

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

ГУЛИЙ ВОЛОДИМИР СЕРГІЙОВИЧ



УДК 621.311.22

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВТОРИННОГО
РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ ТА ПОТУЖНОСТІ В ЕНЕРГОСИСТЕМІ ІЗ
ЗАЛУЧЕННЯМ ЕНЕРГОБЛОКІВ ТЕПЛОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ**

Спеціальність 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2026

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі автоматизації енергосистем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Яндульський Олександр Станіславович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
професор кафедри автоматизації енергосистем

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Лежнюк Петро Дем'янович,
Вінницький національний технічний університет,
професор кафедри електричних станцій та систем;

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

Захист відбудеться «15» квітня 2026 р. о 14:30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.06 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, просп. Берестейський, 37, корп. 1, ауд. 05.

З дисертацією можна ознайомитися у Науково-технічній бібліотеці ім. Г.І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, просп. Берестейський, 37.

Автореферат розісланий «06» березня 2026 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



М.А. Щерба

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасні зміни в структурі об'єднаної енергосистеми України, зростання частки відновлюваних джерел енергії та децентралізованої генерації висувають нові вимоги до надійної роботи енергосистеми. В цих умовах регулювання частоти та потужності в електроенергетичній системі (ЕЕС) є важливою актуальною задачею.

Значний внесок у вирішенні проблеми підвищення ефективності регулювання частоти та потужності зроблено вітчизняними та закордонними науковцями зокрема: Кириленко О.В., Стогній Б. С., Буткевич О. Ф., Кулик М. М., Лепорський В. Д., Лежнюк П. Д., Яндульський О. С., Павловський В. В., P. Anderson, N. Kumar, A. Fouad та інші.

В останні роки частина енергоблоків теплових електричних станцій (ТЕС) пройшли модернізацію. Це дозволило покращити їх маневрові характеристики і дає можливість залучити їх до вторинного регулювання частоти та потужності та вирішити існуючу проблему дефіциту резервів вторинного регулювання частоти та потужності. Крім того в енергетиці України розвивається ринок допоміжних послуг, який передбачає залучення енергоблоків ТЕС до вторинного регулювання частоти та потужності. Зважаючи на те, що більшість енергоблоків ТЕС були спроектовані не для роботи в режимах регулювання частоти та потужності виникає необхідність проведення комплексного дослідження участі енергоблоків ТЕС у вторинному регулюванні частоти та потужності.

Таким чином актуальною науково-практичною проблемою є розробка моделей елементів системи автоматичного регулювання частоти та потужності (САРЧП), методів та засобів регулювання частоти в енергосистемі при залученні блоків ТЕС до вторинного регулювання частоти з врахуванням характеристик котельного обладнання. Вирішення цієї проблеми дозволяє задовольнити чинні вимоги до регулювання частоти та потужності в ОЕС України та підвищити ефективність вторинного регулювання частоти та потужності.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження за темою дисертаційної роботи виконувалися на кафедрі автоматизації енергосистем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України у відповідності з планами науково-дослідних робіт за темами: «Наукові засади, підходи і методи зменшення впливу низькочастотних коливань потужності на режими роботи Об'єднаної енергетичної системи» (№ ДР 0114U002532, 2014-2016 р.р.), «Дослідження дії первинного регулювання та демпфірування низькочастотних коливань потужності ОЕС України» (договір № 469 від 2015 р., замовник ДП НЕК «Укренерго» № ДР - 469, 2015-2018 р.р.), «Методи та засоби оптимального керування гідроагрегатами ГЕС, енергоблоками ТЕС та ВДЕ при зміні частоти та перетоків потужності в Об'єднаній енергосистемі» (№ ДР 0117U004260, 2017-2019 р.р.). Частина досліджень виконувалася в рамках міжвузівського співробітництва з університетом Ворика (Великобританія) за напрямом «Дослідження участі повітряних накопичувачів енергії у регулюванні частоти в енергосистемі». При виконанні науково-дослідних робіт здобувач приймав участь у розробці динамічної моделі ОЕС України та її верифікації на основі реальних даних СМІР, зборі реальних параметрів налаштувань електричних станцій,

розробці моделі САРЧП та регуляторів системного та станційних рівнів, а також був виконавцем окремих розділів.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розробка моделей та засобів регулювання частоти та потужності в енергосистемі із залученням енергоблоків ТЕС до процесів вторинного регулювання частоти та потужності з врахуванням особливості роботи котельного обладнання для підвищення ефективності їх роботи.

Для досягнення мети вирішено такі основні задачі:

1. Аналіз вимог до регулювання частоти та ефективність існуючих методів та підходів до побудови та налаштування САРЧП, стану та перспектив розвитку систем автоматичного регулювання частоти в енергосистемі.

2. Розробка математичних моделей енергоблоків ТЕС, які враховують вплив котельного обладнання на вихідні характеристики при участі ТЕС у вторинному регулюванні частоти.

3. Розробка підходу до регулювання частоти та активної потужності, який дозволить покращити ефективність вторинного регулювання частоти в енергосистемі з врахуванням котельного обладнання енергоблоків ТЕС та допустимі значення перетоків потужності у контрольованих перетинах, а також дослідження динамічних характеристик розробленого регулятора і аналіз ефективності його роботи.

4. Формування вимог до побудови САРЧП енергосистеми з врахуванням котельного обладнання блоків ТЕС, залучених до процесів регулювання частоти та потужності в енергосистемі.

Об'єкт дослідження – процеси регулювання частоти та потужності в електроенергетичній системі.

Предмет дослідження – методи та засоби підвищення ефективності вторинного регулювання частоти та потужності з врахуванням впливу роботи котельного обладнання на динамічні характеристики енергоблоку ТЕС при залученні його до процесів вторинного регулювання частоти та потужності в енергосистемі.

Методи дослідження. Вирішення поставлених задач базується на застосуванні методів сучасної теорії керування, теорії нечітких множин, імітаційного моделювання режимів роботи енергосистеми, матричної алгебри та синтезі оптимальних регуляторів.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше розроблено моделі САРЧП та енергоблоків ТЕС, залучених до вторинного регулювання частоти та потужності, які на відміну від існуючих враховують особливості роботи котельного обладнання та дозволяють дослідити вплив його роботи на вихідні характеристики блоків станцій при їх залученні до регулювання частоти.

2. На основі проведених досліджень процесів регулювання в САРЧП з використанням ПІ-закону та нечіткої логіки показана їх низька ефективність при залученні енергоблоків ТЕС до вторинного регулювання частоти та потужності з контролем перетоків у внутрішніх перетинах ЕЕС.

3. Розроблено підхід до автоматичного регулювання частоти та потужності (АРЧП) на основі методу прогнозуючих моделей (УПМ), використання якого на відміну від існуючих, враховує характеристики котельного обладнання енергоблоків

ТЕС та дозволило зменшити час регулювання, пришвидшити реакцію системи регулювання на збурення та перерегулювання при вторинному регулюванні частоти, що підвищує ефективність регулювання частоти.

4. Отримані нові властивості САРЧП та вихідні характеристики енергоблоків теплових станції при залученні їх до вторинного регулювання частоти на основі яких сформовано вимоги до САРЧП.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Розробка підходу до АРЧП з врахуванням динаміки котельного обладнання енергоблоків дозволив зменшити перерегулювання в САРЧП на 12 %, скоротити час регулювання більш ніж на 40 %, що підвищило ефективність регулювання частоти при паралельній та ізольованій роботі енергосистеми.

2. Розроблений регулятор з використанням запропонованого підходу дозволив зменшити максимальне відхилення перетоку потужності по контрольованим перетинам більш ніж на 55 % у порівнянні з ПІ-регулятором, що в цілому підвищило стійкість ЕЕС.

3. Результати проведених досліджень дозволили сформулювати вимоги до САРЧП та залучити ТЕС до вторинного регулювання з прийнятними характеристиками.

4. Розроблений регулятор на основі прогнозуючих моделей з можливістю обміну даними між ПЗ PowerFactory та Matlab шляхом завантаження спеціальних скомпільованих бібліотек пришвидшив розрахунки більш ніж у 25 разів і може бути використаний в інших дослідженнях.

Результати роботи впроваджено в учбовий процес у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» при викладанні дисциплін: «Теорія автоматичного керування», «Автоматичне управління в енергосистемах» та при виконанні кваліфікаційних та науково-дослідних робіт магістрантів кафедри автоматизації енергосистем факультету електроенерготики та автоматики, а також при виконанні науково-дослідних робіт з ДП НЕК «Укренерго».

Особистий внесок здобувача. Всі результати дисертаційної роботи отримані автором особисто. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, здобувачу належать: у роботі [1] – запропоновано вдосконалений підхід до вторинного регулювання на основі методу прогнозуючих моделей, що дозволяє враховувати обмеження енергоблоків і резервів, обмеження у внутрішніх контрольованих перетинах та підвищити ефективність вторинного регулювання частоти та потужності в енергосистемі; [2] – підвищено надійність роботи регулятора в умовах значної втрати потужності генерації та збільшено ресурс роботи літій-залізофосфатних акумуляторних батарей, які застосовуються у якості накопичувачів електроенергії у СЕС; [3] – уточнено модель ОЕС України; у [4] уточнено модель енергоблоку ТЕС з врахуванням особливості роботи котельного обладнання при участі станції у вторинному регулюванні частоти та потужності, виконано порівняльний аналіз ефективності вторинного регулювання частоти та активної потужності при використанні різних методів налаштування параметрів регулятора системного рівня САРЧП та розроблено адаптивний регулятор на основі нечіткої логіки, використання якого забезпечує виконання чинних вимог до регулювання частоти та активної потужності; [5] – проведено аналіз проблем участі

енергоблоків ТЕС у вторинному регулювання частоти та потужності, а також встановлено наявність ділянки спаду вихідної потужності енергоблоку ТЕС при появі керуючого впливу на збільшення потужності, що обумовлено роботою котельного обладнання; [6] – удосконалено модель енергоблоку ТЕС з врахуванням станційного рівня САРЧП та виконано пошук оптимальних параметрів налаштування системного стабілізатора з використанням сучасних методів оптимізації; у [7] удосконалено модель ОЕС України зі значною часткою ВЕС; [8] – виконано оптимізацію налаштування коефіцієнтів регулятора з використанням об'єктно орієнтованої бібліотеки нелінійних систем середовища Matlab, яка дозволяє визначити параметри регулятора, що відповідають критерію оптимальності; у [9] уточнено динамічну модель ОЕС України, яка включає моделі ТЕС з реальними параметрами налаштування, що приймають участь у нормованому первинному регулюванні частоти та потужності в ОЕС України.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційного дослідження доповідались та отримали позитивну оцінку на: Міжнародній науково-технічній конференції «Оптимальне керування електроустановками» (м. Вінниця, 2015 р., 2017 р., 2025 р.); VII Міжнародній науково-технічній конференції «Підвищення ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах» (м. Луцьк, 2018 р.); 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS) (м. Харків, 2018 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті» (м. Київ, 2018–2020 р.р., 2024–2025 р.р.); Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики» (м. Київ, 2012–2014 р.р., 2023-2024 р.р.).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 24 наукові праці, у тому числі 8 статей у наукових фахових виданнях (з яких 2 статті у періодичних виданнях України, які внесено до категорії «А» та міжнародної наукової бази (Scopus), 1 стаття у періодичному науковому виданні іншої держави, яка входить до ОЕСР та Європейського Союзу), 16 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із змісту, переліку умовних скорочень, вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел (122 найменувань) і 5 додатків. Загальний обсяг роботи становить 185 сторінок, у тому числі 134 сторінки основного тексту, 31 рисуноків та 10 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета та задачі наукових досліджень, визначено об'єкт та предмет досліджень, наведено методи досліджень, сформовано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, наведено дані про зв'язок роботи з науковими програмами, відомості про апробацію отриманих результатів, вказано основний внесок здобувача та публікації основних результатів досліджень.

У **першому розділі** проведено аналіз стану та основних напрямків розвитку САРЧП. Встановлено, що значне збільшення в ОЕС України встановленої потужності ВДЕ призводить до зменшення загальної інерції енергосистеми та зниження ефективності регулювання частоти, а об'єднання ОЕС України з енергосистемою країн західної Європи вимагає дотримання додаткових вимог до регулювання частоти та активної потужності. Виконано аналіз вимог до первинного та вторинного регулювання

частоти в енергосистемах різних країн світу у тому числі в Україні. Відзначено, що в ОЕС України існує дефіцит резервів вторинного регулювання частоти та потужності. Довгий час до вторинного регулювання частоти залучалась лише ДніпроГЕС-1, резервів потужності якої недостатньо для виконання вимог згідно чинних нормативних документів.

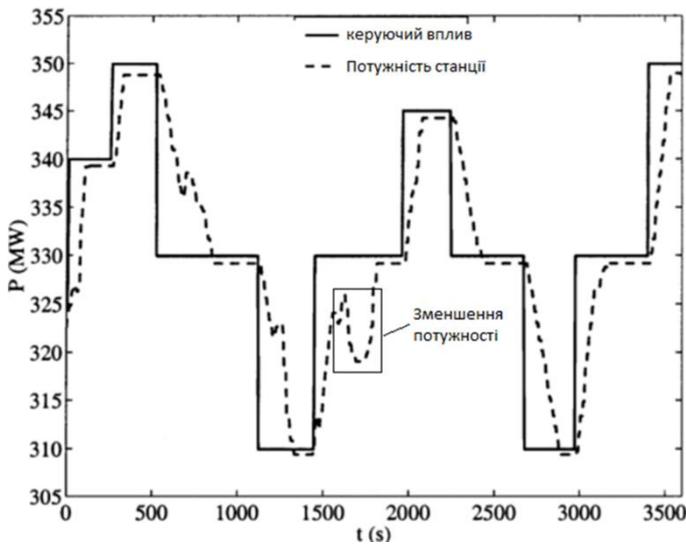


Рис. 1 – Графік зміни вихідної потужності енергоблоку ТЕС

пов'язаних із регулюванням потужності ТЕС показав наявність ділянки спаду вихідної потужності енергоблоку станції при надходженні керівного впливу на збільшення вихідної потужності (рис. 1), що обумовлено особливістю роботи котельного обладнання ТЕС. В момент підвищення потужності контур нагріву робочого тіла не спроможний одночасно забезпечити відповідний тиск при наборі потужності. Виникає ділянка зниження вихідної потужності, що негативно впливає на ефективність регулювання частоти в ЕЕС. Схожі результати були отримані при експериментальних випробуваннях енергоблоку ТЕС, які проводились для перевірки можливості його залучення до вторинного регулювання частоти та потужності. Отримані нові властивості вимагають проведення досліджень участі ТЕС у вторинному регулюванні частоти та потужності з врахуванням особливості роботи котельного обладнання для підвищення ефективності регулювання частоти в ЕЕС.

У другому розділі проведено математичне моделювання САРЧП з врахуванням котельного обладнання ТЕС, які залучені до вторинного регулювання частоти та потужності. Розроблена модель САРЧП складається із двох рівнів: системний рівень – при відхиленні частоти та уставки контрольованого перетоку виконує розрахунок позапланового завдання (керуючий вплив) згідно Пропорційно-інтегрального (ПІ) закону регулювання та розподіляє величину позапланового завдання на електростанції, що приймають участь у вторинному регулюванні; станційний рівень розподіляє позапланове завдання серед блоків станції з врахуванням кількості саме тих блоків, які приймають участь у вторинному регулюванні частоти.

При виникненні небалансу в енергосистемі САРЧП системного рівня (рис. 2) формує позапланове завдання активної потужності на кожну електричну станцію, що

Водночас ряд енергоблоків ТЕС пройшли глибоку модернізацію. Це підвищило їх маневрові характеристики та дозволяє залучати їх до вторинного регулювання частоти. Частина енергоблоків пройшли сертифікацію для участі у торгах на нещодавно створеному ринку допоміжних послуг. Залучення енергоблоків ТЕС до вторинного регулювання частоти дозволить вирішити проблему наявного дефіциту регулюючої потужності, що задовольнить чинні вимоги та підвищить ефективність вторинного регулювання частоти та потужності в ЕЕС. Проведений аналіз експериментальних даних та досліджень

приймає участь у вторинному регулюванні частоти. Значення сумарного позапланового значення активної потужності $\sum P_{пз.пл}$ формує центральний (системний) регулятор.

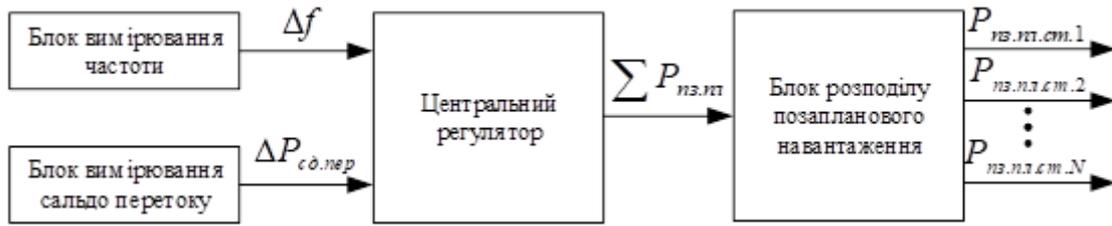


Рис. 2 – Структурна схема системного рівня САРЧП

Для існуючої САРЧП з ПІ-регулятора $\sum P_{пз.пл}$ розраховується за наступною формулою:

$$\sum P_{пз.пл} = K_p \cdot ACE + K_I \cdot \int_{t_1}^{t_2} ACE dt, \quad (1)$$

де K_p , K_I – коефіцієнти налаштування центрального регулятора, ACE – помилка регулювання, яка розраховується за формулою:

$$ACE = \varepsilon_1 \cdot \Delta P_{сд.пер} + \varepsilon_2 \cdot \Delta f, \quad (2)$$

де ε_1 та ε_2 – коефіцієнти, що визначають режими роботи САРЧП, $\Delta P_{сд.пер}$ – зміна сальдо перетоку активної потужності від номінального значення, Δf – відхилення частоти в енергосистемі від номінального значення.

Величина $\sum P_{пз.пл}$ розподіляється між електричними станціями, що приймають участь у вторинному регулюванні частоти в блоці розподілу позапланового навантаження за визначеним законом. Один із законів розподілу позапланового навантаження активної потужності має вигляд:

$$P_{пз.пл.ст.i} = k_i \cdot \sum P_{пз.пл}, \quad (3)$$

де k_i – коефіцієнт дольової участі i -ї електричної станції у вторинному регулюванні частоти.

Сигнал $\sum P_{пз.пл.ст}$ надходить на станційний рівень САРЧП (рис. 3) стайцій, який складається з блоку розподілу позапланового навантаження станцій

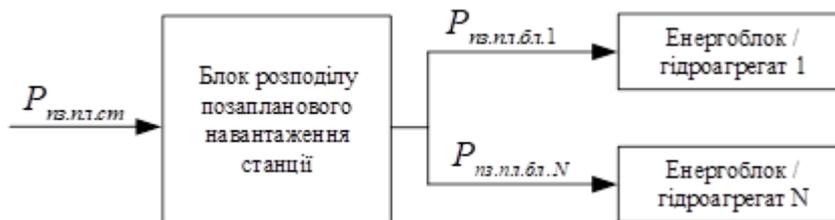


Рис. 3 – Структурна схема станційного рівня САРЧП

ється з блоку розподілу позапланового значення навантаження активної потужності електричної станції серед енергоблоків або гідроагрегатів станції, на які надходить величина $\sum P_{пз.пл.бл}$.

Розроблена математична модель енергоблока ТЕС (рис. 4) з врахуванням роботи котельного обладнання та його участі у вторинному регулюванні частоти складається з системи автоматичного регулювання швидкості турбіни (АРШ), механізму управління турбіни (МУТ), котла, турбіни, генератора. Представлена модель ТЕС враховує маневрові характеристики енергоблока та може бути використана для дослідження процесів регулювання частоти та потужності в ЕЕС.

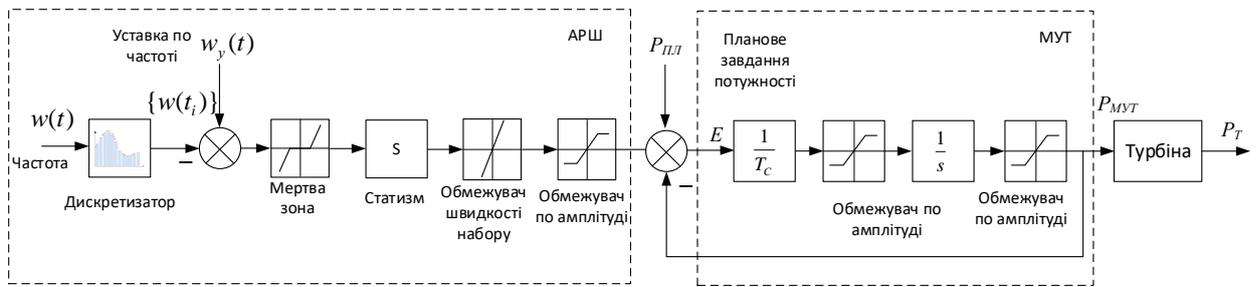


Рис. 4 – Математична модель енергоблоку ТЕС

На (рис. 5) представлена розроблена математична модель котельного обладнання ТЕС. Проведена верифікація (рис. 6) розробленої моделі за реальними даними випробувань (розділ 1) для аналогічного збурення показала, що середньоквадратична помилка становить 0.00701 в.о., а середня абсолютна відносна помилка на проміжку 1600-1800 с складає 0.94%, що є достатнім для проведення подальших досліджень впливу котельного обладнання ТЕС на ефективність регулювання частоти.

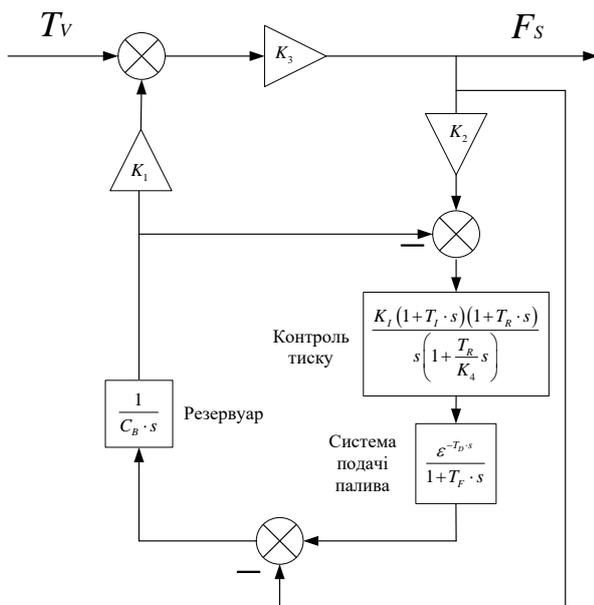


Рис. 5 – Узагальнена модель котельного обладнання ТЕС

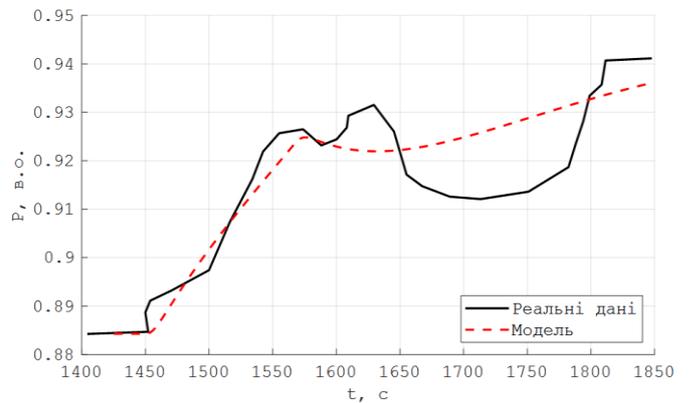


Рис. 6 – Графік зміни потужності енергоблоку

У роботі була розроблена динамічна модель енергосистеми (рис. 7) у програмному забезпеченні PowerFactory.

Розроблена модель включає 621 вузол, 279 синхронних генераторів у складі теплових електричних станцій та гідроелектростанцій (ГЕС), 350 ліній електропередач напругою 750-220 кВ, 376 трансформаторів, 200 вузлів навантаження.

Модель містить міжсистемні лінії з сусідньою енергосистемою і функціонує в режимі паралельної роботи. ВДЕ враховано через їх еквівалентне представлення у вигляді навантаження. Вторинне регулювання частоти здійснює САРЧП. Згідно реальних даних в системному рівні САРЧП встановлений регулятор ПІ закону регулювання. Проведена верифікація розробленої моделі на основі реальних даних існуючої системи моніторингу перехідних процесів (СМІР), підтвердила її відповідність.

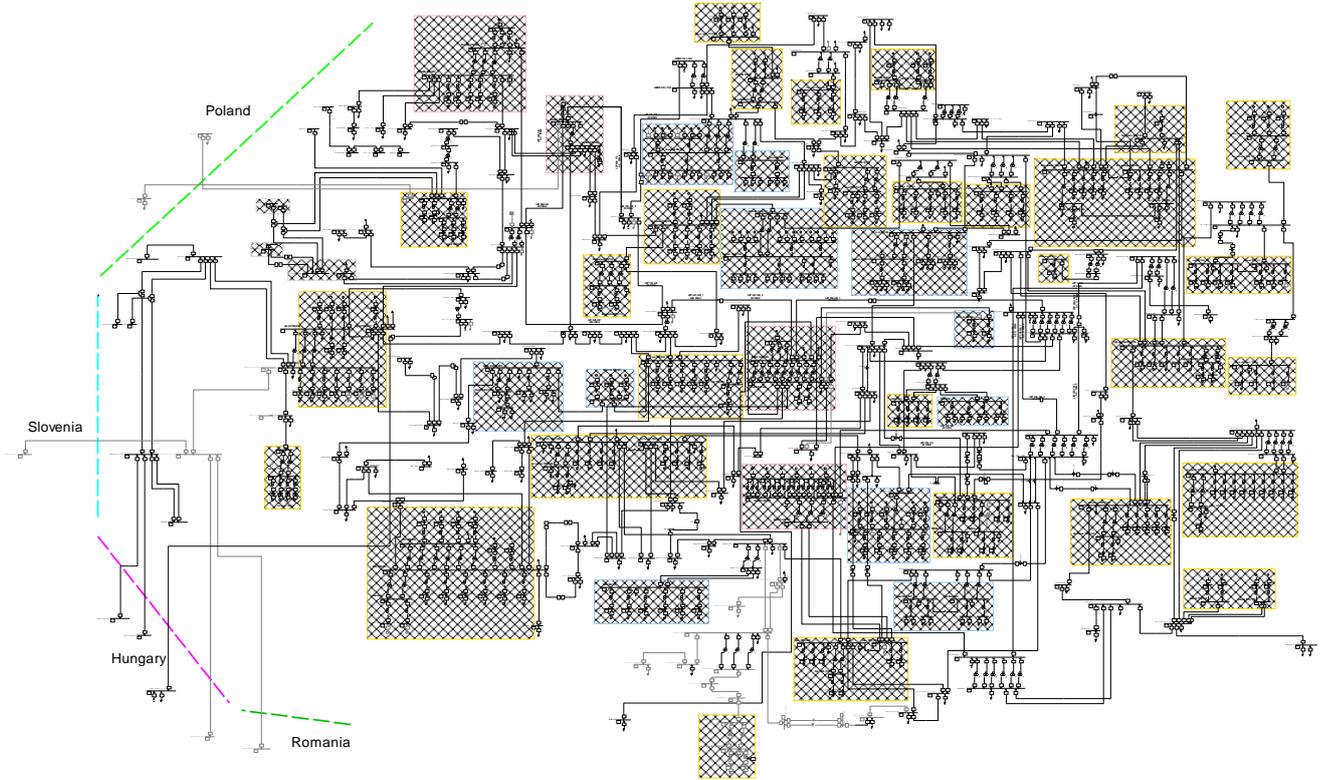


Рис. 7 – Динамічна модель енергосистеми

У **третьому розділі** проведено дослідження участі ТЕС у процесах регулювання частоти та потужності з врахуванням котельного обладнання на моделі 2-х зонної енергосистеми (рис. 8) з центральним регулятором (ЦР) САРЧП, який налаштований згідно III закону регулювання та на основі теорії нечітких множин.

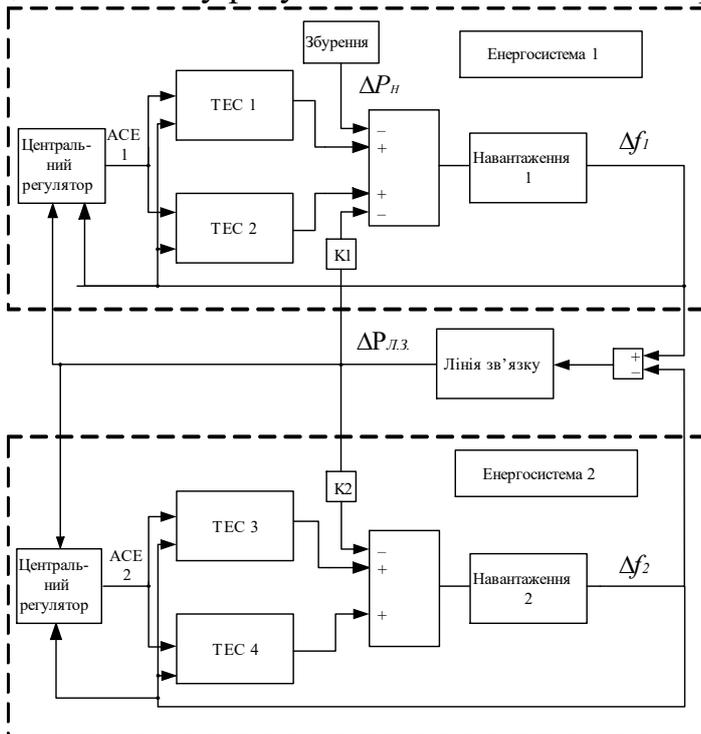


Рис. 8 – Структурна схема 2-х зонної моделі енергосистеми

Аналіз результатів дослідження показав, що при використанні III регулятора, в САРЧП зростає час перехідного процесу та величина перерегулювання, що погіршує ефективність регулювання частоти в ЕЕС (рис. 9). Оптимальне налаштування параметрів ЦР за методом Зіглера–Нікольса призводить до динамічного відхилення частоти -61 мГц (крива 1, рис. 9). Перерегулювання становить 60 мГц, час відновлення резервів первинної потужності -146 с, а на 15-й хвилині після виникнення небалансу відхилення частоти дорівнює $-4,3$ мГц. При налаштуванні параметрів регулятора за методом СНР динамічне відхилення частоти становить $-60,8$ мГц (крива 2, рис. 9), час відновлення резервів пер-

винної потужності дорівнює 250 с, перерегулювання не спостерігається. На момент завершення дії вторинного регулювання (900 с) відхилення частоти становить -4,3 мГц.

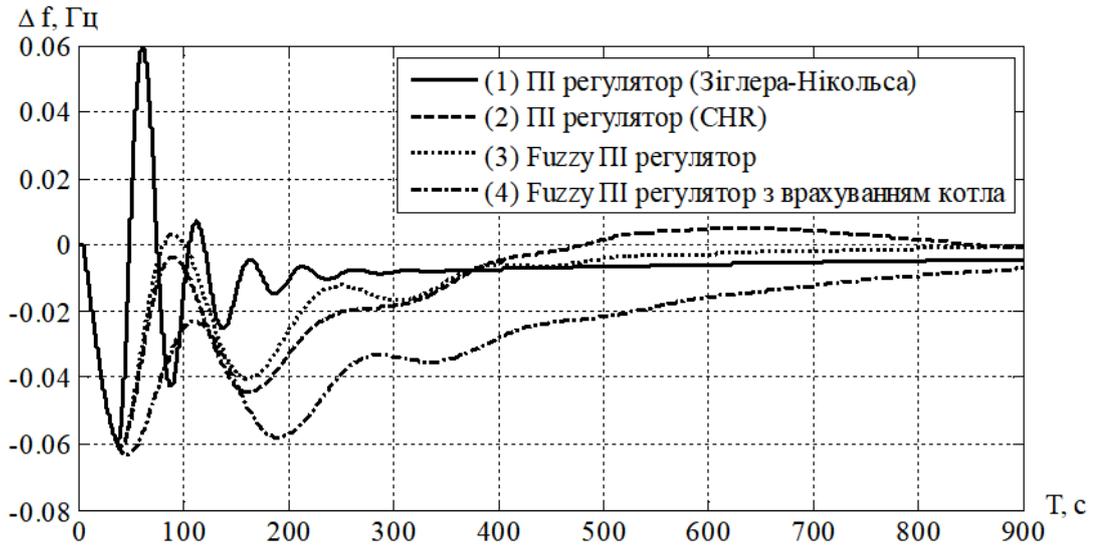


Рис. 9 – Графік зміни частоти для різних ЦР САРЧП.

Для підвищення якості вторинного регулювання з врахуванням котельного обладнання ТЕС було розроблено адаптивний регулятор на основі теорії нечіткої логіки (рис. 10). На вхід регулятора подаються сигнали помилки регулювання ACE , а також

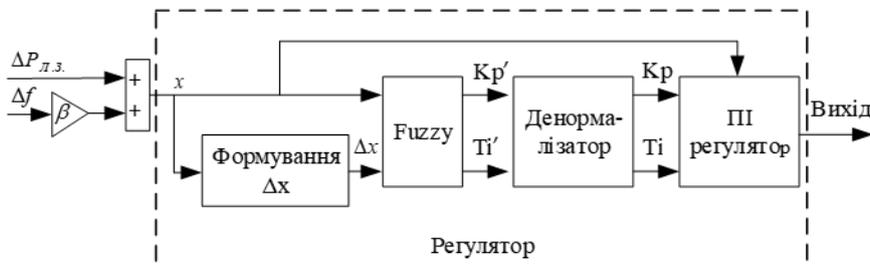


Рис. 10 – Структурна схема адаптивного регулятора

поточне значення сигналу $x(t)$ і його значення з часовою затримкою $x(t-Dt)$. На виході блоку формуються нормалізовані значення параметрів налаштування ПІ-регулятора: K_p' та T_i' . Перехід від нормалізованих величин до реальних значень коефіцієнта підсилення K_p та T_i та інтегральної постійної часу ПІ-регулятора здійснюється у блоці Денормалізації. Сигнал помилки ACE безпосередньо надходить на вхід ПІ-регулятора, де формується керуючий вплив, який являє собою вихід ЦР САРЧП енергосистеми.

Застосування регулятора, розробленого на основі теорії нечітких множин, показало, що величина перерегулювання становить 3,33 мГц (крива 3, рис. 9), час відновлення резервів первинної потужності – 213 с, а динамічне відхилення частоти досягає значення -60,7 мГц. На момент завершення дії вторинного регулювання відхилення частоти дорівнює -0,45 мГц. Таким чином, застосування ЦР, розробленого з використанням теорії нечітких множин, забезпечує зменшення величини перерегулювання частоти порівняно з випадком використання ПІ – регулятора, налаштованого за методом Зіглера–Нікольса, а також скорочує час відновлення резервів первинної потужності порівняно з налаштуванням за методом CHR.

З метою оцінки впливу роботи котельного обладнання ТЕС на маневрові та інші динамічні характеристики енергоблока при участі ТЕС у процесі регулювання частоти та активної потужності і на якість регулювання частоти в енергосистемі, модель

енергоблоків ТЕС було доопрацьовано з урахуванням математичної моделі котла (рис. 5).

Враховуючи результати моделювання, встановлено, що розраховані параметри вторинного регулювання, з урахуванням роботи котельного обладнання ТЕС, задовольняють вимоги чинних нормативних документів. Перерегулювання зменшилось на 22 %, а час регулювання – на 14 % (крива 4, рис. 9). Однак розглянуті підходи до регулювання частоти та потужності не забезпечують врахування обмежень у контрольованих перетинах енергосистеми. При залученні електричних станцій, які географічно розосереджені по всій території України, виникає необхідність ефективного залучення енергоблоків ТЕС та гідроагрегатів ГЕС до процесів регулювання частоти і водночас оптимізації потякорозподілу при вторинному регулюванні частоти та потужності.

Для вирішення цієї задачі запропоновано використання методу управління на основі прогнозуючих моделей (УПМ), що дозволяє враховувати обмеження на резерви потужності, швидкість реагування та перетоки контрольованих перетинів. Метод використовує математичну модель об'єкта для прогнозування поведінки системи в майбутньому та оптимізації керуючих дій з врахуванням обмежень. На кожному кроці обчислюється прогноз майбутньої поведінки системи на певному горизонті (рис. 11) і формується керуючий вплив за рахунок мінімізації критерію оптимальності, враховуючи розглянуті обмеження.

На кожному кроці k_i розглядається послідовність майбутніх керуючих впливів:

$$\Delta u(k_i), \Delta u(k_i + 1), \dots, \Delta u(k_i + N_c - 1), \quad (4)$$

де $\Delta u(k)$ – вектор змін активної потужності генераторів по зонах регулювання, [МВт], N_c – Часовий горизонт керування.

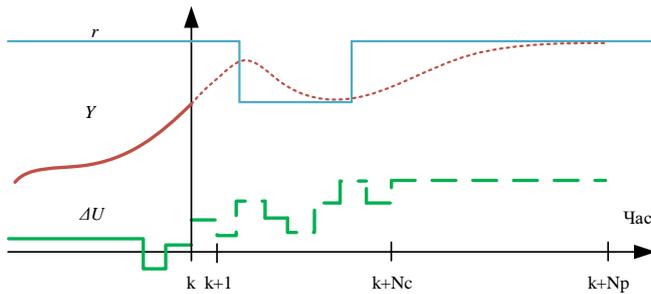


Рис. 11 – Схема формування оптимального вектора керуючих дій

горизонті N_p , що визначається, як вектор:

$$x(k_i + m | k_i), \quad m = 1, \dots, N_p. \quad (5)$$

Розрахунок вектору (5) на горизонті N_p здійснюється з використанням лінеаризованої моделі ЕЕС (6). Розрахований вектор стану (5) дозволяє сформулювати прогноз вихідних змінних (7) системи (частот і міжзонних перетоків активної потужності):

$$x(k+1) = Ax(k) + B\Delta u(k), \quad y(k) = Cx(k), \quad (6)$$

$$y(k_i + m | k_i) = CA^{N_p} x(k_i) + CA^{N_p-1} B\Delta u(k_i) + \dots + CA^{N_p-N_c} B\Delta u(k_i + N_c - 1), \quad (7)$$

Поточний стан ЕЕС визначається вектором стану $x(k_i)$, що формується з: відхилення частоти $f_z(k_i)$ в зоні z^0 від 50 Гц; відхилення перетоку потужності $p_{ij}(k_i)$ між зонами i та j від заданого; інтегральних змінних $e(k_i)$, які відображають накопичену помилку по перетоках.

Основою управління на основі прогнозуючої моделі є розрахунок векторів стану системи на часовому

де A – матриця динаміки, B – матриця впливу керування C^0 – матриця виходів (спостереження), $y(k)$ включає $f_z(k)$ та $p_{ij}(k)$.

Під час вирішення задачі пошуку вектору (4) для вторинного регулювання частоти і перетоків потужності на основі УПМ мають враховуватися наступні обмеження:

Обмеження на потужність:

$$p_z^{\min} \leq u_z(k) \leq p_z^{\max}. \quad (8)$$

Обмеження на швидкість зміни потужності в зонах регулювання:

$$\frac{p_z^{\min}}{\Delta t} \leq \frac{u_z(k)}{\Delta t} \leq \frac{p_z^{\max}}{\Delta t}. \quad (9)$$

Обмеження на допустимі відхилення частоти:

$$f_z^{\min} \leq f_z(k) \leq f_z^{\max}. \quad (10)$$

Обмеження на міжзонні перетоки та перетоки у контрольованих перетинах:

$$|p_{ij}(k)| \leq p_{ij}^{\max}. \quad (11)$$

З метою забезпечення допустимості оптимізаційної задачі навіть у режимах, коли всі жорсткі обмеження не можуть бути одночасно виконані до задачі УПМ вводяться змінні пом'якшення (s_v), які дозволяють тимчасові порушення певних технічних обмежень за умови їх штрафування в цільовій функції. Для кожного обмеження (8)–(11) модифіковане обмеження із застосуванням пом'якшення формується як:

$$z_{\min} - s_v^z \leq z(k) \leq z_{\min} + s_v^z, \quad s_v^z \geq 0. \quad (12)$$

Для уникнення невиправданих порушень обмежень, усі пом'якшення включаються до цільової функції як штрафні члени:

$$J(\cdot) = \dots + \rho_f s_v^f + \rho_p s_v^p + \rho_u s_v^u + \rho_{\Delta u} s_v^{\Delta u}, \quad (13)$$

де $\rho_{*} \gg 0$ – вагові коефіцієнти, що визначають «вартість» кожного типу порушення. Велике значення вказаних коефіцієнтів змушує оптимізатор повністю дотримуватись відповідного обмеження, якщо це можливо.

Таким чином, цільова функція регулювання згідно запропонованого підходу формулюється як квадратичний функціонал:

$$J(u_k) = \sum_{k=0}^{t_f} (z_k^T Q z_k + u_k^T R u_k + 2z_k^T N u_k) + \phi(x_t, t_f) + \rho s_v, \quad (14)$$

де

- $z_k = y(k) - r(k)$ – вектор відхилень частоти і перетоків від заданих значень,
- Q, R, N – вагові матриці,
- $\phi(x_t, t_f)$ – штрафні функції за кінцевий стан (може бути нульовим).

Виходячи з (15), в процесі регулювання на основі УПМ на кожному кроці формування керуючих впливів вирішується задача квадратичного програмування:

$$\text{minimize } J(u_k) \quad \text{subject to } Mz_k \leq \gamma(z_k), \quad (15)$$

де

- M – матриця обмежень (активація меж по частоті, потужності, перетоках),
- $\gamma(z_k)$ – вектор меж,
- u_k – вектор зміни активних потужностей по зонах,
- z_k – вектор помилок регулювання.

У роботі реалізація системи прогноуючого управління для задач автоматичного вторинного регулювання частоти та міжзонних перетоків потужності ґрунтується на принципі зворотного зв'язку: вимірювання → прогноз → оптимізація → керуючий вплив → оновлення даних. На кожному кроці дискретного часу k_i виконується ці п'ять основних етапів.

У четвертому розділі розроблено регулятор системного рівня САРЧП згідно запропонованого підходу. Розробка регулятора з використанням методу УПМ у ПЗ PowerFactory висунуло нову задачу реалізації швидкої взаємодії PowerFactory та Matlab, оскільки вбудований інтерфейс PowerFactory з MATLAB суттєво збільшує час моделювання.

Найшвидшою та найгнучкішою формою інтеграції зовнішніх моделей до середовища PowerFactory є прямий програмний інтерфейс, реалізований через завантаження спеціальних скомпільованих бібліотек, які містять конкретний набір функцій із визначеним переліком вхідних і вихідних параметрів. На рис. 12 наведено структурну схему організації та взаємодії компонентів програмного інтерфейсу середовища PowerFactory

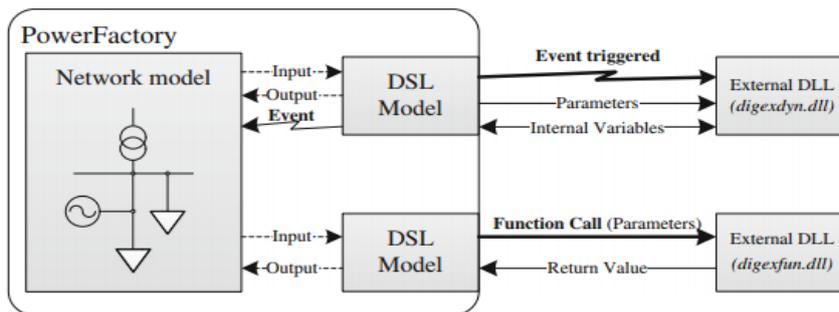


Рис. 12 – Схема організації та взаємодії компонентів програмного інтерфейсу середовища PowerFactory

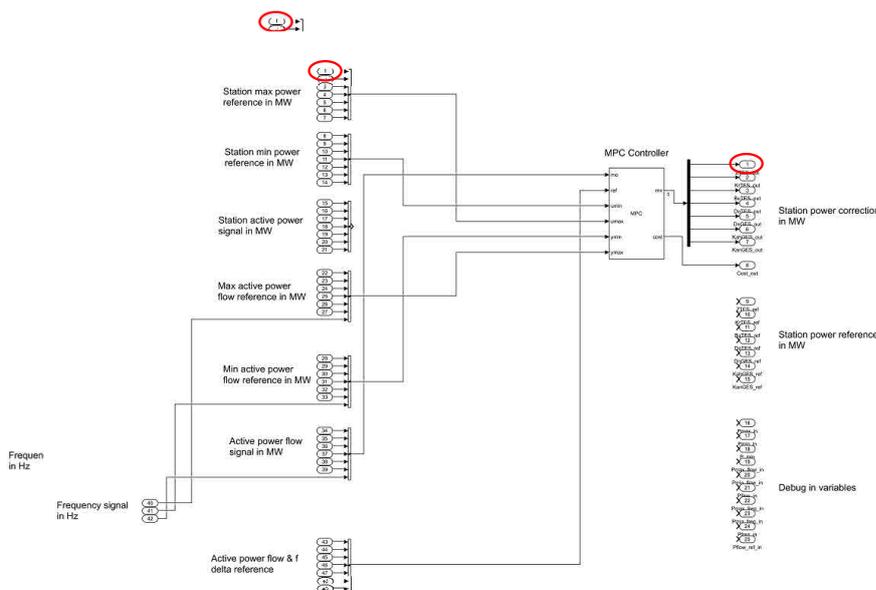


Рис. 13 – Модель регулятора УПМ у ПЗ MATLAB

взаємодії подана на рис. 14. Даний підхід дозволив зменшити час розрахунку/моделювання більш ніж у 25 разів.

рну схему організації та взаємодії компонентів програмного інтерфейсу середовища PowerFactory.

Розроблений регулятор реалізований шляхом завантаження спеціальних скомпільованих бібліотек, що містять конкретний набір функцій із заданим переліком вхідних та вихідних параметрів. Для експорту моделі регулятора УПМ з ПЗ MATLAB (рис. 13) було зкомпільовано модель MATLAB у зовнішню бібліотеку.

Для забезпечення взаємодії між моделями в MATLAB та PowerFactory була створена спеціалізована бібліотека digexdyn.dll. У її функціонал закладено механізм трансляції викликів із PowerFactory до MATLAB. Узагальнена структурна схема такої

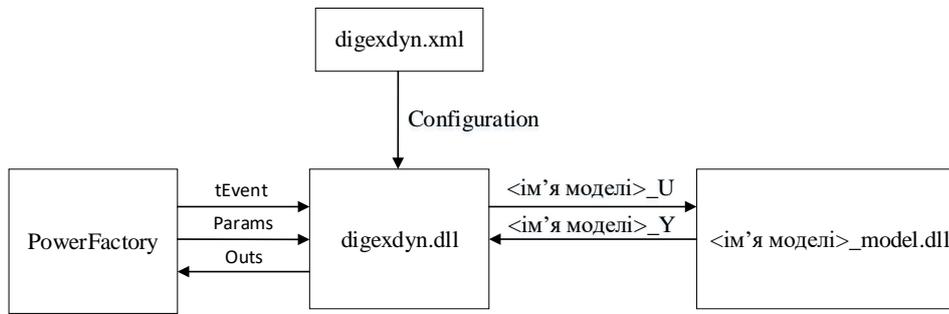


Рис. 14 – Структурна схема взаємодії PowerFactory із моделлю MATLAB

Дослідження ефективності запропонованого підходу до вторинного регулювання частоти з використанням методу УМП проводилось на динамічній моделі ОЕС України. Дослідження режимів роботи ЕЕС виконувалося для двох варіантів конфігурації складу станцій, задіяних у вторинному регулюванні частоти: лише енергоблоки ТЕС та спільна участь гідроагрегатів ГЕС і енергоблоків ТЕС. Серед переліку ТЕС обрано 4 станції у різних регіонах країни, у переліку ГЕС - 3 станції. Параметри станцій відповідають реальним даним. Станції, які залучені до вторинного регулювання частоти та потужності, відповідно до режиму працюють з плановою вихідною

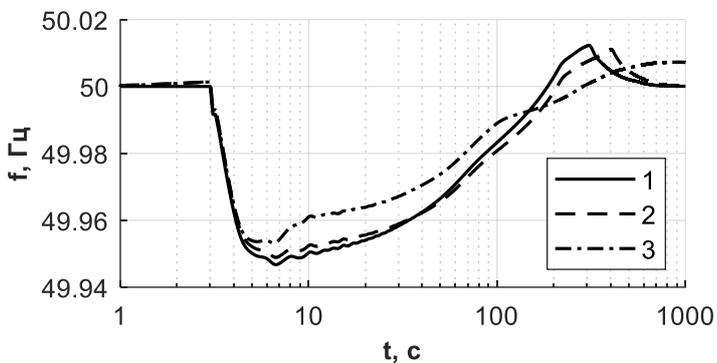


Рис. 15 – Графік зміни частоти в ЕЕС

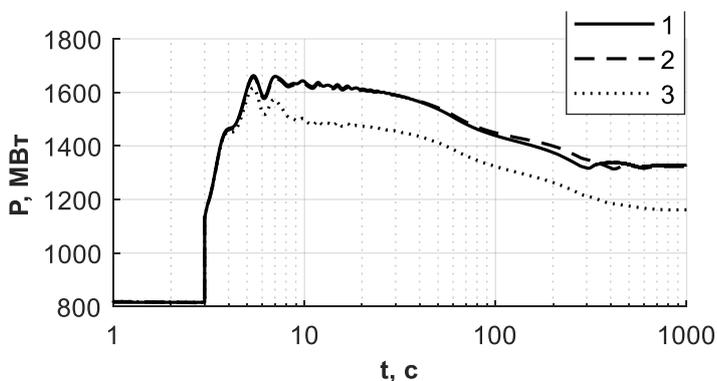


Рис. 16 – Графік зміни потужності у контрольному перетині Перетин-4

після виникнення збурення становило -53 мГц. Час відновлення рівнів частоти до 50 Гц ± 20 мГц та 50 Гц ± 10 мГц становив 83 с та 87 с відповідно. Найбільше максимальне відхилення перетоку потужності спостерігалось у Перетині-4 (крива 1, рис. 16), після завершення перехідного процесу нове усталене значення становило 513 МВт.

потужністю, одночасно підтримуючи встановлений резерв вторинного регулювання. Величина збурення була обрана згідно принципу N-1. Для ОЕС України це вимкнення найбільшого енергоблоку в енергосистемі потужністю 1000 МВт. Розглядалось відключення енергоблоку АЕС, яка розташована у південному регіоні. Серед контрольованих перетинів розглядалось 5 внутрішньосистемних перетинів з обмеженнями величини перетоків активної потужності та перетоки потужності по зовнішньому міжсистемному перетину.

Аналіз результатів моделювання режиму роботи ЕЕС із залученням ГЕС і ТЕС без врахування котельного обладнання ТЕС та з використанням ПІ-регулятора в САРЧП показали, що максимальне динамічне відхилення частоти (крива 1, рис. 15) в енергосистемі після

Максимальне динамічне відхилення значення Сальдо перетоку потужності становило 779 МВт. Впродовж 15 хв значення сальдо перетоку потужності відновилося до номінального.

При залученні ГЕС та ТЕС до вторинного регулювання при врахуванні котельного обладнання ТЕС та з використанням ПІ-регулятора в САРЧП показали, що рівень частоти (крива 2, рис. 15) відновився до $50 \text{ Гц} \pm 20 \text{ мГц}$ за 97 с., а до $50 \text{ Гц} \pm 10 \text{ мГц}$ - за 153 с. Сумарний залучений резерв вторинного регулювання для ТЕС склав 328 МВт, а для ГЕС він становив 421,6 МВт. Максимальне відхилення відносно обмежень перетоків у контрольованих перетинах спостерігається в Перетині-4 (крива 2, рис.16) і складає 53 %.

Аналіз результатів дослідження регулювання частоти та потужності в ОЕС на основі прогнозуючої моделі показало, що одночасне залучення резервів ТЕС та ГЕС до вторинного регулювання частоти є ефективним. Резервів ТЕС та ГЕС достатньо, частота ЕЕС (крива 3, рис. 15) відновлюється до номінальних значень, час відновлення до рівня $50 \text{ Гц} \pm 20 \text{ мГц}$ становить 67 с., а до $50 \text{ Гц} \pm 10 \text{ мГц}$ складає 106 с.

Максимальне відхилення відносно обмежень перетоків у контрольованих перетинах спостерігається в Перетині 4 (крива 3, рис. 16) і складає 34 %, що на 56 % менше ніж у досліді з використанням ПІ-регулятора в САРЧП.

Проведений аналіз виконаних досліджень дозволяє підтвердити ефективність застосування запропонованого підходу при залученні енергоблоків ТЕС до вторинного регулювання частоти та потужності в ЕЕС.

Запропонований метод регулювання зменшив максимальне відхилення у контрольованих перетинах на 56 %, а також зменшив час відновлення частоти до рівня $50 \text{ Гц} \pm 20 \text{ мГц}$ майже в 1.5 разів, що позитивно впливає на стійкість ЕЕС.

Сформовано рекомендації по підвищенню ефективності роботи САРЧП з врахуванням особливості роботи котельного обладнання ТЕС при їх залученні до процесів регулювання частоти та потужності в ЕЕС.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено важливе актуальне науково-практичне завдання, що полягає в розробці моделей елементів САРЧП, методів та засобів регулювання частоти в енергосистемі при залученні блоків ТЕС до вторинного регулювання частоти з врахуванням особливості роботи котельного обладнання, що направлене на підвищення ефективності роботи ЕЕС. Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному:

1. Проведений аналіз поточного стану ОЕС України та функціонування САРЧП показав наявність дефіциту регулюючої потужності, що призводить до погіршення регулюючих характеристик енергосистеми при виникненні значних збурень. Запропоновано використання енергоблоків ТЕС для участі у вторинному регулюванні. На основі аналізу режимів роботи ТЕС з врахуванням котельного обладнання при зміні керуючих впливів виявлено ділянки зниження вихідної активної потужності, які пов'язані з особливостями роботи котельного обладнання, а також наявність перерегулювання.
2. Розроблено нові моделі елементів САРЧП та енергосистеми для дослідження процесів вторинного регулювання частоти і потужності з врахуванням процесів у

котельному обладнанні. Розроблено та верифіковано динамічну модель ОЕС України в середовищі PowerFactory та модель енергоблоку ТЕС, що враховує вплив котельного обладнання на її динамічні характеристики під час вторинного регулювання.

3. Аналіз проведених досліджень показав, що застосування центрального регулятора САРЧП з нечіткою логікою призвело до зменшення перерегулювання на 22 %, а час регулювання на 14 % та дозволяє виконати вимоги до регулювання, проте не враховує обмеження в контрольованих перетинах енергосистеми.
4. Розроблено підхід до вторинного регулювання частоти і запропоновано використання методу керування на основі прогнозуючих моделей, що дозволяє враховувати обмеження на резерви потужності, швидкість реагування та перетоки контрольованих перетинів.
5. Розроблено регулятор на основі прогнозуючих моделей та проведено дослідження його роботи у різних режимах ОЕС. Показано ефективність його використання при залученні ТЕС до вторинного регулювання частоти, а саме: зменшення часу відновлення частоти до номінальних значень (1.5 разів) та зменшення максимального відхилення перетоку потужності по контрольованим перетинам більш ніж на 55 %.
6. За результатами проведених у роботі досліджень сформовано рекомендації по підвищенню ефективності роботи САРЧП з врахуванням ТЕС, залучених до процесів регулювання частоти та потужності в енергосистемі.

Отримані результати в дисертаційній роботі впроваджено в навчальний процес у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» при викладанні дисциплін: «Теорія автоматичного керування», «Автоматичне управління в енергосистемах» та при виконанні кваліфікаційних та науково-дослідних робіт магістрантів кафедри автоматизації енергосистем факультету електроенерготехніки та автоматики, а також при виконанні науково-дослідних робіт з ДП НЕК «Укренерго».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Матеріали дисертаційної роботи викладено в таких опублікованих наукових працях:

1. Yandulskiy, O., Hulyi, V., Nesterko, A., Kovalenko, M., Tymokhin, O. Improving the efficiency of secondary load frequency control in a power system considering internal tie-line power exchanges. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(8) №136. P. 6–15. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.336113>. **(фахове видання категорії «А», включене до бази даних, Scopus)**
2. Yandulskiy O., Tymokhin O., Tymokhina A., Hulyi, V. Active balancing of lithium batteries via redistribution of excess energy across all cells. *Vidnovluvana Energetika*, (3) 82. P. 48-54. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.3\(82\)](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.3(82)). **(фахове видання категорії «А», включене до бази даних, Scopus)**
3. O. S. Yandulskiy, V. S. Hulyi, A. A. Marchenko, R. M. Tatus. Application of blockchain technology for management of networks with distributed generation. *Sciences of*

- Europe. Praha. 2025. №169. P. 68–72. DOI: 10.5281/zenodo.16615580. (наукове видання інших держав, які входять до ОЕСР та/або Європейського Союзу).*
4. О. С. Яндульський, А. А. Марченко, В. С. Гулий. Дослідження ефективності вторинного регулювання частоти та потужності із залученням енергоблоків різних типів. *Перспективні технології та прилади*. Луцьк. 2018. №13. С. 176–181. **(фахове видання категорії «Б»)**
 5. О. С. Яндульський, В. С. Гулий. Особливості участі блоків ТЕС у вторинному регулюванні частоти в ОЕС України. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2017. № 4. С. 1–4. **(фахове видання категорії «Б»)**
 6. О. С. Яндульський, А. А. Марченко, В. С. Гулий. Оптимізація параметрів системного стабілізатора для ефективного демпфування низькочастотних коливань в енергосистемі. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2017. №6. С. 100–104. **(фахове видання категорії «Б»)**
 7. О. С. Яндульський, А. А. Марченко, В. С. Гулий. Дослідження режимів роботи енергосистеми зі значною часткою вітрових електричних станцій. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2016. № 2. С. 122–127. **(фахове видання категорії «Б»)**
 8. О. С. Яндульський, А. А. Марченко, В. С. Гулий. Моделювання системи управління вітротурбіною та оптимізація параметрів регулятора. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2014. №1. С. 1–4. **(фахове видання категорії «Б»)**
 9. O. Yandulskyi, A. Marchenko and V. Hulyi, "Analysis of Efficiency Of Primary Load-Frequency Control of Integrated Power System of Ukraine," 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), Kharkiv, Ukraine, 2018, pp. 244-247. (Включено до міжнародної наукометричної бази даних **Scopus**)
 10. Яндульський О. С., Гулий В. С., Марченко А. А., Тимохін О. В., Нестерко А. Б. Дослідження динамічних режимів роботи ТЕС при регулюванні частоти та активної потужності в енергосистемі. Оптимальне керування електроустановками : матеріали VI міжнародної науково-технічної конференції, м. Вінниця, 22-23 жовт. 2025р. Вінниця, 2025. С. 41–42.
 11. Яндульський О. С., Марченко А. А., Гулий В. С., Татусь Р. М. Впровадження елементів технології блокчейн в мережах з розподіленою генерацією. *Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті* : матеріали XXVI ювілейної міжнародної науково-практичної конференції , м. Київ, 21-23 трав. 2025 р. Київ, 2025. С. 90–91.
 12. Бриль Є. М., Гулий В. С. Використання газотурбінних електростанцій для покриття небалансу в ОЕС України. *Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики* : міжнародна науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів і студентів. Київ. 2024. С. 58–59.
 13. Марченко А. А., Гулий В. С., Лютер А. О. Засоби підвищення стійкості систем електропостачання з відновлюваними джерелами енергії. *Відновлювана енерге-*

- тика та енергоефективність у XXI столітті : матеріали XXV ювілейної міжнародної науково-практичної конференції, м. Київ, 22-24 трав. 2024 р. Київ, 2024. С. 188–190.
14. Гулий В. С., Татусь Р. М. Використання «Blockchain» технології при оптимізації роботи електроенергетичних систем. *Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики* : міжнародна науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів і студентів. Київ. 2023. С. 3–6.
 15. Яндульський О. С., Тимохіна А. О., Гулий В. С. Визначення місця виникнення аварії в об'єднаній енергосистемі на основі моніторингу за швидкістю зміни кута напруги. *Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті* : матеріали XXI міжнародної науково-практичної конференції, м. Київ, 14-15 трав. 2020 р. Київ, 2020. С. 117–121.
 16. Яндульський О. С., Гулий В. С., Тимохіна А. О. Дослідження режимів роботи ТЕС при регулюванні частоти та активної потужності в енергосистемі. *Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті* : матеріали XX міжнародної науково-практичної конференції, м. Київ, 15–16 трав. 2019 р. Київ, 2019. С. 127–131.
 17. Яндульський О. С., Нестерко А. Б., Труніна Г. О., Гулий В. С. Оптимальне регулювання напруги в розподільній електричній мережі з джерелами розосередженого генерування. *Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті* : матеріали XXI міжнародної науково-практичної конференції, м. Київ, 26-28 трав. 2018 р. Київ, 2018. С. 117–121.
 18. Яндульський О. С., Марченко А. А., Гулий В. С. Дослідження ефективності вторинного регулювання частоти та потужності із залученням енергоблоків різних типів. *Підвищення ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах* : VII міжнародна науково-технічна конференція, м. Луцьк, 22-23 черв. 2018 р. Луцьк, 2018.
 19. Яндульський О.С., Гулий В.С. Особливості участі блоків ТЕС у вторинному регулюванні частоти в ОЕС України. *Оптимальне керування електроустановками* : IV міжнародна науково-технічна конференція, м. Вінниця, 11-13 жовт. 2017р. Вінниця, 2017.
 20. Яндульський О.С., Марченко А.А., Гулий В.С. Оптимізація параметрів системного стабілізатора для ефективного демпфування низькочастотних коливань в енергосистемі. *Оптимальне керування електроустановками* : IV міжнародна науково-технічна конференція, м. Вінниця, 11-13 жовт. 2017р. Вінниця, 2017.
 21. Яндульський О.С., Марченко А.А., Гулий В.С. Дослідження режимів роботи енергосистеми зі значною часткою вітрових електричних станцій. *Оптимальне керування електроустановками* : III міжнародна науково-технічна конференція, м. Вінниця, 14-15 жовт. 2015р. Вінниця, 2015.
 22. Марченко А.А., Гулий В.С. Вплив вітроелектричної станції з асинхронним генератором на якість електроенергії при її паралельній роботі з електричною мере-

- жею. *Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики* : міжнародна науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів і студентів. Київ. 2014. С. 34–37.
23. Марченко А. А., Гулий В. С. Моделювання роботи вітротурбіни з електричною мережею в середовищі PowerFactory. *Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики* : міжнародна науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів і студентів. Київ. 2013. С. 47–50.
24. Марченко А.А., Гулий В.С. Імітаційне моделювання системи управління вітротурбіною. *Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики* : міжнародна науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів і студентів. Київ. 2012. С. 47–50.

АНОТАЦІЯ

Гулий В.С. Методи та засоби підвищення ефективності вторинного регулювання частоти та потужності в енергосистемі із залученням енергоблоків теплових електричних станцій. – 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 імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України, Київ, 2026.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуального науково-практичного завдання підвищення ефективності вторинного регулювання частоти та потужності в енергосистемі шляхом оптимального керування регулюючими електростанціями, зокрема енергоблоками ТЕС з урахуванням особливості роботи котельного обладнання.

Проведений аналіз експериментальних досліджень енергоблоків ТЕС показав наявність впливу роботи котельного обладнання на вихідну потужність, що знижує ефективність їх участі при регулюванні частоти.

Розроблено математичні моделі елементів САРЧП та ЕЕС, а також модель енергоблоку ТЕС з врахуванням особливості роботи котельного обладнання. Крім того, удосконалено модель САРЧП, яка забезпечує залучення енергоблоків ТЕС і гідроагрегатів ГЕС до вторинного регулювання частоти та розроблено динамічну модель енергосистеми.

Розроблено підхід до регулювання частоти та потужності на основі прогнозуючих моделей, який враховує обмеження на резерви потужності, швидкість реагування та перетоки контрольованих перетинів та розроблено регулятор САРЧП на його основі. Проведений аналіз результатів дослідження показав, що застосування запропонованого підходу підвищує ефективність регулювання частоти та потужності в ЕЕС.

Ключові слова: регулювання частоти та потужності, обмеження перетоку потужності, метод прогнозуючих моделей, котельне обладнання, тепла електрична станція, оптимальне керування, система автоматичного регулювання частоти та потужності, енергосистема.

ABSTRACT

Hulyi V. Methods and means to increase the efficiency of secondary load frequency control in the power system with involvement of thermal power plant units. – On the rights of the manuscript.

Dissertation submitted in fulfilment of the PhD degree in Technical Sciences on specialty 05.14.02 - Electric power plant stations, networks and systems. The National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" of Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2026.

Dissertation is devoted to solve the actual scientific and practical task on increasing the efficiency of secondary load frequency control (LFC) in the power system through the optimal management of the regulating power plant stations, in particular, thermal power plant (TPP) units, taking into account the specific operational characteristics of boiler equipment.

Performed the analysis of the requirements for primary and secondary LFC in power systems of different countries, including Ukraine. The observation showed a deficit for secondary LFC in the Interconnected Power System of Ukraine. At the same time, a number of TPP units underwent extensive modernization that improves their maneuverability characteristics and enables their involvement in secondary LFC, thereby allowing to eliminate the existing deficit of regulating capacity, meet current requirements and increase the efficiency of secondary LFC in the power system.

Analysis of experimental studies of TPP units revealed the existence of the influence of boiler equipment operation on the power output that thereby reduces the efficiency of its participation in LFC. Identified new properties indicate the necessity in increasing the efficiency of secondary LFC in the power system by developing the approach to secondary LFC that takes into account the operational characteristics of boiler equipment upon involvement of TPP units in secondary LFC.

Developed mathematical models of elements of automatic generation control (AGC) and elements of power system, as well as the model of TPP unit with a consideration of specific operational characteristics of boiler equipment. Additionally, AGC model was improved that enables involvement of TPP units and hydroelectric units in secondary LFC, as well as a dynamic model of the power system was developed.

An approach of LFC was developed that is based on model predictive control (MPC) that considers constraints on power reserves, speed response, and flows in controlled interconnections, and based on this approach, AGC controller was designed. Analysis of the study results showed that the application of the proposed approach improves the efficiency of LFC in the power system.

The application of the developed controller based on the MPC method reduced the regulation time by 42 % and decreased the maximum overload in one of the controlled interconnections by 56 % compared to the PI-controller. Analysis of the conducted research confirms the efficiency of the proposed approach with the involvement of TPP units in the secondary LFC of the power system.

Recommendations were formulated in order to improve the efficiency of AGC operation by taking into account the specific operational characteristics of boiler equipment in TPPs while involving them in LFC processes in the power system.

Practical significance of the work is based on the development of LFC approach that accounts for the specific operational characteristics of boiler equipment in generating units. The application of the proposed approach enhances the efficiency of LFC under both interconnected and isolated operation modes of the power system. Results of the conducted research enabled to formulate the AGC requirements and enabled to involve TPPs in secondary control with acceptable performance characteristics.

Keywords: load frequency control, power flow constraints, model predictive control, boiler equipment, thermal power plant station, optimal control, automatic generation control, power system.