

УДК 621.311

ОЦІНЮВАННЯ ТА ЗМЕНШЕННЯ В РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ НЕБЕЗПЕКИ КОЛИВНОГО ПОРУШЕННЯ СТІЙКОСТІ ОБ'ЄДНАНОЇ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

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 “КПІ”,
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна.

Запропоновано підхід до вирішення проблеми демпфування низькочастотних міжсистемних коливань (НЧК) в об'єднаній енергосистемі (ОЕС) з використанням інтегрованої системи демпфування (ІСД). Джерелом інформації для ІСД є засоби ідентифікації домінуючих мод НЧК. Ці засоби в режимі реального часу аналізують режимні параметри ОЕС і оцінюють небезпеку коливного порушення стійкості ОЕС. Виконано дослідження деяких методів аналізу сигналів в аспекті доцільності їхнього використання в ІСД. Бібл. 8, табл. 2, рис. 2.

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

Загальна характеристика проблеми. Об'єднання електроенергетичних систем (ЕЕС) на паралельну роботу та утворення об'єднаних ЕЕС (ОЕС) призводить до зміни характеру проблеми стійкості і може суттєво впливати на умови використання (завантаження) міжсистемних електричних зв'язків (завичай усі міжсистемні зв'язки є слабкими) внаслідок виникнення небезпечних для функціонування ОЕС низькочастотних електромеханічних коливань (НЧК). За англійською термінологією (і відповідною класифікацією) такі НЧК – це *inter-area oscillations* [4]. Виникнення НЧК пов'язане з коливаннями у протифазі на певній частоті (≤ 1 Гц) роторів синхронних машин (СМ), які належать до протилежних за фазою таких коливань груп СМ. Поширення НЧК в ОЕС може призводити до вимкнення ліній електропередачі, блоків електростанцій, знеструмлення споживачів електроенергії. “Географія” аварій в ОЕС, пов'язаних з НЧК, поширюється на різні частини світу. Якщо обмежитися лише останніми 10 роками, то такі аварії виникали, наприклад, в енергооб'єднаннях Європи (1.05.2005 р., 4.11.2006 р.), КНР (29.08.2006 р., 29.01.2007 р.), Колумбії (2008 р.), Індії (30-31.07.2012 р., 10.09.2012 р. та 14.09.2012 р.), Бангладеш (1.11.2014р.) та інших країн, призводячи до значних економічних збитків.

Небезпечними для ОЕС є НЧК, які характеризуються зростанням амплітуд погано демпфованих мод коливань (погано демпфовані моди називатимемо *домінуючими*). Сам факт наявності таких мод з малими амплітудами не становитиме загрози функціонуванню ОЕС, доки не виникнуть умови, за яких відбуватиметься зростання амплітуд НЧК до значень, небезпечних в аспекті коливного порушення стійкості ОЕС. Тому вирішення проблеми запобігання системним аваріям в ОЕС, пов'язаним з виникненням НЧК, зводиться до створення системи ефективного демпфування НЧК, але разом з цим існує і потреба планування та ведення режимів ЕЕС (ОЕС) з урахуванням умов, які сприяють виникненню небезпечних НЧК, оскільки, як свідчить наявний досвід функціонування різних ОЕС, засоби демпфування НЧК не завжди можуть діяти ефективно. Однією із причин такої неефективності може бути зміна структурно-режимних умов функціонування ОЕС, яким відповідало налаштування зазначених засобів.

Метою досліджень, результати яких частково наведено в даній статті, було визначення ефективного підходу до демпфування НЧК в ОЕС, одержання математичного апарату для надійного оцінювання в режимі реального часу небезпеки коливного порушення стійкості ОЕС та використання результатів зазначеного оцінювання для демпфування небезпечних НЧК.

Запропонований підхід до вирішення проблеми. На даному етапі розвитку ЕЕС основними засобами демпфування електромеханічних коливань є *системні стабілізатори PSS* (від *power system stabilizer*) у складі *систем автоматичного керування збудженням* (САКЗ) СМ. Зазначимо, що в САКЗ з автоматичними регуляторами збудження сильної дії (АРЗ-СД), які використовують в ЕЕС країн пострадянського простору, функції PSS реалізовано, але за структурою та складом вхідних сигналів такі САКЗ СМ відрізняються від тих, що використовують у ЕЕС більшості країн світу [3] (останні із зазначених САКЗ СМ набувають все більшого поширення і в ЕЕС країн пострадянського простору, включаючи Україну). Однак, як АРЗ-СД СМ, так і САКЗ зі структурно виділеними PSS потребують відповідного налаштування для демпфування НЧК.

Зі зміною параметрів та складу обладнання, зокрема і основної електричної мережі ОЕС (що має місце і у разі розширення ОЕС за рахунок приєднання нових ЕЕС), будуть зазнавати певних змін не лише параметри, а і сам склад домінуючих мод НЧК в ОЕС, тим самим зменшуючи ефективність налаштованих засобів демпфування НЧК.

Враховуючи результати аналізу наявної інформації щодо параметрів та тривалості небезпечних НЧК, що виникали в ОЕС світу, та поточного стану справ в ОЕС України з впровадження пристроїв PMUs (аббревіатура від *Phasor Measurement Units*), вітчизняним аналогом яких є розроблений в Інституті електродинаміки НАН України електровимірювальний реєструвальний прилад (ЕВРП) "Регіна-Ч", можна дійти висновку, що для ОЕС України функціонально ефективним та ощадним в економічному аспекті може бути підхід до запобігання системним аваріям, пов'язаним з виникненням НЧК (особливої актуальності така проблема набуде з переходом ОЕС України до паралельної роботи з ОЕС країн Європи), який передбачає реалізацію інтегрованої системи демпфування (ІСД) НЧК, що базується на трьох складових, які умовно можна назвати *автоматичною*, *оперативною* та *превентивною*. Ці три складові ІСД НЧК підпорядковано вирішенню однієї проблеми, але у різному вимірі часу, у кожному часовому "шарі" використання результатів спеціалізованого оброблення даних синхронізованих векторних вимірювань, здійснюваних ЕВРП "Регіна-Ч", розташованих на різних об'єктах ОЕС України. За результатами зазначеного спеціалізованого оброблення даних можна виявити та оцінити небезпеку коливного порушення стійкості ОЕС, визначаючи домінуючі моди НЧК та їхні параметри. Саме засоби зазначеної ідентифікації, що функціонують у режимі реального часу, є тим "ядром", яке інформаційно об'єднує складові ІСД НЧК в одну систему. Засоби ІСД НЧК щонайменше зменшать небезпеку коливного порушення стійкості ОЕС або ж взагалі його унеможливлять. Зробимо необхідні пояснення щодо зазначених складових, виходячи з умови їхнього впровадження в ОЕС України.

Автоматична складова ІСД НЧК, окремі питання побудови якої розглянуто в [1], базується на функціонально узгодженому використанні PMUs та САКЗ СМ з метою демпфування небезпечних для ОЕС НЧК. Ефективність цієї складової залежить, насамперед, від правильності швидкого визначення домінуючих модальних частот та відповідних показників демпфування. Для цього засоби ідентифікації домінуючих мод електромеханічних коливань здійснюють неперервне оброблення інформації, що реєструється PMUs. В ОЕС технічно високорозвинених країн у системах моніторингу (WAMS), керування (WACS) та схемах захисту (WAPS) широко використовують концентратори даних та відповідні ("синхрофазорні") векторні процесори, наприклад [8]. Оскільки під час передавання даних каналами зв'язку мають місце затримки (запізнення) надходження інформації, а для ОЕС України потреба в каналах з належними характеристиками є особливо гострою, то стає очевидним, що програмні засоби зазначеної ідентифікації у разі їхнього функціонування в режимі реального часу у складі ІСД НЧК повинні знаходитися в місцях реєстрації інформації, тобто вони повинні входити до складу програмного забезпечення ЕВРП "Регіна-Ч".

Вище зазначалося, що внаслідок певних структурно-режимних змін в ОЕС дія PSS у складі САКЗ СМ щодо демпфування НЧК в ОЕС може бути неефективною. Як свідчать опубліковані дані, зокрема [2], тривалість НЧК, що виникали в різних ОЕС світу, в окремих випадках була значною, достатньою для того, щоб оперативно-диспетчерський персонал міг вжити заходи для "знесення" НЧК у тих контрольованих перетинах ОЕС, де вони становили найбільшу загрозу. Визначити в режимі *on-line* СМ (групи СМ), "винні" у виникненні таких НЧК, використовуючи лише штатні засоби, якими користується диспетчер ЕЕС (ОЕС), неможливо. Тому в центрі диспетчерського керування (ЦДК) ОЕС України повинні функціонувати засоби *оперативної* складової ІСД НЧК, які потребують інформації щодо параметрів виявлених небезпечних домінуючих мод електромеханічних коливань, за якими визначають СМ (групи СМ), що зумовлюють виникнення зазначених складових електромеханічних коливань. Такі дані надходять до *оперативної* складової ІСД НЧК від засобів іден-

тифікації та визначення параметрів зазначених мод, що функціонують у складі програмного забезпечення верхнього (серверного) рівня ЄВРП “Регіна-Ч”. Засоби *оперативної* складової ІСД НЧК використовують ці дані для інформування оперативно-диспетчерського персоналу про появу загрози коливного порушення стійкості ОЕС (виникнення НЧК) та надання йому, у разі потреби, інструкцій та рекомендацій щодо дій за поточних умов, наприклад, щодо перерозподілу навантаження відповідних генераторів електростанцій (підготовка необхідних інструктивних матеріалів здійснюється в режимі *off-line* засобами *превентивної* складової, а відповідність передбачених інструкціями ситуацій поточним умовам – засобами *оперативної* складової на базі інформації, що одержують від системи моніторингу стану ОЕС). Основне призначення цієї складової ІСД НЧК – запобігання виникненню НЧК, небезпечних для функціонування ОЕС, а не лише “знесення” довготривалих НЧК, демпфування яких автоматичними засобами виявиться неефективним.

Отже, програмні засоби ідентифікації та визначення параметрів доміантних мод НЧК, що знаходяться на верхньому рівні ЄВРП “Регіна-Ч”, готують і надають інформацію засобам як *автоматичної*, так і *оперативної* та *превентивної* складових ІСД НЧК. Схему організації надходження такої інформації до ЦДК ОЕС України (НЕК “Укренерго”) для *оперативної* та *превентивної* складових ІСД НЧК показано на рис. 1, де суцільними лініями позначено виділені канали передавання даних від ЄВРП “Регіна-Ч” (встановлених на електроенергетичних об’єктах – електростанціях та підстанціях ОЕС України) до ЦДК ОЕС України, а штриховими – канали, які організовано між об’єктами та ЦДК ЕЕС і між ЦДК ЕЕС та ЦДК ОЕС України. Слід зазначити, що в ЄВРП “Регіна-Ч” є можливість реалізації і керуючих впливів, тобто принципово можливо реалізувати і функції керування, що важливо в аспекті забезпечення ефективної реалізації *автоматичної* складової ІСД НЧК.

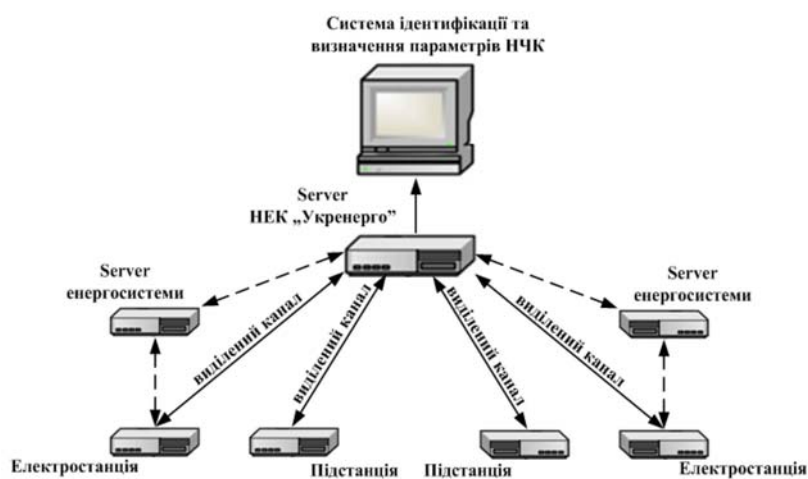


Рис. 1

режимів ОЕС.

Питання ідентифікації та визначення параметрів доміантних мод низькочастотних електромеханічних коливань в ОЕС. До популярних засобів, які застосовують у режимі *off-line* для аналізу статичної стійкості ЕЕС (ОЕС), синтезу систем керування та розв’язання багатьох інших прикладних задач, належить апарат модальної теорії лінійних динамічних систем [7]. Використанню модального аналізу передують попередня лінеаризація системи нелінійних диференціальних рівнянь – математичної моделі системи (ОЕС) – в певній точці області існування її режимів. Визначені в результаті модального аналізу частоти мод – складові вільного руху лінеаризованої системи – є власними частотами ОЕС. Кожну i -ту моду можна охарактеризувати кількома параметрами, серед яких: стала демпфірування α_i [c^{-1}]; частота $\omega_i = 2\pi f_i$ [рад./с] (чи f_i [Гц]); показник демпфування $\xi_i = -\alpha_i (\alpha_i^2 + \omega_i^2)^{-0,5}$ [в.о. – відносні одиниці]; амплітуда A_i [іменовані чи в.о.]. Визначальними в аспекті оцінювання небезпеки коливного порушення стійкості ОЕС, обумовленої виникненням НЧК, є визначення частот доміантних мод та відповідних показників демпфування: наявність у коливаннях режимних параметрів ОЕС низькочастотних ($f \leq 1$ Гц) мод, додатні значення показників демпфування

Результати визначення параметрів доміантних мод НЧК після їхнього надходження до ЦДК ОЕС використовують, як зазначалося вище, засоби *оперативної* та *превентивної* складових ІСД НЧК, але, на відміну від перших, засоби *превентивної* складової функціонують у режимі *off-line*. Основне призначення засобів цієї складової – визначення умов та чинників, які сприяють виникненню небезпечних НЧК; “винуватців” виникнення таких НЧК; інструкцій, спрямованих на “знесення” НЧК за різних схемо-режимних умов, та ін. Інформацію щодо умов, які сприяють виникненню небезпечних НЧК, слід враховувати під час планування ре-

яких близькі до нуля ($\xi \leq 0,01$), свідчить про наявність потенційної загрози виникнення НЧК (нормальним вважають стан ОЕС, за якого показники демпфірування домінантних мод становлять $\xi \geq 0,05$). За значенням та зміною у часі амплітуд домінантних мод теж можна робити висновки щодо зміни енергії відповідної складової коливальних та існування небезпеки коливного порушення стійкості ОЕС.

Виникнення НЧК в ОЕС може обумовлюватися різними причинами, наприклад, бути наслідком аварійних подій, які призводять до інтенсивних збурень режиму ОЕС (з очевидним виходом за межі певного околу точки лінеаризації, хоча, формально, властивості лінеаризованої системи не поширюються за межі певного околу точки лінеаризації), або ж проявлятися у вигляді “саморозхитування” з поступовим зростанням амплітуд коливальних параметрів режиму внаслідок флуктуацій вузлових навантажень електроспоживання, флуктуацій потужності вітрових електростанцій та ін. Для зазначених прикладів виникнення НЧК характер процесів (принаймні, на початковому відрізку часу їхнього виникнення), що відтворюватимуться у зміні параметрів режиму ОЕС, буде нелінійним і нестационарним та квазістационарним відповідно. В обох розглянутих випадках “поведінка” домінантних мод НЧК може визначати стійкість ОЕС, більше того: стійкість ОЕС може залежати і від взаємодії мод [6]. Однак, не дивлячися на те, що ЕЕС (ОЕС) є нелінійними системами, а процеси, внаслідок яких виникають НЧК, у більшості випадків є нелінійними і нестационарними, в практиці експлуатації таких систем для ідентифікації та визначення параметрів домінантних мод НЧК широко використовують не лише апарат модального аналізу, а і різні методи аналізу сигналів (зокрема і в режимі реального часу), більшість з яких не орієнтовано на оброблення даних, що стосуються нелінійних і нестационарних процесів. Очевидно, що до найпопулярніших засобів, орієнтованих на аналіз даних, що стосуються будь-яких процесів (нелінійних і нестационарних), належить перетворення Гільберта-Хуанга (комбінація емпіричного методу розкладання Хуанга та спектрального аналізу Гільберта), який, на відміну від інших методів, апіорі має істотні “плюси” у вигляді адаптивного базису та визначення частоти диференціюванням, а не згортокою, в той час як, наприклад, вейвлет-перетворення, яке теж орієнтовано на аналіз даних нестационарних (але не нелінійних) процесів, таких “плюсів” не має. В окремих випадках використання тих чи інших засобів аналізу сигналів дає цілком задовільну збіжність результатів, що одержують різними засобами, в інших же випадках результати можуть помітно відрізнятися. Застосування в ІСД НЧК відповідних засобів ідентифікації домінантних мод НЧК та визначення їхніх параметрів передбачає неодмінне виконання вимоги щодо надійності одержання адекватних результатів протягом короткого відрізка часу (із заданою періодичністю).

З огляду на викладене вище, виникає потреба додаткового дослідження питань, пов’язаних із визначенням таких засобів (методів), які найбільше відповідають умовам розв’язання поставленої задачі та вимогам щодо одержання результатів. В аспекті відповідності вищезазначеним вимогам було досліджено такі засоби (методи): 1) дискретного перетворення Фур’є (ДПФ); 2) непараметричні (періодограми, спектрограми, методи Велча, Томпсона); 3) параметричні: авторегресійні (Юла-Волкера, Берга, коваріаційний та коваріаційний модифікований) та розрахунку власних чисел (MUSIC – від *MUltiple S_gnal C_lassification* та EV – від *Eigen Vectors*); 4) вейвлет-перетворення (Хаара, сомбреро, Морле); 5) перетворення Гільберта-Хуанга (ПГХ); 6) метод найменших квадратів Ганкеля (НКГ); 7) перетворення Стоквелла; 8) метод пучка матриць (ПМ); 9) метод Проні та Проні модифікований.

Зробимо необхідні попередні пояснення стосовно виконаних досліджень. Оскільки деякі із вищезазначених методів аналізу сигналів, наприклад, ДПФ, не дозволяють визначати показники демпфування ξ , то у разі їхнього застосування для оцінювання загрози виникнення НЧК доводиться використовувати вибірки даних (сформовані за результатами дискретизації і попереднього оброблення сигналів), зсунуті одна відносно одної у часі, і порівнювати амплітуди (або енергії) відповідних низькочастотних складових сигналу. Дискретність формування вибірок даних становила 0,02 с (дискретність запису інформації до бази даних ЕВРП “Регіна-Ч” становить 0,02 с). У більшості досліджень верхня границя частини частотного спектру, в якій передбачалося виявлення домінантних мод, становила 1 Гц.

Оскільки деякі із методів використовують експоненціальну модель сигналу, то досліджувався вплив порядку моделі на результати ідентифікації мод НЧК. Від вибору порядку моделі залежить, насамперед, тривалість аналізу та кількість мод, які може бути визначено: у разі заниження порядку моделі моди з малими амплітудами і від’ємними коефіцієнтами демпфування можуть бути “приховані” модами з більшими амплітудами і додатними коефіцієнтами демпфування, необгрунтоване ж завищення порядку моделі буде збільшувати час виконання обчислень і призводитиме до “виявлення” хибних складових сигналів з можливістю одночасного викривлення параметрів наявних складових.

Щоб уникнути негативних наслідків суб'єктивного “призначення” порядку моделі, попередньо використовувався метод *мінімальної описової довжини* (MDL) [5], який дозволив обґрунтованіше визначити порядок моделі (з незначним завищенням порядку, що гарантувало визначення усіх доміантних мод). Застосування методу MDL зводиться до виконання послідовності процедур (формування матриці Ганкеля на базі вибірки даних сигналу, що реєструється, → сингулярне розкладання матриці Ганкеля → визначення власного вектору → визначення порядку моделі на базі елементів власного вектору), що потребує певного часу обчислень. Проте, застосування методу MDL цілком себе виправдовує в аспекті забезпечення виконання вимог щодо одержання результатів розв'язання основної задачі. Прокоментуємо одержані результати визначення кількома методами параметрів періодичних складових сигналу

$$x(t) = 100 + 2 \sin(2\pi \cdot 0.1t) + \sin(2\pi \cdot 0.2t) \quad (1)$$

для випадків завдання різних порядків моделі (4, 6, 8, 10, 16, 20, ...). Зазначимо, що із застосуванням методу MDL визначено 10-й, дещо завищений порядок.

Починаючи з 6-го і вищих порядків моделі сигналу, правильні значення частоти, амплітуди та показника демпфування складових одержано лише з використанням методів Проні, ПМ та НКГ, у той час як використання MUSIC дало дещо викривлені значення частот (одержано 0,12 та 0,21 Гц) та суттєво викривлені значення амплітуд (відповідно 2,32 та 1,34) лише у разі використання 8-го порядку моделі (подальші збільшення порядку моделі призводили до точного визначення частот складових, але зовсім не покращували, а навіть погіршували точність визначення амплітуд). Використання методу EV дозволило одержати викривлені значення частот та амплітуд складових, починаючи лише з 10-го порядку моделі сигналу, подальші ж підвищення порядку моделі давали ефект, аналогічний такому, що одержували у разі використання методу MUSIC (ξ методами MUSIC та EV не визначався).

Вплив порядку моделі сигналу на час визначення параметрів складових виявився найменшим для методу ПМ. Для методу НКГ зазначений вплив є меншим, ніж для методу Проні, хоча це стає помітно, починаючи лише з 40-го порядку моделі (до цього вплив був, практично, однаковим). Наприклад, якщо за “точку відліку” для порівняння взяти 10-й порядок моделі, то у разі його зростання з кроком 10 (тобто наступним брати 20-й, 30-й, 40-й, 50-й порядки) час обчислень відповідно збільшуватиметься: для методу ПМ в 1.1, 1.2, 1.3 та 1.4 рази, а для методів НКГ та Проні спочатку однаково – відповідно в 1.2 та 1.3 рази, але у випадку 40-го та 50-го порядків моделі час обчислень за методом НКГ збільшується відповідно в 1.5 та 1.7 разів, а за методом Проні – в 1.7 та 1.9 разів. У разі використання методу MUSIC час обчислень відповідно збільшується в 1.7, 2.5, 4.0 та 6.0 разів, а у випадку використання методу EV – у 1.7, 2.9, 5.7 та 8.1 разів.

Попередні висновки щодо можливості використання досліджуваних методів для розв'язання поставленої задачі у випадку використання 10-секундної вибірки даних: лише з використанням методів Проні, ПМ, НКГ та ПГХ одержано цілком правильні значення параметрів складових сигналу, а з використанням методів MUSIC та EV – дещо викривлені результати. Решта досліджуваних методів не дозволила одержати правильні результати. Методи, що успішно пройшли вищезазначену перевірку, було додатково перевірено з використанням сигналу (2)

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

Частоти періодичних складових цього сигналу характерні не лише для *внутрішньосистемних* та *міжсистемних*, а і для *локальних* коливань, тому за верхню границю частини частотного спектру, в якій передбачалося виявлення доміантних складових НЧК, було взято 2 Гц. У табл. 1 наведено визначені параметри періодичних складових сигналу (2) (курсивом зазначено результати, які визначено із суттєвими похибками, а курсивом з підкреслюванням – ті, що визначено взагалі невірні). Дані табл. 1 свідчать, що методи НКГ та ПМ дозволили визначити частоти усіх періодичних складових сигналу, але жоден із методів не забезпечив правильне визначення усіх параметрів (ПГХ не забезпечує визначення ξ).

Розглянемо приклад результатів ідентифікації доміантних низькочастотних мод коливань потоку активної потужності по лінії електропередачі “ПС Вінниця-750 – Южно-Українська АЕС” (фаза А), зареєстрованого 01.02.2015 р. (рис. 2). Обмежимося 5-секундним часовим відрізком (від 13:00:00 до 13:00:05). На базі даних реєстрації цього сигналу виконано порівняння результатів, одержаних різними методами за короткої довжини вибірки даних.

Таблиця 1

| Метод | Визначені параметри періодичних складових сигналу | | |
|-------|---|-----------------|--------------|
| | f , Гц | A , б.в. | ξ , в.о. |
| ПГХ | 1,48 | 1,32 | – |
| | 0,54 | 4,12 | |
| | 1,90 | 8,51 | |
| НКГ | 0,10 | 362 | -0,003 |
| | 0,15 | 1215 | 0 |
| | 1,50 | 2×10^6 | 0 |
| | 1,90 | 2×10^6 | 0 |
| ПМ | 0,10 | 167 | -0,006 |
| | 0,15 | 613 | -0,002 |
| | 1,50 | 8×10^6 | 0 |
| | 1,90 | 6×10^6 | 0 |
| Проні | 0,16 | 3,06 | -0,056 |
| | 1,50 | 1,96 | -0,001 |
| | 1,90 | 0,47 | -0,001 |

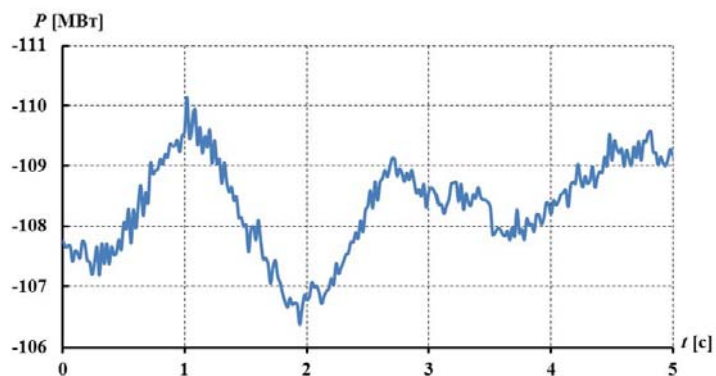


Рис. 2

Розглянемо три випадки, коли вибірка даних “охоплювала” часовий інтервал в одну ($0 \div 1$), дві ($0 \div 2$) та три ($0 \div 3$) секунди. У першому випадку домінуючі моди коливань не було виявлено. У разі 2-секундної ширини вікна стеження методами НКГ, ПМ та Проні модифікованим у коливаннях потоку активної потужності виявлено складову з частотою 0,70–0,71 Гц та амплітудою 1,0–1,1 МВт і показником демпфування 0,056–0,061 (табл. 2). У випадку 3-

секундної ширини вікна стеження відповідні значення параметрів становили: 0,68–0,70 Гц, 1,0÷1,1 МВт та 0,056÷0,061 (наявність відмінностей в одержаних за різної ширини вікон стеження значеннях параметрів моди пов’язана з різною енергією сигналу в зазначених часових інтервалах і не суперечить принципу невизначеності Гейзенберга). У зазначених випадках методи ПГХ та Проні (на відміну від модифікованого методу Проні) не забезпечили виявлення низькочастотних (≤ 1 Гц) складових коливань.

Висновки. На підставі одержаних результатів (обмежений обсяг статті дозволив навести лише окремі результати досліджень) можна зробити висновки, що серед досліджуваних методів надійнішими є НКГ, ПМ та Проні модифікований, які близькі за одержуваними результатами, але дещо відрізняються за обчислювальними витратами (НКГ є “найшвидшим”), проте не настільки, щоб цей чинник був визначальним в аспекті розв’язання основної задачі. Фільтрація даних та визначення порядку моделі сигналу (з використанням методу MDL) дозволяє підвищити ефективність аналізу сигналів та якість одержуваних результатів. Для надійного забезпечення інформацією складових ІСД НЧК доцільно використовувати ансамбль засобів аналізу сигналів з ПГХ включно (використання ансамблю дозволить також “відсіювати” хибні складові, якщо такі “виявлятиме” один із методів).

Таблиця 2

| Метод | Часовий інтервал, с | Визначені параметри домінуючих мод коливань | | |
|---------------------|---------------------|---|-----------|--------------|
| | | f , Гц | A , МВт | ξ , в.о. |
| НКГ | 0–2 | 0,71 | 1,0 | 0,061 |
| | 0–3 | 0,68 | 0,9 | 0,031 |
| ПМ | 0–2 | 0,71 | 1,0 | 0,056 |
| | 0–3 | 0,68 | 0,9 | 0,033 |
| Проні модифікований | 0–2 | 0,70 | 1,1 | 0,058 |
| | 0–3 | 0,68 | 0,9 | 0,032 |

1. 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.

2. Arango O.J., Sanchez H.M., Wilson D.H. Low frequency oscillations in the Colombian Power System – identification and remedial actions / *CIGRE-2010*, Paper C2-105.

3. *IEEE Std 3.421.5-2005*. IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, 2005. – 85 p.

4. Kundur P. Power System Stability and Control. – New York: McGraw-Hill, 1994. – 1176 p.
5. 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.
6. Messina A.R., Vittal V. Nonlinear, non-stationary analysis of interarea oscillations via Hilbert Spectral Analysis // IEEE Transactions on Power Systems. – 2006. – Vol. 21. – No 3. – Pp. 1234–1241.
7. Porter B., Grossley T.R. Modal Control, Theory and Applications. – London: Taylor and Francis, 1972. – 233 p.
8. Edmund O. Schweitzer, III, David Whitehead, Armando Guzmán, Yanfeng Gong, and Marcos Donolo Advanced Real-Time Synchrophasor Applications // Journal of Reliable Power. Synchrophasors. – 2011. – Vol. 2. – No 2. – Pp. 16–28.

УДК 621.311

ОЦЕНИВАНИЕ И УМЕНЬШЕНИЕ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ОПАСНОСТИ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО НАРУШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ОБЪЕДИНЕННОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

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 “КПИ”,

пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина.

Предложен подход к решению проблемы демпфирования низкочастотных межсистемных колебаний (НЧК) в объединенной энергосистеме (ОЭС) с использованием интегрированной системы демпфирования (ИСД). Источником информации для ИСД являются средства идентификации доминирующих мод НЧК. Эти средства в режиме реального времени анализируют режимные параметры ОЭС и оценивают опасность колебательного нарушения устойчивости ОЭС. Выполнено исследование некоторых методов анализа сигналов в аспекте целесообразности их использования в ИСД. Библ. 8, табл. 2, рис. 2.

Ключевые слова: объединенная энергосистема, низкочастотные межсистемные колебания, демпфирование, устройство векторных измерений, методы анализа сигналов.

EVALUATION AND DECREASE IN REAL TIME OF RISK OF OSCILLATORY LOSS OF INTERCONNECTED POWER SYSTEM STABILITY

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.

An approach to damping problem solution of inter-area oscillations (IAO) in an interconnected power system (IPS) with use of an integrated damping system (IDS) is proposed. The tools of identifying of dominant modes of IAO are the information source for IDS. These tools in real-time analyse the IPS operational condition parameters and evaluate current risk of oscillatory loss of IPS stability. Some methods of signal analysis from the point of view of appropriateness of their use in IDS were examined. References 8, tables 2, figures 2.

Key words: Interconnected power system, inter-area oscillations, damping, phasor measurement unit, methods of signal analysis.

Надійшла 15.07.2015

Остаточний варіант 18.09.2015