

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

НЕСТЕРКО АРТЕМ БОРИСОВИЧ



УДК 621.316

**ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ
ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ
ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ**

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 у Національному технічному університеті України «Київському політехнічному інституті» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Яндульський Олександр Станіславович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»,
декан факультету електроенерготехніки та автоматики.

Офіційні опоненти: - доктор технічних наук, професор
Лежнюк Петро Дем'янович
Вінницький національний технічний університет
МОН України, м. Вінниця, завідувач кафедри
електричних станцій та систем;

- кандидат технічних наук
Шполянський Олег Григорович
Інститут електродинаміки НАН України, м. Київ
старший науковий співробітник відділу
оптимізації систем електропостачання.

Захист відбудеться «10» жовтня 2016р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.002.06 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут» за адресою: 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37, корп. №20, ауд.3.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» за адресою: 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий « » вересня 2016 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



В.О. Шостак

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розвиток електроенергетичних систем (ЕЕС), підвищення вимог до надійності та якості електропостачання разом зі збільшенням частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в загальному енергобалансі ЕЕС визначають необхідність подальшого удосконалення методів та засобів керування режимами ЕЕС.

Характер протікання електромеханічного перехідного процесу в багатомашинній ЕЕС пов'язаний з характеристиками різних елементів електроенергетичної системи. Основний вплив на протікання перехідних процесів зміни частоти системи мають структура електричних зв'язків ЕЕС, характеристики агрегатів та навантажень приєднаних до мережі. Використання ВДЕ як альтернативного синхронним генераторам засобу генерування не повинно призводити до погіршення умов функціонування існуючих систем регулювання частоти. Тому актуальними задачами є дослідження та розробка нових методів регулювання частоти ЕЕС з ВДЕ в перехідних режимах.

Значний вклад в розвиток теорії, методів та засобів керування режимами ЕЕС, автоматичного регулювання частоти ОЕС України, моніторингу ЕЕС в перехідних режимах внесли колективи Інституту електродинаміки та Загальної енергетики НАН України, Вінницького та Донецького Національних технічних університетів, Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Національного університету «Львівська політехніка», Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», Державного підприємства «Національна енергетична компанія «Укренерго» та колективи закордонних фірм та дослідних установ Канади, США, країн Європейського союзу, Російської Федерації, серед яких EPRI, Hydro-Quebec, ERCOT, ENTSO-E та Сибірський науково дослідний інститут енергетики. Аналіз нових підходів та методів моніторингу та керування перехідними режимами ЕЕС, в тому числі на основі використання синхронізованих даних системи моніторингу перехідних режимів (СМПР) показав, що розвиток даного напрямку досліджень є актуальним науково-технічним завданням.

На основі впроваджених в ОЕС України комплексів «Регіна-Ч» розпочато створення сучасної технологічної СМПР та системи керування перехідними режимами ЕЕС в режимі реального часу (СКПР). Завдяки СМПР з'являється можливість визначення з високою точністю значення частоти та швидкості її зміни в різних точках ОЕС України, що дозволяє підвищити ефективність існуючих систем регулювання частоти на основі використання уточнених динамічних моделей як окремих елементів, так і ЕЕС в цілому. При цьому задачі та умови функціонування СКПР спрямовані на унеможливлення розвитку системних аварій.

Одним з основних параметрів ЕЕС, який впливає на характер перехідних процесів ЕЕС, є постійна інерції системи. Зменшення постійної інерції ЕЕС при інтеграції ВДЕ з інверторним приєднанням до мережі обумовлено використанням швидкодіючої схеми синхронізації на основі фазового

автопідстроювання частоти. Відсутність інерційного відгуку основних типів ВДЕ призводить до збільшення величини електричних моментів синхронних генераторів (СГ) при виникненні аварійних небалансів потужності, що призводить до збільшення динамічного відхилення частоти та зменшення декременту затухання низькочастотних коливань режимних параметрів під час перехідних режимів. Вирішення даної проблеми вбачається у розвитку концепції віртуальної інерції (ВІ) відновлюваних джерел енергії, що передбачає створення на основі ВДЕ засобів керування потужністю, які здатні швидко, на інтервалах біля 0.5с, змінювати вихідну потужність в широких діапазонах, що дозволяє залучити ВДЕ з ВІ до регулювання частоти ЕЕС в перехідних режимах.

Збільшення частки генерування ВДЕ в енергобалансі ОЕС України призводить до погіршення умов функціонування системи автоматичного регулювання частоти ЕЕС. Тому стає актуальною задача розробки нових методів налаштування регуляторів ВІ з урахуванням динамічних характеристик ЕЕС, що потребує дослідження методів ідентифікації моделей ЕЕС на основі даних СМПР та розробки нових підходів до регулювання частоти ЕЕС під час перехідних режимів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертація виконана на кафедрі автоматизації енергосистем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» у відповідності з планами наукових досліджень, а саме, за держбюджетними науково-дослідними роботами «Наукові засади, підходи та методи підвищення ефективності автоматичного регулювання режимами електроенергетичної системи з відновлювальними джерелами енергії» (№ державної реєстрації 0111U002229), «Наукові засади, підходи та методи зменшення впливу низькочастотних коливань потужності на режими роботи Об'єднаної електроенергетичної системи» (№ державної реєстрації 0114U002532), де здобувач був виконавцем окремих розділів.

Мета і задачі дослідження. Мета дисертаційної роботи полягає в підвищенні якості регулювання частоти електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії шляхом розвитку методів ідентифікації динамічної моделі ЕЕС з використанням даних системи моніторингу перехідних режимів та розробки нових методів залучення ВДЕ з регуляторами віртуальної інерції до регулювання частоти ЕЕС.

Відповідно до вказаної мети в роботі вирішуються такі основні задачі:

1. Аналіз впливу ВДЕ на характер перехідних режимів ОЕС України.
2. Розробка динамічної моделі ЕЕС з ВДЕ для дослідження перехідних режимів на основі даних СМПР.
3. Дослідження методів автоматичного регулювання потужності ВДЕ в перехідних режимах ЕЕС.
4. Розробка методу централізованого регулювання потужності ВДЕ з метою їх залучення до регулювання частоти ЕЕС.

5. Дослідження впливу обмежень на процес регулювання та затримок каналів передачі даних на якість централізованого регулювання частоти ЕЕС з ВДЕ в перехідних режимах.

Об'єктом дослідження є процеси в електроенергетичних системах з ВДЕ при виникненні аварійних небалансів потужності.

Предметом дослідження є методи та засоби регулювання частоти в ЕЕС з залученням відновлюваних джерел енергії.

Методи дослідження. В дисертації для розв'язання поставлених задач використані методи сучасної теорії управління складними багатовимірними системами. При цьому використані методи аналізу лінійних неперервних та дискретних систем, матричної алгебри, модального аналізу та синтезу оптимальних регуляторів. Перевірка ефективності розроблених методів та алгоритмів проводилася на основі аналізу результатів моделювання на сертифікованих програмних комплексах розрахунку режимів ЕЕС та порівняння окремих результатів моделювання з результатами експериментальних досліджень з використанням даних системи моніторингу перехідних режимів.

Наукову новизну складають такі положення:

1. Розвинуто підхід до визначення інваріантної структури багатомашинної ЕЕС на основі кластерного аналізу синхронізованих вимірів режимних параметрів, який на відміну від існуючих враховує процеси об'єднання когерентних груп генераторів під час перехідних процесів, що дозволило визначити частоту та розташування центрів інерції когерентних груп генераторів.
2. Вперше запропоновано метод ідентифікації динамічної моделі ЕЕС на основі аналізу руху центрів інерції когерентних груп генераторів, що дозволило, використовуючи дані пасивного експерименту, отримати модель ЕЕС, що враховує взаємний вплив когерентних груп генераторів на перехідний режим системи.
3. Вперше розроблено метод налаштування регуляторів віртуальної інерції ВДЕ на основі синтезу оптимальної системи автоматичного керування ЕЕС, робота якої спрямована на підвищення якості перехідного процесу в електроенергетичній системі з відновлюваними джерелами енергії.
4. Вперше досліджено вплив затримок в каналах передачі даних та обмежень при регулюванні частоти ЕЕС, що дозволило визначити необхідні характеристики засобів керування та значення допустимих затримок каналів передачі даних САРЧП.

Практичне значення одержаних результатів. Практична цінність роботи полягає в тому, що:

1. Використання синхронізованих вимірів режимних параметрів СМІР дозволило дослідити склад когерентних груп генераторів ОЕС України. На основі отриманих результатів проведено ідентифікацію динамічної моделі ЕЕС, еквівалентної ОЕС України, що дало можливість дослідити якість регулювання частоти в перехідних режимах ЕЕС.

2. Використання запропонованого методу залучення відновлюваних джерел енергії до регулювання частоти дозволяє збільшити потужність резервів необхідних для регулювання частоти в ОЕС України.
3. Встановлено, що використання запропонованого методу формування уставок засобів керування дозволяє підвищити якість перехідних процесів зміни частоти ЕЕС зі значною часткою генерування ВДЕ в енергобалансі.
4. Результати проведених досліджень дозволяють дати рекомендації по модернізації системи моніторингу перехідних режимів та системи автоматичного регулювання частоти ОЕС України.

Окремі результати дослідження увійшли в звіти науково-дослідних робіт: «Дослідження впливу низькочастотних коливань перетоків потужності на режим роботи ОЕС України при регулюванні частоти та активної потужності» (№ ДР 0111U002229), «Наукові засади, підходи та методи підвищення ефективності автоматичного регулювання режимами електроенергетичної системи з відновлювальними джерелами енергії» (№ ДР 0111U002229) та «Наукові засади, підходи та методи зменшення впливу низькочастотних коливань потужності на режими роботи Об'єднаної електроенергетичної системи» (Дог. № 03-3/0716-12), виконаних на кафедрі АЕ ФЕА НТУУ КП. Отримані рішення можуть стати основою для створення нових методів регулювання частоти ЕЕС на основі використання даних СМПР.

Результати, отримані в дисертації, використовуються в навчальному процесі та при виконанні кваліфікаційних та науково-дослідних робіт магістрантів кафедри автоматизації енергосистем факультету електроенерготехніки та автоматики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут».

Особистий внесок здобувача. Всі результати, які складають основний зміст дисертаційної роботи, отримані автором самостійно.

У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належить формалізація поставлених завдань, розробка математичних моделей і методів, їх реалізація і тестування в програмно-обчислювальних комплексах, аналіз та узагальнення результатів, а саме: [1] – розроблено моделі регулювання частоти та потужності регіону Південної енергосистеми ОЕС України; [2] – по даним СМПР проведено аналіз внутрішніх коливань когерентних груп генераторів та визначено частоти центрів інерції когерентних груп генераторів ОЕС України; досліджено роботу диференціального регулятора віртуальної інерції в системі керування сонячною електростанцією; [3] – досліджено роботу регулятора віртуальної інерції в складі системи керування швидкості обертання турбіни ВЕС; [4] – розроблено критерії регулювання потужності відновлюваних джерел енергії у складі електричної мережі; [5] – проаналізовано основні етапи ідентифікації динамічної моделі електроенергетичної системи; на основі використання підпросторових методів ідентифікації отримано лінійну модель ЕЕС у нормальній формі змінних стану; [6] – розроблено структуру ієрархічної дворівневої системи регулювання частоти ЕЕС з ВДЕ; запропоновано підхід до оптимального регулювання частоти ЕЕС на основі використання керованих

ВДЕ з віртуальною інерцією; [7] – на основі спектрального аналізу коливань частоти обертання роторів синхронних генераторів ЕЕС розроблено метод визначення складу когерентних груп генераторів з повільною когерентністю під час перехідних процесів електроенергетичної системи; [8] – розроблено підхід до побудови системи автоматичного регулювання частоти електроенергетичної системи з використанням управління на основі прогнозуючої моделі, синхронізованих вимірів системи моніторингу перехідних режимів та ВДЕ з віртуальною інерцією як засобів керування; [9] – досліджено підхід до визначення величини резерву активної потужності ВДЕ, що використовується для регулювання частоти та активної потужності в різних режимах роботи ЕЕС.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати роботи доповідалися та обговорювалися на II Міжнародній науково-технічній конференції «Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ-2013)» (м. Вінниця, 2013 р.); на XIII Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми сучасної електротехніки (ПСЕ-2014)» (м. Київ, 2014 р.); на V Міжнародній науково-технічній конференції «Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах» (м. Луцьк, 2014 р.); на XV Ювілейній Міжнародній науково-практичній конференції «Відновлювана енергетика XXI століття» (Київ, 2014 р.); на всеукраїнській науково-практичній конференції молодих учених, спеціалістів, аспірантів «Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика» (Маріуполь, 2015); на XVI Міжнародній науково-практичній конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті» (Київ, 2015 р.); на IV Міжнародній конференції «Інтелектуальні енергетичні системи – ESS'15» (Київ, 2015 р.), на III Міжнародній науково-технічній конференції «Оптимальне керування електроустановками - ОКЕУ 2015» (Вінниця, 2015).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 18 наукових праць, у тому числі 9 статей у наукових фахових виданнях України (3 статті у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 9 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Обсяг та структура дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (159 найменувань) і додатків. Основний зміст викладений на 150 сторінках друкованого тексту, містить 8 таблиць, 69 рисунків. Загальний обсяг дисертації – 205 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовані мета та задачі роботи, визначено об'єкт та предмет дослідження, вказано методи дослідження, наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, наведено відомості про апробацію отриманих результатів, зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами, вказано особистий внесок здобувача та публікації основних результатів дисертації.

У **першому розділі** проведено аналіз існуючих підходів до залучення ВДЕ до регулювання частоти в електроенергетичних системах.

Дослідження планів розвитку ОЕС України відповідно до даних НЕК «Укренерго» показало тенденцію до збільшення частки ВДЕ в енергобалансі ОЕС України, так в межах наступних 10 років потужність ВДЕ в ОЕС України становитиме 10-12% потужності ОЕС України в режимі мінімуму навантажень. Встановлено, що інтеграція ВДЕ в ЕЕС супроводжується проблемами пов'язаними з непередбачуваністю та змінністю генерування електричної потужності, що призводить до порушення балансу потужності в ЕЕС, умов надійного та якісного електропостачання. У той же час традиційні підходи до побудови систем автоматичного регулювання частоти не враховують особливості режимів генерування ВДЕ, не забезпечують належного контролю виділених резервів потужності та не враховують допустимі межі зміни режимних параметрів ЕЕС. Це робить актуальною задачу розробки нових методів регулювання частоти електроенергетичної системи, в тому числі з залученням ВДЕ.

Проведений аналіз використання ВДЕ з інверторним приєднанням в ЕЕС показав, що відсутність інерційного відгуку основних типів ВДЕ призводить до збільшення швидкості протікання електромеханічних перехідних процесів та зменшення логарифмічного декременту затухання коливань частоти ЕЕС. Особливо, проблема відсутності інерційного відгуку актуальна під час виділення частини мережі зі значною часткою ВДЕ на автономну роботу (рис.1), де процес зміни частоти має більшу швидкість порівняно з режимом при паралельній роботі з потужною ЕЕС.

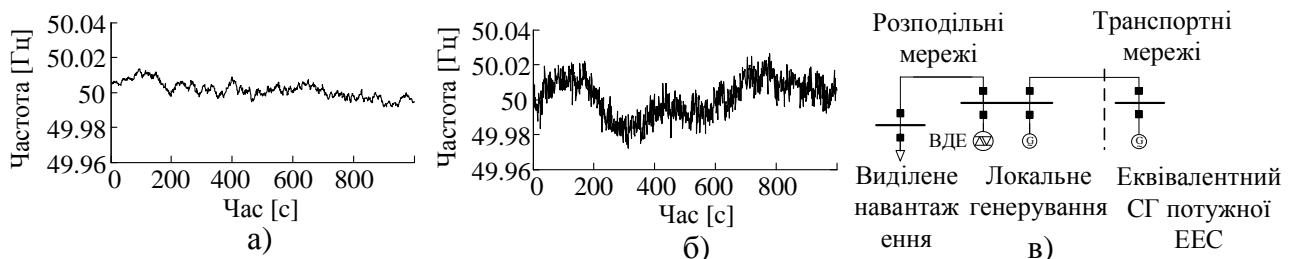


Рис.1. Результати розрахунку частоти системи з ВДЕ: а) в режимі паралельної роботи з потужною ЕЕС; б) при автономній роботі; в) схема тестової мережі

Крім того, зменшення інерційного відгуку окремих частин ЕЕС призводить до збільшення максимального відхилення значення частоти обертання роторів СГ, що веде до необхідності підвищення вимог до швидкодії засобів системного захисту та автоматики. Це обумовлює необхідність удосконалення методів та засобів регулювання частоти ЕЕС з метою недопущення критичних відхилень частоти під час перехідних режимів.

В роботі запропоновано вирішення проблеми зменшення інерційного відгуку ЕЕС з ВДЕ на основі використання ВДЕ з віртуальною інерцією (ВІ), що забезпечується шляхом регулювання вихідної потужності джерела з інверторним приєднанням до мережі. Проведене дослідження підходів до налаштування та аналізу ефективності ВДЕ з ВІ в ЕЕС показало, що однією з основних задач, що потребує вирішення, є розробка нових математичних

моделей електроенергетичних систем з урахуванням систем регулювання частоти та аналіз перехідних режимів за частотою ЕЕС з ВДЕ на основі даних системи моніторингу перехідних режимів.

У **другому розділі** для вирішення поставлених задач розроблено математичні моделі елементів ЕЕС з ВДЕ, деталізація опису яких дозволила провести дослідження перехідних режимів електроенергетичної системи.

На основі даних НЕК «Укренерго» уточнено, розроблену на кафедрі автоматизації енергосистем НТУУ КПІ, динамічну модель ОЕС України. В модель додано засоби автоматичного регулювання СГ, систему автоматичного регулювання частоти та перетоків потужності, електричні зв'язки з ЄЕС Росії, Білорусії та Молдови. Модель включає 62 еквівалентних синхронних генератори та їх, електричні зв'язки на рівнях напруги 220-750кВ з урахуванням статичних характеристик еквівалентного навантаження на рівні 110кВ.

Якість розробленої моделі перевірено на основі розрахунку частоти ЕЕС в перехідному режимі та порівняння отриманих результатів з відповідними даними синхронізованих вимірювань частоти СМПР. Встановлено, що середньоквадратичне відхилення розрахованих на розробленій моделі значень частоти та відповідних даних СМПР склало $3.56 \cdot 10^{-3}$ Гц; різниця між значеннями максимальних відхилень частоти не перевищує $2.1 \cdot 10^{-4}$ Гц. Домінуюча частота коливань розрахункових даних та даних СМПР складає 0.481 та 0.478 Гц, а різниця 0.03 Гц відповідно. Результати порівняння свідчать, що дослідження з використанням розробленої моделі ОЕС дозволять дати адекватні оцінки та рекомендації стосовно перехідних режимів ОЕС України.

Для визначення складу когерентних груп генераторів ЕЕС та їх характеристик в роботі запропоновано використання спектрального аналізу та методів ієрархічної кластеризації даних СМПР. Проведено ідентифікацію когерентних за частотою груп генераторів (КГГ) при 6 розрахункових аварійних сценаріях (рис.2). Доведено, що використання ієрархічної кластеризації методом одиничного зв'язку за запропонованим підходом враховує особливості перехідних режимів за частотою ЕЕС та дозволяє визначити склад КГГ, що має інваріантний характер по відношенню до місця виникнення збурення. В основу підходу покладено використання метрики $d(\dot{S}_1, \dot{S}_2)$ (1), а вихідні дані для кластеризації відповідають компонентам правих власних векторів небезпечних мод низькочастотних коливань.

$$d(\dot{S}_1, \dot{S}_2) = \sqrt{\left(\alpha(|\dot{S}_1| - |\dot{S}_2|)\right)^2 + \left(\beta(\arg(\dot{S}_1) - \arg(\dot{S}_2))\right)^2} \quad (1)$$

де \dot{S}_i – комплексні коефіцієнти спектрального розкладу коливань частоти обертання роторів еквівалентних синхронних генераторів в КГГ; α, β – вагові коефіцієнти амплітуди та фази коливань відповідно.

В результаті проведених досліджень встановлено, що в ОЕС України є три когерентні за частотою групи генераторів, між якими в перехідних режимах спостерігаються низькочастотні коливання потужності на частоті 0.5 Гц з найбільшою в ОЕС України амплітудою (рис. 2ж).

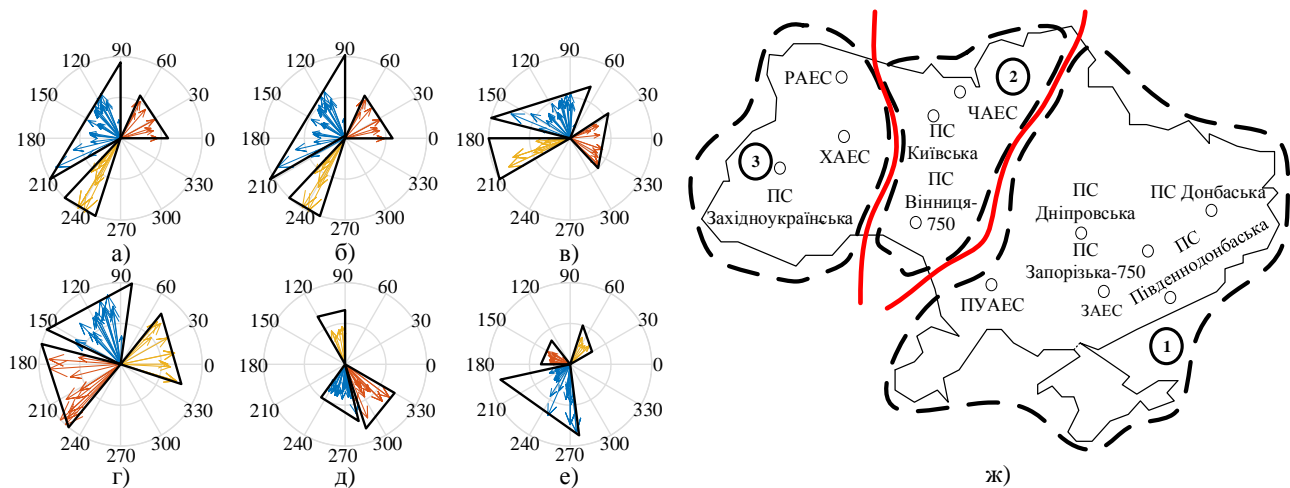


Рис.2. Результати ієрархічної кластеризації даних СМПП та визначення когерентних груп генераторів ОЕС України:

а) КЗ ПС Донбаська 750 кВ; б) КЗ ПС Київська 750 кВ; в) КЗ ПС Західноукраїнська 750 кВ; г) відключення блоку 1ГВт РАЕС; д) відключення блоку 1ГВт ЗАЕС; е) відключення блоку 1ГВт ПУАЕС; ж) географічне розташування КГГ

На основі аналізу складу КГГ визначена структура еквівалентної математичної моделі ОЕС України. Розрахункові дані перехідних режимів за частотою відповідних КГГ використовуються для ідентифікації моделі ЕЕС типу «чорний ящик». Застосування в запропонованому підході методу підпросторової ідентифікації дозволило визначити модель ЕЕС у формі змінних стану та калмановські оцінки відповідних змінних стану, використовуючи синхронізовані виміри режимних параметрів СМПП під час пасивних експериментів. Зважаючи на те, що інтерпретація фізичного змісту змінних стану моделі типу «чорний ящик» ускладнена, тому в роботі використовується нормальна форма представлення дискретної моделі (2).

$$\begin{aligned} z_{k+1} &= A z_k + B_m u_k + w_k \\ y_k &= C_m z_k + D_m u_k + v_k \\ E \begin{bmatrix} w_k^T & v_k^T \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} Q & S \\ S^T & R \end{bmatrix} \delta_{kl} \geq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

де $A_m = A, B_m, C_m, D_m$ – матриці лінійної моделі системи у нормальній формі; w_k, v_k – шуми вимірювань та шуми процесу відповідно (центровані, стаціонарні білі шуми, некорельовані з входами); Q, S, R – коваріаційні матриці шумів; E – математичне очікування; δ_{kl} – дельта Кронекера.

Для підвищення ефективності автоматичного регулювання частоти ЕЕС також в роботі запропоновано використання ВДЕ з ВІ у якості засобів керування, які мають визначені на періоді керування характеристики на завантаження та розвантаження. На основі проведених досліджень моделей диференціального – df/dt (рис. 3а) та релейного – Δf (рис. 3б) регуляторів віртуальної інерції вітрових (рис. 3в) та сонячних електричних станцій (рис. 3г) встановлено, що використання віртуальної інерції основних типів відновлюваних джерел дозволяє зменшити негативний вплив ВДЕ з інверторним приєднанням на процеси регулювання частоти в ЕЕС. Отримані

результати моделювання роботи ВДЕ (ВЕС, СЕС) з ВІ на стандартній (IEEE) 14-вузловій тестовій мережі свідчать про необхідність налаштування регуляторів ВІ ВДЕ з урахуванням взаємного впливу КГГ перехідний режим.

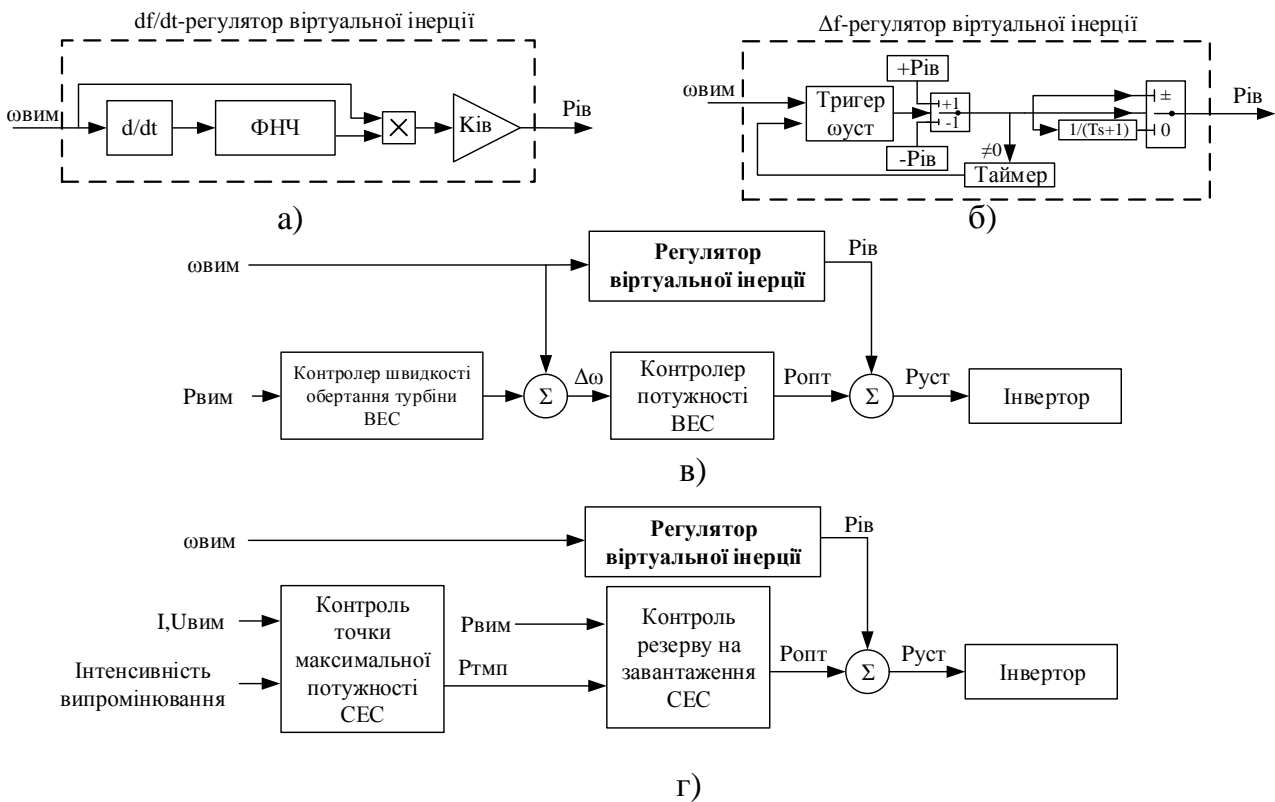


Рис.3. Структура моделі регулятора віртуальної інерції у складі систем керування ВДЕ

З метою формування в режимі реального часу параметрів оптимального налаштування регуляторів ВІ ВДЕ запропоновано підхід до централізованого регулювання частоти ЕЕС, на основі використання, ідентифікованої підпросторовими методами, динамічної моделі ЕЕС та даних СМПР. Сформовані уставки регуляторів віртуальної інерції враховують взаємний вплив КГГ та допустимі межі зміни режимних параметрів під час перехідних режимів за частотою.

У **третьому розділі** розроблено метод налаштування регуляторів віртуальної інерції на основі розрахунку уставок потужності ВДЕ з ВІ в перехідних режимах. Метод полягає у використанні синхронізованих даних СМПР для ідентифікації та верифікації моделі ЕЕС та подальшого синтезу на основі моделі ЕЕС центрального регулятора частоти системи, що враховує взаємний вплив КГГ на перехідний процес зміни частоти ЕЕС, наявні резерви потужності засобів керування, їх характеристики на завантаження/розвантаження та режимні обмеження ЕЕС.

Проведено порівняння критеріїв оптимального регулювання частоти ЕЕС з ВДЕ, що забезпечують мінімум часу перехідного процесу, мінімум амплітуди коливань перехідного процесу, мінімум відхилення від усталеного значення. Встановлено, що розглянуті критерії є частковими формами запису інтегрального функціонала (3).

$$J(u_k) = \sum_{k=t_0}^{t_f} L(x_k, u_k, t) + \varphi(x_{t_f}, t_f) = \min \quad (3)$$

Показано, що використання функціонала (3) у формі квадратичного критерію якості (4) дозволяє селективно керувати окремими модальними складовими частоти ЕЕС в перехідному режимі.

$$J(u_k) = \sum_{k=0}^{t_f} (z_k^T Q z_k + u_k^T R u_k + 2z_k^T N u_k) + \varphi(x_{t_f}, t_f) = \min \quad (4)$$

де z – вектор змінних стану ідентифікованої моделі ЕЕС в нормальній формі; u – вектор вхідних керівних впливів; Q, R, N – вагові матриці.

Селективність керування досягається на основі формування вагової матриці Q у формі $Q_{ii} = q_{\lambda_i}$, $Q_{ij, j \neq i} = 0$, де $q_{\lambda_i} = \begin{bmatrix} q_{\sigma_i} & q_{\omega_i} \\ q_{-\omega_i} & q_{\sigma_i} \end{bmatrix}$ – ваговий коефіцієнт при мінімізації i -ї модальної складової коливання ($q_{\lambda_i} = [0]$ – якщо i -та модальна складова коливання не мінімізується в процесі керування).

Для системи, модель якої записана у формі (2), вектор виходу $y(t)$ можна виразити рівнянням (5), що представляє собою розв'язок системи однорідних диференціальних рівнянь та в загальному випадку має комплексно спряжені корені – моди ($\lambda = \sigma \pm i\omega$).

$$y_k = \sum_{i=1}^n e^{-\sigma_i k} (C_{1i} \sin(\omega_i k) + C_{2i} \cos(\omega_i k)) \quad (5)$$

Мінімізація критерію (5) спрямована на зменшення значення $q_{\lambda_i} z_i^2 = q_{\lambda_i} (e^{-\sigma_i k} (C_{1i} \sin(\omega_i k) + C_{2i} \cos(\omega_i k)))^2$, тобто значень C_{1i} , C_{2i} та $-\sigma_i$. Таким чином запропонований критерій якості мінімізує амплітуду та максимізує згасання коливань частоти ЕЕС в перехідних режимах.

На основі аналізу методів оптимального керування багатовимірними системами знайшов подальший розвиток метод управління на основі прогнозуючої моделі (УПМ), який на відміну від інших враховує обмеження на наявні резерви потужності засобів керування та їх характеристики на завантаження та розвантаження. Критерій оптимальності (4) для УПМ заданий у формі (6), де уставка вектору вихідних сигналів дорівнює нулю, а вихідні сигнали, це відхилення змінних стану моделі в нормальній формі та відхилення частоти центрів інерції КГГ від ustalених значень.

$$J(u_k) = \left(\sum_{j=1}^{n_y} \sum_{i=1}^p \left[\frac{q_{i,j}^y (r_j^i - y_j^i)}{s_j^y} \right]^2 + \sum_{j=1}^{n_u} \sum_{i=0}^{p-1} \left[\frac{q_{i,j}^u (t_j^i - u_j^i)}{s_j^u} \right]^2 + \sum_{j=1}^{n_u} \sum_{i=0}^{p-1} \left[\frac{q_{i,j}^{\Delta u} (u_j^i - u_j^{i-1})}{s_j^u} \right]^2 \right) = \min \quad (6)$$

де p, k – горизонти прогнозу та керування відповідно; n_y, n_u – кількість виходів та входів системи, відповідно; u – оптимальний вектор керування $[u^{kT} \ u^{k+1T} \ \dots \ u^{k+p-2T} \ u^{k+p-1T}]$; y_j^i – прогноз j -го виходу системи на i -му кроці горизонту прогнозу; u_j^i – значення j -го входу системи на i -му кроці горизонту прогнозу; r_j^i, t_j^i – уставки j -го виходу та j -го входу системи на i -му кроці горизонту прогнозу, відповідно; $q_{i,j}^y, q_{i,j}^u, q_{i,j}^{\Delta u}$ – вагові коефіцієнти j -го виходу, входу та різниці входів на сусідніх кроках горизонту прогнозу, відповідно; s_j^y, s_j^u – масштабні коефіцієнти j -го виходу та j -го входу системи, відповідно.

На основі модального аналізу розробленої моделі ОЕС України визначено вимоги до місць встановлення засобів реєстрації синхронізованих вимірів та запропоновано підхід до розрахунку спостерігача змінних стану моделі в нормальній формі для побудови оптимального управління при повній інформації про стан об'єкта керування. Встановлено, що оптимальними місцями встановлення засобів реєстрації режимних параметрів (частоти) під час перехідних режимів є центри інерції КГГ – центроїди кластерів.

Для вирішення задачі регулювання частоти ЕЕС запропоновано структуру ієрархічної дворівневої системи автоматичного керування ЕЕС з трьома КГГ (рис.4), де $T_{\text{КГГ}}$ – еквівалентна постійна часу КГГ [с]; T_t , T_g , $T_{\text{вде}}$ – постійні часу еквівалентної турбіни, генератора та ВДЕ відповідної когерентної групи [с]; T_{ij} – еквівалентні коефіцієнт синхронізуючого моменту між КГГ [МВт/рад]; R – еквівалентний коефіцієнт статизму КГГ [Гц/МВт]; B – еквівалентний коефіцієнт корекції за частотою [МВт/Гц]; ΔP_H , $\Delta P_{\text{пер}}$ – відхилення від планового значення величини навантаження та перетоку, відповідно [МВт]; Δf – відхилення частоти КГГ від номінального значення [Гц]; $\Delta P_{\text{зони}}$ – використана потужність резервів засобів керування [МВт]; РПР – реєстратор перехідних режимів (напр., типу «Регіна-Ч»).

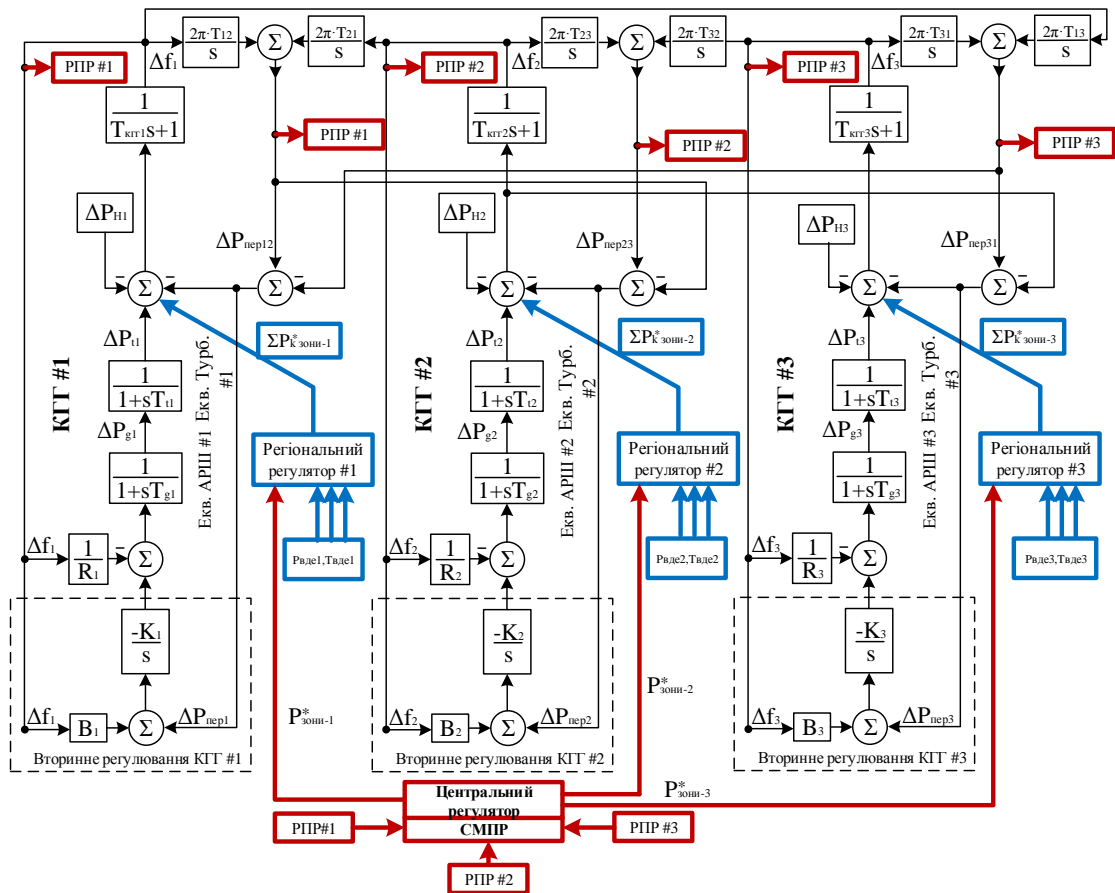


Рис.4. Структура ієрархічної дворівневої системи керування ЕЕС еквівалентної ОЕС України з трьома КГГ

Використання централізованого керування ЕЕС дозволило врахувати взаємний вплив КГГ на процес зміни частоти відповідних центрів інерції при

формуванні уставок засобів керування. При цьому центральний регулятор вирішує задачі керування системного рівня, враховуючи обмеження засобів регіонального рівня, а регіональні регулятори відповідають за реалізацію уставок сформованих центральним регулятором та підтримку заданих характеристик резервів потужності відповідної КГГ.

На основі вимог до центрального та регіонального регуляторів розроблено алгоритми їх сумісної роботи, які представлені на рис. 5.

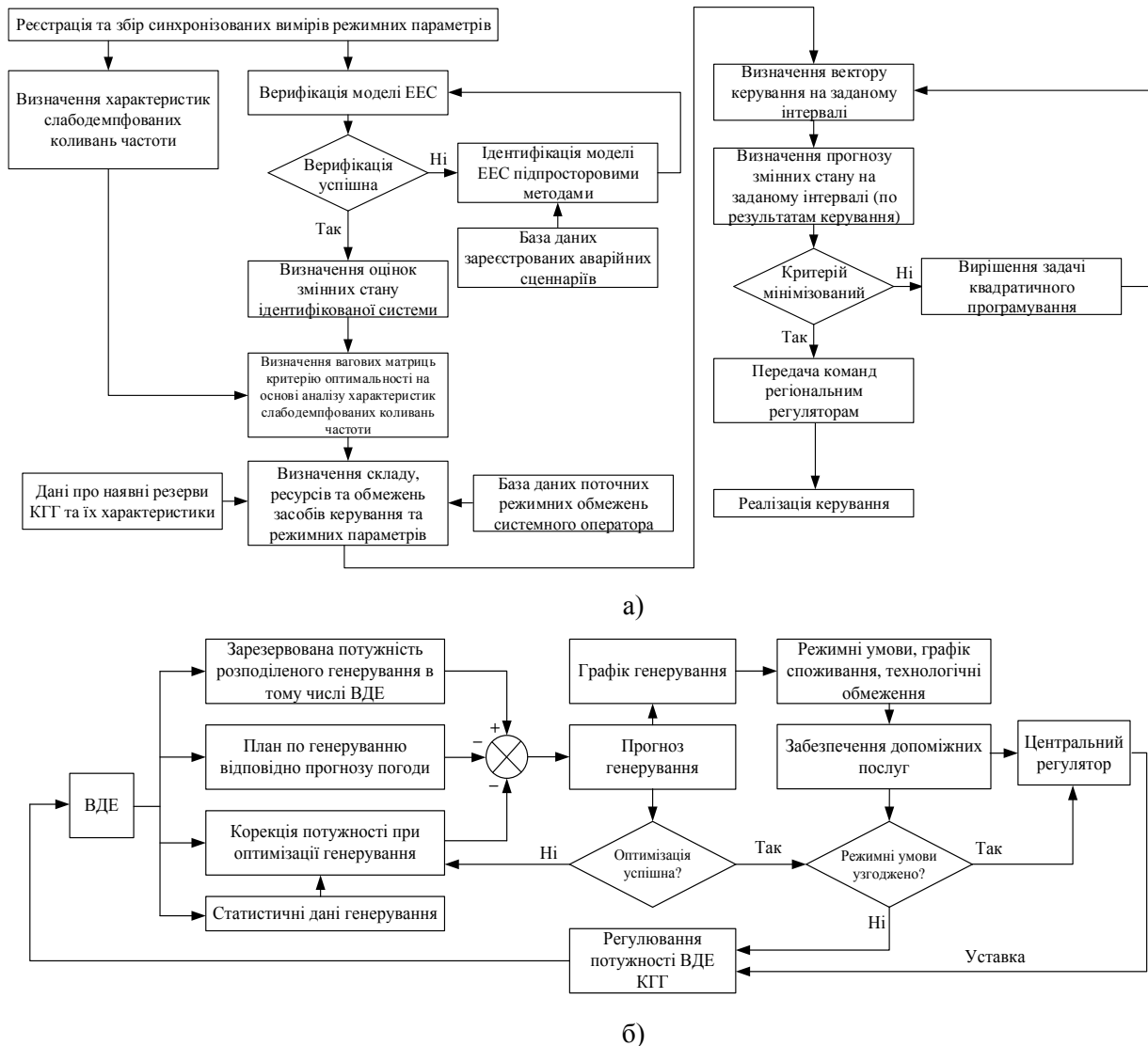


Рис.5. Алгоритми роботи: а) центрального регулятора; б) регіонального регулятора

На розробленій трьохмашинній моделі ЕЕС, еквівалентній ОЕС України за складом та характеристиками КГГ, в програмних комплексах PowerFactory та MatLab було проведено моделювання трифазних КЗ в центрах інерції відповідних КГГ (шини 750кВ ПС Західноукраїнська, ПС Донбаська, ПС Київська) (рис.6). Для регулювання частоти ЕЕС на основі УПМ використано 10% (± 250 МВт на кластер) від потужності ВДЕ в ОЕС України (прогноз НЕК «Укренерго» на 2025 рік).

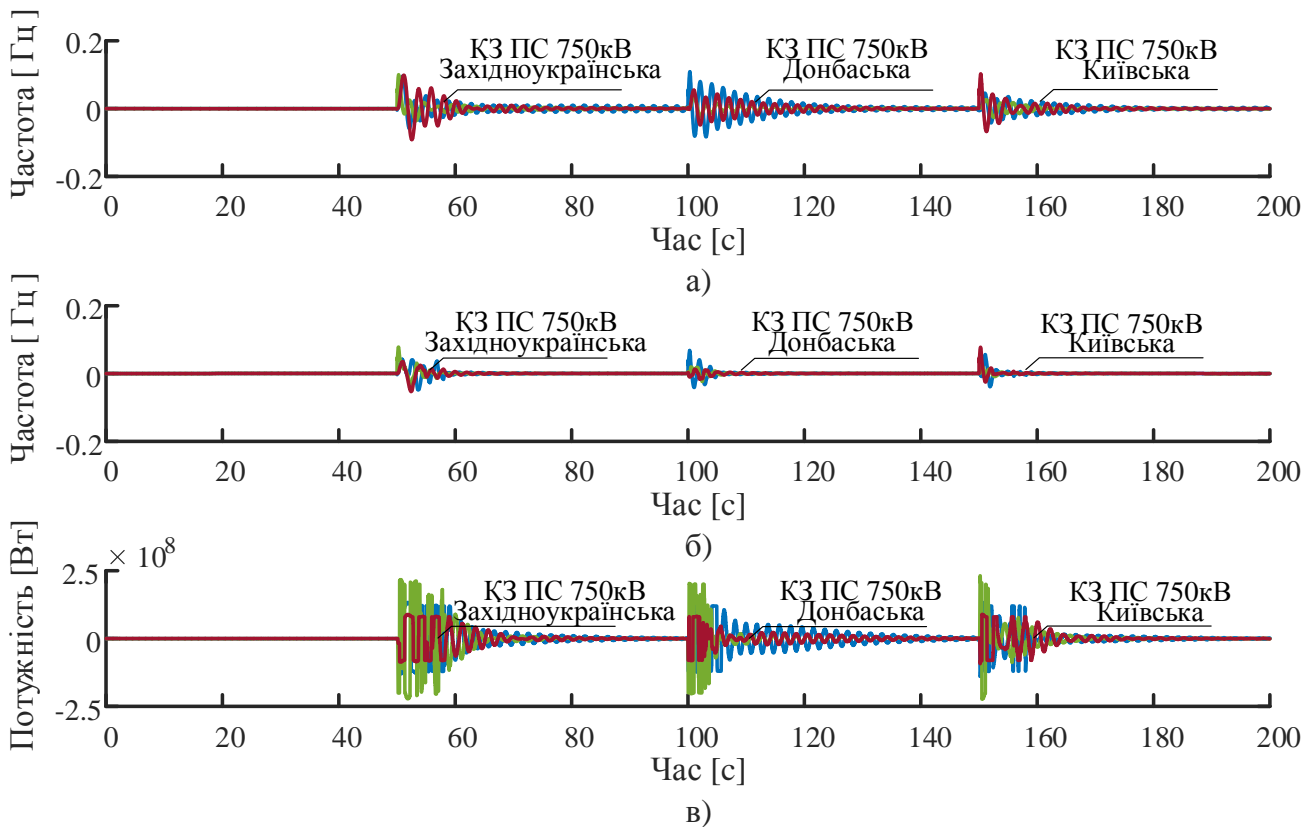


Рис.6. Результати розрахунку відхилення частоти центрів інерції КГГ: а) без централізованого керування; б) з централізованим керуванням на основі УПМ; в) використаної потужності резервів засобів керування відповідних КГГ

Ефективність використання синхронізованих вимірів СМІР та УПМ при формуванні уставок регуляторів віртуальної інерції ВДЕ підтверджується результатами розрахунку перехідного процесу зміни частоти СГ при моделюванні трифазних КЗ. Показано, що в процесі регулювання потужність засобів керування (рис.6в) знаходиться у визначених межах (± 250 МВт). Отримані результати (рис.6) вказують на зменшення часу перехідного процесу зміни частоти від 4-х до 6-ти разів, з 30-40с (рис.6а) до 5-10с (рис.6б) та збільшення логарифмічного декременту затухання коливань частоти в 4 рази, з 0.22 до 0.91 при використанні централізованого керування на основі УПМ.

Подібні результати моделювання було отримано і для інших розрахункових сценаріїв, які підтверджують зменшення часу та підвищення якості перехідних процесів зміни частоти центрів інерції когерентних груп генераторів ЕЕС при використанні централізованого керування на основі УПМ.

У **четвертому розділі** досліджено ефективність запропонованого методу автоматичного регулювання частоти ЕЕС під час перехідних режимів за частотою з урахуванням режимних та технологічних обмежень об'єкту та засобів керування.

Основними обмеженнями, які враховувались при автоматичному регулюванні частоти в перехідних режимах ЕЕС, є наступні:

- на вихідні величини (u – вихідний сигнал):
 - 1) обмеження на величину наявних резервів потужності засобів керування (віртуальних електричних станцій): $u^{min} \leq u_k \leq u^{max}$;

- 2) обмеження на швидкість зміни потужності засобів керування: $\Delta u^{min} / \Delta t \leq \Delta u_k / \Delta t \leq \Delta u^{max} / \Delta t$.
- на вхідні величини (y – вхідний сигнал):
 - 1) обмеження на величину відхилення частоти: $y^{min} \leq y_k \leq y^{max}$;
 - 2) обмеження на максимальну швидкість зміни частоти: $\Delta y^{min} / \Delta t \leq \Delta y_k / \Delta t \leq \Delta y^{max} / \Delta t$;
 - 3) обмеження на величину взаємного кута навантаження (δ_{ij}) між КГГ: $\delta_{mn} \leq \delta_{mn}^{max}$.

З метою дослідження якості функціонування системи автоматичного регулювання частоти на основі УПМ, при визначених обмеженнях, проведено аналіз перехідних процесів при моделюванні трифазних КЗ в центрах інерції ЕЕС. Отримані результати розрахунку перехідних режимів ЕЕС при визначених обмеженнях на величину швидкості завантаження та розвантаження засобів керування наведено на рис.7 (а-г – 1ГВт/с, д-з – 200МВт/с).

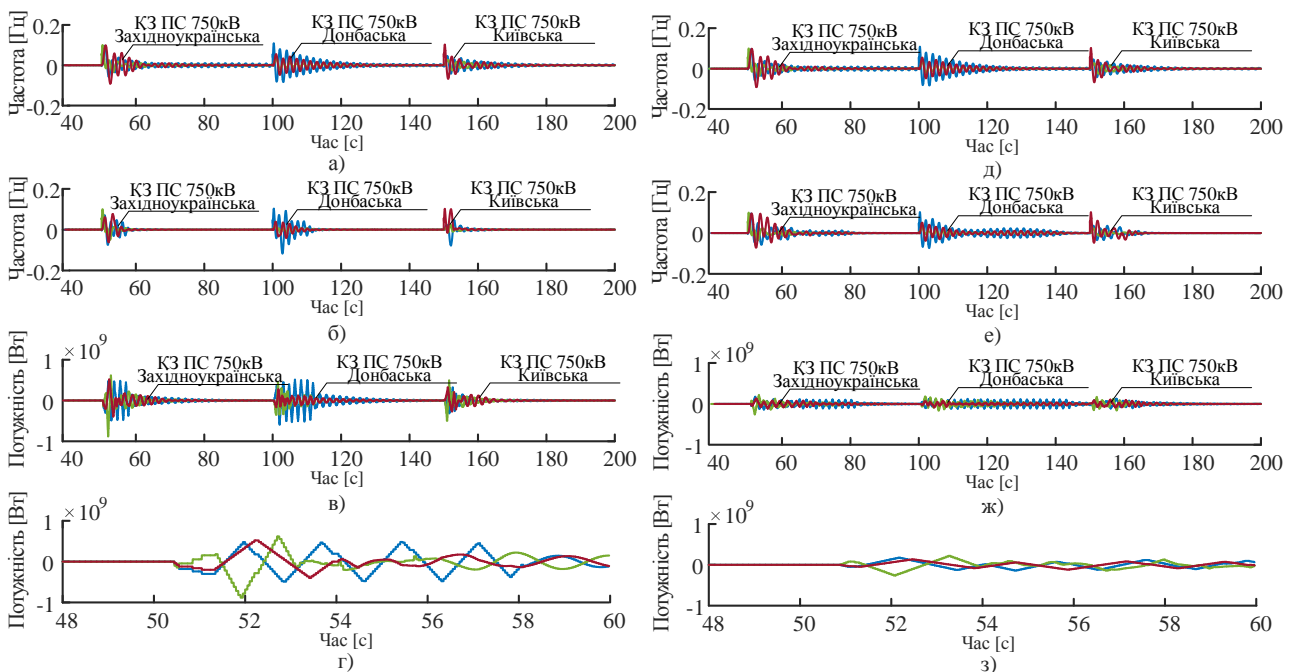


Рис.7. Результати розрахунку перехідного процесу відхилення частоти центрів інерції КГГ: а, д) без централізованого керування; б, е) з централізованим керуванням на основі УПМ; в, г, ж, з) використаної потужності резервів засобів керування відповідних КГГ, при обмеженнях на величину швидкості завантаження та розвантаження засобів керування

Встановлено, що при використанні УПМ з обмеженням на швидкість завантаження/розвантаження засобів керування на рівні 1ГВт/с (рис.7 а-г) – час перехідного процесу зменшився в середньому в 2 рази, логарифмічний декремент затухання збільшився в 1.5 рази. При швидкості завантаження/розвантаження 200МВт/с (рис.7 д-з) – час перехідного процесу зменшився в середньому в 1,5 рази, логарифмічний декремент затухання збільшився в 1.33 рази. Отримані результати розрахунку свідчать, що характеристики засобів керування на завантаження та розвантаження якісно впливають на якість регулювання.

Дослідження впливу характеристик каналів передачі даних в ОЕС України для інформаційного забезпечення СМПР та централізованої системи автоматичного регулювання частоти ЕЕС показали (рис.8), що при налаштуванні САРЧП необхідно враховувати затримки в КПД величиною від 1мс до 250мс. Аналіз керованої по лінійному зворотному зв'язку (еквівалентному УПМ без обмежень) показав (рис.8), що при величині затримки більше 50мс система з централізованим керуванням втрачає стійкість.

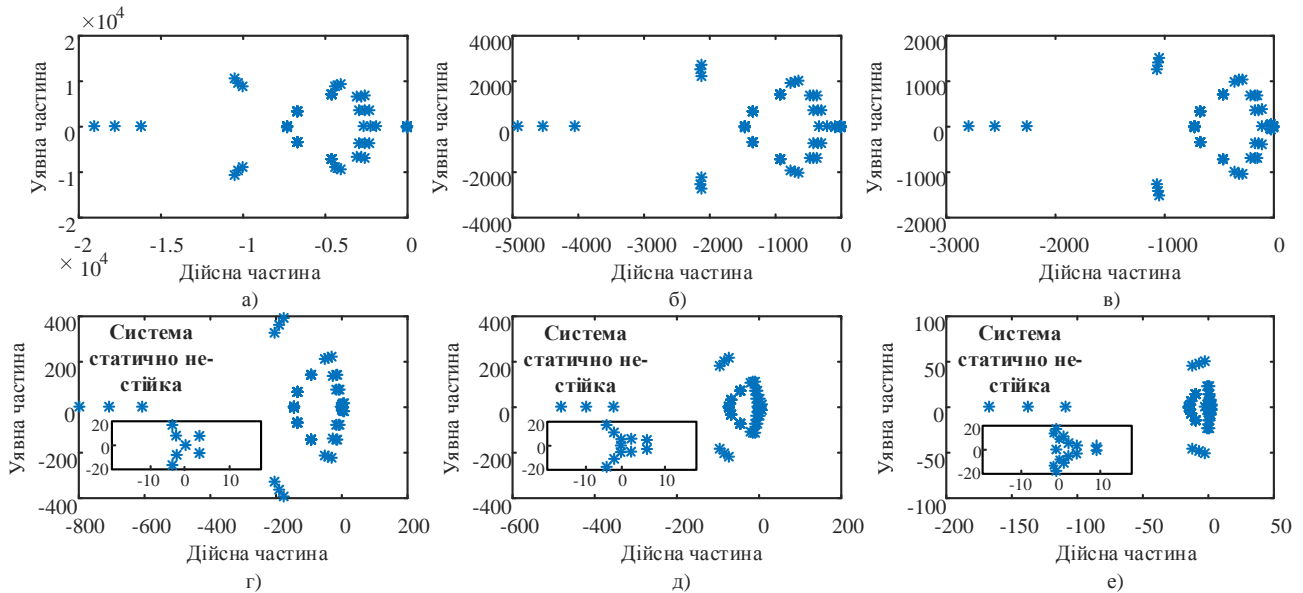


Рис.8. Полюси системи з централізованим керуванням при затримках в КПД : а) 1×10^{-3} с, б) 5×10^{-3} с, в) 1×10^{-2} с, г) 5×10^{-2} с, д) 1×10^{-1} с, е) 2.5×10^{-1} с

На основі використання модифікованої моделі об'єкту керування виконано налаштування системи автоматичного регулювання частоти на основі УПМ з урахуванням затримок в КПД. Для вихідної моделі без затримок вхідні/вихідні канали моделі модифіковано на основі апроксимації Паде, що враховує визначені рівні затримок в реальних КПД. Таким чином, вхідні/вихідні значення модифікованої моделі типу «чорний ящик» у процесі УПМ синхронізуються з урахуванням, визначених у процесі передачі даних, затримок реальних КПД. Запропонований підхід на основі використання модифікованої моделі дозволяє, в процесі формування оптимальних керівних команд, враховувати затримки КПД, використовуючи аналогічний процес розрахунку уставок ВІ ВДЕ як і для системи без затримок.

Встановлено, що при затримці в КПД до 250мс, на розрахунковій трьохмашинній моделі час перехідного процесу зменшився в 2 рази (рис.9), логарифмічний декремент згасання збільшився в 3.5 рази. Отримані результати розрахунку підтверджують ефективність запропонованого підходу до розрахунку уставок засобів керування з урахуванням затримок в каналах передачі даних.

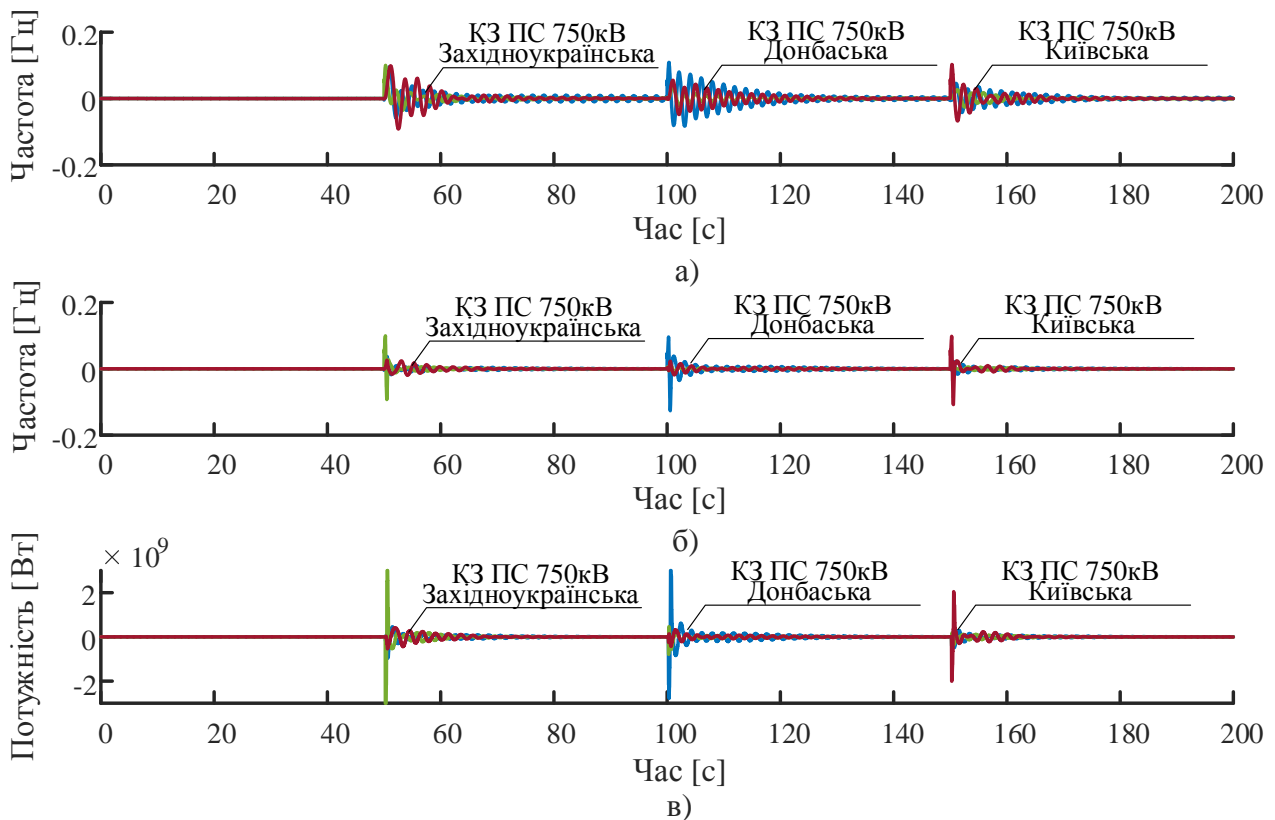


Рис.9 Результати розрахунку відхилення частоти центрів інерції КГТ при затримці в КПД 250мс: а) без централізованого керування; б) з централізованим керуванням на основі УПМ; в) використаної потужності резервів засобів керування відповідних КГТ

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У роботі наведено нове вирішення актуального науково-прикладного завдання підвищення якості регулювання частоти електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії на основі розвитку методів ідентифікації динамічної моделі ЕЕС з використанням даних системи моніторингу перехідних режимів та розробки нових методів залучення ВДЕ з регуляторами віртуальної інерції до регулювання частоти ЕЕС.

Виконані дослідження дозволяють зробити наступні висновки:

1. Проведено аналіз стану та перспектив розвитку ОЕС України. Виявлено тенденцію до збільшення частки ВДЕ в енергобалансі до 2025 року до 10-12% від встановленої потужності енергосистеми. Встановлено, що значна частка ВДЕ з інверторним приєднанням в енергобалансі призводить до погіршення умов функціонування систем автоматичного регулювання частоти ЕЕС, що пов'язано зі зменшенням еквівалентної постійної інерції енергосистеми.
2. Дослідження існуючих методів аналізу перехідних режимів ЕЕС свідчать про доцільність їх вдосконалення на основі використання спектрального аналізу та методів ієрархічної кластеризації даних СМПР для визначення складу когерентних за частотою груп генераторів. Запропонований підхід враховує процеси об'єднання когерентних груп генераторів під час перехідних

процесів, що дозволило визначити три слабкі перетини з максимальною потужністю міжсистемних коливань. Отримані результати кластеризації для розрахункових сценаріїв свідчать, що запропонований підхід забезпечує інваріантність складу КГГ по відношенню до місця виникнення збурення.

3. Запропоновано метод ідентифікації динамічної моделі ЕЕС на основі використання даних системи моніторингу перехідних режимів та методів підпросторової ідентифікації. Розроблений підхід дозволив визначити динамічні характеристики ЕЕС, частоти небезпечних коливань потужності між КГГ та частоти відповідних центрів інерції КГГ. Використання підпросторової ідентифікації дозволило на основі даних пасивного експерименту сформувати динамічну модель трьохмашинної ЕЕС, еквівалентної ОЕС України з трьома КГГ. Встановлено, що середньоквадратичне відхилення розрахованих на ідентифікованій моделі значень частоти та відповідних даних СМПР склало $3.56 \cdot 10^{-3}$ Гц, а різниця між значеннями максимальних відхилень частоти не перевищує $2.1 \cdot 10^{-4}$ Гц.

4. Показана можливість використання ВДЕ з ВІ для регулювання частоти ЕЕС в перехідних режимах. Встановлено, що при налаштуванні регуляторів віртуальної інерції ВЕС необхідно враховувати динамічні характеристики електричної мережі в місці приєднання ВДЕ та роботу існуючих систем регулювання. З метою підвищення ефективності використання віртуальної інерції ВДЕ для автоматичного регулювання частоти розроблено новий підхід до централізованого регулювання потужності ВДЕ з ВІ.

5. Розроблено метод регулювання частоти ЕЕС в перехідних режимах на основі використання ідентифікованої моделі ЕЕС. Сформовані на основі аналізу даних СМПР, уставки регуляторів ВІ враховують взаємний вплив КГГ, характеристики резервів засобів керування на завантаження і розвантаження, та допустимі межі зміни режимних параметрів під час перехідних режимів.

6. Розроблено метод налаштування та розрахунку уставок регуляторів віртуальної інерції відновлюваних джерел енергії. Встановлено, що ефективність регулювання частоти ЕЕС з використанням розробленого методу у значній мірі залежить від швидкодії засобів керування, встановлених обмежень та затримок в каналах передачі даних. Так час перехідного процесу зменшується на 25% при збільшенні швидкодії засобів керування в 5 разів.

7. На основі досліджень якості та стійкості централізованого регулювання частоти ЕЕС встановлено, що затримки КПД не повинні перевищувати 10мс, проте з використанням управління на основі прогнозуючої моделі величину затримок КПД можна збільшити до 250мс.

8. Аналіз результатів моделювання трифазних КЗ в центрах інерції відповідних КГГ показав, що використання запропонованого підходу дозволяє підвищити окремі показники якості перехідних процесів зміни частоти ЕЕС з ВДЕ не менше ніж в 1.2 рази.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Матеріали дисертаційної роботи викладено в таких опублікованих наукових працях:

1. Яндульський О.С. Локальне керування розосередженими джерелами енергії в перехідних режимах / О.С. Яндульський, А.А. Марченко, А.Б. Нестерко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2014. - № 1- С. 82-85. (Здобувачем розроблено моделі регулювання частоти та потужності регіону Південної енергосистеми ОЕС України).

2. Яндульський О.С. Оцінка динамічних характеристик багатомашинних електроенергетичних систем на основі даних системи моніторингу перехідних режимів / О.С. Яндульський, А.А. Марченко, А.Б. Нестерко // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – № 4. – 2014. [Електронний ресурс] Режим доступу: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/3824/5575> (Включено до наукометричної бази РИНЦ) (Здобувачем проведено аналіз внутрішніх коливань когерентних груп генераторів та визначено частоти центрів інерції когерентних груп генераторів ОЕС України; досліджено роботу диференціального регулятора віртуальної інерції в системі керування сонячною електростанцією).

3. Яндульський О.С. Дослідження впливу відновлюваних джерел енергії з віртуальною інерцією на процеси регулювання частоти та потужності електроенергетичної системи / О.С. Яндульський, А.Б. Нестерко // Енергетика, економіка, технології, екологія. Науковий журнал. – 2015. - №1(39) –С.17-24. (Здобувачем досліджено роботу регулятора віртуальної інерції в складі системи керування швидкості обертання турбіни ВЕС).

4. Яндульський О.С. Оптимальне регулювання напруги в розподільній електричній мережі з джерелом розосередженого генерування з урахуванням їх належності одному власнику при використанні резерву активної потужності / О.С. Яндульський, Г.О. Труніна, А.Б. Нестерко // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. - 2015. - №2/91. – С.50-54. (Здобувачем розроблено критерії регулювання потужності відновлюваних джерел енергії у складі електричної мережі).

5. Яндульський О.С. Ідентифікація моделі електроенергетичної системи на основі синхронізованих вимірів режимних параметрів під час перехідних процесів / О.С. Яндульський, А.Б. Нестерко // Технічна електродинаміка. – 2015. - №5. – С.59-62. (Включено до наукометричної бази SCOPUS) (Здобувачем проаналізовано основні етапи ідентифікації динамічної моделі електроенергетичної системи; на основі використання підпросторових методів ідентифікації отримано лінійну модель ЕЕС у нормальній формі змінних стану).

6. Яндульський О.С. Централізована система оптимального регулювання частоти та потужності електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії / О.С. Яндульський, А.Б. Нестерко // Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки: збірник наукових праць. - 2015. - №30(Т.2). – С. 113-121. (Здобувачем розроблено структуру

ієрархічної дворівневої системи регулювання частоти ЕЕС з ВДЕ; запропоновано підхід до оптимального регулювання частоти ЕЕС на основі використання керованих ВДЕ з віртуальною інерцією).

7. Яндульський О.С. Визначення когерентних груп генераторів під час електро cơеханічних перехідних процесів в електроенергетичній системі / О.С. Яндульський, О.В. Тимохін, Г.О. Труніна, А.Б. Нестерко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2015. – №6(123). – С. 129-135. (Здобувачем розроблено метод визначення складу когерентних груп генераторів з повільною когерентністю під час перехідних процесів електроенергетичної системи).

8. Нестерко А.Б. Підвищення ефективності регулювання частоти електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії // Відновлювана енергетика. – 2015. – №4(43). – С. 12-16. (Здобувачем розроблено підхід до побудови системи автоматичного регулювання частоти електроенергетичної системи з використанням управління на основі прогнозуючої моделі, синхронізованих вимірів системи моніторингу перехідних режимів та ВДЕ з віртуальною інерцією як засобів керування).

9. Яндульський О.С. Визначення резервів активної потужності джерел розосередженого генерування з урахуванням їх впливу на напругу в мережі / О.С. Яндульський, А.А. Марченко, А.Б. Нестерко, Г.О. Труніна // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. Збірник наукових праць. – 2016. – №1(43). – С. 13-18. (Включено до наукометричної бази РИНЦ) (Здобувачем досліджено підхід до визначення величини резерву активної потужності ВДЕ, що використовується для регулювання частоти та активної потужності в різних режимах роботи ЕЕС).

10. Яндульський О.С. Локальне керування розосередженими джерелами енергії в перехідних режимах / О.С. Яндульський, А.А. Марченко, А.Б. Нестерко // ОКЕУ 2015 Оптимальне керування електроустановками. II Міжнародна науково-технічна конференція. Тези доповідей. 22-24 жовтня 2013р. Вінницький національний технічний університет, Вінниця - С. 117

11. Яндульський О.С. Вплив відновлюваних джерел енергії з інверторним приєднанням на інерцію електроенергетичної системи / О.С. Яндульський, А.Б. Нестерко // XIII Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми сучасної електротехніки – 2014» (ПСЕ-2014). Тези доповідей. 2-6 червня 2014р. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ – С.22

12. Яндульський О.С. Оцінка динамічних характеристик багатомашинних електроенергетичних систем на основі даних синхрофазорів / О.С. Яндульський, А.А. Марченко, А.Б. Нестерко // V Міжнародна науково-технічна конференція «Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах». Тези доповідей. 29 червня – 2 липня 2014р. Луцький національний технічний університет, Луцьк-Шацькі озера – С.161-162

13. Труніна Г.О. Керування режимами розподільної електричної мережі за допомогою сонячної електростанції / Г.О. Труніна, А.Б. Нестерко // XV Ювілейна міжнародна науково-практична конференція «Відновлювана

енергетика XXI століття». Тези доповідей. 16-17 вересня 2014р. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Кафедра відновлюваних джерел енергії, Київ – С.101-103

14. Яндульський О.С. Централізована система оптимального регулювання частоти та потужності електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії / О.С. Яндульський, А.Б. Нестерко // Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених, спеціалістів, аспірантів «Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика» Тези доповідей. 20-24 квітня 2015 р. ДВНЗ «ПДТУ», Маріуполь – С.31-32

15. Яндульський О.С. Визначення резервів активної потужності відновлюваних джерел енергії з урахуванням їх впливу на напругу в мережі / О.С. Яндульський, А.Б. Нестерко, Г.О. Труніна // XVI міжнародна науково-практична конференція «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті». Тези доповідей. 28-29 травня 2015 р. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Кафедра відновлюваних джерел енергії, Київ – С.17

16. Яндульський О.С. Ідентифікація моделі електроенергетичної системи на основі синхронізованих вимірів режимних параметрів під час перехідних процесів / О.С. Яндульський, А.Б. Нестерко // Четверта міжнародна конференція «Інтелектуальні енергетичні системи - ESS'15». Тези доповідей. 9-12 червня 2015р., Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ – С.32

17. Яндульський О.С. Визначення когерентних груп генераторів під час електромеханічних перехідних процесів в електроенергетичній системі / О.С. Яндульський, О.В. Тимохін, Г.О. Труніна, А.Б. Нестерко // III Міжнародна науково-технічна конференція «Оптимальне керування електроустановками» (ОКЕУ 2015). Тези доповідей. 14-15 жовтня 2015р. Вінницький національний технічний університет, Вінниця – С.66

18. Яндульський О.С. Залучення відновлюваних джерел енергії до регулювання частоти та потужності електроенергетичної системи / О.С. Яндульський, А.Б. Нестерко, Г.О. Труніна // ОКЕУ 2015 Оптимальне керування електроустановками. III Міжнародна науково-технічна конференція. Тези доповідей. 14-15 жовтня 2015р. Вінницький національний технічний університет, Вінниця – С.67

АНОТАЦІЯ

Нестерко А. Б. Підвищення ефективності регулювання частоти електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії. – 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». – Київ, 2016.

Дисертаційна робота присвячена розробці методів та засобів, направлених на підвищення ефективності регулювання частоти

електроенергетичних систем з відновлюваними джерелами енергії. В роботі розроблено динамічну модель ОЕС України. На основі використання кластерного аналізу синхронізованих вимірів режимних параметрів СМІР вдосконалено метод ідентифікації інваріантної структури ЕЕС та запропоновано метод формування динамічної моделі ЕЕС на основі аналізу руху центрів інерції когерентних груп генераторів.

Розроблено метод регулювання частоти ЕЕС в перехідних режимах за частотою на основі використання динамічної моделі ЕЕС та з урахуванням взаємного впливу когерентних груп генераторів, характеристик резервів засобів керування на завантаження та розвантаження та допустимих меж зміни режимних параметрів під час перехідних режимів за частотою.

Встановлено, що використання запропонованого підходу дозволяє підвищити ефективність регулювання та якість перехідних процесів зміни частоти ЕЕС з ВДЕ не менше ніж в 1.2 рази.

Ключові слова: електроенергетична система, система автоматичного регулювання частоти, відновлювані джерела енергії, віртуальна інерція, централізоване керування.

ABSTRACT

Nesterko A. Improving the efficiency of electrical power systems frequency control considering renewable energy sources. – Manuscript.

The thesis for the candidate of engineering on speciality 05.14.02 – power plants, networks and systems. The National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», – Kyiv, 2016

Thesis is devoted to the development of methods and tools aimed to improve the efficiency of frequency control of electrical power systems considering renewable energy sources. In work, it was developed a dynamic model of IPS of Ukraine, the use of which allows to consider the impact of renewable energy sources on the process of IPS of Ukraine frequency control. On the basis of the use of cluster analysis of synchronized measurement of EPS transients modes it was improved the method of identifying of electrical power system invariant structure and proposed the method of forming a dynamic model of EPS on the basis of the analysis of the motion of inertia centers of coherent groups of generators.

It was developed the method of EPS frequency control through the use of a dynamic model of the EPS which taking into account the mutual influence of coherent groups of generators, the characteristics of reserve management tools for loading and unloading and limits the changes of regime parameters in transient conditions when the frequency is changed.

It was found that the use of the proposed approach could improve the efficiency and control quality during transient changes in the EPS frequency more than 1.2 times.

Keywords: power system, load frequency control, renewable energy, virtual inertia, centralized control.

АННОТАЦИЯ

Нестерко А.Б. Повышение эффективности регулирования частоты электроэнергетической системы с возобновляемыми источниками энергии. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – Электрические станции, сети и системы. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», – Киев, 2016.

Диссертационная работа посвящена разработке методов и средств, направленных на повышение эффективности регулирования частоты электроэнергетических систем (ЭЭС) с возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ).

В работе проведен анализ состояния и перспектив развития ОЭС Украины на следующие 10 лет. Выявлена тенденция к увеличению доли ВИЭ в энергобалансе к 2025 году до 10-12% от установленной мощности энергосистемы. Исследованы причины ухудшения условий функционирования систем автоматического регулирования частоты ЭЭС со значительной долей ВИЭ в энергобалансе. Установлено, что ВИЭ с инверторным присоединением к сети приводят к уменьшению эквивалентной постоянной инерции энергосистемы.

Установлено, что традиционные подходы к построению систем автоматического регулирования частоты не учитывают особенности режимов генерации ВИЭ, не обеспечивают должного контроля выделенных резервов мощности и не учитывают допустимые пределы изменения режимных параметров ЭЭС. Это делает актуальной задачу разработки новых методов регулирования частоты электроэнергетической системы, в том числе с привлечением ВИЭ.

В работе разработана динамическая модель ЭЭС с ВИЭ для исследования переходных режимов на основе данных СМПР. Использование динамической модели ЭЭС позволяет оценить влияние возобновляемых источников энергии на процессы регулирования частоты ОЭС Украины.

Исследованы методы анализа переходных режимов ЭЭС. Показана целесообразность их совершенствования на основе использования спектрального анализа и методов иерархической кластеризации при определении состава когерентных по частоте групп генераторов (КГГ). Предложенный подход учитывает процессы объединения когерентных групп генераторов во время переходных процессов, что позволило определить три слабые сечения с максимальной мощностью межсистемных колебаний в ОЭС Украины. Полученные результаты кластеризации для расчетных сценариев свидетельствуют, что предложенный подход обеспечивает инвариантность состава КГГ по отношению к месту возникновения возмущения.

Автором предложен метод идентификации динамической модели ЭЭС на основе использования данных системы мониторинга переходных режимов и методов подпространственной идентификации. Использование подпространственной идентификации позволило на основе данных пассивного

эксперимента сформировать динамическую модель трехмашинной ЭЭС, эквивалентной ОЭС Украины с тремя КГГ. Разработанный подход позволил определить динамические характеристики ЭЭС, частоты опасных колебаний мощности между КГГ и частоты соответствующих центров инерции КГГ.

В работе показана возможность использования ВИЭ с виртуальной инерции для регулирования частоты ЭЭС в переходных режимах. Установлено, что при настройке регуляторов виртуальной инерции ВЭС необходимо учитывать динамические характеристики электрической сети в месте присоединения ВИЭ и работу существующих систем регулирования. С целью повышения эффективности использования виртуальной инерции ВИЭ для автоматического регулирования частоты разработан новый подход к централизованному регулированию мощности ВИЭ с ВИ.

Разработан метод регулирования частоты ЭЭС в переходных режимах на основе использования динамической модели ЭЭС. Предложенный подход к настройке регуляторов ВИЭ позволяет учесть взаимное влияние КГГ, характеристики резервов средств управления на загрузку и разгрузку, и допустимые пределы изменения режимных параметров в переходных режимах.

Исследовано влияние задержек в каналах передачи данных и ограничений при регулировании частоты ЭЭС, что позволило определить необходимые характеристики средств управления и значения допустимых задержек каналов передачи данных (КПД) САРЧМ. На основе исследований качества и устойчивости централизованного регулирования частоты ЭЭС установлено, что задержки КПД не должны превышать 10 мс, однако с использованием управления на основе прогнозирующей модели величину задержек КПД можно увеличить до 250мс.

Анализ результатов моделирования показал, что использование предложенного подхода позволяет повысить отдельные показатели качества переходных процессов изменения частоты ЭЭС с ВИЭ не менее чем в 1.2 раза.

Результаты проведенных исследований позволяют дать рекомендации по модернизации системы мониторинга переходных режимов и системы автоматического регулирования частоты ОЭС Украины.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, система автоматического регулирования частоты, возобновляемые источники энергии, виртуальная инерция, централизованное управление.