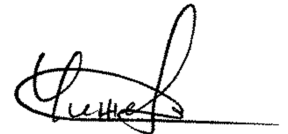


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”



ЧИЖЕВСЬКИЙ ВОЛОДИМИР ВАЛЕРІЙОВИЧ

УДК 621.311

**ОЦІНЮВАННЯ В РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ ЗАГРОЗИ КОЛИВНОГО
ПОРУШЕННЯ СТІЙКОСТІ ЕНЕРГООБ'ЄДНАННЯ**

Спеціальність 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Київ – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті електродинаміки Національної академії наук України та на кафедрі електричних мереж та систем Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки
Буткевич Олександр Федотович,
Інститут електродинаміки НАН України,
головний науковий співробітник відділу моделювання електро-
енергетичних об’єктів та систем

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
Кулик Володимир Володимирович,
Вінницький національний технічний університет МОН України,
професор кафедри електричних станцій та систем

кандидат технічних наук
Гурєв Віктор Олександрович,
науково-виробниче ТОВ “Інфотех”,
генеральний директор

Захист відбудеться “10” жовтня 2016 р. о 17⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.002.06 при Національному технічному університеті України “Київський політехнічний інститут” за адресою: 03056, Україна, м. Київ, просп. Перемоги, 37, корп. 20, ауд. 3.

З дисертацією можна ознайомитися у Науково-технічній бібліотеці ім. Г. І. Денисенка Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут” за адресою: 03056, Україна, м. Київ, пр. Перемоги, 37.

Автореферат розіслано «__» вересня 2016 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради К 26.002.06,
канд. техн. наук, доц.



В. О. Шостак

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Інтеграційні процеси, які тривають у світовій електроенергетиці з другої половини ХХ ст., призвели до створення потужних електроенергетичних об'єднань (ЕО). У таких ЕО паралельно працює багато синхронних машин (СМ) і здійснюється електропостачання великої кількості споживачів. Забезпечення стійкості режимів ЕО є основною умовою функціонування ЕО. Водночас за останні десять років в ЕО Європи, Азії та Америки було зареєстровано чимало аварій, обумовлених виникненням і подальшим посиленням електромеханічних низькочастотних коливань (НЧК) з частотою, що не перевищувала 1 Гц.

У різні роки дослідженнями причин виникнення НЧК в електроенергетичних системах (ЕС) та питаннями їх демпфірування займалися М. Klein, G. J. Rogers, P. Kundur, L. L. Grigsby, A. R. Messina, N. Kakimoto, G. Duan, G. Breulman, L. Zhang, P. Bikash та багато інших. Проте, віддаючи належне науковому рівню і глибині проведених досліджень проблеми демпфірування НЧК в ЕО (ЕС) (далі під час розгляду процесів, які можуть мати місце як в ЕО, так і в ЕС, використано абревіатуру “ЕО”), слід визнати, що задачі оцінювання в реальному часі загрози коливного порушення стійкості ЕО внаслідок виникнення НЧК та забезпечення їх надійного демпфірування і на сьогодні залишаються актуальними, що підтверджується випадками спричинених НЧК системних аварій. У разі переходу Об'єднаної енергетичної системи (ОЕС) України до паралельної роботи з ЕО країн Європи (ENTSO-E) для такого розширеного ЕО зросте актуальність проблеми унеможливлення коливного порушення стійкості внаслідок виникнення небезпечних для функціонування ЕО НЧК, оскільки у новому (розширеному) ЕО з'являться додаткові слабкі електричні зв'язки, групи СМ, вітрові електричні станції та інші чинники, які сприятимуть виникненню НЧК. До основних задач, які стоять на шляху вирішення зазначеної проблеми, належить створення засобів оцінювання в реальному часі загрози коливного порушення стійкості ЕО, викликаного виникненням НЧК. Актуальність цієї задачі і обумовила вибір теми дисертаційного дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Одержані в дисертації результати є частиною результатів виконання за участю автора в Інституті електродинаміки Національної академії наук України (ІЕД НАН України) та на кафедрі електричних мереж та систем Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут” (далі – НТУУ “КПІ”) в рамках виконання наукових проектів:

1) “Науково-технічні засади побудови та засоби практичної реалізації компонентів проблемно-орієнтованої системи моніторингу режимів об'єднаної електроенергетичної системи України” (№ ДР 0107U002100, 2007 р.) комплексної програми наукових досліджень НАН України “Науково-технічні проблеми інтеграції енергетичної системи України в Європейську енергетичну систему” (“Інтеграція”) (ІЕД НАН України);

2) “Розвиток наукових основ створення засобів моніторингу, діагностики та керування електроенергетичними системами та об'єктами” (“Діамант-2”) (№ ДР 0107U002701, 2011 р.) програми наукових досліджень НАН України “Наукові основи сучасних енергоефективних технологій генерування та перетворення електричної та теплової енергії” (ІЕД НАН України);

3) “Об.2.2 Комплекс науково-технічних засобів та заходів з підвищення рівня керованості режимів ОЕС України та запобігання виникненню системних аварій: дослідження та розробки” (№ ДР 0113U005235, 2013 р.) цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України “Науково-технічне, нормативне та інформаційне забезпечення створення гнучкої та адаптивної об'єднаної енергетичної системи України” (“Об'єднання-2”) (ІЕД НАН України);

4) “Розробка математичних моделей та методів аналізу і оптимізації розвитку основних мереж енергосистем в умовах ринкових відносин” (№ ДР 0112U002423) (НТУУ “КПІ”).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційного дослідження є підготовка ефективного математичного апарату для оцінювання в режимі реального часу загрози коливного порушення стійкості ЕО, обумовленої виникненням НЧК, розроблення і впровадження у виробництво відповідних програмних засобів.

Для досягнення поставленої мети потрібно було вирішити такі завдання:

- дослідити умови ефективного використання систем автоматичного керування збудженням (САКЗ) СМ з метою демпфірування НЧК в ЕО;
- визначити вимоги до розв’язання в режимі реального часу задачі оцінювання загрози коливного порушення стійкості ЕО та дослідити методи аналізу сигналів в аспекті їх придатності для визначення в режимі реального часу параметрів доміантних мод НЧК в ЕО;
- визначити умови використання відібраних методів та розробити відповідну процедуру для надійного оцінювання в режимі реального часу загрози коливного порушення стійкості ЕО, обумовленої виникненням НЧК;
- впровадити у виробництво розроблені програмні засоби.

Об’єктом дослідження є режими ЕС та ЕО, в яких виникають НЧК.

Предметом дослідження є методи, моделі та засоби оцінювання в режимі реального часу загрози коливного порушення стійкості ЕО.

Методи дослідження. Вирішення поставлених у дисертаційній роботі завдань ґрунтується на методах аналізу усталених та перехідних режимів ЕС, теорії стійкості, модального аналізу, методах аналізу сигналів, комп’ютерному математичному моделюванні як засобі виконання досліджень.

Достовірність теоретичних положень дисертації підтверджено збігом одержаних результатів досліджень з використанням тестових моделей ЕС (чотиримашинна ЕС, шестимашинна ЕС) з відомими результатами, одержаними з використанням зазначених моделей.

Наукова новизна одержаних результатів.

1) Вперше визначено вимоги до розв’язання в режимі реального часу задачі оцінювання загрози коливного порушення стійкості ЕО і внаслідок всебічного дослідження здійснено селекцію методів аналізу сигналів з огляду на їх придатність для розв’язання зазначеної задачі.

2) Для забезпечення надійності та адекватності оцінювання в режимі реального часу загрози коливного порушення стійкості ЕО вперше запропоновано використовувати ансамбль попередньо відібраних методів аналізу сигналів та розроблено процедуру такого використання.

3) Запропоновано та обґрунтовано новий підхід до застосування засобів ідентифікації та визначення параметрів доміантних мод НЧК у вигляді інформаційного “ядра” – основної функціональної складової інтегрованої системи демпфірування (ІСД) НЧК в ОЕС України, що забезпечить оперативність та однозначність наданих результатів складовим ІСД НЧК.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що застосування розроблених програмних засобів, які реалізують ансамбль методів ідентифікації та визначення параметрів доміантних мод НЧК, надає змогу оцінювати в режимі реального часу загрозу коливного порушення стійкості ЕО і запобігати системним аваріям, обумовленим виникненням небезпечних НЧК. Розроблені програмні засоби ідентифікації та визначення параметрів доміантних мод НЧК використано малим приватним підприємством (МПП) “Анігер” для розширення функцій комплексу програм верхнього об’єктного рівня електровимірювальних реєструючих приладів (ЕВРП) “Регіна-Ч”, які впроваджено на об’єктах ОЕС України. При подальшому впровадженні ЕВРП “Регіна-Ч” на об’єктах ОЕС України також передбачено використання зазначених програмних засобів.

Особистий внесок здобувача. Результати, наведені в дисертаційній роботі, одержано здобувачем особисто. У наукових працях, що були опубліковані у співавторстві здобувачу належать: в [1] – виконано дослідження сигналів з метою визначення частот доміантних складових НЧК тестової шестимашинної ЕС; в [2] – проведено оброблення результатів вимірювання режимних параметрів для ліній електропередачі (ЛЕП) зі складу

різних контрольованих перетинів ОЕС України з метою визначення частот доміантних мод НЧК; в [3] – досліджено методи швидкого перетворення Фур’є, спектрограми, періодограми, Велча та Томсона в аспекті можливості їх застосування для визначення параметрів складових НЧК в ЕО; в [4] – досліджено особливості застосування систем глобального моніторингу з метою підвищення ефективності демпфірування НЧК в ЕО; в [5] – визначено вимоги до формування та оброблення дискретних вибірок даних (результатів реєстрації режимних параметрів), для забезпечення виявлення в реальному часі небезпеки коливного порушення стійкості ЕО; в [7] – запропоновано використання ансамблю методів аналізу сигналів з метою забезпечення надійності та адекватності оцінювання в реальному часі загрози коливного порушення стійкості ЕО; в [8] – проведено дослідження впливу налаштувань САКЗ СМ на ефективність демпфірування НЧК; в [9] – досліджено можливість застосування методу Проні для визначення в реальному часі параметрів складових НЧК в ЕО; в [10] – запропоновано застосування ансамблю програмних засобів (що реалізують відповідні методи) ідентифікації доміантних мод НЧК як інформаційного “ядра” ІСД НЧК; в [11] – здійснено селекцію методів аналізу сигналів, призначених для надійного забезпечення інформацією складових ІСД НЧК; в [13] – проаналізовано підхід до визначення частот доміантних мод НЧК, який передбачає використання результатів синхронізованого моніторингу режимних параметрів ЕС; в [14] – здійснено оброблення результатів вимірювання режимних параметрів ЕС з метою визначення частот доміантних складових коливань; в [15] – проведено серію досліджень з метою визначення вимог до формування та оброблення результатів реєстрації (вимірювання) режимних параметрів ЕО.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на: загальноуніверситетській науково-технічній конференції молодих учених, аспірантів і студентів “Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики” (м. Київ, 2007 р.); Міжнародній конференції CIGRE “Monitoring of Power System Dynamics Performance” (м. Санкт-Петербург, Російська Федерація, 2008 р.); X-й Міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми сучасної електротехніки – 2008” (м. Київ); Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених, аспірантів і студентів “Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики” (м. Київ, 2008 р., 2013 р.); I-й Міжнародній науково-технічній конференції “Інтелектуальні енергетичні системи – ІЕС (ESS'10)” (“Фортуна”, Свалявський р-н, Закарпатська обл.); II-й Міжнародній науково-технічній конференції “Інтелектуальні енергетичні системи – ІЕС (ESS'11)” (с. Поляна, Свалявський р-н, Закарпатська обл.); XII-му Міжнародному симпозиумі “Обчислювальні проблеми електротехніки – 2011” (СРЕЕ'2011) (с. Кострина, Закарпатська обл.); I-й Міжнародній науково-технічній конференції “Оптимальне керування електроустановками” (ОКЕУ–2011) (м. Вінниця); науково-технічній конференції “Електроенергетика України – європейський шлях розвитку” (м. Київ, 2012 р.); III-й Міжнародній науково-технічній конференції “Інтелектуальні енергетичні системи – ІЕС (ESS'13)” (м. Мукачеве, Закарпатська обл.); XIII-й Міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми сучасної електротехніки – 2014” (м. Київ).

Публікації. Результати дисертаційної роботи апробовано на 11 науково-технічних конференціях (в т. ч. – 9 міжнародних) та 1 міжнародному симпозиумі. Основні положення та результати дисертаційної роботи опубліковано у 15 наукових працях, в тому числі 11 статтях у наукових фахових виданнях (6 статей у виданнях України та 1 статтю у зарубіжному виданні включено до міжнародних наукометричних баз даних (МНБД)), 2 доповідях і 2 тезах доповідей у збірниках за матеріалами міжнародних конференцій і симпозиуму.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з переліку умовних скорочень, вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, переліку посилань та додатків. Повний обсяг дисертаційної роботи становить 297 сторінок, у тому числі основний текст (160 сторінки) із 76 рисунками та 25 таблицями, перелік посилань зі 175 найменуваннями (23 сторінки) та 9 додатків (87 сторінок).

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційного дослідження, сформульовано мету та задачі дисертаційної роботи, викладено її наукову новизну та практичну цінність, наведено відомості про публікації, апробацію та впровадження основних результатів досліджень.

У першому розділі проаналізовано характер і причини виникнення НЧК в ЕО світу. За результатами аналізу доступної інформації щодо системних аварій в ЕО встановлено, що причиною частини цих аварій стало виникнення та подальший “розвиток” НЧК з частотою до 1 Гц, які створювали загрозу функціонуванню ЕО.

Традиційний підхід до визначення можливості виникнення НЧК в ЕС (ЕО) за різних схемо-режимних умов передбачає використання лінеаризованої математичної моделі ЕС (ЕО) у вигляді відповідної системи алгебро-диференціальних рівнянь та методів модального аналізу для визначення власних значень характеристичної матриці ЕС (ЕО), зокрема комплексно-спряжених $\lambda = \sigma \pm j\omega$. В модальній теорії лінійних систем $e^{\lambda_i t}$ має назву i -тої моди системи (загальна кількість мод відповідає кількості власних значень), відповідно, λ_i “представляє” i -ту моду. Кожна i -та мода характеризується рядом параметрів, зокрема амплітудою (A_i), сталою демпфірування (σ_i), частотою (ω_i), показником демпфірування ($\xi_i = -\sigma_i / (\sigma_i^2 + \omega_i^2)^{0.5}$), які може бути використано для визначення характеру НЧК в ЕО.

Розрізняють згасаючі НЧК, незгасаючі НЧК з незмінною амплітудою та незгасаючі НЧК з амплітудою, яка зростає з плином часу. Хоча безпосередню загрозу для функціонування ЕО становлять незгасаючі НЧК, амплітуда яких зростає у часі, за результатами досліджень зроблено висновок, що виявлення та контроль незгасаючих НЧК з незмінною амплітудою також є нагальною потребою, оскільки за певних умов амплітуда таких НЧК теж може зростати.

Результати аналізу причин виникнення НЧК та сучасний стан ОЕС України дають підстави вважати, що небезпечними для функціонування ОЕС України, зокрема і під час паралельної роботи з ЕО країн Європи, можуть бути міжсистемні (з частотою до 0,3 Гц), внутрішньосистемні (з частотою 0,3...1,0 Гц) та міжстанційні (з частотою до 3 Гц) електромеханічні коливання. Оскільки абсолютну більшість значних аварій в ЕО світу було спричинено міжсистемними та внутрішньосистемними НЧК, то першочергову увагу має бути приділено ідентифікації НЧК з частотами до 1 Гц. Зроблено висновок, що з метою недопущення порушень стійкості ОЕС України, які можуть спричинити такі НЧК, необхідним є створення ІСД НЧК, здатної своєчасно надійно виявляти та демпфірувати НЧК в зазначеному діапазоні частот.

Використання в режимі реального часу традиційних підходів до аналізу (оцінювання запасів) стійкості ЕО зустрічає перепони принципового характеру, обумовлені складністю забезпечення в реальному часі необхідного рівня відповідності актуальної моделі ЕО, враховуючи значення її параметрів, поточному стану ЕО. Тому в роботі використано новий підхід до розв’язання цієї задачі, в основу якого покладено аналіз сигналів – режимних параметрів ЕО, вимірюваних пристроями векторних вимірювань (наприклад, ЕВРП “Регіна-Ч”).

Для забезпечення розв’язання в режимі реального часу задачі ідентифікації мод НЧК та оцінювання загрози функціонуванню ЕО запропоновано створення у складі ІСД НЧК спеціалізованого комплексу ідентифікації та визначення параметрів (КІВП) мод НЧК, для якого визначено такі основні вимоги:

- оперативність виявлення мод НЧК у визначеному діапазоні частот;
- адекватне оцінювання таких основних параметрів складових НЧК, як ω , A , σ , ξ ;
- висока роздільна здатність аналізу сигналів за частотою для “відокремлення” (розрізнення) мод з близькими частотами;
- надійність отримання результатів визначення параметрів складових НЧК у різних експлуатаційних режимах ЕО.

У другому розділі досліджено ефективність демпфірування НЧК в ЕО за допомогою САКЗ СМ, якими на сьогодні обмежується номенклатура придатних для демпфірування НЧК в ОЕС України технічних засобів, підтверджено потребу застосування автоматичних регуляторів напруги СМ з великими коефіцієнтами підсилення за напругою лише разом з системним стабілізатором (PSS) та встановлено, що ефективність демпфірування НЧК з використанням PSS може бути суттєво підвищено завдяки адаптації параметрів їхніх налаштувань з урахуванням значень параметрів домінуючих мод НЧК, визначених засобами ІСД НЧК.

На сьогодні в ОЕС України та ОЕС (ЕС) країн пострадянського простору в експлуатації перебувають, переважно, САКЗ з автоматичними регуляторами збудження (АРЗ) сильної дії (СД), тоді як в ЕС більшості країн світу – САКЗ з конструктивно незалежними автоматичним регулятором напруги (AVR) та PSS. Сучасні АРЗ СД мають задовольняти низці вимог відповідно до СТО 59012820.29.160.20.001–2012, а для САКЗ СМ з AVR та PSS стандартом IEEE 421.5 – 2005 регламентовано три типи схем:

- DC – САКЗ зі збудником, що містить генератор постійного струму;
- AC – САКЗ зі збудником, що містить генератор змінного струму і випрямляч;
- ST – САКЗ зі збудником статичного типу.

На відміну від АРЗ СД, в AVR реалізують, переважно, пропорційний або пропорційно-інтегральний закон регулювання за похибкою (відхиленням напруги статора від заданої уставки), фазу якої коригують додатковою ланкою фазового зсуву, “вхід” від якої, як і “вхід” від PSS впливають на “вихід” AVR. З метою дослідження впливу типу САКЗ з AVR зі “штатними” та налаштовувемими значеннями параметрів на демпфірування НЧК було обрано по два “представника” кожного типу САКЗ (із найбільш широко пропонуємих виробниками): DC1A, DC2A, AC1A, AC5A, ST1A, ST2A. Зазначені дослідження проведено на основі моделей двох тестових схем (ТС) – схеми чотиримашинного ЕО (IEEE 2-area benchmark system, реалізацію моделі якої в середовищі “Matlab” наведено на рис. 1; далі – ТС-I) та схеми шестимашинної ЕС (тестова ЕС інституту “Енергосетьпроект”, м. Москва; далі – ТС-II).

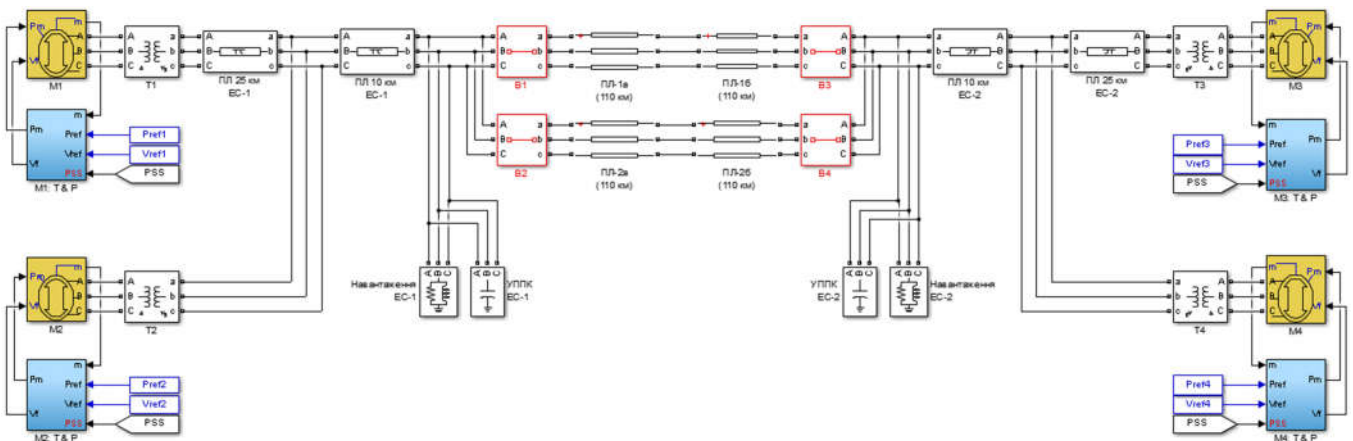


Рисунок 1 – Реалізація в середовищі “Matlab” моделі ТС-I

В моделях зазначених ЕО та ЕС СМ враховано рівняння Парка–Горєва з урахуванням одного демпферного контуру за поздовжньою віссю роторів та одного – за поперечною, з використанням пробних версій продуктів “Matlab” та “Simscape Power Systems” за таких умов:

- PSS відключено;
- граничні значення потоку потужності по МЗ (або контрольованим ЛЕП) та тривалості трифазного КЗ відповідали режиму на межі коливного порушення стійкості ЕС;

– навантаження електроспоживання змодельовано постійними значеннями активних та реактивних потужностей;

– зміна потоку потужності по МЗ (або контрольованим ЛЕП), які поєднують дві частини ЕО (ЕС), здійснювалася шляхом зміни активної потужності навантаження та перерозподілом навантажень між СГ ЕС з метою недопущення переобтяження СГ за робочим струмом статора та забезпечення резерву активної потужності на СГ, що виконує роль балансуєчого пункту.

За результатами проведених досліджень (окремі результати яких наведено в табл. 1 та табл. 2) підтверджено доцільність зменшення коефіцієнтів підсилення AVR за напругою K_A відносно регламентованих стандартом IEEE 421.5 – 2005 значень з метою покращення можливостей САКЗ СМ щодо демпфірування НЧК у різних експлуатаційних режимах ЕО (наведені в табл. 1 та табл. 2 значення K_A розраховано, виходячи з умови забезпечення відсутності по МЗ ТС-І незгасаючих НЧК, амплітуда яких зростає у часі, при передачі до ЕС-2 активної потужності $P_{гр}$, яка становить 80% від граничної потужності передачі МЗ (зокрема, для МЗ ТС-І $P_{гр}=574$ МВт)).

Таблиця 1 – Значення K_A , які забезпечують максимальний (за умови недопущення коливного порушення стійкості ЕС) потік активної потужності по МЗ ТС-І

Тип AVR САКЗ	AC1A	AC5A	DC1A	DC2A	ST1A	ST2A
K_A , що забезпечує $P_{гр}$	$2 \leq K_A \leq 31$	$2 \leq K_A \leq 85$	$1 \leq K_A \leq 39$	$2 \leq K_A \leq 1426$	$3 \leq K_A \leq 73$	$1 \leq K_A \leq 2$
K_A за IEEE 421.5 – 2005	400	400	46	300	190	120

Таблиця 2 – Значення K_A , за яких досягається максимальний час тривалості трифазного КЗ по МЗ ТС-І, що не призводить до коливного порушення стійкості ТС-І

Тип САКЗ	AC1A	AC5A	DC1A	DC2A	ST1A	ST2A
Макс. час тривалості 3-ф. КЗ, $t_{КЗ}^{\max}$, с	0,58	0,55	0,52	0,56	0,53	0,39
K_A , що забезпечує $t_{КЗ}^{\max}$	3	$3 \leq K_A \leq 4$	$3 \leq K_A \leq 8$	3	3	1
K_A за IEEE 421.5 – 2005	400	400	46	300	190	120

Зазначений висновок підтверджує наявність протиріччя у вимогах до налаштування САКЗ для реалізації двох функцій – стабілізації напруги на шинах СМ та демпфування коливань ротора СМ, оскільки виконання першої із зазначених функцій потребує швидкодіючих САКЗ з великими значеннями коефіцієнтів підсилення за відхиленням напруги статора, що викликає ефект від'ємного демпфування електромеханічних коливань ротора СМ в перехідних режимах, тим самим ускладнюючи реалізацію другої із зазначених функцій.

Зазвичай під час налаштування САКЗ проблеми ЕО, пов'язані з виникненням низькочастотних коливань у протифазі роторів окремих груп СМ, залишаються поза увагою, оскільки з метою налаштування САКЗ СМ застосовують, переважно, моделі одночастотного руху “СМ – шини нескінченної потужності (ШНП)”. За таких умов перевірка функціонування САКЗ конкретних СМ у складі відповідної моделі ЕС не завжди спроможна виявити небажані “системні ефекти”, оскільки налаштування САКЗ СМ для демпфування локальних електромеханічних коливань СМ відносно ШНП ще не гарантує демпфування коливань, частота яких близька до власних частот ЕС. Ця обставина (зокрема, в обтяжених та післяаварійних режимах ЕО) сприяє зростанню ймовірності виникнення незгасаючих НЧК, демпфірування яких із застосуванням лише наявних в експлуатації САКЗ СМ виявляється малоефективним.

Дослідження впливу PSS, наявного в структурі САКЗ СМ, на процес демпфірування НЧК здійснено для регламентованих стандартом IEEE 421.5 – 2005 PSS типів PSS1A,

PSS3B та PSS4B. За результатами досліджень, проведених за умов, аналогічних умовам попередніх досліджень, встановлено, що застосування PSS у складі САКЗ у більшості випадків надає змогу збільшити граничне значення потоку активної потужності по МЗ (або контрольованій ЛЕП) шляхом “відсунення” межі, перевищення якої призводить до виникнення незгасаючих НЧК, які з часом призводять до втрати стійкості ЕС (табл. 3), але зазначений позитивний вплив застосування PSS спостерігається не в усіх випадках.

Таблиця 3 – Граничні (за умовою недопущення коливного порушення стійкості ЕС) потоки активної потужності МЗ по ТС-I

Тип PSS	$P_{гр}$ (у кінці МЗ), МВт, у випадку САКЗ з AVR типу					
	AC1A	AC5A	DC1A	DC2A	ST1A	ST2A
Без PSS	0	528	396	>574	0	0
PSS1A	не дослідж.	не дослідж.	85	>574	>574	>574
PSS3B	509	534	>574	>574	569	540
PSS4B	>574	514	>574	>574	>574	>574

Встановлено, що наявність PSS у структурі САКЗ СМ не завжди надає змогу уникати виникнення НЧК в нормальних (за відсутності збурень) режимах роботи ЕО (так, наприклад, граничний (за умовою недопущення коливного порушення стійкості ЕС) режим роботи ЕС у випадку застосування для всіх СГ ТС-I САКЗ з AVR типу AC5A та PSS типу PSS4B супроводжувався наявністю незгасаючих НЧК з частотою, приблизно, 0,40 Гц та незмінною амплітудою близько 110 МВт).

Причиною подібних ситуацій, пов’язаних з неналежною ефективністю PSS, є, зокрема, “стандартні” (згідно зі стандартом IEEE 421.5 – 2005) налаштування PSS, які не враховують фактичних значень режимних параметрів в ЕО і не дають змоги забезпечити ефективну роботу PSS у разі значних змін нормальних та виникнення післяаварійних режимів. Широка різноманітність типів AVR у САКЗ паралельно працюючих СМ та схем електричних з’єднань реальних ЕО практично унеможлиблює вибір ефективного “універсального” типу PSS, який забезпечить надійне демпфірування НЧК в усьому спектрі робочих режимів ЕО. З урахуванням різної ефективності PSS певного типу в нормальних та перехідних режимах ефективна (з огляду на забезпечення демпфірування НЧК) робота PSS в усіх режимах ЕО з умовно постійним “набором” налаштувань параметрів є неможливою. Зважаючи на це, в роботі обґрунтовано необхідність застосовування PSS з адаптованими налаштуваннями (з урахуванням значень параметрів домінантних мод, отриманих в режимі реального часу).

Отже, важливим чинником забезпечення ефективного демпфірування НЧК за умови застосовування PSS з адаптованими параметрами є наявність актуальної інформації щодо існування НЧК у певній “точці” ЕО та щодо параметрів мод таких НЧК. Оперативне отримання такої інформації потребує застосування автоматичних засобів збору інформації, які можуть в режимі реального часу надавати зазначену інформацію засобам автоматичного керування параметрами режиму ЕО та оперативному персоналу. У свою чергу, виконання вимоги щодо забезпечення швидкого переналаштування автоматичних засобів демпфірування НЧК потребує застосування автоматичної системи визначення оптимальних параметрів налаштування. З метою виконання зазначених вимог в роботі запропоновано створення спеціалізованої ІСД НЧК (загальну структуру ІСД НЧК наведено на рис. 2, здатної в режимі реального часу на підставі результатів аналізу параметрів режиму ЕО, вимірюваних ЕВРП “Регіна-Ч”, ідентифікувати домінантні моди НЧК та сформулювати необхідні керівні впливи для забезпечення їх “придушення”).



Рисунок 2 – Загальна структура ІСД НЧК

З метою розв'язання задачі виявлення та визначення параметрів домінантних мод НЧК запропоновано створення інформаційного "ядра" – комплексу ідентифікації та визначення параметрів домінантних мод НЧК (КІВП). Отримані результати з рівня ЕВРП "Регіна-С" мають надходити до "концентратора-аналізатора" (який водночас має здійснювати функцію керування розподіленою автоматичною складовою ІСД НЧК), де передбачено виконання таких функцій:

- 1) визначення потреби керуючих впливів на САКЗ певних СГ електростанцій з метою демпфірування виявлених домінантних мод коливань;
- 2) формування та видачу сигналів керування, спрямованих на забезпечення демпфірування домінантних мод НЧК;
- 3) видачу засобам оперативної складової ІСД НЧК всієї необхідної інформації щодо виявлених небезпечних домінантних мод НЧК (надходження інформації превентивній складовій ІСД НЧК здійснюється засобами оперативної складової ІСД НЧК).

Здатність запропонованої ІСД НЧК адекватно оцінювати в режимі реального часу загрозу коливного порушення стійкості ЕО, обумовлену виникненням НЧК, та ефективність забезпечення демпфірування НЧК досліджено з використанням моделей ТС-І та ТС-ІІ. Зокрема в ТС-І за умови застосування для усіх СГ САКЗ з AVR типу АС5А та PSS типу PSS4В з налаштуваннями згідно стандарту IEEE 421.5 – 2005 у випадку збільшення потоку активної потужності в кінці МЗ до 514 МВт в ЕС виникали стійкі НЧК з незмінною амплітудою, приблизно, 110 МВт (рис. 3а). Починаючи з 50с від моменту виникнення в ЕС стійких НЧК з незмінною амплітудою було змодельовано початок роботи КІВП НЧК ІСД, в результаті чого усім PSS було надано інформацію щодо актуальної частоти домінантної моди НЧК. Починаючи з 60с від моменту виникнення коливань було змодельовано початок роботи усіх PSS з адаптованими налаштуваннями, виконаними на основі інформації щодо частоти домінантної моди, отриманої від КІВП НЧК ІСД, що надало змогу "придушити" стійкі НЧК в ЕС (рис. 3а). Тут на основі отриманої від КІВП НЧК ІСД інформації щодо фактичного значення частоти НЧК в режимі реального часу було змінено (скориговано) центральну частоту середньо-частотного (СЧ) діапазону PSS: 0,70 Гц на 0,40 Гц.

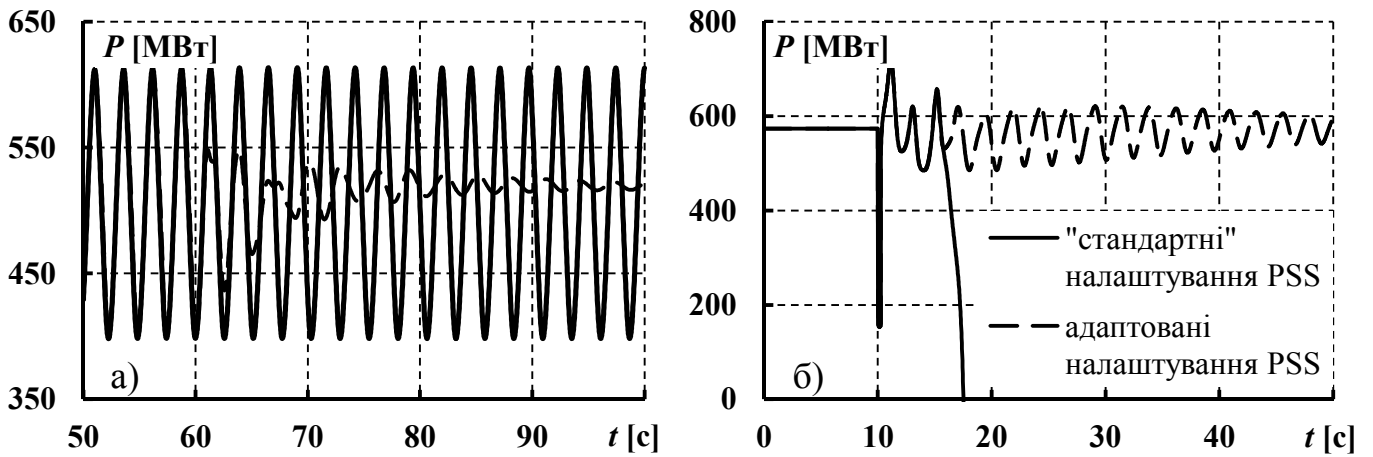


Рисунок 3 – Графіки потоку активної потужності в кінці МЗ ТС-І за умови застосування для всіх СГ САКЗ з PSS типу PSS4B зі “стандартними” та адаптованими параметрами

За результатами досліджень встановлено, що оперативність роботи автоматичної складової ІСД НЧК відіграє особливо важливу роль у випадку потреби демпфірування НЧК, причиною яких стали значні збурення в ЕО. Зокрема у випадку застосування для всіх СГ ТС-І САКЗ з AVR типу AC1A та PSS типу PSS4B трифазне КЗ тривалістю 0,28с в МЗ ТС-І спричиняє НЧК, які призводять до порушення стійкості ЕС за, приблизно, 7,5с після виникнення КЗ (рис. 3б). Для розглянутих схемно-режимних умов ТС-І експериментально визначено, що з метою запобігання зазначеному порушенню час роботи КІВП НЧК ІСД має бути не більшим від 5с, а за результатами моделювання роботи зазначеного комплексу отримано частоту доміантної моди НЧК близько 0,50 Гц, тому за 5с після зняття КЗ було імітовано перехід PSS усіх СГ на роботу з новою центральною частотою СЧ-діапазону. Тут робота PSS з новими налаштуваннями дала змогу забезпечити демпфірування НЧК, які неможливо було “придушити” за “стандартних” налаштувань PSS (рис. 3б).

Результатами експериментальних досліджень підтверджено суттєвий вплив на підвищення ефективності PSS (з огляду на необхідність забезпечення демпфірування НЧК) використання адаптованих (з урахуванням фактичних параметрів складових НЧК) налаштувань, отриманих в режимі реального часу за допомогою КІВП НЧК ІСД.

У третьому розділі відповідно до функціональних вимог КІВП НЧК ІСД виконано селекцію методів аналізу сигналів і визначено умови їх застосування з метою забезпечення надійності виявлення в реальному часі складових НЧК та адекватності визначення їхніх параметрів.

На підставі результатів проведених досліджень сформульовано основні функціональні вимоги, виконання яких мають забезпечувати засоби КІВП НЧК як інформаційного “ядра” ІСД НЧК:

- адекватність ідентифікації і точність визначення параметрів доміантних мод НЧК (що обумовлено залежністю ефективної роботи PSS від точності визначення частот доміантних мод НЧК), а також забезпечення високої роздільної здатності за частотою (що обумовлено можливістю існування в ЕО декількох мод з близькими частотами);

- надійність ідентифікації та визначення параметрів доміантних мод НЧК (що обумовлено потребою виявлення доміантних мод НЧК навіть з малими амплітудами) та стійкість до шумів (завад), наявних у реальних сигналах, реєструємих пристроями векторних вимірювань на об’єктах ЕО;

- висока швидкодія (що обумовлено необхідністю виявлення в режимі реального часу небезпечних (в аспекті стійкості ЕО) мод НЧК.

Важливою особливістю реалізації функції визначення параметрів мод НЧК в режимі реального часу є необхідність виконання аналізу вибірок даних сигналів, множина відліків яких також періодично оновлюються за принципом “першим прийшов – першим пішов”. Ширина вікна спостереження, яке використовується під час аналізу сигналів із застосуванням певного методу, має бути достатньою для отримання адекватних результатів аналізу і водночас має охоплювати якнайменший часовий інтервал з метою забезпечення необхідної оперативності ідентифікації домінуючих мод НЧК та оцінювання наявності загрози функціонуванню ЕО. Зважаючи на це, кількість відліків сигналу в певному вікні спостереження і, відповідно, тривалість (довжину) часового відрізка, який охоплює вікно спостереження (далі тривалість цього часового відрізка називатимемо шириною вікна спостереження) може бути неоднаковою як для різних методів аналізу сигналів, так і для різних вибірок даних сигналів, що відповідають різним режимам роботи ЕО.

В роботі вперше досліджено придатність (з урахуванням вимог до засобів КІВП НЧК ІСД) методів аналізу сигналів для визначення в режимі реального часу параметрів домінуючих мод НЧК. В рамках досліджень всебічно проаналізовано методи дискретного перетворення Фур’є (ДПФ), непараметричні методи (періодограми, спектрограми, Велча та Томсона), параметричні методи авторегресійної моделі (Юла–Волкера, Берга, коваріаційного та модифікованого коваріаційного) та експоненціальної моделі (багатократної класифікації сигналів, власних векторів, загальних найменших квадратів Ганкеля (HTLS), пучка матриць (MP), “класичного” та модифікованого (за сингулярними числами, що ґрунтується на методі найменших квадратів і забезпечує вищу адекватність результатів аналізу для сигналів із завадами, ніж “класичний” метод) методів Проні), а також методи вейвлет-перетворення, перетворень Стоквелла, Гільберта-Хуанга (ННТ) та їх модифікацій). З метою визначення порядку моделі сигналів для забезпечення роботи методів аналізу параметричної групи в роботі запропоновано застосування принципу *мінімальної довжини опису* (MDL), згідно якого оптимальному порядку моделі сигналу p відповідає максимальне значення розрахованого для $p = 1 \dots N$ виразу:

$$\text{MDL}(p) = -\sigma^{-2} \sum_{n=0}^{p-1} x^2[n] + p \ln N,$$

де x – значення відліків сигналу, загальна кількість яких дорівнює N ; σ^2 – дисперсія x .

Результатами досліджень доведено, що використання принципу MDL забезпечує практично прийнятний “компроміс” між взаємно суперечливими вимогами до точності та оперативності визначення порядку моделі сигналів.

Селекцію методів аналізу сигналів в аспекті їх придатності для використання в КІВП ІСД НЧК (з урахуванням зазначених функціональних вимог) виконано із застосуванням трьох синтезованих багатокомпонентних тестових сигналів (ТСГ-1–ТСГ-3), які містять складові, наявні у реальних сигналах ЕО в умовах присутності НЧК, та двох ТСГ (ТСГ-4 та ТСГ-5), отриманих в результаті моделювання певних збурень в ТС-I та ТС-II. Компонентний склад ТСГ-4 та ТСГ-5 попередньо визначено за допомогою модального аналізу, а ТСГ-1 – ТСГ-3 описано такими виразами:

– ТСГ-1: $y(t) = 100 + 2\sin(2\pi \cdot 0.1t) + 1\sin(2\pi \cdot 0.2t)$;

– ТСГ-2: $y(t) = 100 + (1+t)\sin(2\pi \cdot 0.1t) + (1+1.1t)\sin(2\pi \cdot 0.15t) + (1+1.3t)\sin(2\pi \cdot 1.5t) + (1+1.1t)\sin(2\pi \cdot 1.9t)$;

– ТСГ-3: $y(t) = 100 + (\exp(0.25t) - 1)\sin(2\pi(0.30 + 0.01t)) + A_2(t)\sin(2\pi \cdot 0.80t)$, де $A_2(t) = \exp(0.6t) - 1$, якщо $t \in [0; 5]c$; $A_2(t) = \exp(0.6 \cdot 5) - 1$, якщо $t \in (5; 6]c$; $A_2(t) = \exp(0.6 \cdot 5) - \exp(0.7t)$, якщо $t \geq 6c$.

Частота дискретизації f_d ТСГ-4 становить 60 Гц, решти ТСГ – 50 Гц; графіки ТСГ-1–ТСГ-5 наведено на рис. 4.

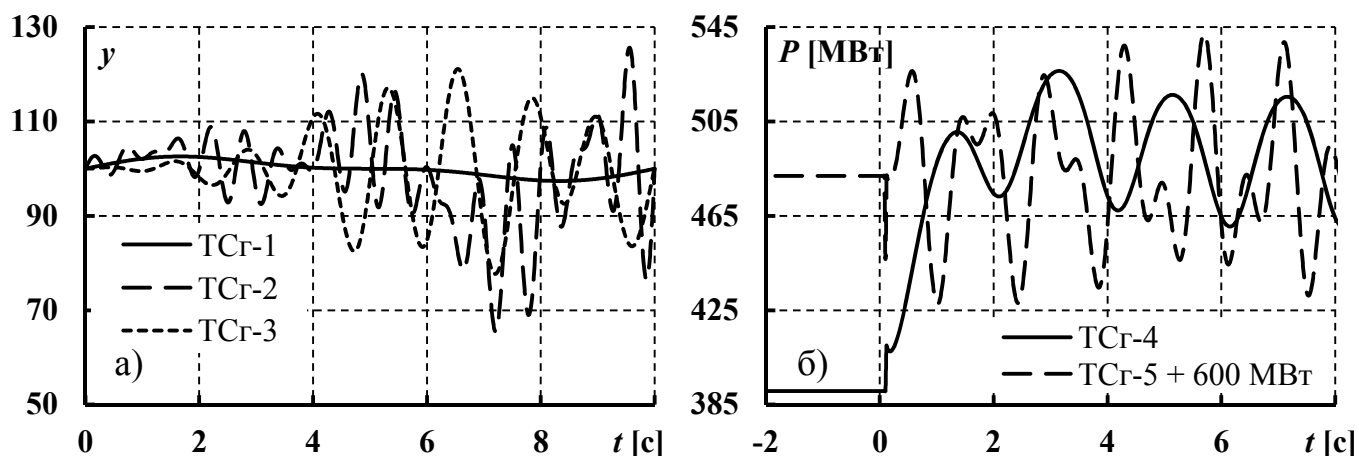


Рисунок 4 – Графіки ТСГ, застосованих з метою селекції методів аналізу для КІВП НЧК ІСД

Залучені до експериментів ТСГ забезпечили можливість проведення всебічного дослідження методів аналізу сигналів в умовах наявності в сигналах мод з малими амплітудами, мод з близькими та кратними частотами, а також зміну амплітуд мод за різними законами.

Селекцію методів аналізу сигналів здійснено з урахуванням вимог щодо:

- швидкодії – час розрахунку з використанням певного методу обмежено 1с
- точності визначення частоти НЧК – не нижче 0,05 Гц із забезпеченням роздільної здатності за частотою не гірше від 0,10 Гц.

Дослідження методів аналізу сигналів на основі ТСГ-1 – ТСГ-5 проведено із застосуванням вікон спостереження шириною від 1с до 10с. В табл. 4 наведено якісну оцінку результатів роботи найбільш ефективних методів аналізу сигналів з огляду на виконання вимог за надійністю ідентифікації мод НЧК (в табл. 4 цю вимогу позначено як “Н”), точністю визначення їх частоти (“Т”) та адекватністю визначення їх амплітуди (“А”) (символ “+” в табл. 4 означає повну відповідність методу аналізу певній вимозі, “+/-” – часткову відповідність (наприклад, було забезпечено виявлення лише частини реально існуючих складових НЧК в ТСГ або значення параметрів частини виявлених складових НЧК було розраховано з неналежною точністю), “-” – повна невідповідність певній вимозі).

Таблиця 4 – Якісна оцінка результатів роботи найбільш ефективних методів аналізу сигналів

Метод аналізу сигналів	Якісна оцінка виконання вимог до методів аналізу сигналів за результатами визначення параметрів ТСГ														
	ТСГ-1			ТСГ-2			ТСГ-3			ТСГ-4			ТСГ-5		
	Н	Т	А	Н	Т	А	Н	Т	А	Н	Т	А	Н	Т	А
HTLS	+	+	+	+	+	+/-	+	+/-	+	+/-	+	+/-	+	+	+
MP	+	+	+	+	+	+/-	+	+/-	+	+/-	+	+/-	+	+	+
Проні (“кл.”)	+	+	+	+/-	+	+	+	+	+	+/-	+	+	+/-	+	+/-
Проні (мод.)	+	+	+	+/-	+	+/-	+	+/-	+	+/-	+	+/-	+/-	+	+/-
МННТ-2	+	+	+	+/-	-	+/-	+/-	-	+/-	+/-	+	+/-	+	+/-	+/-

Внаслідок всебічного дослідження зазначених в табл. 4 методів аналізу сигналів встановлено, що функціонування інформаційного “ядра” ІСД НЧК на базі якогось одного методу не здатне забезпечити достатньої надійності ідентифікації мод НЧК та точності визначення їхніх параметрів. Тому для підвищення надійності функціонування КІВП НЧК ІСД в роботі вперше запропоновано використовувати ансамбль програмних засобів, кожен з яких реалізує відповідний метод аналізу сигналів, та процедуру узагальнення результатів аналізу, в якій враховано “сильні сторони” кожного із методів ансамблю. З метою створення зазначеного ансамблю за результатами проведених досліджень відібрано 2 групи методів аналізу сигналів:

- основна – HTLS, МР, “класичний” та модифікований методи Проні;
- референсна (допоміжна) – ДПФ та модифікація перетворення Гільберта-Хуанга (МННТ-2) (методи референсної групи мають неповну відповідність вимогам, висунутим до засобів КІВП НЧК ІСД, проте у порівнянні з методами основної групи потребують суттєво меншого часу для визначення параметрів мод НЧК).

Для відібраних методів аналізу сигналів встановлено, що:

- необхідної адекватності та оперативності визначення параметрів домінантних мод НЧК за допомогою КІВП НЧК ІСД може бути досягнуто за умови використання вікон спостереження шириною $2 \dots 5c$ з частотою дискретизації, не нижчою від частоти основної гармоніки струму;

- найвищої точності результати аналізу параметрів складових НЧК для різних методів аналізу сигналів досягають за неоднакової ширини вікна спостереження, що зумовлює доцільність забезпечення можливості використання різних методів аналізу сигналів у складі КІВП НЧК ІСД з неоднаковими за шириною вікнами спостереження;

- з метою адекватного оцінювання характеру демпфірування мод НЧК крім визначення показника демпфірування потрібно додатково відслідковувати динаміку зміни у часі амплітуди кожної моди, визначаючи “рівень небезпечності” моди з урахуванням прийнятого для мод НЧК граничного значення амплітуди;

- охоплення вікном спостереження сигналу часового відрізка, що містить момент виникнення збурення в ЕО, яке спричинило виникнення в ньому НЧК, погіршує ефективність роботи розглянутих методів аналізу сигналів, що зумовлює з метою підвищення оперативності виявлення та адекватності визначення параметрів складових НЧК потребу періодичного (з періодом від $1c$) розрахунку із залученням до цього розрахунку нових відліків даних, отриманих від пристроїв векторних вимірювань;

- з метою забезпечення адекватності результатів визначення параметрів домінантних мод НЧК будь-яким методом аналізу сигналів слід здійснювати фільтрацію “викидів” в результатах такого визначення.

Зважаючи, що для сигналів, отриманих від пристроїв векторних вимірювань за нормального режиму роботи ЕО, характерною є наявність шумів (завад) із співвідношенням “сигнал-шум” (SNR) в діапазоні $80 \dots 120$ дБ, в роботі на основі ТСг-2 з білим шумом було досліджено вплив шуму на надійність та точність визначення в режимі реального часу параметрів складових НЧК кожним методом аналізу сигналів, відібраним для реалізації в КІВП НЧК ІСД. За результатами досліджень встановлено, що у зазначеному діапазоні SNR відібрані методи аналізу сигналів забезпечують прийнятну для практичного використання точність визначення параметрів складових НЧК, хоча наявний у сигналі шум і має негативний вплив на результати визначення частот та амплітуд низькочастотних мод. Також встановлено, що точність результатів визначення параметрів складових сигналів з шумом залежить і від методу аналізу сигналів: з огляду на забезпечення адекватності визначення частот домінантних мод найменш чутливими до наявності шумів у вибірці даних сигналу виявилися методи HTLS та МР, а з огляду на забезпечення адекватності визначення амплітуд цих мод – модифікований метод Проні.

У **четвертому розділі** наведено розроблений алгоритм функціонування ансамблю методів аналізу сигналів, здійснено перевірку адекватності роботи зазначеного алгоритму із застосуванням тестового та низки зареєстрованих ЕВРП “Регіна-Ч” сигналів ЕС, а також досліджено можливість підвищення достовірності визначення параметрів домінантних

мод НЧК засобами програмного комплексу online-оцінювання загрози коливного порушення стійкості ЕО за допомогою застосування цифрової фільтрації сигналів та використання миттєвих значень параметрів режиму.

Значення параметрів визначених мод НЧК, отримані з використанням відібраних для КІВП НЧК ІСД методів аналізу сигналів, можуть дещо відрізнятися, тому в роботі було розроблено спеціальну процедуру узагальнення результатів ідентифікації та визначення параметрів доміантних мод НЧК з урахуванням таких умов:

а) під час узагальнення результатів, отриманих за допомогою певного методу аналізу сигналів, вважається, що:

1) моди з різницею частот, меншою за Δf_1 , є однією модою. Прийнято, що:

1.1) частота та амплітуда такої узагальненої моди дорівнюють відповідним параметрам моди з більшою амплітудою коливань;

1.2) характер демпфірування узагальненої моди визначається шляхом аналізу зміни у часі її амплітуди A , розрахованої (з урахуванням вимоги до оперативності виявлення мод НЧК з від'ємним демпфіруванням) для трьох послідовних вікон спостереження. Враховано, що:

1.2.1) зважаючи на можливу наявність у вибірці даних аналізованого сигналу моди зі змінною у часі частотою в $(k-2)$ -му та $(k-1)$ -му вікнах спостереження, необхідно проаналізувати амплітуди мод, що мають частоти з відхиленням до $\pm\Delta$ від частоти розглядуваної моди в k -му вікні спостереження;

1.2.2) демпфірування узагальненої моди називатимемо *стійко від'ємним* у випадку зростання її амплітуди для трьох послідовно досліджених вікон спостереження;

1.2.3) демпфірування узагальненої моди називатимемо *вірогідно від'ємним* у випадку зростання її амплітуди для першого та другого або для першого та третього вікон спостереження (останній випадок характерний для НЧК, амплітуда яких повільно збільшується у часі);

1.2.4) демпфірування узагальненої моди називатимемо *стійко додатним* у випадку зменшення її амплітуди для трьох послідовно досліджених вікон спостереження;

1.3) амплітуду узагальненої моди, меншу від порогового значення A' , до подальшого оброблення її не залучають (зазначений пункт дає можливість "відфільтрувати" в результатах аналізу низькоамплітудні складові, джерелом яких є, наприклад, шуми (завади));

1.4) амплітуду узагальненої моди, більшу від A'' , визначено хибно і до подальшого оброблення її не залучають. Значення A'' для k -го вікна спостереження становить: S_{\max} за умови $0 < S_{\min} < S_{\max}$, $|S_{\max}|$ за умови $0 > S_{\max} > S_{\min}$, $(S_{\max} - S_{\min})$ за умови $(S_{\max} > 0)$ ($S_{\min} < 0$), де S_{\max} та S_{\min} – максимальне та мінімальне значення параметра, зміну якого у часі відображає сигнал, який підлягає аналізу, в k -му вікні спостереження;

б) під час узагальнення результатів роботи усіх задіяних методів аналізу сигналів вважається, що:

1) результати, отримані із застосуванням методів основної групи, однаково достовірні;

2) моди з різницею частот, меншою за Δf_2 , є однією модою. Прийнято, що:

2.1) частота та амплітуда результуючої моди визначаються як середнє арифметичне відповідних параметрів, розрахованих із застосуванням методів аналізу сигналів основної групи (дія виконується з урахуванням результатів фільтрації мод за A' та A'' в рамках узагальнення результатів, отриманих за допомогою певного методу аналізу сигналів);

2.2) демпфірування результуючої моди вважається *стійко від'ємним*, якщо принаймні один з методів аналізу сигналів основної групи вказав на *стійко від'ємний* характер демпфірування цієї моди;

2.3) демпфірування результуючої моди вважається стійко додатним, якщо всі методи аналізу сигналів основної групи вказують на стійко додатний характер демпфірування цієї моди;

3) результуюча мода вважається реально існуючою, якщо її ідентифіковано, принаймні, двома методами аналізу сигналів основної групи або одним методом основної та одним методом референсної груп. У випадку, коли моду ідентифіковано лише одним методом основної групи, з метою підтвердження її існування виконується розрахунок параметрів сигналу із застосуванням методів референсної групи з поступовим збільшенням ширини вікна спостереження до граничного значення $T_{гр}$. Тут розрахунок параметрів складових НЧК методами референсної групи здійснюється або до отримання одним із методів підтвердження існування моди, виявленої методом основної групи, або до досягнення шириною вікна спостереження значення $T_{гр}$, після чого методи референсної групи повертаються до роботи із заданою шириною вікна спостереження $T_{зад}$;

4) результуюча мода вважається небезпечною, якщо її амплітуда перевищує $A_{гр}$.

Перевірку адекватності визначення параметрів НЧК за допомогою процедури, яка враховує зазначені умови, здійснено із застосуванням ТСг-5 та сигналів, зареєстрованих ЕВРП “Регіна-Ч” в ОЕС України під час проведення системних випробувань ОЕС України та ЄЕС Росії 21 вересня 2011 р. (графіки зареєстрованих сигналів ЗСг-1 та ЗСг-3 наведено на рис. 5).

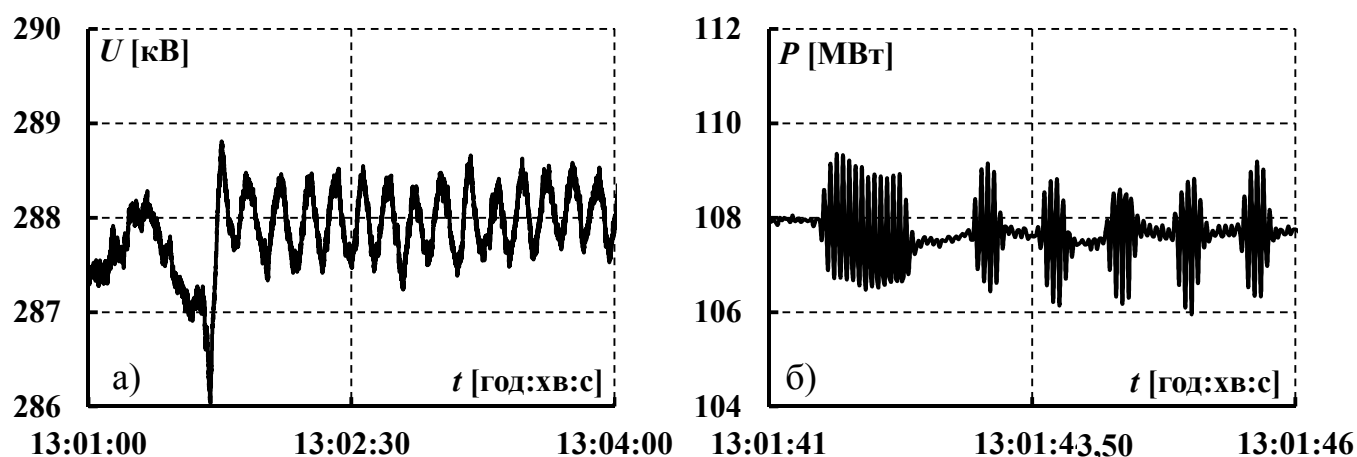


Рисунок 5 – Графіки зареєстрованих сигналів: а – ЗСг-1; б – ЗСг-3

За результатами перевірки підтверджено можливість застосування запропонованої процедури для визначення параметрів мод НЧК. Зокрема, для вибірки даних ЗСг-1 (особливістю якого є мала амплітуда коливань – до 0,35% від середнього значення режимного параметра, зміну якого у часі відображає сигнал) виявлено наявність домінантної моди НЧК з частотою, приблизно, 0,12 Гц та “епізодичну” ідентифікацію моди з частотою близько 0,61 Гц. Також встановлено можливість застосування розробленої процедури з метою узагальнення результатів ідентифікації та визначення параметрів домінантних мод НЧК з частотами поза “проблемним” діапазоном частот НЧК (зокрема, для вибірки даних ЗСг-3 виявлено наявність мод НЧК з частотами близько 16,6 Гц та 17,6 Гц із зростанням частоти другої визначеної моди до 18,6 Гц в кінцевих часових відрізках цієї вибірки даних).

За результатами аналізу зареєстрованих ЕВРП “Регіна-Ч” сигналів підтверджено негативний вплив шумів (завад) на якість результатів розрахунку параметрів складових НЧК, отримуваних внаслідок використання визначених та відібраних для роботи в КІВП НЧК ІСД методів аналізу сигналів. З метою мінімізації зазначеного негативного впливу в роботі запропоновано застосування цифрової фільтрації до кожного вікна спостереження

перед його обробленням зазначеними методами. Цифровий фільтр (з урахуванням вимог до оперативності роботи КІВП НЧК ІСД, адекватності отримуваних результатів аналізу сигналів, діапазону частот НЧК, найбільш небезпечних у аспекті стійкості ЕО) має відповідати ряду вимог:

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

Підвищення адекватності результатів визначення параметрів складових НЧК у разі застосування цифрової фільтрації підтверджено результатами оброблення даних ТСГ-1 (рис. 3а), до якого було додано “білий” шум з метою досягнення SNR у 80дБ (орієнтовне значення SNR для WAMS із цифровими каналами зв’язку за 1-2с після збурення в ЕО), та зареєстрованого ЕВРП “Регіна-Ч” ЗСГ-2. До кожного вікна спостереження цих сигналів перед їх обробленням методами аналізу сигналів було застосовано синтезований з урахуванням наведених вимог фільтр Чебишева другого роду 10-го порядку, що у випадку застосування, наприклад, “класичного” методу Проні, дало змогу виявити наявні у сигналах складові, які не було виявлено у випадку оброблення “нефільтрованих” сигналів: для ТСГ-1 було ідентифіковано складову з частотою 0,2 Гц (табл. 5), а для ЗСГ-2 – складову з частотою близько 0,5 Гц, яку було виявлено методами МР та НТЛС.

Таблиця 5 – Результати розрахунку параметрів складових ТСГ-1 з шумом

Аналізований сигнал	Часовий відрізок, с								
	0–2			1–3			2–4		
	f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ
Без фільтрації	–	–	–	–	–	–	–	–	–
З фільтрацією	0,18	0,9	0,013	0,19	1,1	0,042	0,21	0,9	0,048

Дослідження можливості підвищення адекватності отриманих внаслідок роботи КІВП НЧК ІСД результатів розрахунку параметрів складових НЧК завдяки застосуванню миттєвих значень режимних параметрів проведено з використанням п’ятикомпонентного ТСГ-2 (рис. 3а). З метою порівняння результатів визначення параметрів складових НЧК, розрахованих для вибірок даних сигналів з діючими та миттєвими значеннями режимних параметрів, для зазначеного часового відрізка було сформовано відповідні вибірки даних ТСГ-2 з частотою дискретизації $f_d=500$ Гц. За результатами дослідження визначено, що для методів НТЛС та МР оброблення вибірки даних ТСГ-2 з миттєвими значеннями надало змогу виявити у цьому сигналі існуючі компоненти з частотами близько 0,10 Гц та 0,15 Гц, чого не вдалося домогтися в результаті оброблення цими ж методами вибірки даних з діючими значеннями сигналу, проведеного для аналогічних вікон спостереження за умови однакової частоти дискретизації обох вибірок даних (табл. 6).

За результатами досліджень встановлено, що використання миттєвих значень сигналів призводить до покращення якості результатів визначення параметрів складових НЧК (насамперед – до підвищення роздільної здатності за частотою) у порівнянні з результатами, отриманими із застосуванням сигналів з діючими значеннями цих же сигналів.

Таблиця 6 – Розраховані параметри складових ТСт-2 з діючими та миттєвими значеннями

Метод аналізу	Значення	Часовий відрізок, c								
		0–2			2–4			4–6		
		$f, \text{Гц}$	A	ξ	$f, \text{Гц}$	A	ξ	$f, \text{Гц}$	A	ξ
HTLS	діючі	0,17	3,9	-0,045	0,16	8,3	-0,075	0,16	6,4	-0,049
		1,50	0,9	0,001	1,50	0,6	0,000	1,50	3,3	0,000
		1,90	0,7	0,000	1,90	1,1	0,000	1,90	3,2	0,000
	миттєві	$f, \text{Гц}$	A	ξ	$f, \text{Гц}$	A	ξ	$f, \text{Гц}$	A	ξ
		0,08	4,2	0,366	0,09	3,3	-0,014	0,11	8,5	-0,328
		0,16	4,0	-0,059	0,16	6,6	-0,098	0,17	7,0	-0,130
		1,50	0,7	0,002	1,50	3,2	0,003	1,50	4,0	0,002
		1,90	0,5	0,000	1,90	2,4	0,001	1,90	3,7	0,001

Результати виконаних досліджень було враховано під час розроблення комплексу програмних засобів, призначеного для оцінювання в режимі реального часу загрози коливного порушення стійкості ЕО, обумовленої виникненням НЧК. Враховуючи потребу паралельного функціонування програмних засобів, що реалізують ансамбль методів аналізу сигналів, під час реалізації зазначеного комплексу було використано багатопотоковий принцип виконання обчислень. Розроблені програмні засоби впроваджено у виробництво і використано МПП “Анігер” (м. Київ) для розширення функцій комплексу програм верхнього об’єктного рівня ЕВРП “Регіна-Ч”, встановлених на об’єктах ОЕС України.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв’язано актуальну науково-технічну задачу оцінювання в режимі реального часу загрози коливного порушення стійкості енергооб’єднання, обумовленої виникненням НЧК. Розв’язання задачі базується на використанні спеціально підготовленого ансамблю методів аналізу сигналів для оброблення результатів синхронізованих вимірювань параметрів режиму енергооб’єднання.

В результаті виконання дисертаційної роботи одержано такі наукові та практичні результати:

1) Досліджено умови ефективного використання систем автоматичного керування збудженням синхронних машин з метою демпфірування НЧК в енергооб’єднаннях. Встановлено, що з метою підвищення надійності демпфірування зазначених коливань доцільно застосовувати системні стабілізатори, в яких передбачена можливість адаптивних налаштувань.

2) Визначено вимоги до розв’язання в реальному часі задачі оцінювання загрози коливного порушення стійкості енергооб’єднання на базі використання методів аналізу сигналів для розрахунку параметрів домінантних мод НЧК.

3) В результаті досліджень вперше за сукупністю вимог здійснено селекцію методів аналізу сигналів, які в режимі реального часу забезпечують надійні ідентифікацію та визначення параметрів домінантних мод НЧК.

4) Запропоновано і обґрунтовано доцільність застосування інтегрованої системи демпфірування НЧК з метою недопущення коливного порушення стійкості енергооб’єднання. За результатами модельно-розрахункових досліджень доведено вищу, у порівнянні з традиційними неадаптивними САКЗ СМ, ефективність зазначеної системи.

5) Для надійного оцінювання в режимі реального часу загрози коливного порушення стійкості енергооб’єднання вперше запропоновано застосовувати ансамбль попередньо визначених методів аналізу сигналів. Розроблено і програмно реалізовано процедуру узагальнення отриманих з його використанням результатів визначення параметрів домінантних мод НЧК.

6) Встановлено та експериментально доведено, що цифрова фільтрація сигналів підвищує надійність визначення параметрів доміантних мод НЧК.

7) Встановлено та експериментально доведено, що використання миттєвих значень сигналу підвищує точність визначення (насамперед – за частотою) параметрів його складових у порівнянні з використанням діючих значень.

8) Для надійного оцінювання в режимі реального часу загрози коливного порушення стійкості ОЕС України створено програмні засоби ідентифікації та визначення параметрів доміантних мод НЧК, які впроваджено у виробництво і використано МПП “Анігер” (м. Київ) для розширення функцій комплексу програм верхнього об’єктного рівня ЕВРП “Регіна-Ч”, встановлених на об’єктах ОЕС України.

ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Буткевич О. Ф. Експериментально-модельні дослідження динамічних властивостей електроенергетичних систем / О. Ф. Буткевич, В. С. Буланая, О. Б. Рибіна, **В. В. Чижевський** // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки. Частина 4. – 2008. – С. 37–40. *Здобувачем виконано дослідження сигналів з метою визначення частот доміантних складових НЧК тестової шестимашиної ЕС.*

2. Стогний Б. С. Проблемно-орієнтований моніторинг режимов енергооб’єднання / Б. С. Стогний, А. Ф. Буткевич, Е. В. Зорин, А. В. Левконюк, **В. В. Чижевський** // Технічна електродинаміка. – 2008. – №6. – С. 52–59. (Включено до МНБД РИНЦ). *Здобувачем проведено оброблення результатів вимірювання режимних параметрів для ЛЕП зі складу різних контрольованих перетинів ОЕС України з метою визначення частот доміантних мод НЧК.*

3. Буткевич О. Ф. Деякі аспекти моніторингу низькочастотних коливань режимних параметрів енергооб’єднань / О. Ф. Буткевич, **В. В. Чижевський** // Праці Інституту електродинаміки НАН України. Збірник наукових праць. Спец. випуск. – 2010. – С. 72–77. *Здобувачем досліджено методи швидкого перетворення Фур’є, спектрограми, періодограми, Велча та Томсона в аспекті можливості їх застосування для визначення параметрів складових НЧК в ЕО.*

4. Буткевич О. Ф. Деякі питання розвитку системи керування режимами ОЕС України / О. Ф. Буткевич, А. В. Левконюк, О. Б. Рибіна, **В. В. Чижевський** // Технічна електродинаміка. Силова електроніка та енергоефективність. Частина 1. – 2010. – С. 165–168. *Здобувачем досліджено особливості застосування систем глобального моніторингу з метою підвищення ефективності демпфірування НЧК в ЕО.*

5. Буткевич О. Ф. Виявлення в режимі реального часу небезпеки коливного порушення стійкості об’єднаних енергосистем / О. Ф. Буткевич, **В. В. Чижевський** // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – №6. – С. 164–167. (Статтю включено до МНБД РИНЦ). *Здобувачем визначено вимоги до формування та оброблення дискретних вибірок даних (результатів реєстрації режимних параметрів), для забезпечення виявлення в реальному часі небезпеки коливного порушення стійкості ЕО.*

6. **Чижевський В. В.** Особливості застосування методу Проні для аналізу режимних параметрів енергооб’єднань в режимі реального часу / **В. В. Чижевський** // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – №1. – С. 54–57. (Статтю включено до МНБД РИНЦ).

7. Kyrylenko Oleksandr. Monitoring of operational parameters of interconnected power systems / Oleksandr Kyrylenko, Oleksandr Butkevych, **Volodymyr Chyzhevskiy** // Przegląd elektrotechniczny (Electrical Review). – 2012. – R.88, Nr. 3a. – P. 25–27. (Статтю включено до МНБД Scopus). *Здобувачем запропоновано використання ансамблю методів аналізу сигналів з метою забезпечення надійності та адекватності оцінювання в реальному часі загрози коливного порушення стійкості ЕО.*

8. Буткевич О. Ф. Низькочастотні коливання режимних параметрів та покращення динамічних властивостей енергосистем / О. Ф. Буткевич, О. М. Агамалов, **В. В. Чижевський** // Праці Інституту електродинаміки НАН України. Зб. наук. праць. Спец. випуск. – 2013. – С. 50–60. *Здобувачем проведено дослідження впливу налаштувань САКЗ СМ на ефективність демпфірування НЧК.*

9. Буткевич О. Ф. Ідентифікація в реальному часі низькочастотних коливань параметрів режиму енергосистеми / О. Ф. Буткевич, **В. В. Чижевський** // Технічна електродинаміка. – 2014. – № 4. – С. 35–37. (Статтю включено до МНБД Scopus). *Здобувачем досліджено можливість застосування методу Проні для визначення в реальному часі параметрів складових НЧК в ЕО.*

10. Буткевич О. Ф. Деякі питання побудови інтегрованої системи запобігання коливальному порушенню стійкості об'єднаної енергосистеми / О. Ф. Буткевич, **В. В. Чижевський** // Енергетика: економіка, технологія, екологія. – 2015. – № 3. – С. 28–36. (Статтю включено до МНБД РИНЦ). *Здобувачем запропоновано застосування ансамблю програмних засобів (що реалізують відповідні методи) ідентифікації домінуючих мод НЧК як інформаційного “ядра” ІСД НЧК.*

11. Буткевич О. Ф. Оцінювання та зменшення в режимі реального часу небезпеки коливного порушення стійкості об'єднаної енергосистеми / О. Ф. Буткевич, **В. В. Чижевський** // Технічна електродинаміка. – 2015. – № 6. – С. 46–52. (Статтю включено до МНБД Scopus). *Здобувачем здійснено селекцію методів аналізу сигналів, призначених для надійного забезпечення інформацією складових ІСД НЧК.*

12. **Чижевський В. В.** Низькочастотні коливання в електроенергетичних системах: напрямки вирішення проблеми / **В. В. Чижевський** // Тези доповідей за матеріалами Загальноуніверситетської науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики, 19 листопада 2007 р., м. Київ. – 2007. – С. 93–94.

13. **Чижевський В. В.** Покращення якості керування енергосистемами за допомогою результатів синхронізованого моніторингу режимів електроенергетичних систем / **В. В. Чижевський**, А. В. Левконюк // Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики, 27 листопада 2008 р., м. Київ. – 2008. – С. 197–198. *Здобувачем проаналізовано підхід до визначення частот домінуючих мод НЧК, який передбачає використання результатів синхронізованого моніторингу режимних параметрів ЕС.*

14. Kyrylenko Oleksandr. About one approach to the monitoring of Interconnected Power System's operational condition parameters / Oleksandr Kyrylenko, Oleksandr Butkevych, **Volodymyr Chyzhevskiy** // Матеріали XII міжнародного симпозіуму “Обчислювальні проблеми електротехніки – 2011”, 5–7 вересня 2011 р., с. Кострина, Закарпатська обл. – С. 40. *Здобувачем здійснено оброблення результатів вимірювання режимних параметрів ЕС з метою визначення частот домінуючих складових коливань.*

15. Буткевич О. Ф. Проблема коливного порушення стійкості енергооб'єднань та демпфування низькочастотних коливань режимних параметрів / О. Ф. Буткевич, **В. В. Чижевський**, О. Б. Вайнштейн // Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики, 2–6 грудня 2013 р., м. Київ. – 2013. – С. 154–155. *Здобувачем проведено серію досліджень з метою визначення вимог до формування та оброблення результатів реєстрації (вимірювання) режимних параметрів.*

АНОТАЦІЇ

Чижевський В. В. Оцінювання в режимі реального часу загрози коливного порушення стійкості енергооб'єднання. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи. – Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут” Міністерства освіти та науки України, Київ, 2016.

У дисертаційній роботі запропоновано підхід до розв'язання актуальної науково-технічної задачі оцінювання в режимі реального часу загрози коливного порушення стійкості енергооб'єднання (ЕО), обумовленої виникненням низькочастотних коливань (НЧК), який базується на застосуванні методів аналізу сигналів для оброблення результатів вимірювань параметрів режиму ЕО пристроями векторних вимірювань.

За сукупністю вимог здійснено селекцію методів аналізу сигналів, які в режимі реального часу здатні забезпечити визначення параметрів доміантних мод НЧК.

Для надійного оцінювання в режимі реального часу загрози коливного порушення стійкості ЕО вперше запропоновано застосовувати ансамбль попередньо відібраних та налаштованих методів аналізу сигналів, розроблено процедуру узагальнення отриманих з його використанням результатів визначення параметрів доміантних мод НЧК.

Експериментально доведено, що цифрова фільтрація сигналів до їх оброблення ансамблем методів аналізу сигналів, а також використання миттєвих значень сингалу підвищує надійність та точність визначення параметрів доміантних мод НЧК.

Запропоновано і обґрунтовано доцільність застосування інтегрованої системи демпфірування НЧК з метою недопущення коливного порушення стійкості ЕО.

Ключові слова: енергооб'єднання, низькочастотні коливання, стійкість, демпфірування, методи аналізу сигналів.

Chyzhevskiy V. V. Real-time evaluation of a menace of power union's oscillating instability. – The Manuscript.

The dissertation for the scientific degree of Candidate of technical sciences in the specialty 05.14.02 – electrical power plants, networks and systems. – National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute” Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2016.

In this thesis an approach to the solution of actual scientific and technical problem of real-time evaluation of a menace of power union's oscillating instability due to arising of low frequency oscillations (LFO) is proposed. This approach based on using of specially prepared ensemble of signals' analysis methods for processing of results of synchronized measuring of power union's state parameters.

With complex of requirements the selection of methods for real-time identification of LFOs' parameters is made.

Necessity of using of power system stabilizers with settings adopted to the actual frequency values of LFOs' dominant modes for increasing of reliability of LFOs' damping in LFOs' integrated damping system is found out.

Using of ensemble of previously selected signals' analysis methods for reliable real-time evaluation of a menace of power union's oscillating instability is proposed for the first time. The procedure for generalization of parameters estimation results of LFOs' dominant modes obtained from the proposed ensemble of signals' analysis methods is developed.

Increasing of the precision and estimation reliability of the parameters of LFOs' dominant modes by means of using of instantaneous values of the signal and digital filtering of the signals before their processing with the ensemble of signals' analysis methods is experimentally proved.

Keywords: power union, low frequency oscillations, stability, damping, signals' analysis methods.

Чижевский В. В. Оценивание в режиме реального времени угрозы колебательного нарушения устойчивости энергообъединения. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – электрические станции, сети и системы. – Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт” Министерства образования и науки Украины, Киев, 2016.

В диссертационной работе предложен подход к решению актуальной научно-технической задачи оценивания в режиме реального времени угрозы колебательного нарушения устойчивости энергообъединения (ЭО), обусловленного возникновением низкочастотных колебаний (НЧК), основанный на использовании специально подготовленного ансамбля методов анализа сигналов для обработки результатов синхронизированных измерений параметров режима ЭО.

Приведены результаты выполненных с использованием цифровых моделей тестовой энергосистемы и ЭО экспериментов по исследованию условий эффективного использования систем автоматического управления возбуждением синхронных машин (СМ) для демпфирования НЧК в ЭО. Установлено, что с целью повышения надёжности демпфирования НЧК необходимо использование системных стабилизаторов (PSS) с настройками, “ориентированными” на фактические значения частот доминирующих мод НЧК.

Определены требования к решению в режиме реального времени задачи оценивания угрозы колебательного нарушения устойчивости ЭО с использованием результатов измерения режимных параметров ЭО и методов анализа сигналов для расчёта параметров доминирующих мод НЧК.

Предложено использование интегрированной системы демпфирования НЧК с целью недопущения колебательного нарушения устойчивости ЭО и обоснована целесообразность её применения. На основании результатов модельно-расчётных исследований подтверждена более высокая эффективность предложенной системы по сравнению с традиционными неадаптивными системами автоматического управления возбуждением СМ.

Впервые с целью надёжного оценивания в режиме реального времени угрозы колебательного нарушения устойчивости ЭО предложено использовать ансамбль предварительно отобранных методов анализа сигналов. Впервые по совокупности требований для создания указанного ансамбля осуществлена селекция методов анализа сигналов, обеспечивающих в режиме реального времени надёжные идентификацию и определение параметров доминирующих мод НЧК, в результате которой отобраны методы анализа сигналов, объединённые в 2 группы: основную (метод общих наименьших квадратов Хенкеля, метод пучка матриц, “классический” и модифицированный (с применением разложения по сингулярным числам, базирующемся на методе наименьших квадратов) методы Прони) и референсную (методы, базирующиеся на дискретном преобразовании Фурье и модифицированном (с использованием всего одной интерполяции при расчёте среднего значения обводящей в каждом отсеивании в процессе итерационного определения функций собственных мод) преобразовании Гильберта-Хуанга). Экспериментально доказано, что порядок модели анализируемых с целью определения параметров доминирующих мод НЧК сигналов может быть адекватно и оперативно определён с применением принципа минимальной длины описания (MDL).

Установлено, что с целью адекватного оценивания характера демпфирования мод НЧК вместе с определением показателя демпфирования необходимо дополнительно

отслеживать динамику изменения во времени амплитуды каждой моды. Экспериментально определено, что необходимая адекватность (точность) и оперативность определения параметров доминирующих мод НЧК может быть достигнута при условии использования окон наблюдения длительностью 2...5с при частоте дискретизации значений выборки данных не ниже частоты основной гармоники промышленного тока.

Разработан алгоритм и программно реализована процедура обобщения результатов определения параметров доминирующих мод НЧК, полученных с применением ансамбля методов анализа сигналов.

Установлено и экспериментально доказано повышение надёжности определения параметров доминирующих мод НЧК в случае проведения цифровой фильтрации результатов измерения режимных параметров ЭО, полученных с помощью устройств векторных измерений, до их обработки ансамблем методов анализа сигналов.

Установлено и экспериментально доказано повышение точности определения параметров составляющих НЧК (прежде всего, при определении частоты доминирующих мод НЧК) в случае использования мгновенных значений сигнала по сравнению с использованием для этой цели действующих значений этого же сигнала.

Разработаны программные средства идентификации и определения параметров доминирующих мод НЧК с целью надёжного оценивания в режиме реального времени угрозы колебательного нарушения устойчивости ОЭС Украины. Указанные программные средства внедрены в эксплуатацию и использованы малым частным предприятием “Анигер”(г. Киев, Украина) с целью расширения функций комплекса программ верхнего объектного уровня электроизмерительных регистрирующих приборов “Регіна-Ч”, установленных на объектах Объединённой энергетической системы Украины.

Ключевые слова: энергообъединение, низкочастотные колебания, устойчивость, демпфирование, методы анализа сигналов.

Підп. до друку 06.09.2016 р. Формат $60 \times 84 \frac{1}{16}$. Папір офс. Гарнітура Times.
Спосіб друку – ризографія. Ум. друк. арк. **, *. Обл.-вид. арк. **, *. Наклад 150 пр.
Зам. № 16-***

Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут”
Видавництво “Політехніка”
Свідоцтво ДК № 1665 від 28.01.2004 р.
03056, Київ, вул. Політехнічна, 14, корп. 15
тел. (44) 406-81-78