**ЗМІСТ**

|  |  |
| --- | --- |
| Перелік умовних скорочень………..……………………………………………….. | 5 |
| Вступ………………………………………………………………………………… | 8 |
| 11Проблема низькочастотних коливань режимних параметрів в енерго-об’єднаннях ………………………………………………………………………… | 13 |
| 1.1 Загальна характеристика проблеми………………………………………..... | 13 |
| 1.2 Низькочастотні коливання, небезпечні в аспекті стійкості ЕО…………… | 16 |
| Висновки по розділу 1…………………………………………………………….. | 32 |
| 21Демпфірування низькочастотних електромеханічних коливань в енерго-об’єднаннях ……………………………...................................................................... | 33 |
| 2.1 Засоби демпфірування НЧК в ЕО…………………………………………….. | 33 |
| 2.2 Демпфірування НЧК в ЕО за допомогою САКЗ СМ……………………..... | 42 |
| Висновки по розділу 2…………………………………………………………….. | 87 |
| Загальні висновки………………………………………………………………………. | 89 |
| Список використаних джерел……………….……………………………………….. | 92 |
| Додаток А Параметри чотиримашинної тестової схеми ЕС………………………. | 98 |
| Додаток Б Лістинги розрахункових функцій ………………………………………. | 101 |
| Додаток В Результати перевірки дисертації на плагіат………………………........ | 104 |

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| АРЗ | – | автоматичний регулятор збудження |
| АРЗ СД | – | автоматичний регулятор збудження сильної дії |
| БП | – | балансуючий пункт |
| ВП | – | вейвлет-перетворення |
| ВТФ | – | вейвлетотвірна функція |
| ДПФ | – | дискретне перетворення Фур’є |
| ЕВРП | – | електровимірювальний реєструвальний прилад |
| ЕО | – | електроенергетичне об’єднання |
| ЕРС | – | електрорушійна сила |
| ЕС | – | електроенергетична система |
| ЕСт | – | електростанція |
| ЄЕС | – | Єдина електроенергетична система |
| ЗСг | – | зареєстрований сигнал |
| AIC | – | Akaike’s Information Criterion – інформаційний критерій Акаікі |
| AVR | – | Automatic Voltage Regulator – автоматичний регулятор напруги |
| CSC | – | Convertible Static Compensator – обертовий статичний компенсатор |
| EEF | – | Exponentially Embedded Family – експоненціально вбудоване сімейство |
| EMD | – | Empirical Mode Decomposition – емпіричне розвинення за модами |
| EV | – | EigenVector (method) – (метод) власних векторів |
| ENTSO–E | – | European Network of Transmission System Operators for Electricity – Європейська мережа системних операторів передачі електроенергії |
| FACTS | – | Flexible Alternating Current Transmission Systems – гнучкі системи передачі змінного струму |
| GPS | – | Global Positioning System – система глобального позиціонування |
| IMF | – | Intrinsic Mode Function – функція власних мод |
| HHT | – | Hilbert-Huang Transform – перетворення Гільберта-Хуанга |

**ВСТУП**

**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, А. R. Messina, N. Каkіmoto, 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, викликаної 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 на кафедрі електричних мереж та систем Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” в рамках виконання наукового проекту “Розробка математичних моделей та методів аналізу і оптимізації розвитку основних мереж енергосистем в умовах ринкових відносин” (№ ДР 0112U002423).

**Мета і завдання 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 ЕС (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 домінантних 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 цих 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 домінантних 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 домінантних 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 домінантних 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.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи і результати досліджень доповідалися і обговорювалися на:

* загальноуніверситетській науково-технічній конференції молодих учених, аспірантів і студентів “Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики” (19 листопада 2007 р., м. Київ);
* Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених, аспірантів і студентів “Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики” (27 листопада 2008 р., м. Київ);

**Публікації.** Основні положення та результати дисертаційної роботи опубліковано у двох наукових працях:

1. Буткевич О. Ф. Виявлення в режимі реального часу небезпеки коливного порушення стійкості об’єднаних енергосистем [Електронний ресурс] / О. Ф. Буткевич, В. В. Чижевський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 6. – C. 164–167. – ISSN 1997–9266. – Режим доступу : http://visnyk.vntu.edu.ua/article/ download/1788/3922
2. Буткевич О. Ф. Деякі аспекти моніторингу низькочастотних коливань режимних параметрів енергооб’єднань [Текст] / О. Ф. Буткевич, В. В. Чижевський // Праці Інституту електродинаміки НАН України. Зб. наук. праць. Спец. вип. – 2010. – C. 72–77. – ISSN 1727–98952 тезах доповідей у збірниках за матеріалами міжнародного симпозіуму та загальноуніверситетської конференції.

**1 ПРОБЛЕМА НИЗЬКОЧАСТОТНИХ КОЛИВАНЬ РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ В ЕНЕРГООБ’ЄДНАННЯХ**

* 1. **Загальна характеристика проблеми**

Розвиток світової електроенергетики протягом останнього півстоліття характеризувався утворенням потужних ЕО. Зокрема, в цей період в Європі було створено транснаціональні ЕО NORDEL (ЕС Фінляндії, Швеції, Норвегії та Східної Данії), BALTSO (ЕС Естонії, Латвії та Литви), UKTSOA (ЕС Англії, Шотландії та Уельсу), ATSOI (ЕС Ірландії та Північної Ірландії), UCTE (ЕС 25 країн Європи), які в подальшому об’єдналися в континентальне ЕО ENTSO–E [53]. Зазначені процеси інтеграції національних ЕС (ЕО) з утворенням транснаціональних ЕО мають місце в усьому світі і обумовлені низкою технологічних та економічних переваг великих ЕО в порівнянні з національними ЕС та ОЕС.

Дослідження динамічних властивостей ЕС (ЕО) потребує застосування відповідної математичної моделі, яка являє собою систему звичайних нелінійних диференціальних та алгебричних рівнянь. Зазвичай для дослідження процесів виникнення НЧК порядок диференціальних рівнянь в такій системі зводять до першого з отриманням системи вигляду

, (1.1)

де *х* – вектор змінних стану (містить, переважно, параметри стану СМ – кути роторів, кутові швидкості, електрорушійні сили (ЕРС) тощо);

*u* – вектор керівних впливів;

*у* – вектор вихідних (результуючих) сигналів, які показують результат керівних впливів;

*F*, *G* – відповідно, диференціальні рівняння першого порядку та алгебричні функції від *х* та *и* [101, 134].

Систему (1.1) широко застосовують під час проведення досліджень властивостей ЕС та ЕО з метою запобігання порушень їх функціонування, зокрема і тих, які пов’язані з виникненням НЧК режимних параметрів [110, 135, 142]. Проте, не дивлячись на проведені численні дослідження, такі порушення постійно мають місце. Наприклад, НЧК режимних параметрів спостерігалися в ЕС та ЕО таких країн:

* Англія – Шотландія (1980 р.) – частота коливань близько 0,5 Гц [123];
* Тайвань (1984 р., 1989 р., 1990 р., 1991р., 1992 р.) – частота коливань у діапазоні 0,78…1,05 Гц [68, 123];
* Іспанія – Німеччина (16 грудня 1996 р.) – частота коливань у діапазоні 0,20…0,26 Гц [39];
* Захід США – Канада (10 серпня 1996 р.) – частота коливань близько 0,22 Гц (результатом порушення було припинення паралельної роботи зазначених ЕС) [123].

Результати виконаних досліджень із застосуванням моделювання електро-механічних перехідних процесів в ОЕС України свідчать про наявність низько-частотних (з частотами 0,40…1,25 Гц) складових у коливаннях потоків активної потужності по ЛЕП системотвірної електричної мережі [25]***.***

* 1. **Низькочастотні коливання, небезпечні в аспекті стійкості ЕО**

В аспекті оцінювання загрози НЧК з огляду на стійкість ЕО (ЕС) серед параметрів складових НЧК найбільш інформативним є показник демпфірування. З огляду на значення

показника демпфірування в ЕС (ЕО) розрізняють такі типи НЧК [57, 122]:

* згасаючі (амплітуда зменшується з плином часу);
* незгасаючі з незмінною амплітудою;
* незгасаючі з амплітудою, яка зростає з плином часу.

Прикладом згасаючих НЧК в ЕС (ЕО) є коливання, зареєстровані в ЕО США та Канади 14 серпня 2003 р. Частота згасаючих НЧК у перетині “Нью-Йорк – Онтаріо”, причиною виникнення яких стало відключення ЛЕП з номінальною напругою 345 кВ, становила близько 0,3 Гц. Графік зміни з часом потоку активної потужності по зазначеному перетину наведено на рис. 1.1 [57].

Незгасаючі НЧК з незмінною амплітудою мають нульовий показник демпфірування і можуть виникати з тих самих причин, що і згасаючі НЧК. На практиці засоби, які застосовують в ЕС (ЕО) для демпфірування НЧК, не завжди здатні забезпечити їх надійне демпфірування, що викликає потребу втручання оперативного персоналу [34].

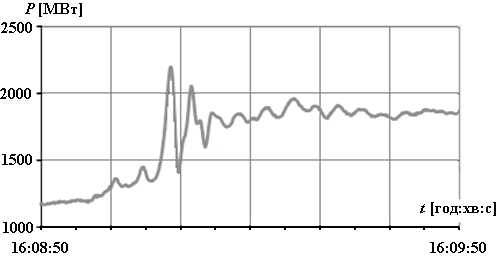


Рисунок 1.1 – Приклад згасаючих НЧК

Незгасаючі НЧК з незмінною амплітудою є досить небезпечними, оскільки їх тривале існування підвищує ймовірність порушення стійкості ЕС (ЕО). Прикладом незгасаючих НЧК з незмінною амплітудою в ЕС (ЕО) є коливання, які спостерігалися 9 лютого 2011 р. в ЕО ENTSO–E протягом декількох хвилин. На рис. 1.2 наведено графіки зміни потоків активних потужностей по чотирьох ЛЕП, які з’єднують ЕС Італії та Швейцарії [34]. Частота незгасаючих НЧК тут становить близько 0,25 Гц. Причину виникнення зазначених НЧК визначено не було.

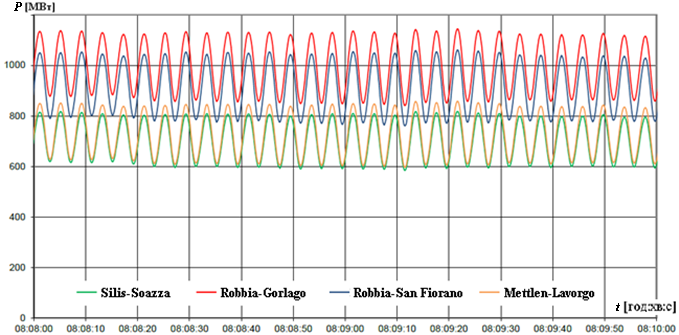


Рисунок 1.2 – Приклад незгасаючих НЧК з незмінною амплітудою

**Висновки по розділу 1**

1. За результатами ретроспективного аналізу системних аварій в ЕС (ЕО) країн світу встановлено, що причиною частини зазначених аварій стало виникнення та подальший “розвиток” низькочастотних (з частотою до 3 Гц) коливань режимних параметрів, які створювали загрозу для стійкої роботи ЕС (ЕО). Виявлено, що з огляду на ймовірність спричинення зазначеного порушення стійкості найбільш небезпечними є НЧК з частотами до 1 Гц.
2. Показано, що наявні в ЕО засоби, призначені для демпфірування НЧК, не завжди здатні забезпечити ефективне виконання зазначеної функції.
3. Для оцінювання в реальному часі загрози коливного порушення стійкості ОЕС України необхідно створити відповідні засоби, що забезпечуватимуть необхідні оперативність та точність визначення параметрів складових НЧК і надійність вище-зазначеного оцінювання. Такі засоби мають використовувати результати синхронізованих вимірювань параметрів режиму ЕО електровимірювальними реєструючими приладами “Регіна-Ч”.

**2 дЕМПФІРУВАННЯ НИЗЬКОЧАСТОТНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ КОЛИВАНЬ В ЕНЕРГООБ’ЄДНАННЯХ**

1. **Демпфірування НЧК в ЕО за допомогою САКЗ СМ**

Відомо, що активну потужність, яка передається по МЗ, може бути визначено за виразом:

, (2.1)

де *U*1, *U*2 – модулі напруги пунктів, поєднаних МЗ, кВ;

*x* – реактивний (або еквівалентний реактивний) опір МЗ, Ом;

δ – кут між векторами напруги пунктів, які поєднує МЗ, ел. град. [28].

За умови, що напруги на початку та в кінці МЗ становлять, відповідно, *U*1=332,3∠–2,4º та *U*1=328,3∠–6,5º, а реактивний опір МЗ становить 32,6 Ом, отримаємо:



Можна показати, що максимальну активну потужність, яку можна передати до кінця МЗ, з урахуванням всіх параметрів симетричної П-подібної заступної схеми ЛЕП необхідно розраховувати так:

, (2.2)

де *r* – активний опір ЛЕП (Ом);

*g* – активна провідність ЛЕП (См).

Аналіз (2.2) дає змогу зробити висновок, що гранична потужність передачі МЗ змінюється разом зі зміною рівнів напруги на початку та в кінці МЗ, які відбуваються внаслідок зміни навантаження цього МЗ.

В табл 2.1 представлено результати досліджень з визначення граничного потоку активної потужності *Р*гр по МЗ 7–9 для тестової схеми ТС-І, параметри якої наведено в Додатку А.

Таблиця 2.1 – Граничні (за умовою недопущення коливного порушення стійкості ЕС) потоки активної потужності МЗ у ТС-І з параметрами AVR САКЗ всіх СГ згідно з [72]

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Параметри | | Тип AVR САКЗ | | | | | | |
| АС1А | АС5А | DC1A | DC2A | ST1A | ST2A | АРЗ СД за [9] |
| *Р*СГ, МВт (*І*СГ, в. о.) | 1 | 700 (0,779) | 800\* (0,912) | 700 (0,785) | 850\* (0,981) | 700 (0,779) | 700 (0,779) | 700 (0,779) |
| 2 | 293 (0,331) | 782 (0,925) | 718 (0,821) | 798 (0,982) | 293 (0,331) | 293 (0,331) | 293 (0,331) |
| 3 | 719 (0,800) | 719 (0,811) | 719 (0,805) | 719 (0,817) | 719 (0,800) | 719 (0,800) | 719 (0,800) |
| 4 | 700 (0,778) | 700 (0,806) | 700 (0,784) | 700 (0,827) | 700 (0,778) | 700 (0,778) | 700 (0,778) |
| Модулі напруги на початку та в кінці МЗ, кВ | п | 236,6 | 218,9 | 228,0 | 213,2 | 236,6 | 236,6 | 236,6 |
| к | 237,7 | 223,4 | 230,5 | 219,0 | 237,7 | 237,7 | 237,7 |
| *Р*гр (у кінці МЗ), МВт | | 0 | 528 | 396 | >574 | 0 | 0 | 0 |
| 0,8*Р*'max 2 за (2.4б), МВт | | 693 | 601 | 646 | 574 | 693 | 693 | 693 |

**Примітка.** Перерозподіл навантаження між СГ відносно вихідного розподілу (табл. А.4 додатку А) з метою недопущення переобтяження СГ за робочим струмом статора та забезпечення резерву активної потужності на СГ–БП.

За аналогією з наведеними в [23] вимогами до мінімального коефіцієнта запасу за активною потужністю МЗ у нормальному режимі роботи ЕС, під час проведення досліджень завантаження МЗ 7–9 було обмежено 0,8*Р*'max 2.

Синхронний генератор, що працює паралельно з ЕС, являє собою коливну структуру. Електричну потужність СМ *Ре* створюють обертові магнітні поля ротора і статора, зміщені на кут ротора δ*SM*, а потужність, передану навантаженню, визначають за фазовим кутом δ*S* між напругою генератора і напругою ЕС (рис. 2.1а).

Непараметричні методи аналізу сигналів не застосовують з метою розрахунку спектра жодних припущень щодо моделі аналізованого сигналу, тому визначення його параметрів здійснюється виключно на основі інформації, яку містять відліки сигналу. До непараметричних методів аналізу належать періодограма, спектрограма, методи Велча (Welch) та Томсона (Thomson) [22]. Графіки спектральної густини потужності вибірки даних ТСг-1, отримані із застосуванням періодограми, спектрограми, методів Велча та Томсона, наведено на рис. 2.2.

Для забезпечення розв’язання в режимі реального часу засобами ІСД НЧК задач виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх складових було всебічно досліджено та відібрано методи аналізу сигналів для основної та референсної груп (ансамблів). Рисунок 2.1. Векторні діаграми: а – CГ; б – PSS

Рисунок 2.2 – Графіки СГП вибірки даних ТСг-1, отримані із застосуванням періодограми, спектрограми, методів Велча та Томсона

Використання зазначених методів аналізу сигналів може давати дещо різні значення параметрів визначених мод НЧК, тому в дисертаційній роботі було розроблено процедуру узагальнення результатів виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх домінантних мод 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 Δ*f*1, є однією модою. Прийнято, що:
   1. частота та амплітуда такої узагальненої моди дорівнюють відповідним параметрам моди з більшою амплітудою коливань;
   2. характер демпфірування узагальненої моди визначається шляхом аналізу зміни у часі її амплітуди *А*, розрахованої (з урахуванням вимоги до оперативності виявлення мод НЧК з від’ємним демпфіруванням) для трьох послідовних вікон спостереження. Враховано, що:
      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 розглянути амплітуди мод, що мають частоти з відхиленням до ±Δ від частоти розглядуваної моди в *k*-му вікні спостереження;
      2. демпфірування узагальненої моди називатимемо стійко від’ємним у випадку зростання її амплітуди для трьох послідовно досліджених вікон спостереження;
      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 з плином часу);
      4. демпфірування узагальненої моди називатимемо стійко додатним у випадку зменшення її амплітуди для трьох послідовно досліджених вікон спостереження;
   3. амплітуду узагальненої моди, меншу за порогове значення *A*′, до подальшого оброблення її не залучають (зазначений пункт дає можливість здійснити “фільтрацію” результатів розрахунку від низькоамплітудних складових, джерелом яких є шуми);
   4. амплітуду узагальненої моди, більшу за *A*′′, визначено хибно і до подальшого оброблення її не залучають. Значення *A*′′ для *k*-го вікна спостереження має бути визначено так:



де *S*max та *S*min – максимальне та мінімальне значення параметра, зміну якого з часом 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 різних методів основної групи, однаковою мірою достовірні;
2. моди з різницею частот, меншою за Δ*f*2, є однією модою. Прийнято, що:
   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. 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;
   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 є реально існуючою, якщо її було ідентифіковано, принаймні, двома методами аналізу сигналів основної групи або одним методом основної та одним

методом референсної груп.

Результати дослідження вибірки даних ТСг-5 із застосуванням процедури узагальнення результатів виявлення НЧК та визначення параметрів іхніх домінантних мод із перевіркою додатного демпфірування мод за пунктом б.2.3 алгоритму наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Результати дослідження ТСг-5 із застосуванням процедури узагальнення результатів виявлення НЧК та визначення параметрів іхніх домінантних мод

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Часовий відрізок,  *с* | Розрахункові параметри виявлених мод НЧК | | | | | | | | | | | |
| Мода №1 | | | | Мода №2 | | | | Мода №3 | | | |
| *f*,  Гц | *А*,  кВ | Характер демпфірування | Ознака загрози | *f*,  Гц | *А*,  кВ | Характер демпфірування | Ознака загрози | *f*,  Гц | *А*,  кВ | Характер демпфірування | Ознака загрози |
| 0–2 | 0,78 | 33,4 | не визначено | небезпечна | 1,29 | 34,9 | не визначено | небезпечна | 1,38 | 22,1 | не визначено | небезпечна |
| 1–3 | 0,76 | 33,6 | вірогідно від’ємне | небезпечна | 1,37 | 22,0 | вірогідно від’ємне | небезпечна |  |  |  |  |
| 2–4 | 0,76 | 33,2 | вірогідно від’ємне | небезпечна | 1,26 | 26,1 | вірогідно від’ємне | небезпечна | 1,38 | 23,9 | стійко від’ємне | небезпечна |
| 3–5 | 0,74 | 32,6 | вірогідно від’ємне | небезпечна | 1,37 | 27,4 | стійко від’ємне | небезпечна |  |  |  |  |
| 4–6 | 0,76 | 31,0 | вірогідно від’ємне | небезпечна | 1,39 | 29,1 | стійко від’ємне | небезпечна |  |  |  |  |
| 5–7 | 0,76 | 30,7 | стійко додатне | небезпечна | 1,40 | 29,3 | стійко від’ємне | небезпечна |  |  |  |  |
| 6–8 | 0,76 | 30,3 | стійко додатне | небезпечна | 1,38 | 31,4 | вірогідно від’ємне | небезпечна |  |  |  |  |
| 7–9 | 0,73 | 32,0 | вірогідно від’ємне | небезпечна | 1,40 | 25,8 | вірогідно від’ємне | небезпечна | 2,18 | 3,7 | вірогідно від’ємне |  |
| 8–10 | 0,76 | 33,8 | стійко від’ємне | небезпечна | 1,38 | 28,0 | вірогідно від’ємне | небезпечна | 2,02 | 1,0 | вірогідно від’ємне |  |

**Висновки по розділу 2**

1. Розроблено процедуру узагальнення результатів виявлення НЧК та визначення параметрів іхніх домінантних мод у програмному комплексі online-оцінювання загрози коливного порушення стійкості ЕО. Надійність визначення параметрів складових сигналів за допомогою цієї процедури експериментально підтверджено із застосуванням тестових сигналів та сигналів, зареєстрованих в ОЕС України ЕВРП “Регіна–Ч”.
2. Встановлено та експериментально доведено, що цифрова фільтрація сигналів до їх оброблення ансамблем методів аналізу сигналів підвищує надійність визначення параметрів домінантних мод НЧК.
3. Встановлено та експериментально доведено, що для визначення параметрів складових НЧК використання миттєвих значень сигналу підвищує точність (насамперед – за частотою) такого визначення у порівнянні з використанням діючих значень.

**ЗАГАЛЬНІ 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 енерго-об’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 енерго-об’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 домінантних 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 домінантних 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.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Буткевич О. Ф. Виявлення в режимі реального часу небезпеки коливного порушення стійкості об’єднаних енергосистем [Електронний ресурс] / О. Ф. Буткевич, В. В. Чижевський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 6. –C. 164–167. – ISSN 1997–9266. – Режим доступу : http://visnyk.vntu.edu.ua/article/ download/1788/3922.
2. Буткевич О. Ф. Деякі аспекти моніторингу низькочастотних коливань режимних параметрів енергооб’єднань [Текст] / О. Ф. Буткевич, В. В. Чижевський // Праці Інституту електродинаміки НАН України. Зб. наук. праць. Спец. вип. – 2010. – C. 72–77. – ISSN 1727–9895.
3. Буткевич О. Ф. Деякі питання побудови інтегрованої системи запобігання коливному порушенню стійкості об’єднаної енергосистеми [Електронний ресурс] / О. Ф. Буткевич, В. В. Чижевський // Енергетика: економіка, технологія, екологія. – 2015. – № 3. – С. 28–36. – ISSN 1813–5420. – Режим доступу : http://energy.kpi.ua/files/3\_2015.pdf
4. Буткевич О. Ф. Експериментально-модельні дослідження динамічних властивостей електроенергетичних систем [Текст] / О. Ф. Буткевич, В. С. Буланая, О. Б. Рибіна, В. В. Чижевський // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки. Ч. 4. – 2008 – №6. – С. 37–40. – ІSSN 0204–3599.
5. Буткевич О. Ф. Ідентифікація в реальному часі низькочастотних коливань параметрів режиму енергосистеми [Текст] / О. Ф. Буткевич, В. В. Чижевський // Технічна електродинаміка. – 2014. – № 4. – С. 35–37. – ISSN 1607–7970.
6. Буткевич О. Ф. Моніторинг та діагностування електроенергетичних об’єктів та систем України на базі комплексів “Регіна” [Текст] / О. Ф. Буткевич, В. Л. Тутик // Гідроенергетика України. – 2010. – № 3. – С. 46–49. – ISSN 1812–9277.
7. Буткевич О.Ф. Низькочастотні коливання режимних параметрів та покращення динамічних властивостей енергосистем [Текст] / О. Ф. Буткевич, О. М. Агамалов, В. В. Чижевський // Праці Інституту електродинаміки НАН України. Зб. наук. праць. Спец. вип. – 2013. – С. 50–60. – ISBN 1727–9895.

**ДОДАТОК А**

**Параметри моделі чотиримашинної тестової схеми ЕС**



Рисунок А.1 – Тестова чотиримашинна схема (ТС-І)

Таблиця А.1 – Параметри синхронних генераторів ТС-І

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| СГ | *S*н, МВ∙А | *U*н, кВ | *xd*, в.о. | *xq*, в.о. | *xl*, в.о. | *xd'*, в.о. | *xq'*, в.о. | *xd''*, в.о. | *xq''*, в.о. | *Ra*,  в.о. | c | c | c | c | *ASat*, в.о. | *ВSat*, в.о. | ψ*Т*1, в.о. | *KD* | *Н*,  с |
| *G*1 | 900 | 20 | 1,8 | 1,7 | 0,2 | 0,3 | 0,55 | 0,25 | 0,25 | 0,0025 | 8,00 | 0,40 | 0,03 | 0,05 | 0,015 | 9,6 | 0,9 | 0 | 6,500 |
| *G*2 | 6,500 |
| *G*3 | 6,175 |
| *G*4 | 6,175 |

Таблиця А.2 – Параметри ЛЕП ТС-І

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Ділянка ЛЕП | *L*,  км | *U*б,  кВ | *S*б,  МВ∙А | *r*0,  в.о. | *x*0,  в.о. | *b*0,  в.о. |
| 5–6 | 25 | 230 | 100 | 0,0001 | 0,001 | 0,00175 |
| 6–7 | 10 |
| 7–8а | 110 |
| 7–8б | 110 |
| 8а–9 | 110 |
| 8б–9 | 110 |
| 9–10 | 10 |
| 10–11 | 25 |

Таблиця А.3 – Параметри трансформаторів ТС-I

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Трансформатор | *U*вн, кВ | *U*нн, кВ | *S*н, МВ∙А | *R*, в.о. | *Х*, в.о. |
| *Т*1 – *Т*4 | 230 | 20 | 900 | 0 | 0,15 |

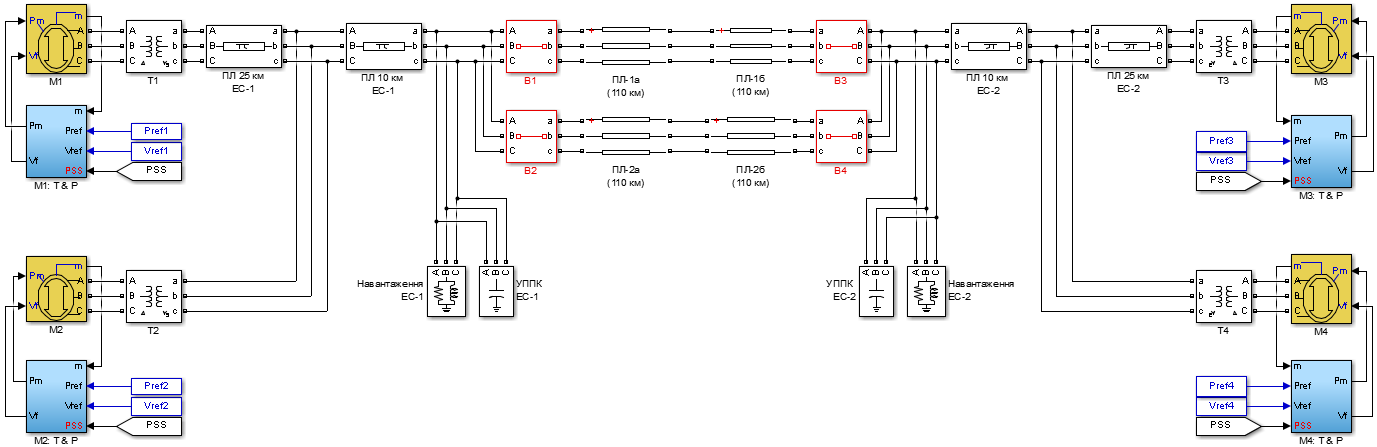


Рисунок А.2 – Модель ТС-І у середовищі “Matlab”

**ДОДАТОК Б**

**Лістинги розрахункових функцій**

Лістинг Ж.1 – Програмна реалізація функції для визначення порядку моделі аналізованого сигналу за принципом MDL згідно з (3.5)

function [ModelOrder] = MDL(X)

SignalLength = length(X);

L = floor(0.5\*SignalLength);

H = hankel(X(1:L),X(L:SignalLength));

[~,SingularMatrix,~] = svd(H);

SingularValues = diag(SingularMatrix);

MinimumDescriptionLength = [];

for k = 0:1:(L-1)

Buffer = -SignalLength\*sum(log(SingularValues(k+1:L))) +

SignalLength\*(L-k)\*log((sum(SingularValues(k+1:L))/

(L-k))) + k\*(2\*L-k)\*log(SignalLength)/2;

MinimumDescriptionLength = [MinimumDescriptionLength; Buffer];

end

[~, ModelOrder] = min(MinimumDescriptionLength);

ModelOrder = ModelOrder - 1;

end

Лістинг Ж.2 – Програмна реалізація функції для розрахунку параметрів сигналів методом ДПФ

function [Frequencies, Amplitudes] = DFTFunction(X,Fs,Accuracy,DFTPoints)

DFTPoints = length(X);

Amplitudes = abs(fft(X,DFTPoints));

Amplitudes = 2\*Amplitudes/DFTPoints;

Amplitudes(1) = Amplitudes(1)/2;

Frequencies = 0:(Fs/DFTPoints):(Fs/2-1/DFTPoints);

Amplitudes = Amplitudes(1:length(Frequencies));

end

|  |
| --- |
| **ДОДАТОК Б**  **РЕЗУЛЬТАТИ ПЕРЕВІРКИ ДИСЕРТАЦІЇ НА ПЛАГІАТ** |