

ІДЕНТИФІКАЦІЯ В РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ НИЗЬКОЧАСТОТНИХ КОЛИВАНЬ ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМУ 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.

Показано актуальність проблеми коливного порушення статичної стійкості енергосистем (ЕС) та ідентифікації в реальному часі низькочастотних коливань режимних параметрів (НЧК) ЕС. Запропоновано підхід до реалізації такої ідентифікації та наведено приклад ідентифікації НЧК для тестової моделі ЕС. Бібл. 8, табл. 1, рис. 2.

Ключові слова: енергосистема, параметри режиму, низькочастотні коливання, ідентифікація.

Кількість випадків порушення стійкості енергосистем та енергооб'єднань (ЕС) світу, спричинені виникненням та розвитком низькочастотних коливань режимних параметрів (НЧК), збільшується в останні роки. Тривалі незгасаючі НЧК призводять як до знеструмлення (внаслідок вимушеного відключення) великої кількості споживачів, як це відбувалося, наприклад, в ЕС Китаю, США, Італії (усі у 2003 р.), так і до припинення паралельної роботи ЕС, як це сталося, наприклад, в ЕС Заходу США та Канади (1996 р.) або в ЕС Колумбії з енергосистемами Екватору та Венесуели (2008 р.). Демпфірування НЧК повинно автоматично забезпечуватися складовими систем автоматичного керування збудженням (САКЗ) синхронних машин, до яких належать системні стабілізатори PSS (у закордонних САКЗ) та автоматичні регулятори збудження сильної дії (в САКЗ, які експлуатуються, переважно, в ЕС України та країн пострадянського простору), а також засобами силової електроніки (FACTS та ін.), які в ЕС України, на жаль, не набули поширення. Однак, як свідчить досвід експлуатації ЕС, ефективність таких засобів не завжди забезпечується. Тому своєчасне виявлення небезпечних довготривалих НЧК з метою їхнього послаблення внаслідок оперативних дій диспетчерського персоналу ЕС продовжує залишатися актуальною задачею, яку можна розглядати як складову комплексної проблеми забезпечення стійкості ЕС, спрямовану на запобігання коливному порушенню стійкості ЕС.

У разі поступового “саморозхитування” ЕС на власній частоті, викликаного дією малих збурюючих сил за відповідних, сприятливих виникненню НЧК, схемо-режимних умов, та недостатній ефективності засобів автоматичного демпфірування НЧК, можна запобігти коливному порушенню стійкості ЕС, якщо забезпечити неперервний моніторинг запасу статичної стійкості ЕС (з використанням певної метрики) та своєчасно вживати заходи, спрямовані на послаблення НЧК. Частоту небезпечних НЧК та відповідні ступінь стійкості ЕС і коефіцієнт демпфірування, що відповідають певному режиму ЕС, можна визначати, застосовуючи до лінеаризованої математичної моделі ЕС апарат лінійної алгебри (апарат алгебричної проблеми власних значень) [1,5,7]. Однак, практичне застосування такого підходу в режимі *on-line* функціонування ЕС є проблематичним, насамперед внаслідок складності забезпечення необхідної відповідності параметрів актуальної моделі ЕС поточним значенням параметрів реальної ЕС, включаючи генеруюче обладнання з відповідними системами регулювання. Враховуючи поширення в ЕС світу сучасних систем моніторингу WAMS (аббревіатура від Wide Area Measurement System), слід використовувати інформацію, що реєструється пристроями PMU (аббревіатура від Phasor Measurement Unit) – пристроями об'єктного рівня WAMS (PMU вітчизняного виробництва є пристрій “Регіна-Ч” [4]), як для ідентифікації НЧК, так і для підвищення ефективності засобів автоматичного демпфірування НЧК. Ідентифікацію НЧК можна здійснювати як в *off-line* (використовуючи результати реєстрації параметрів режимів ЕС, накопичені PMU, розташованими в різних точках ЕС), так і в *on-line* режимі. Не зупиняючися на питаннях *off-line*-ідентифікації, лише зазначимо, що її результати повинні підпорядковуватися задачі виявлення узагальнюючих залежностей (причино-наслідкових зв'язків) між особливостями схемо-режимних умов та виникненням небезпечних НЧК. Такі залежності повинні враховуватися при плануванні та веденні режимів ЕС, щоб запобігти виникненню небезпечних НЧК. Очевидно, що практичне розв'язання задачі *on-line*-ідентифікації НЧК априорі є складнішим у порівнянні із задачею *off-line*-ідентифікації НЧК, насамперед, внаслідок часових обмежень щодо одержання її розв'язку, крім того, воно потребує реалізації у складі WAMS підсистеми моніторингу НЧК. Враховуючи обмеження, що стосуються обсягу даної публікації, зупинимось лише на розгляді деяких особливостей *on-line*-ідентифікації НЧК, які можуть виникати за квазіусталених режимів ЕС (як “саморозхитування” ЕС).

Результати виконаних досліджень, зокрема і [2,3,8], свідчать, що для *on-line*-ідентифікації НЧК доцільно “паралельно” використовувати певний “набір” методів та “ковзаючі” вікна для неперервної перехресної обробки сигналів. Використовуючи “паралельно” різні методи, можна надійніше забезпечити ідентифікацію НЧК. Підвищенню ефективності такої ідентифікації сприяє і використання вибірок даних, що стосуються різних ре-

жимних параметрів, які можуть містити різний склад мод. Організацію *on-line* обробки такої інформації з метою виявлення домінантних мод повинні забезпечувати засоби підсистеми моніторингу НЧК. Проілюструємо з використанням моделювання можливість реалізації *on-line*-ідентифікації НЧК на прикладі відомої тестової 4-машинної моделі ЕС [6,7], яку утворюють дві майже “симетричні” підсистеми (позначимо їх ЕС-А та ЕС-В), з’єднані повітряними лініями електропередачі (ПЛ_{А-В}), опори яких (у відносних одиницях) вказано на схемі ЕС, яку представлено на рис. 1. Підсистеми ЕС-А та ЕС-В містять по 2 генератора (кожний номінальною потужністю 900 МВА) з САКЗ; всі дані щодо моделі ЕС наведено в [6,7].

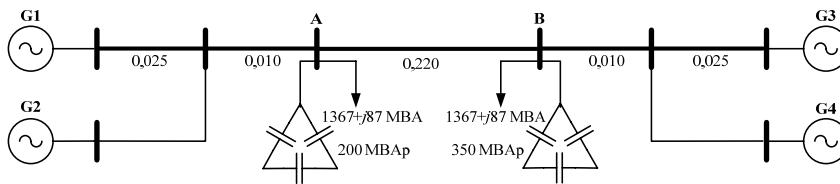


Рис. 1

для дослідження НЧК, якби коефіцієнт демпфірування на частоті 0,363 Гц відразу не був від’ємним. Тому, щоб уникнути «розхитування» у початковому режимі, було зменшено як коефіцієнти підсилення регуляторів збудження усіх генераторів ЕС, так і активне навантаження в ЕС-В, довівши значення потоку активної потужності по ПЛ_{А-В} до 170 МВт. Через 50 с після початку моделювання усталеного режиму ЕС навантаження в ЕС-В було збільшено, викликавши зростання (на 5 МВт) та незгасаючі НЧК потоку потужності по ПЛ_{А-В}. Через наступні 50 с навантаження в ЕС-В знову було збільшено на 5 МВт, призвівши до чергового збільшення потоку активної потужності по ПЛ_{А-В} з наступним повільним зростанням амплітуди НЧК (рис. 2). Вибірки даних, сформовані за результатами такого моделювання, дозволяють імітувати використання *on-line* “ковзаючого” вікна та *on-line*-ідентифікацію НЧК. Покажемо це на прикладі застосування методу Проні (МП) та алгоритму швидкого перетворення Фур’є (АШПФ). Слід зазначити, що хоча є і ефективніші (за окремими показниками) методи від МП, наприклад, *Hankel Total Least Square Method* (дещо “швидший” та робастніший), однак, враховуючи обчислю-

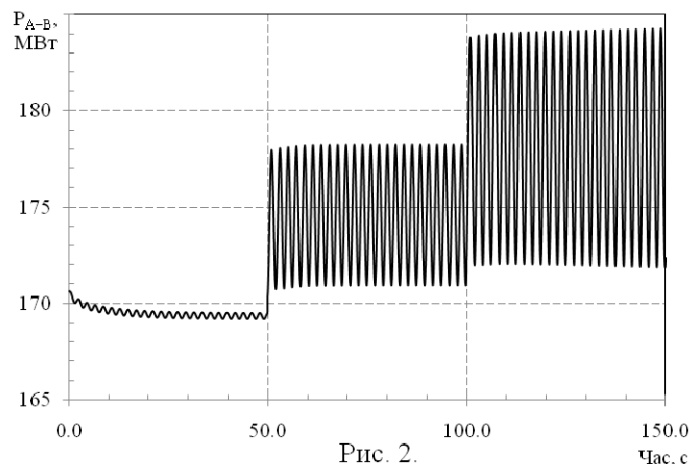


Рис. 2

вальну потужність засобів WAMS та точність вимірювання параметрів режиму, МП може успішно використовуватися для *on-line*-ідентифікації НЧК, які можуть виникати у вигляді “саморозхитування” ЕС. Суттєвий вплив на результати ідентифікації НЧК має вибір порядку моделі (від цього залежить, насамперед, кількість мод, які може бути визначено за допомогою МП): у випадку зниження порядку моделі моди з малими амплітудами і від’ємними коефіцієнтами демпфірування можуть “приховуватися” модами з більшими амплітудами і додатними коефіцієнтами демпфірування. Необгрунтоване ж підвищення порядку моделі може суттєво збільшувати час обчислень.

До вибірок даних, сформованих за результатами моделювання (рис. 2), було застосовано “ковзаючі” вікна та використано модель 20-го порядку (тим самим передбачаючи можливість ідентифікувати до десяти мод). Результати ідентифікації НЧК МП наведено в представленій нижче таблиці, де також показано і результати застосування АШПФ (який орієнтовано на аналіз періодичних сигналів). Оскільки АШПФ не дозволяє безпосередньо визначати характер демпфірування НЧК, то для цього слід проаналізувати 2 вибірки, зсунуті одна відносно одної у часі, і порівняти амплітуди (або енергії) відповідної (на певній частоті) складової. Саме так для різних часових інтервалів визначався знак коефіцієнту демпфірування, зазначений в таблиці (“> 0” або “< 0”). Для односекундних інтервалів вибірки даних, на яких параметри НЧК не могли бути визначені з використанням АШПФ, в таблиці використано позначення “-”. Час розрахунку АШПФ на інших інтервалах вибірки даних становив 10⁻⁴ с.

До вибірок даних, сформованих за результатами моделювання (рис. 2), було застосовано

| Інтервал моделюемого процесу, с | | 0–50 | | 50–100 | | | | | 100–150 | | | | |
|-----------------------------------|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|--------|--------|---------|
| Часовий інтервал даних вибірки, с | | 0–1 | 0–10 | 50–51 | 51–52 | 41–51 | 45–55 | 50–60 | 100–101 | 101–102 | 91–101 | 95–105 | 100–110 |
| Метод Проні | частота, Гц | 0,484 | 0,484 | 0,502 | 0,485 | 0,485 | 0,501 | 0,481 | 0,480 | 0,486 | 0,482 | 0,481 | 0,480 |
| | амплітуда, МВт | 0,092 | 0,161 | 2,791 | 3,600 | 0,161 | 0,163 | 3,735 | 4,387 | 5,756 | 3,769 | 3,816 | 6,032 |
| | к-т демпфірування | 0,002 | 0,002 | -0,064 | -0,003 | 0,001 | 0,003 | 0,001 | -0,102 | -0,008 | 0,049 | 0,033 | -0,007 |
| | час розрахунку, с | 0,0291 | 0,1964 | 0,0287 | 0,0286 | 0,1972 | 0,1978 | 0,1962 | 0,0279 | 0,0271 | 0,1962 | 0,1988 | 0,1977 |
| АШПФ | частота, Гц | – | 0,469 | – | – | 0,469 | 0,469 | 0,469 | – | – | 0,469 | 0,469 | 0,469 |
| | амплітуда, МВт | – | 0,234 | – | – | 0,157 | 1,986 | 3,622 | – | – | 3,551 | 4,923 | 5,911 |
| | к-т демпфірування | – | > 0 | – | – | < 0 | < 0 | < 0 | – | – | < 0 | < 0 | < 0 |

Аналіз даних таблиці дає змогу зробити певні порівняння та висновки щодо можливості застосування МП та АШФП для *on-line*-ідентифікації НЧК, які можуть виникати за квазіусталених режимів ЕС. МП дозволяє ідентифікувати НЧК і, що особливо важливо, правильно визначати коефіцієнт демпфірування, чого не можна сказати про АШФП, оскільки визначені з його допомогою параметри НЧК є досить наближеними. Суттєвим недоліком АШФП у контексті ідентифікації НЧК є його “інерційність” – з моменту виникнення НЧК має бути додатково врахована певна кількість нових “точок” (даних вибірки), щоб АШФП мав змогу надійно виокремити з сигналу складову на частоті НЧК.

1. *Буткевич А.Ф.* Некоторые методические вопросы расчета статической устойчивости сложной энергосистемы по необходимым и достаточным условиям / Препринт АН УССР. Ин-т электродинамики; № 453. – Киев, 1986. – 41 с.
2. *Буткевич О.Ф., Чижевський В.В.* Деякі аспекти моніторингу низькочастотних коливань режимних параметрів енергооб’єднань // Праці Інституту електродинаміки НАН України. Спец. вип. – 2010. – С. 72-77.
3. *Буткевич О.Ф., Чижевський В.В.* Виявлення в режимі реального часу небезпеки коливного порушення стійкості об’єднаних енергосистем // Вісник Вінницького технічного університету. – 2011. – № 6. – С. 164-167.
4. *Стогній Б.С., Сопель М.Ф., Слинко В.М., Ушаповський К.В., Пилипенко Ю.В., Тарасевич П.Й., Трофименко С.О.* Створення технічних засобів системи моніторингу перехідних режимів енергосистем та їхнє метрологічне забезпечення // Праці ІЕД НАН України. – 2007. – № 1 (16). – С. 16-22.
5. *Elbouyahyaoui L., Messaoudi A., Sadok H.* Algebraic properties of the GMRES and block Arnoldi methods // Electronic Transactions on Numerical Analysis. – 2009. – Vol. 33. – Pp. 207-220.
6. *Klein M., Rogers G.J., Kundur P.* Fundamental Study of Inter-Area Oscillations in Power Systems // Transactions on Power Systems. – 1991. – Vol. 6. – No 3. – Pp. 914-921.
7. *Kundur P.* Power System Stability and Control. – McGrawHill Inc., 1994. – 1176 p.
8. *Курьленко О., Буткевич О., Чыжевський В.* Monitoring of operational parameters of interconnected power systems / Przegląd elektrotechniczny (Electrical Review), ISSN 0033-2097, R. 88 NR 3a/2012, 25-27.

УДК 621.311

ИДЕНТИФИКАЦИЯ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ЭНЕРГОСИСТЕМЫ А.Ф.Буткевич^{1,2}, докт.техн.наук, В.В.Чижевский²

¹ – Інститут електродинаміки НАН України, пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна, e-mail: butkevych@ied.org.ua

² – Национальный технический университет Украины «КПИ», пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина.

Показана актуальность проблемы колебательного нарушения статической устойчивости энергосистем (ЭС) и идентификации в реальном времени низкочастотных колебаний режимных параметров (НЧК) ЭС. Предложен подход к реализации такой идентификации и приведен пример идентификации НЧК для тестовой модели ЭС. Библи. 8, табл. 1, рис. 2.

Ключевые слова: энергосистема, параметры режима, низкочастотные колебания, идентификация.

REAL-TIME IDENTIFICATION OF LOW-FREQUENCY OSCILLATIONS OF POWER SYSTEM'S MODE PARAMETERS

O.F Butkevych^{1,2}, V.V.Chyzevskiy²

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», Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine.

A problem urgency of the oscillatory loss of steady-state stability of power systems (PS) and real-time identification of low frequency oscillations (LFO) of PS mode parameters is showed. An approach to the implementation of such identification is proposed, and an example of LFO identification for test model of PS is presented. References 8, table 1, figures 2.

Key words: power system, mode parameters, low-frequency oscillations, identification.

1. *Butkevych O.F.* Some methodological issues of calculating the steady-state stability of complex power systems according to necessary and sufficient conditions / Preprint, USSR Academy of Sciences. Institute of Electrodynamics; No 453. – Kiev. – 1986. – 41 p. (Rus)
2. *Butkevych O.F., Chyzevskiy V.V.* Some aspects of monitoring of low-frequency oscillations of mode parameters of interconnected power systems // Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. Spetsialnyi vypusk. – 2010. – Pp. 72-77. (Ukr)
3. *Butkevych O.F., Chyzevskiy V.V.* Real-time detection of hazard of oscillatory violation of the stability of Interconnected power systems // Visnyk Vinnitskoho Politekhnichnoho Universytetu. – 2011. – No 6. – Pp. 164-167. (Ukr)
4. *Stognii B.S., Sopol M.F., Slynko V.M., Ushchapovskiy K.V., Pylypenko Yu.V., Tarasevych P.Y., Trofymenko S.O.* Creation of technical means of monitoring of transient modes of power systems and their metrological support // Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. – 2007. – No 1 (16). – Pp. 16-22. (Ukr)
5. *Elbouyahyaoui L., Messaoudi A., Sadok H.* Algebraic properties of the GMRES and block Arnoldi methods // Electronic Transactions on Numerical Analysis. – 2009. – Vol. 33. – Pp. 207-220.
6. *Klein M., Rogers G.J., Kundur P.* Fundamental Study of Inter-Area Oscillations in Power Systems // Transactions on Power Systems. – 1991. – Vol. 6. – No 3. – Pp. 914-921.
7. *Kundur P.* Power System Stability and Control. – McGrawHill Inc., 1994. – 1176 p.
8. *Курьленко О., Буткевич О., Чыжевський В.* Monitoring of operational parameters of interconnected power systems / Przegląd elektrotechniczny (Electrical Review), ISSN 0033-2097, R. 88 NR 3a/2012, 25-27.

Надійшла 24.02.2014