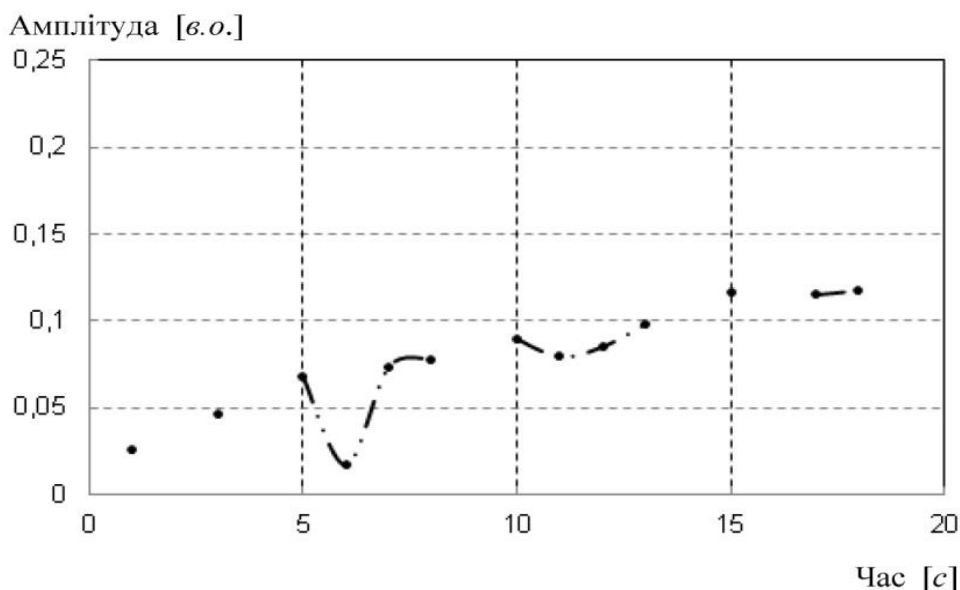


Рисунок 3 – Зміна амплітуди складової сигналу, якій відповідає частота 1,2 Гц

Проілюструємо вплив частоти дискретизації, яка використовується під час формування вибірки даних, та ширини вікна стеження на результати визначення параметрів складових сигналу у разі застосування МНКГ.

#### Аналіз тестового сигналу з використанням МНКГ

Наведемо результати аналізу синтезованого сигналу (2), що містить різні складові, зокрема і з характерним для ОЕС порядком електромеханічних частот. У виразі (2) знаки множення, взагалі-то, не показано, але “зірочку” (\*) як знак множення все ж використано перед значенням частоти ( $f$ ) кожної із складових

$$y = 100 \sin(2\pi * 50 t) + (1+t) \sin(2\pi * 0.10 t) + (1+1.5t) \sin(2\pi * 0.15 t) + (1+1.3t) \sin(2\pi * 1.5 t) + (1+1.1t) \sin(2\pi * 1.9 t) + (1+t) \sin(2\pi * 10 t) + \text{БШ}. \quad (2)$$

Амплітуди складових сигналу зростають зі зміною часу (виняток становить складова з частотою 50 Гц, амплітуда коливань якої залишається незмінною).

Кожну ( $i$ -ту) складову сигналу можна охарактеризувати кількома параметрами: частотою  $\omega_i = 2\pi f_i$  [рад./с] чи  $f_i$  [Гц]; фазою  $\varphi_i$  [рад. чи град.]; амплітудою  $A_i$  (у разі реальних сигналів – в іменованих чи відносних одиницях [в.о.]); сталою демпфування  $\alpha_i$  [с<sup>-1</sup>]; показником демпфування  $\xi_i = -\alpha_i (\alpha_i^2 + \omega_i^2)^{-0.5}$  [в.о.].

Визначальними в аспекті оцінювання небезпеки коливного порушення стійкості ОЕС, обумовленої виникненням НЧК, є значення частот домінантних мод (моди – складові вільних коливань ОЕС) та відповідних показників демпфування (домінантними називатимемо погано демпфовані низькочастотні моди). За значеннями та зміною у часі амплітуд домінантних мод теж можна робити висновки щодо зміни енергії відповідної складової коливань та існування небезпеки коливного порушення стійкості ОЕС. Спеціально синтезовані сигнали дозволяють визначити умови “працездатності” окремих методів аналізу сигналів та можливість і доцільність їх використання у складі “інформаційного ядра” ІСД НЧК.

В табл. 2 наведено деякі результати ідентифікації та визначення параметрів складових сигналу за різної ширини вікон стеження, що “охоплювали” різні часові інтервали (наведено 5 випадків, що стосуються різної ширини вікна стеження – від 1 до 10 с), та частоти дискретизації ( $f_\delta$ ) сигналу під час формування вибірки даних (наведено результати для двох випадків:  $f_\delta = 25$  Гц та  $f_\delta = 50$  Гц). Одночасно з різною шириною вікон стеження під час досліджень використовувалися моделі сигналу різного порядку (5-го, 8-го, 13-го, 16-го).

Таблиця 2 – Визначені параметри виявлених складових сигналу (2) з використанням МНКГ

$f_0$ , $\Gamma\zeta$	Параметр складової сигналу	Ширина вікна стеження (“охоплований” часовий інтервал) [с] / порядок моделі сигналу				
		0–1 с / 5	0–2 с / 8	0–3 с / 8	0–5 с / 13	0–10 с / 16
25	$f$ , $\Gamma\zeta$	0	<b>0,139</b>	<b>0,141</b>	0	<b>0,079</b>
		1,770	<b>1,474</b>	<b>1,482</b>	<b>0,158</b>	<b>0,170</b>
		<b>10,00</b>	<b>1,927</b>	<b>1,914</b>	<b>1,486</b>	<b>1,493</b>
			<b>10,00</b>	<b>10,00</b>	1,673	<b>1,505</b>
					<b>1,912</b>	<b>1,895</b>
					<b>9,984</b>	<b>1,908</b>
					<b>10,00</b>	<b>9,999</b>
	$\xi$ , в.о.	-1	-0,481	-0,440	1	-0,031
		0	-0,057	-0,053	-0,139	-0,072
		-0,011	-0,046	-0,041	-0,027	0,003
			-0,008	-0,006	0,041	-0,004
					-0,022	-0,003
					0,007	0,003
					-0,003	0
50	$f$ , $\Gamma\zeta$	0	<b>0,163</b>	<b>0,140</b>	0	<b>0,066</b>
		1,757	<b>1,470</b>	<b>1,477</b>	<b>0,152</b>	<b>0,166</b>
		<b>10,01</b>	<b>1,936</b>	<b>1,925</b>	<b>1,488</b>	<b>1,489</b>
			<b>10,00</b>	<b>10,00</b>	1,686	<b>1,508</b>
					<b>1,911</b>	<b>1,899</b>
					<b>9,997</b>	<b>1,901</b>
					<b>10,00</b>	<b>9,997</b>
	$\xi$ , в.о.	-1	-0,540	-0,451	1	0,114
		0,005	-0,056	-0,057	-0,133	-0,056
		-0,012	-0,041	-0,044	-0,028	0,001
			-0,008	-0,006	0,058	-0,003
					-0,020	0,006
					0,006	-0,004
					-0,003	0
				0		

Наведені в табл. 2 результати свідчать, що у разі використання близького до адекватного (дещо завищеного) порядку моделі сигналу та ширині вікна стеження у 10 с правильно визначено (з певними похибками, але “впізнавані”) усі частоти складових сигналу (їх зазначено напівжирним шрифтом). У разі використання ширини вікна стеження у 2 с та заниженого порядку моделі правильно визначено (з певними похибками, але “впізнавані”) майже усі частоти складових сигналу (2): невизначеною залишилася складова з найнижчою частотою (0,1  $\Gamma\zeta$ ), амплітуда коливань якої зростала найповільніше. Є невірною визначені показники демпфування: за винятком складової з незмінною амплітудою коливань, показники демпфування інших складових сигналу повинні бути від’ємними. Зміна частоти дискретизації  $f_0$  (з 25 на 50  $\Gamma\zeta$ ) не мала суттєвого впливу на результати ідентифікації та визначення частот та показників демпфування складових синтезованого сигналу (2). Результати виконаних досліджень [9] свідчать, що від вибору порядку моделі сигналу залежить, насамперед, тривалість аналізу та кількість складових, які може бути “виявлено”: заниження порядку може призводити до того, що складові з малими амплітудами і від’ємними коефіцієнтами демпфування будуть “приховані” складовими з більшими амплітудами і додатними коефіцієнтами демпфування, тобто їх не буде виявлено, у той час як надмірне завищення порядку моделі буде призводити до збільшення часу виконання обчислень та до “виявлення” хибних

складових сигналів з можливим одночасним викривленням значень параметрів дійсних (що містяться в сигналі) складових сигналів. Уникнути негативних наслідків суб'єктивного "призначення" порядку моделі дозволило використання методу *мінімальної описової довжини* [13].

#### **Висновки**

1. Ефективне вирішення проблеми демпфування НЧК та запобігання коливному порушенню стійкості ОЕС України можливо на базі створення ІСД НЧК, три складові якої функціонують у різних часових "шарах", у різному вимірі часу. Первинним джерелом інформації для ІСД НЧК є ЄВРП "Регіна-Ч".

2. Основою "інформаційного ядра" ІСД НЧК повинен бути ансамбль "індивідуально" налаштованих методів (відповідних програмних засобів) аналізу сигналів, що витримали всебічну перевірку з використанням спеціально синтезованих багатокомпонентних сигналів. Використання такого ансамблю дозволить надійніше ідентифікувати домінуючі моди НЧК та визначити їхні параметри, "колективно" відсіювати хибні складові, якщо такі "виявлятиме" якийсь із методів.

#### **Список літератури**

1. Yutaka Ota, Hiroyuki Ukai, Koichi Nakamura, Yasunori Mitani, Masahide Hojo, and Osamu Saeki "PMU based power oscillation detection system and its application to Japanese longitudinal power system", 15<sup>th</sup> PSCC, Liege, 22-26 August 2005, Session 4, Paper 6.
2. Kakimoto N., Sugumi M., Makino T., Tomiyama K. "Monitoring of interarea oscillation mode by synchronized phasor measurement", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 21, No. 1, February 2006. – Pp. 260-268.
3. Messina A.R., Vittal V. "Nonlinear, non-stationary analysis of interarea oscillation via Hilbert spectral analysis", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 21, No. 3, August 2006. – Pp. 1234-1241.
4. Far H.G., Banakar H., Li P., Luo C., Ooi B.-T. "Damping Interarea Oscillations by Multiple Modal Selectivity Method", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 24, No. 2, May 2009. – Pp. 766-775.
5. Arango O.J., Sanchez H.M., Wilson D. H. "Low Frequency Oscillations in the Colombian Power System Identification and Remedial Actions", 2010 CIGRE Session, Paper C2-105.
6. Jakkattanajit 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, Vol. 1, No. 3, 2011. – Pp. 352-358.
7. Агамалов О.Н., Буткевич А.Ф. Вопросы построения интегрированной системы управления возбуждением синхронных машин в объединенной энергосистеме // Технічна електродинаміка. – 2015. – № 4. – С. 57-61.
8. Butkevych O., Agamalov O. Power System Stability and Robustness of Synchronous Machine's Excitation Control with Magnitude-Phase Voltage Regulator // Технічна електродинаміка. – 2014. – № 5. – С. 41-43.
9. Буткевич О.Ф., Чижевський В.В. Оцінювання та зменшення в режимі реального часу небезпеки коливного порушення стійкості об'єднаної енергосистеми // Технічна електродинаміка. – 2015. – № 6. – С. 46-52.
10. Huang N.E., Shen Z., Long S.R., Wu M.L., Shih H.H., Zheng Q., Tung N.C.Y.C C., and Liu H.H., "The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis," Proc. R. Soc. London, 1998, Vol. 454. – Pp. 903–995.
11. Huang N.E., Wu M.L.C., Long S.R., Shen S.S.P., Qu W., Gloersen P., Fan K. L. "A confidence limit for the empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis", Proc. R. Soc. London, 2003, Vol. 459. – Pp. 2317-2345.
12. Laila D.S., Messina A.R., Bikash C. P. "A Refined Hilbert–Huang Transform With Applications to Interarea Oscillation Monitoring", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 24, No. 2, May 2009. – Pp. 610-620.
13. 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.

**O. Butkevych, V. Chyzhewskyi**

<sup>1</sup> – **The Institute of Electrodynamics**

<sup>2</sup> – **National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"**

#### **SOME PROBLEMS OF INTEGRATED SYSTEM CONSTRUCTION FOR PREVENTION OF INTERCONNECTED POWER SYSTEM'S OSCILLATORY INSTABILITY**

*Some features construction of an integrated damping system (IDS) of electromechanical low-frequency oscillations (LFO) in the Integrated Power System (IPS) of Ukraine are presented. Computer software of identifying the dominant modes of LFO is the source of information for IDS LFO. Such means in real-time evaluate a current risk of oscillatory loss of IPS stability. Primary sources of information for IDS LFO are the phasor measurement units. It is shown that the selection of signal analysis methods suitable for use in the IDS LFO is based on the comprehensive testing of these methods.*



**Key words:** Interconnected power system, electromechanical low-frequency oscillations, damping, phasor measurement unit, signal analysis methods

#### References

1. Yutaka Ota, Hiroyuki Ukai, Koichi Nakamura, Yasunori Mitani, Masahide Hojo, and Osamu Saeki "PMU based power oscillation detection system and its application to Japanese longitudinal power system", 15<sup>th</sup> PSCC, Liege, 22-26 August 2005, Session 4, Paper 6.
2. Kakimoto N., Sugumi M., Makino T., Tomiyama K. "Monitoring of interarea oscillation mode by synchronized phasor measurement", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 21, No. 1, February 2006. – Pp. 260-268.
3. Messina A.R., Vittal V. "Nonlinear, non-stationary analysis of interarea oscillation via Hilbert spectral analysis", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 21, No. 3, August 2006. – Pp. 1234-1241.
4. Far H.G., Banakar H., Li P., Luo C., Ooi B.-T. "Damping Interarea Oscillations by Multiple Modal Selectivity Method", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 24, No. 2, May 2009. – Pp. 766-775.
5. Arango O.J., Sanchez H.M., Wilson D. H. "Low Frequency Oscillations in the Colombian Power System Identification and Remedial Actions", 2010 CIGRE Session, Paper C2-105.
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, Vol. 1, No. 3, 2011. – Pp. 352-358.
7. Agamalov O.M., Butkevych O.F. "The questions of an integrated excitation control system of synchronous machines construction in the interconnected power system", Tekhnichna elektrodynamika, 2015, No. 4. – Pp. 57-61.
8. Butkevych O., Agamalov O. "Power System Stability and Robustness of Synchronous Machine's Excitation Control with Magnitude-Phase Voltage Regulator", Tekhnichna elektrodynamika, 2014, No. 5. – Pp. 41-43.
9. Butkevych O.F., Chyzhevskiy V.V. "Evaluation and decrease in real time of risk of oscillatory loss of Inter connected Power System stability", Tekhnichna elektrodynamika, 2015, No. 6. – Pp. 46-52.
10. Huang N.E., Shen Z., Long S.R., Wu M.L., Shih H.H., Zheng Q., Tung N.C.Y.C C., and Liu H.H., "The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis," Proc. R. Soc. London, 1998, Vol. 454. – Pp. 903–995.
11. Huang N.E., Wu M.L.C., Long S.R., Shen S.S.P., Qu W., Gloersen P., Fan K. L. "A confidence limit for the empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis", Proc. R. Soc. London, 2003, Vol. 459. – Pp. 2317-2345.
12. Laila D.S., Messina A.R., Bikash C. P. "A Refined Hilbert–Huang Transform With Applications to Interarea Oscillation Monitoring", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 24, No. 2, May 2009. – Pp. 610-620.
13. 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.

**УДК 621.311**

**А.Ф. Буткевич<sup>1</sup>**, докт. техн. наук, **В.В. Чижевский<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> - Институт электродинамики НАН Украины

**<sup>2</sup> - Национальный технический университет «Киевский политехнический институт»  
НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ  
КОЛЕБЛЮЩИХСЯ НАРУШЕНИЙ УСТОЙЧИВОСТИ ОБЪЕДИНЕННОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ**

*Изложены некоторые особенности построения интегрированной системы демпфирования (ИСД) электромеханических низкочастотных колебаний (НЧК) в Объединенной энергосистеме (ОЭС) Украины. Источником информации для ИСД НЧК являются программные средства идентификации доминирующих мод НЧК. Такие средства в режиме реального времени оценивают опасность колебательного нарушения устойчивости ОЭС. Первичным источником информации для ИСД НЧК являются устройства векторных измерений. Показано, что селекция методов анализа сигналов, пригодных для использования в ИСД НЧК, базируется на всестороннем тестировании этих методов.*

**Ключевые слова:** объединенная энергосистема, электромеханические низкочастотные колебания, демпфирование, устройство векторных измерений, методы анализа сигналов

Надійшла 29.10.2015

Received 29.10.2015