

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЗАГАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ**

ЗГУРОВЕЦЬ ОЛЕКСАНДР ВАСИЛЬОВИЧ

УДК 621.316.726

**РОЗВИТОК МОДЕЛЕЙ ТА ЗАСОБІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
СТАБІЛЬНОГО ФУНКЦІОНУВАННЯ ВІТРОВИХ І
СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ В ЕНЕРГОСИСТЕМАХ**

Спеціальність 05.14.01 – Енергетичні системи та комплекси

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Робота виконана в Інституті загальної енергетики НАН України, м. Київ

Науковий керівник академік НАН України, доктор технічних наук, професор
КУЛИК Михайло Миколайович,
Інститут загальної енергетики НАН України, м. Київ
директор Інституту

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник
ЗВАРИЧ Валерій Миколайович,
Інститут електродинаміки НАН України, м. Київ
провідний науковий співробітник відділу теоретичної
електротехніки та діагностики електротехнічного
обладнання

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
ШУЛЬЖЕНКО Сергій Валентинович,
Державне підприємство «Національна енергетична
компанія «Укренерго» Міністерства фінансів України,
м. Київ
начальник відділу аналізу розвитку споживання
Департаменту розвитку системи передачі

Захист відбудеться «14» червня 2019 року о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.223.01 в Інституті загальної енергетики НАН України за адресою: 03150, м. Київ, вул. Антоновича, 172, тел. 294-67-01.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Інституту загальної енергетики НАН України за адресою: 03150, м. Київ, вул. Антоновича, 172.

Автореферат розісланий «11» травня 2019 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради К 26.223.01

І.Ч. Лещенко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Інтенсивне впровадження вітрових (ВЕС) та сонячних (СЕС) електростанцій у структуру сучасних електроенергетичних систем призводить до необхідності всебічного дослідження особливостей процесів генерації на ВЕС та СЕС і їх впливу на роботу всієї енергосистеми. Нестабільний характер видачі потужності цими електростанціями в мережу впливає, насамперед, на процеси регулювання частоти в енергосистемі.

Процеси генерації на ВЕС та СЕС, що входять до складу енергосистеми, фактично вносять додаткові збурення в енергосистему, та, як наслідок, суттєво ускладнюють процес регулювання частоти і потужності.

Даній проблематиці присвячені роботи багатьох вітчизняних та зарубіжних вчених, таких як Авраменко В.М., Веніков В.А., Воропай М.І., Дрьомін І.В., Кулик М.М., Кудря С.О., Резцов В.Ф., Лебедев С.О., Совалов С.А., Стернінсон Л.Д., Цукерник Л.В., Чебан В.М., Р. Anderson, А. Fouad та ін. Традиційне вирішення завдань регулювання частоти здійснювалось в таких умовах функціонування енергосистеми, коли поява небалансу електричної потужності обумовлювалась споживанням, а компенсувалась з боку генерації шляхом зміни потужності електростанцій. В умовах введення нових генеруючих потужностей на ВЕС та СЕС вже ці генератори стають джерелом збурень в енергосистемі, і швидкодії традиційних генераторів, таких як теплові та гідроелектростанції (ГЕС), що беруть участь в регулюванні частоти, часто стає недостатньо. Поява таких викликів з боку масового впровадження відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), а також нові можливості в технологіях накопичення та генерації електроенергії створюють необхідність розроблення нових підходів до вирішення задачі стабілізації частоти в об'єднаних енергосистемах (ОЕС). Найбільш поширеною технологією зберігання енергії на сьогодні є гідроакумулюючі електростанції. Прикладами нових технологій зберігання енергії є адіабатичні накопичувачі стиснутого повітря, маховики, конденсатори надвисокої ємності. Найбільш перспективною є технологія зберігання енергії в накопичувачах на базі акумуляторних батарей (АБ) через їх вивченість, легкість в проектуванні та встановленні у порівнянні з іншими технологіями зберігання, а також високу швидкодію. Втім застосуванню цієї технології повинні передувати теоретичні дослідження процесів регулювання частоти і потужності в ОЕС, в яких одночасно функціонують ВЕС, СЕС та АБ великої потужності.

Таким чином, вдосконалення і розвиток моделей та засобів забезпечення стабільного функціонування по частоті вітрових і сонячних електростанцій в енергосистемах є актуальною науковою задачею, що потребує вирішення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася відповідно до планів наукових робіт Інституту загальної енергетики НАН України, а саме: «Визначення граничних обсягів, умов і режимів використання вітрових та сонячних електростанцій у складі Об'єднаної енергосистеми України» (2015 р., № ДР 0113U004085); «Створення та розвиток математичних засобів прогнозування і оптимізації енергетичних об'єднань на основі ефективних технологій перетворення та використання енергії» (2018 р.,

№ ДР 0117U000051); «Визначення механізмів взаємоузгодженості екологічних та технологічних складових розвитку енергетики» (2018 р., № ДР 0118U002102).

В означених роботах використані розроблені автором моделі та засоби моделювання процесів регулювання частоти в електроенергетичних системах з потужними вітровими та сонячними електростанціями.

Мета і задачі дослідження. *Метою дослідження є розроблення ефективних математичних моделей та засобів забезпечення стабільного функціонування по частоті вітрових і сонячних електростанцій в енергосистемах.*

У процесі реалізації означеної мети було сформульовано й розв'язано такі *задачі дослідження:*

- аналіз підходів до забезпечення стабільного функціонування вітрових і сонячних електростанцій в енергосистемах;
- визначення основних властивостей нелінійних обмежень, зумовлених технологічними особливостями регуляторів і характеру їх впливу на процеси регулювання частоти і потужності в енергосистемі;
- дослідження особливостей функціонування ВЕС, СЕС та акумуляторних батарей у складі енергосистем, формалізація цих особливостей для дослідження їх впливу на процеси регулювання частоти та потужності енергосистем;
- розроблення адаптивних законів регулювання частоти і потужності в енергосистемах з ВЕС і СЕС та акумуляторними батареями;
- розроблення узагальненої математичної моделі процесів регулювання частоти і потужності в енергосистемах з ВЕС і СЕС та акумуляторними батареями;
- створення програмно-інформаційного комплексу та інтеграція його з існуючим програмним забезпеченням;
- проведення цифрових досліджень з використанням розроблених моделей та виявлення найважливіших властивостей енергосистем із запропонованими структурами.

Об'єкт дослідження – процеси регулювання частоти і потужності в енергосистемах із відновлюваними джерелами та накопичувачами енергії.

Предмет дослідження – моделі та засоби забезпечення стабільного функціонування вітрових і сонячних електростанцій в енергосистемах.

Методи дослідження. Дослідження процесів регулювання частоти і потужності виконувалося шляхом застосування систем нелінійних диференціальних рівнянь з початковими умовами та їх подальшим розв'язанням за допомогою удосконалених числових методів. Для використання в моделі вихідних натурних даних щодо швидкості вітру та потужності сонячних електростанцій були використані числові методи поліноміальної апроксимації та дискретного перетворення Фур'є (ДПФ).

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Розроблено і всебічно досліджено узагальнену математичну модель процесів регулювання частоти і потужності, яка, на відміну від існуючих, дає можливість вивчати ці процеси в енергосистемах з ВЕС та СЕС як з традиційними, так і з новітніми швидкодіючими регуляторами на базі акумуляторних батарей, а також аналізувати результати автономної або спільної роботи вітрових та сонячних

електростанцій з генераторами-регуляторами різних типів.

2. Розроблено і досліджено нову адаптивну функцію потужності регулятора частоти, в яку, на відміну від існуючих, до пропорційно-інтегрально-диференціального закону вперше додано адаптивну складову, що дозволило отримати якісно кращі результати із забезпечення точності по частоті.

3. Формалізовано процеси функціонування вітрових і сонячних електростанцій, а також акумуляторних батарей, що дозволило дослідити їх спільну роботу в енергосистемах та проаналізувати їх вплив на процеси регулювання частоти та потужності.

4. Розроблено проблемно-орієнтований програмно-інформаційний комплекс (ПК) «Частота-М», в якому функціонують програмні модулі для числової реалізації математичних моделей ВЕС та СЕС у складі ОЕС, що дало змогу запропонувати варіанти забезпечення стабільного функціонування вітрових і сонячних електростанцій в енергосистемах, які базуються на співвідношеннях між наявними генеруючими потужностями різних відновлюваних джерел енергії та регуляторів (акумуляторні батареї, ГЕС).

Практичне значення одержаних результатів.

Результати виконаних досліджень були використані при підготовці аналізу та пропозицій до проблемної записки щодо необхідності розроблення та впровадження першочергових науково-технічних заходів з екологізації програми розвитку гідроенергетики на період до 2026 року (згідно доручення Відділення наук про землю НАН України, лист від 30.10.2018 № 72/31).

Використання розроблених в роботі математичних моделей та програмних засобів забезпечення стабільного функціонування вітрових і сонячних електростанцій в енергосистемах дозволили визначити потужність акумуляторних батарей і ГЕС, необхідну для ефективного регулювання частоти в енергосистемі з потужними ВЕС та СЕС.

Результати дисертаційної роботи доцільно використовувати при дослідженні перспектив розвитку структури генеруючих потужностей ОЕС України в частині забезпечення вимог щодо точності підтримки частоти та надійності функціонування енергосистеми в умовах інтенсивного впровадження вітрових та сонячних електростанцій.

Особистий внесок здобувача. Наукові положення і результати, викладені в дисертаційній роботі, розроблені автором самостійно. Робота [3] написана автором самостійно. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, автору належить розроблення програмних засобів моделювання, проведення числових обчислень, а також: [1, 2, 4, 7, 8] – запропоноване удосконалення моделі процесів регулювання частоти та потужності шляхом введення рівнянь, що описують роботу акумуляторних батарей спільно з ВЕС, СЕС та ГЕС; [5] – адаптивна математична модель процесів регулювання частоти та потужності в енергосистемах з ВЕС і акумуляторними батареями; [6] – визначення основних характеристик графіків електричних навантажень та факторів впливу на них.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи та її окремі результати доповідались на:

- міжнародних науково-практичних конференціях: «Моделювання-2018» (м. Київ, 2018 р.); «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті» (м. Київ, 2018 р.);

- Бюро Відділення фізико-технічних проблем енергетики НАН України;

- наукових семінарах та на вченій раді Інституту загальної енергетики НАН України (2013–2018 рр.).

Публікації. За результатами дисертаційного дослідження опубліковано 8 наукових праць: 6 статей у фахових наукових виданнях, у тому числі 4 статті у виданнях, які входять до міжнародних наукометричних баз Google Scholar та Index Copernicus International; 2 доповіді у матеріалах міжнародних конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 129 найменувань на 14 сторінках, 4 додатків на 21 сторінці. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 175 сторінок, де основний текст займає 125 сторінок, у т. ч. 19 таблиць та 42 рисунки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано вибір теми дослідження, сформульовано мету та задачі дослідження, вказано на зв'язок з науковими програмами і темами, визначено новизну отриманих результатів та подано відомості про їх практичну цінність і використання, відзначено особистий внесок здобувача у наукових публікаціях, наведено відомості про апробацію результатів дисертаційної роботи.

У **першому розділі** виконано аналіз стану і особливостей організації функціонування вітрових та сонячних електростанцій у складі енергетичних систем, наведено технологічні властивості ВЕС та СЕС, проаналізовано відповідний досвід їх використання. Сформульовано задачі дослідження.

Останнім часом у світі спостерігається масове впровадження ВДЕ. Так, частку відновлюваних джерел у структурі генерації електричної енергії, на яку в 2017 році в світі припадало близько 26,5%, багато країн планують збільшити до 50% і більше до 2040–2050 років. Більш того, 57 країн поставили собі за мету повністю відмовитися від викопних джерел, а 17 країн вже досягли частки відновлюваної енергетики на рівні 90%, і хоча більшу частину цих потужностей складають гідроресурси, багато країн також нарощують потенціал вітрових і сонячних станцій.

Не менш динамічна картина зростання спостерігається і в Україні, де тільки кількість сонячних електроустановок приватних господарств (потужністю до 30 кВт) в 2017 році перевищила показник 2016 року більш, ніж удвічі і склала 3010 установок сумарною потужністю 51 МВт. Загальна кількість сонячних електростанцій в кінці першого кварталу 2018 року налічувала 235 одиниць загальною потужністю 841 МВт, а темпи зростання в 2017 році випередили 2016 рік більш ніж на 40%.

Вітрові станції містять досить суттєві обертові маси, що дещо згладжують флуктуації вітру, втім їх величин недостатньо для компенсації значних поривів вітру. Фотоелектричні електростанції на відміну від вітрових взагалі не мають механічних складових завдяки прямому характеру перетворення променевої енергії Сонця в електричну. Це призводить до того, що єдиним фактором згладжування

змін в інсоляції частково може виступати лише збільшення площі, яку займає станція, що не завжди є досяжним внаслідок необхідності відчуження великих територій. Зростання швидкості вітру підсилює нерівномірність генерації на СЕС.

Введення великих обсягів подібної нестабільної генерації призводить до виникнення збурень в мережі і без наявності достатньої кількості регулюючих потужностей може призводити і вже призводить на практиці до виникнення аварійних ситуацій в енергосистемах різних країн. Це є новим і складним викликом в управлінні енергосистеми, оскільки згідно проведеним дослідженням швидкість зміни потужності ВЕС та СЕС значно перевищує цей показник для регулюючих електростанцій при покритті графіків електричних навантажень.

Боротьба з цими явищами призводить до необхідності відключення станцій або введення великих обсягів потужностей резерву, що недоцільно економічно.

Завдяки розвитку засобів з акумуляції електричної енергії у вигляді електрохімічних акумуляторних батарей з'являється можливість використання цих технологій для подолання проблеми нестабільної генерації відновлюваних джерел енергії. Проте перед масовим використанням АБ в ОЕС України необхідно провести дослідження процесів регулювання частоти і потужності в ОЕС, в яких одночасно функціонують ВЕС, СЕС та АБ великої потужності.

Отже, вдосконалення і розвиток моделей та засобів забезпечення стабільного функціонування по частоті вітрових і сонячних електростанцій в енергосистемах є актуальною науковою задачею, що потребує вирішення.

У другому розділі проведено формалізацію функціонування об'єктів енергосистеми при регулюванні частоти і потужності, зокрема вітрових та сонячних електростанцій, а також акумуляторних батарей. Розглянуто питання регулювання частоти і потужності в традиційних генераторах та вітрових і сонячних електростанціях. Визначено основні властивості нелінійних обмежень, обумовлених технологічними особливостями регуляторів, і характер їх впливу на процес стабілізації частоти та потужності в енергосистемі.

Частота в електроенергетичній системі є важливою характеристикою, що залишається однаковою у всіх частинах системи. Вона є не лише індикатором якості електричної енергії, але й фактором, що визначає стабільність роботи енергосистеми. Тому важливо, щоб відхилення частоти завжди підтримувалося в межах допустимого діапазону і якомога швидше поверталось до номінального значення в разі його збільшення, що вимагає не тільки достатніх наявних обсягів регуляторів, а й їх високої швидкодії.

Генератори-регулятори в залежності від їх фізичної природи мають у своєму складі устаткування, яке тим чи іншим чином обмежує їх можливості зі зміни потужності. Зокрема, на теплових електростанціях (ТЕС) таким устаткуванням є парові котли, в яких швидкість зміни потужності обмежена температурною напругою трубопроводів та корпусу, на гідроелектростанціях таким інерційним елементом є направляючі апарати, а швидкодія електрохімічних акумуляторних батарей обмежується лише їх внутрішнім опором. Тому допустима швидкість зміни потужності генераторів ТЕС не може перевищувати 6–7%/хв від їх номінальної потужності $P_{ном}$, для ГЕС цей показник становить 1–2,5% $P_{ном}$ /с, а для АБ –

перевищує $700\%P_{ном}/с$.

Тому поряд з використанням традиційних ГЕС у якості генераторів-регуляторів важливим є залучення швидкодіючих накопичувачів електричної енергії на базі акумуляторних батарей. Можливість їх використання в якості регуляторів обумовлена інтенсивним розвитком як електрохімічних накопичувачів енергії (потужні акумуляторні батареї, що застосовуються в транспорті) так і електронної елементної бази (потужні імпульсні перетворювачі постійного струму в змінний). Це привело до зниження вартості та підвищення одиничної потужності подібних систем.

Необхідні витрати для впровадження систем накопичення електричної енергії не будуть перевищувати витрати на вирішення проблеми стабілізації частоти при масовому впровадженні ВЕС та СЕС іншими способами.

У третьому розділі розроблено і всебічно досліджено нову узагальнену математичну модель стабілізації частоти і потужності при роботі ВЕС та СЕС у складі електроенергетичних систем. Наведено опис розробленого ПДК «Частота-М», необхідного для проведення числових експериментів з використанням побудованої моделі.

В роботі наведені відомі та розроблені нові регулюючі функції. Одним з використаних законів є відомий пропорційно-диференційно-інтегральний (ПД) закон

$$F(t) = A(\omega_0 - \omega(t)) - Q \frac{d\omega}{dt} + S \int_{t_0}^{t_1} (\omega_0 - \omega(\tau)) d\tau, \quad (1)$$

де $F(t)$ – регулююча функція; $\omega(t)$ – кругова частота в енергосистемі в момент часу t ; ω_0 – кругова частота в початковий момент часу t_0 ; A , Q , S – відповідно пропорційна, диференціальна та інтегральна складові закону; $[t_0, t_1]$ – відрізок часу, що розглядається.

Закон (1) формує регулюючу функцію, в якій аргументом є відхилення частоти $\omega_0 - \omega(t)$, тобто в процесі регулювання аргумент прямує до нуля. З іншого боку, регулююча функція повинна мати у кожний момент часу похідну, яка є співставною (краще – більшою) за модулем з похідною від потужності ВЕС та СЕС. Тоді задля виконання цієї умови коефіцієнти в ПД-законі повинні приймати великі значення. Однак відомо, що при великих значеннях цих коефіцієнтів система регулювання за певних додаткових умов може втратити стійкість.

Тому в роботі вперше було запропоновано формування не менш точного і більш надійного закону регулювання для зазначених систем. Останнім часом особлива увага при синтезі систем регулювання надається адаптивним системам, в яких використовуються не загальні закони (функції) регулювання, а специфічні залежності, що зумовлені призначенням системи регулювання.

Призначенням комплексу з генераторів ВЕС, СЕС, АБ та ГЕС є виробництво електроенергії заданої потужності $U(t)$ із стабільною частотою $f_0 \pm \Delta f_{дон}$, де $\Delta f_{дон}$ – допустиме відхилення частоти, $U(t)$ – уставка, що задається диспетчерською службою, зокрема, для покриття графіка електричних навантажень. Виходячи з цього, отримуємо залежність

$$D_a(t) = U(t) - \sum_{i=1}^m P_{BECi}(t) - \sum_{j=1}^n P_{CECj}(t), \quad (2)$$

де $D_a(t)$ – адаптивна складова функції регулювання, m – кількість ВЕС, n – кількість СЕС в енергосистемі.

Залежність (2) може бути використана і успішно використовувалась як самостійна регулююча функція, при цьому точність регулювання по частоті забезпечувалась високою. Однак більш надійною з точки зору завадостійкості виявилась регулююча функція (3), яка є сумою адаптивної складової $D_a(t)$ та ПД-закону зі стійкими величинами його коефіцієнтів

$$P_{AB}(t) = D_a(t) + A_{AB}(\omega_0 - \omega(t)) - Q_{AB} \frac{d\omega(t)}{dt} + S_{AB} \int_{t_0}^{t_1} (\omega_0 - \omega(\tau)) d\tau. \quad (3)$$

Отриманий закон дав змогу побудувати адаптивну модель регулювання частоти і потужності в енергосистемах з вітровими електростанціями, регулююча потужність якої на відміну від існуючих складається із двох частин, а саме, адаптивної складової $D_a(t)$ та ПД-закону. Таке поєднання зазначених складових в одному законі дозволило отримати якісно кращі результати регулювання.

На базі розробленої раніше в Інституті загальної енергетики НАН України моделі процесів регулювання частоти і потужності в енергосистемі в аварійних режимах з використанням споживачів-регуляторів було створено узагальнену математичну модель, яка дозволяє вирішувати принципово іншу задачу, а саме, забезпечення стабільності частоти і потужності в нормальних режимах енергосистем, в яких використовуються ВЕС та СЕС з великими сумарними потужностями. Розвиток моделі полягає в тому, що в існуючу математичну модель замість рівнянь, що описують процеси в споживачах-регуляторах, були введені нові рівняння (2) – (4), (8) – (15) для ВЕС, СЕС, акумуляторних батарей та зв'язків між ними і традиційними об'єктами енергосистеми:

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{\sum_{i=1}^I P_{ci}(t) + P_{AB}(t) + P_{zp}(t) + P_{BEC}(t) + P_{CEC}(t) - P_h(t) - P_m(t)}{T_c P_{\Sigma c0} \omega(t)} \omega_0^2, \quad (4)$$

$$\frac{dP_{ci}(t)}{dt} = \frac{P_{c0i} - P_{ci}(t) + B_{ci}(\omega(t) - \omega_0)}{\tau_{ci}}, \quad i = \overline{1, I}, \quad (5)$$

$$\frac{dP_h(t)}{dt} = \frac{P_{h0} - P_h(t) + C_h(\omega(t) - \omega_0)}{\tau_h}, \quad (6)$$

$$\frac{dP_{zp}(t)}{dt} = \frac{B_{zp}(\omega(t) - \omega_0) + F_{zp}(t) - P_{zp}(t)}{T_{zp}}, \quad (7)$$

$$\frac{dP_{BEC}(t)}{dt} = \frac{P_{BEC0} + B_{BEC}(\omega(t) - \omega_0) + P_{BECg}(v_g(t)) - P_{BEC}(t)}{T_{BEC}}, \quad (8)$$

$$P_{BECg}(v_g) = c_0 + c_1 v_g + c_2 v_g^2 + \dots + c_n v_g^n, \quad (9)$$

$$P_{CEC}(t) = \frac{1}{2} A_0 + \sum_{k=1}^M (A_k \cos k\omega_0 t + B_k \sin k\omega_0 t), \quad (10)$$

$$v_6(t) = \frac{1}{2} A_{v0} + \sum_{k=1}^N (A_{vk} \cos k\omega_0 t + B_{vk} \sin k\omega_0 t), \quad (11)$$

$$A_{vk} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{2N} \left(P_{BEC6}(t_n) \cos \frac{2\pi k}{T} t_n \right), \quad k = 0, 1, \dots, N, \quad (12)$$

$$B_{vk} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{2N} \left(P_{BEC6}(t_n) \sin \frac{2\pi k}{T} t_n \right), \quad k = 0, 1, \dots, N, \quad (13)$$

$$A_k = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{2M} \left(P_{CEC}(t_m) \cos \frac{2\pi k}{T} t_m \right), \quad k = 0, 1, \dots, M, \quad (14)$$

$$B_k = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^{2M} \left(P_{CEC}(t_m) \sin \frac{2\pi k}{T} t_m \right), \quad k = 0, 1, \dots, M, \quad (15)$$

$$F_{zp}(t) = A_{zp}(\omega(t) - \omega_0) + Q_{zp} \frac{d\omega}{dt} + S_{zp} \int_{t_0}^{t_1} (\omega(\tau) - \omega_0) d\tau, \quad (16)$$

де T_c – постійна часу енергосистеми; $P_{\Sigma \neq 0}$ – сумарна потужність генераторів у початковий момент часу; $P_{zi}(t)$, $P_H(t)$, $P_{zp}(t)$, $P_{AB}(t)$, $P_{BEC}(t)$, $P_{CEC}(t)$ – шукані змінні функції, що відповідають генераторам, навантаженню, генераторам-регуляторам (ГЕС), акумуляторній батареї, ВЕС та СЕС відповідно; τ_{zi} , τ_H , T_{zp} , T_{BECs} – постійні часу генераторів, навантаження, генераторів-регуляторів та ВЕС відповідно; B_{zi} , C_H , B_{zp} , B_{BEC} – крутизна частотних характеристик генераторів, навантаження, генераторів-регуляторів та ВЕС відповідно; A_{AB} , A_{zp} , Q_{AB} , Q_{zp} , S_{AB} , S_{zp} – коефіцієнти підсилення пропорційної, диференціальної та інтегральної складових закону регулювання для акумуляторної батареї та генераторів-регуляторів відповідно; $t = [t_0, t_1]$ – інтервал часу, на якому досліджуються процеси регулювання в енергосистемі; M , N – кількість точок натурних показників швидкості вітру та потужності СЕС відповідно.

Таким чином, сукупність узагальнених математичних моделей, що описують процеси функціонування ВЕС та СЕС в ОЕС, являє собою систему рівнянь (2) – (23) з наступними технологічними обмеженнями:

обмеження на швидкість зміни потужності:

$$L_{ABnh} \leq \left| \frac{dP_{AB}(t)}{dt} \right| \leq L_{AB\delta h}, \quad t \in [t_0, t_1], \quad P_{AB} \in [P_{ABh1}, P_{ABh2}], \quad (17)$$

$$L_{zpn\delta} \leq \left| \frac{dP_{zp}(t)}{dt} \right| \leq L_{zpn\delta}, \quad t \in [t_0, t_1], \quad P_{zp} \in [P_{zpn\delta 1}, P_{zpn\delta 2}], \quad (18)$$

обмеження на рівень потужності АБ:

$$P_{AB \min} \leq P_{AB}(t) \leq P_{AB \max}, \quad (19)$$

$$P_{zp \min} \leq P_{zp}(t) \leq P_{zp \max}, \quad (20)$$

зона нечутливості:

$$\frac{dP_{AB}(t)}{dt} = const, \omega(t) - \omega_0 \in [\omega_{s1}, \omega_{s2}], \quad (21)$$

$$\frac{dP_{zp}(t)}{dt} = const, \omega(t) - \omega_0 \in [\omega_{k1}, \omega_{k2}], \quad (22)$$

де g, h – індекси, що позначають інтервали потужності генератора-регулятора та АБ, в яких діє обмеження швидкості; $P_{zp\ min}, P_{zp\ max}, P_{AB\ min}, P_{AB\ max}$ – обмеження мінімальної і максимальної потужності ГЕСр та АБ відповідно; $[\omega_{s1}, \omega_{s2}]$ – зона нечутливості АБ; $[\omega_{k1}, \omega_{k2}]$ – зона нечутливості генератора-регулятора.

Початкові умови змінних у рівняннях (4) – (8):

$$\begin{cases} \omega(t_0) = \omega_0, \\ P_{zi}(t_0) = P_{zi0}, \\ P_n(t_0) = P_{n0}, \\ P_{zp}(t_0) = P_{zp0}, \\ P_{BEC}(t_0) = P_{BEC0}. \end{cases} \quad (23)$$

Отримана модель, на відміну від існуючих, дає можливість досліджувати процеси регулювання в енергосистемах з ВЕС та СЕС як з традиційними регуляторами, так і з швидкодіючими акумуляторними батареями, а також дає можливість аналізу результатів автономної або спільної дії вітрових та сонячних електростанцій з генераторами-регуляторами різних типів.

Розроблена модель надає можливості щодо обґрунтування застосування нових способів забезпечення стабільного функціонування вітрових і сонячних електростанцій в енергосистемах, що полягають у введенні у склад енергосистем з вітровими та сонячними електростанціями швидкодіючих генераторів-регуляторів на базі АБ чи потужних ГЕС, а також їх спільного використання. Можливі варіанти визначаються завдяки підбору співвідношень між наявними в енергосистемі значеннями генеруючих потужностей різних видів ВДЕ (вітрові та сонячні електростанції) та регуляторів (акумуляторні батареї, ГЕС). Ці співвідношення встановлюють граничні значення потужностей, що виробляються генераторами-регуляторами (ГЕС та АБ), та є необхідними для балансування стохастичного характеру електрогенерації вітрових та сонячних електростанцій.

В роботі описано розроблений здобувачем проблемно-орієнтований програмно-інформаційний комплекс «Частота-М» (рис. 1), в якому реалізовано узагальнену математичну модель процесів регулювання частоти і потужності в енергосистемах з ВЕС, СЕС та генераторами-регуляторами різних типів, включаючи ГЕС та швидкодіючі АБ. Розроблений ПІК має модульну структуру та включає: модулі імпорту/експорту натурних даних, параметрів апроксимацій та результатів обчислень у вигляді текстових файлів MS Word і таблиць MS Excel, у тому числі для взаємодії з пакетом MathCAD; модулі побудови та відтворення поліноміальної і ДПФ апроксимацій для роботи з вихідними даними швидкості вітру, потужностей СЕС, нелінійними властивостями вітроагрегатів; модулі проведення розрахунків за допомогою удосконалених числових методів обчислення систем нелінійних

диференціальних рівнянь з початковими умовами та визначення похибок розрахунків; модулі керування, роботи з параметрами експерименту та інтерфейсні модулі для зручної роботи оператора.

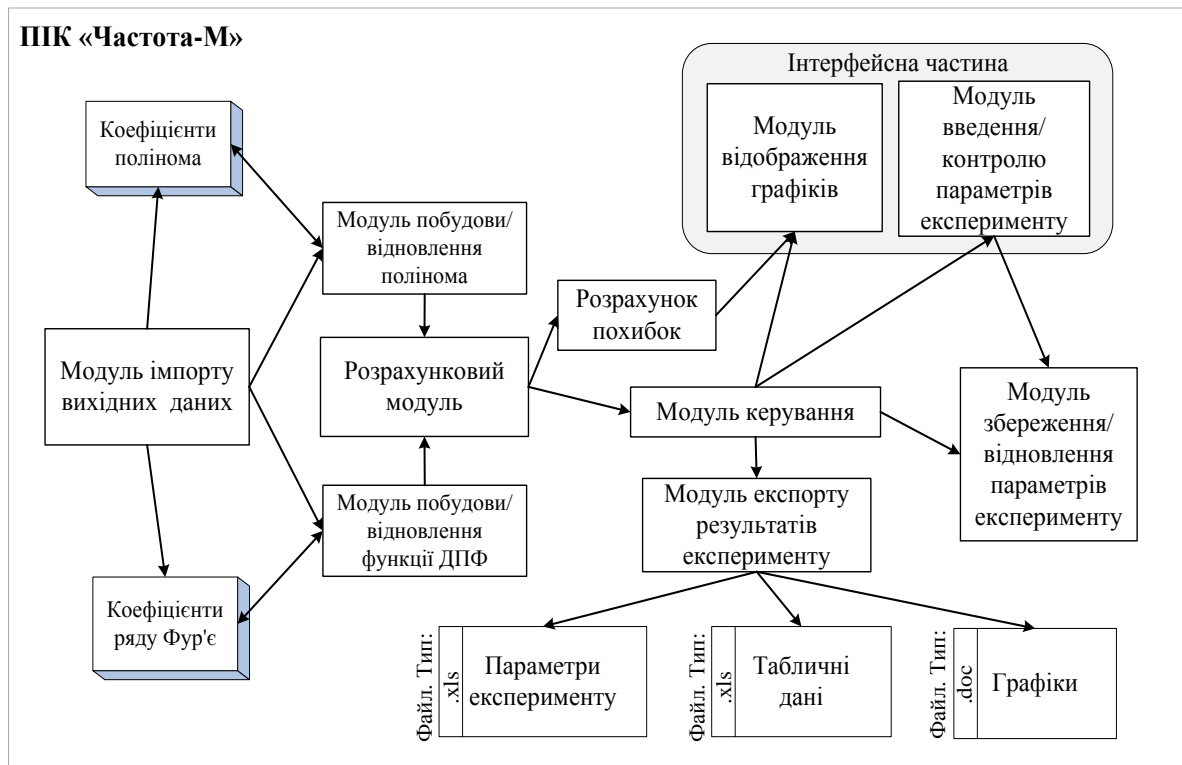


Рисунок 1 – Структура програмно-інформаційного комплексу «Частота-М»

У четвертому розділі надані результати виконаних числових досліджень з використанням створених моделей процесів стабілізації частоти в енергосистемах із ВЕС та СЕС і регулюючими потужностями, якими були акумуляторні батареї та ГЕС.

Дослідження проводилися з використанням універсальної розрахункової схеми, що наведена на рис. 2. Загальна кількість варіантів досліджених схем становить кілька десятків, із них далі наведені такі, які надають можливість зробити найважливіші висновки.

Була досліджена, зокрема, схема енергосистеми (рис. 2) з загальним навантаженням $P_n = 14500$ МВт, втратами в мережах $P_m = 1500$ МВт, потужностями $P_{AEC} = 7410$ МВт, $P_{TEC} = 4590$ МВт, $P_{ГЕС} = 1000$ МВт, $P_{BEC\ max} = 1400$ МВт, $P_{AB\ max} = 3000$ МВт, $P_{СЕС} = P_{ГЕСр} = 0$, уставка диспетчерського управління $U = 3000$ МВт. Швидкодія АБ дорівнювала 714% від її номінальної потужності за секунду. Вихідною величиною була діаграма швидкості вітру в діапазоні 0–120 с, наведена на рис. 3.

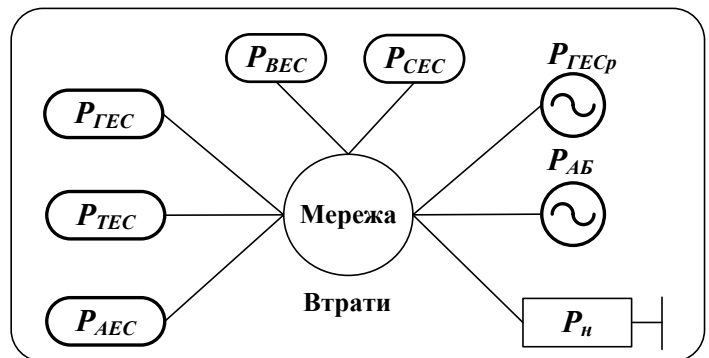


Рисунок 2 – Агрегована розрахункова схема енергосистеми

Згідно проведеного дослідження в інтервалі 0–35 с акумуляторна батарея була вимкнена і працювала лише в інтервалі 35–120 с. За відсутності АБ відхилення частоти в енергосистемі (рис. 4, штрихова лінія) змінюється неперервно в діапазоні $-0.8 \div -2.2$ Гц, що є недопустимим. Після вмикання АБ в системі протягом 4 с відбувається перехідний процес з виходом на стаціонарний режим з відхиленням частоти $|\Delta f| < 0.02$ Гц. При цьому АБ генерує таку змінну потужність P_{AB} (рис. 5), яка забезпечує виконання рівняння (2): $U(t) = P_{BEC}(t) + P_{AB}(t) = 3000$ МВт в інтервалі часу 35–120 с. Використання АБ як регулятора частоти і потужності дало можливість стабілізувати ці параметри з точністю, що із запасом задовольняє вимоги не тільки енергосистеми України, а також енергосистеми Євросоюзу ENTSO-E.

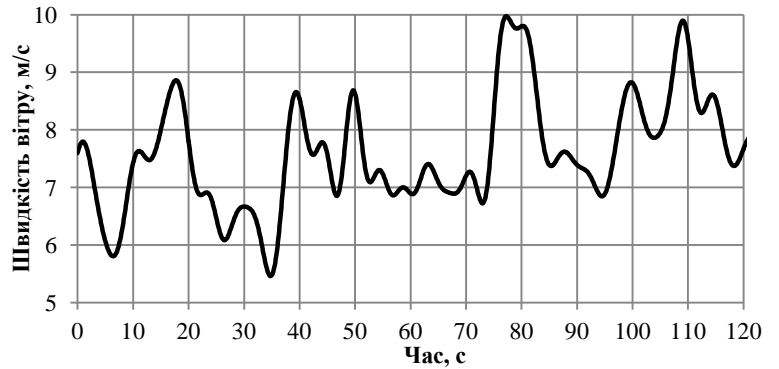


Рисунок 3 – Графік швидкості вітру

Використання запропонованої моделі дало змогу встановити, що при реальних швидкостях вітру (4–10 м/с) для ефективного регулювання частоти в енергосистемі ($0,2 \text{ Гц} \geq |\Delta f_{max}| \geq 0,02 \text{ Гц}$) з потужними ВЕС (15–25 % від встановленої потужності традиційних джерел в енергосистемі) достатньо мати акумуляторні батареї, сумарна потужність яких є співставною із сумарною потужністю ВЕС (рис. 4, 5).

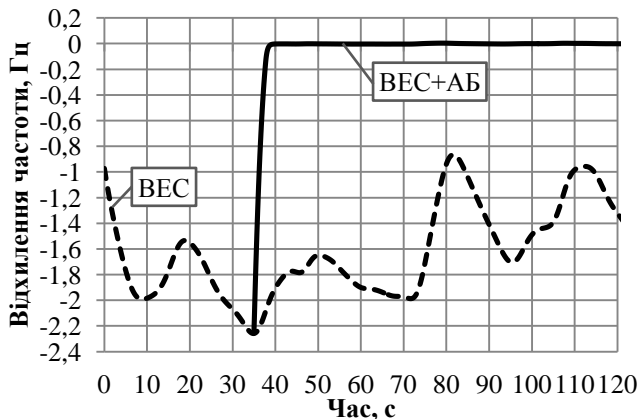


Рисунок 4 – Відхилення частоти в системі при роботі ВЕС із включенням АБ на 35-й секунді

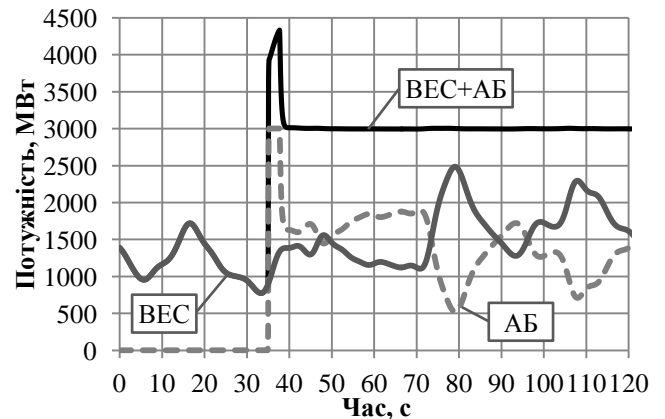


Рисунок 5 – Потужність АБ, ВЕС та їх сумарна потужність

Було досліджено роботу сонячних електростанцій з використанням генераторів-регуляторів на базі АБ (рис. 6). Розрахункова схема енергосистеми, що була використана в дослідженні (рис. 2), мала загальне навантаження $P_n = 16000$ МВт, втрати в мережах $P_m = 1500$ МВт, потужності $P_{AEC} = 7400$ МВт, $P_{TEC} = 4600$ МВт, $P_{ГЕС} = 2000$ МВт, $P_{СЕС max} = 2500$ МВт, $P_{AB max} = 2600$ МВт, $P_{BEC} = P_{ГЕСp} = 0$, уставку диспетчерського управління $U = 3500$ МВт. Швидкодія АБ дорівнювала $714\%P_{ном}/с$. Графік потужності СЕС був заданий згідно натурних даних (рис. 6).

В дослідженні моделювався режим роботи енергосистеми, за яким в інтервалі часу $t=0-2$ с система є нерегульованою, тобто працює СЕС та інші елементи системи, окрім АБ. Починаючи з $t=2$ с і в подальшому, в роботу долучається акумуляторна батарея (рис. 7).

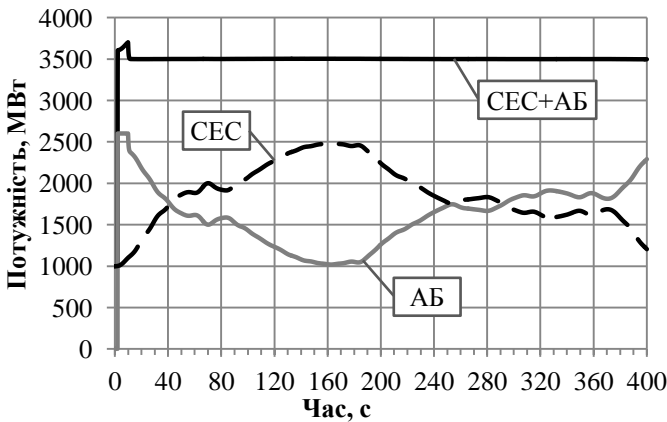


Рисунок 6 – Потужність АБ, СЕС та їх сумарна потужність

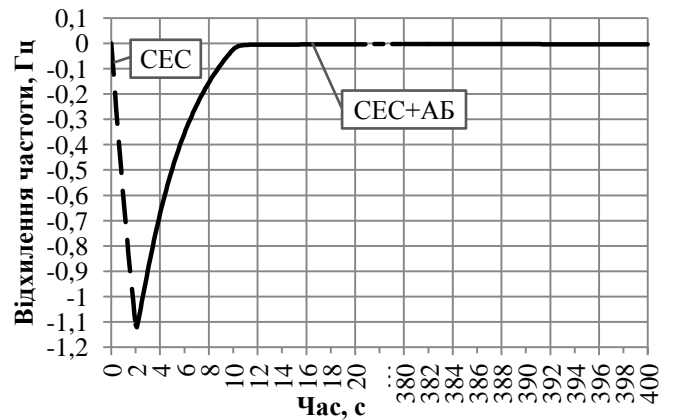


Рисунок 7 – Відхилення частоти в системі при роботі СЕС із включенням АБ на 2-й секунді

Як видно із рис. 7 при цьому протягом 9 с після вмикання АБ в енергосистемі частота стабілізується на рівні 50 Гц з відхиленням менш ніж 0,01 Гц і забезпечується такою на всьому інтервалі до 400 с.

В роботі було проведено ряд досліджень по визначенню можливостей стабілізації частоти в енергосистемах за допомогою різних типів генераторів-регуляторів, зокрема, було проведено дві серії експериментів з відокремленою або одночасною роботою регулюючих ГЕС та АБ. В цих дослідженнях розрахункова схема енергосистеми (рис. 2) мала загальне навантаження $P_n = 16000$ МВт, втрати в мережах склали $P_m = 1600$ МВт, потужності генерації налічували $P_{AEC} = 7600$ МВт, $P_{TEC} = 4800$ МВт, $P_{ГЕС} = 2100$ МВт, $P_{BEC\ max} = 2800$ МВт, $P_{СЕС} = 0$, потужності регуляторів P_{AB} та $P_{ГЕСр}$ змінювалися в залежності від умов експериментів, уставка диспетчерського управління складала $U = 3100$ МВт. Показник швидкодії для ГЕС та АБ складав відповідно 2,5% та 714% від їх номінальної потужності за секунду.

Перша серія цифрових експериментів (7 варіантів) була проведена з метою виявлення взаємного впливу потужностей $P_{ГЕСр}$ та P_{AB} та визначення відхилень частоти $|\Delta f|_{\max}$ на всьому часовому діапазоні $0 \leq t \leq 120$ с. При цьому потужність $P_{BEC}(t)$ не перевищувала 2800 МВт, на потужності P_{AB} та $P_{ГЕСр}$ накладалось обмеження $P_{BEC}(t)_{\max} = P_{AB}(t)_{\max} + P_{ГЕСр}(t)_{\max}$, варіанти відрізнялись значеннями відношення $P_{AB\ max}/P_{ГЕСр\ max}$. Величини максимальних значень $P_{BEC}(t)$, $P_{AB}(t)$, $P_{ГЕСр}(t)$ в проведених експериментах не співпадають за часом і спостерігаються в довільних точках його інтервалу. В усіх експериментах для кожного моменту часу модель забезпечує виконання рівняння

$$P_{BEC}(t) + P_{ГЕСр}(t) + P_{AB}(t) + P_{\kappa}(t) = U(t), \quad (24)$$

де $U(t)$ – вимога (уставка) диспетчерської служби із забезпечення необхідної для енергосистеми потужності; $P_{\kappa}(t)$ – відхилення кінетичної потужності обертових мас (ротори генераторів та електродвигунів навантаження, турбіни) від її значення при $f = f_0$ (при $f(t) = f_0 \pm |\Delta f|_{\max}$ допустима величина P_{κ} є малою).

Результати спільної роботи АБ та ГЕСр, що наведені в табл. 1, надають можливість зробити такі висновки. За умови використання лише ГЕСр (варіант 7) відхилення частоти не відповідає нормативним вимогам щодо підтримки частоти навіть в ОЕС України ($|\Delta f|_{max} \leq 0,2$ Гц). При використанні в системі регулювання лише АБ (варіант 1)

забезпечується відхилення частоти, модуль якого не перевищує 0,01 Гц, що із запасом задовольняє навіть вимогам системи ENTSO-E (0,02 Гц). Загалом, при зменшенні відношення $P_{AB\ max}/P_{ГЕСр\ max}$ спостерігається поступове погіршення регулюючої характеристики системи підтримки частоти.

Таблиця 2 – Мінімальна потужність регулятора (МВт), необхідна для забезпечення відхилення частоти в межах ± 0.2 Гц та ± 0.02 Гц

Варіант	1	2	3	4
$ \Delta f _{max}$	0.2		0.02	
$P_{ГЕСр}$	8647	0	13268	0
P_{AB}	0	1795	0	2161

Результати цих досліджень наведені в табл. 2. Звертає увагу те, що необхідна потужність згідно варіанта 1 табл. 2 більш ніж втричі перевищує $P_{ВЕС\ max}$, а згідно варіанта 3 – у 4,7 рази. Разом з тим, необхідна потужність P_{AB} , згідно варіанта 4 табл. 2, є меншою за потужність P_{AB} за варіантом 2 табл. 1.

Для пояснення зазначених показників було більш детально розглянуто модельні величини за варіантом 2 табл. 1. Дані потужностей АБ, ГЕСр, ВЕС та їх сумарна потужність за цим варіантом представлені на рис. 8.

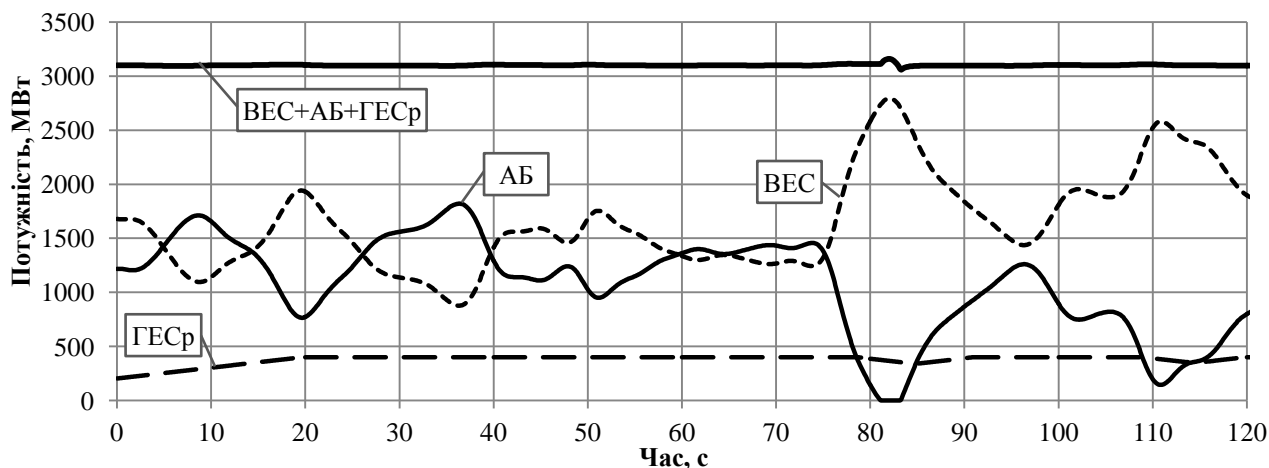


Рисунок 8 – Потужності АБ, ГЕСр, ВЕС та їх сумарна потужність за варіантом 2 табл. 1

Таблиця 1 – Залежність максимального відхилення частоти від співвідношення потужностей (МВт) АБ та ГЕСр

Варіант	1	2	3	4	5	6	7
$P_{AB\ max}$	2800	2400	2240	1400	700	560	0
$P_{ГЕСр\ max}$	0	400	560	1400	2100	2240	2800
$P_{AB\ max}/P_{ГЕСр\ max}$	-	6	4	1	0,333	0,25	0
$ \Delta f _{max}$	0,01	0,02	0,06	0,15	0,2	0,26	0,75

Метою другої серії експериментів (4 варіанти) було встановлення необхідних потужностей $P_{ГЕСр}$ та P_{AB} , при яких забезпечується нормативна частота в енергосистемі з відхиленням $|\Delta f|_{max}$, що не перевищує 0.2 та 0.02 Гц. При цьому ГЕСр та АБ працюють окремо.

При використанні в системі регулювання частоти лише ГЕС ($P_{AB} = 0$) її потужність для забезпечення вимоги $|\Delta f|_{max} \leq 0,2$ Гц повинна становити не менше 8647 МВт при максимальній потужності ВЕС 2800 МВт, тобто, коефіцієнт перевищення потужності ГЕС дорівнює 3,1. Однак від такої потужності ГЕС відбирається при цьому на всьому інтервалі часу потужність, що не перевищує 2219 МВт. За тих же самих умов при використанні лише АБ її необхідна потужність та потужність відбору є однаковими і становлять лише 1795 МВт (табл. 3, варіант 2). Така велика різниця між показниками необхідних потужностей ГЕС та АБ пояснюється дуже великою різницею у їх швидкодії (2,5% за секунду від $P_{ГЕСр ном.}$ та 714% за секунду від $P_{AB ном.}$).

При допустимому відхиленні частоти $|\Delta f|_{max} \leq 0,02$ Гц та коли працює лише ГЕС, її необхідна потужність зростає до 13368 МВт, а потужність, що відбирається, залишається на рівні 2219 МВт. Для АБ потрібна потужність та потужність, що відбирається, є однаковими і становлять 2161 МВт. Це також пояснюється великою різницею у швидкодії ГЕСр та АБ.

Несподіваними є результати, отримані при сумісній роботі АБ та ГЕС. Здавалося б, дані деяких варіантів табл. 1 протирічать результатам відповідних варіантів табл. 2. Для варіанта 2 табл. 1 допустиме $|\Delta f|_{max} \leq 0,02$ Гц досягається при необхідній потужності $P_{AB} = 2400$ МВт та $P_{ГЕСр} = 400$ МВт, тоді як при такому ж $|\Delta f|_{max}$ згідно табл. 2 (варіант 4) достатньо мати лише $P_{AB} = 2161$ МВт при $P_{ГЕСр} = 0$. Дивує не тільки те, що сума $P_{AB} + P_{ГЕСр}$ для варіанта 2 табл. 1 є більшою за цю ж суму варіанта 4 табл. 2. Видається неймовірним той факт, що величина P_{AB} за варіантом 4 табл. 2 є значно меншою у порівнянні з її значенням згідно варіанта 2 табл. 1. Але аналіз показує, що ніяких протиріч не існує. Дійсно, для кожного моменту часу роботи системи справедливою є залежність (24). Як видно із рис. 8, траєкторія $P_{ГЕСр}$ після $t \geq 20$ с змінюється мало і наближається до константи $P_{ГЕСр} = 400$ МВт. Таке явище пояснюється малою швидкістю зміни потужності $P_{ГЕСр}$. Тоді згідно (24) регулювальний діапазон P_{AB} автоматично зменшується на величину $P_{ГЕСр}$ до значення $P_{AB} = 2000$ МВт. Тобто, ГЕС не допомагає регулювати частоту, а фактично частково блокує роботу АБ.

Був проведений комплекс числових експериментів з використанням розробленої адаптивної моделі, у яких було встановлено, що найкращі показники зі стабілізації частоти надає повна модель, в якій використовується як адаптивна складова, так і ПД-закон (рис. 9, табл. 3, варіант 1). Значення параметрів розрахункової схеми енергосистеми (рис. 2) залишилась без змін: $P_n = 16000$ МВт, втрати в мережах склали $P_m = 1600$ МВт, потужності генерації налічували $P_{AEC} = 7600$ МВт, $P_{TEC} = 4800$ МВт, $P_{ГЕС} = 2100$ МВт, $P_{BEC max} = 2800$ МВт, $P_{CEC} = P_{ГЕСр} = 0$, потужність регулятора $P_{AB max} = 2800$ МВт. Уставка $U(t)$ при цьому була змінною, а саме, $U(t) = 3100$ МВт при $0 \leq t < 80$ с, $U(t) = 3600$ МВт при $80 \leq t \leq 120$ с. Швидкодія АБ дорівнювала $714\%P_{ном}/с$. Проведені дослідження провадились з метою використання їх результатів для регулювання частоти і потужності як в ОЕС України, так і в енергосистемі Євросоюзу ENTSO-E. Як зазначалось, максимально допустиме відхилення частоти в енергосистемі ENTSO-E для нормальних режимів визначено обсягом $|\Delta f|_{max} \leq 0,02$ Гц, в ОЕС України на сьогодні $|\Delta f|_{max} \leq 0,2$ Гц. В

табл. 3 наведені варіанти регулюючих потужностей, що прямо чи опосередковано пов'язані із цими показниками.

Згідно варіанта 1 вимога ENTSO-E по частоті досягається при сумісному використанні в регулюючій потужності $P_{AB}(t)$ адаптованої складової D_a та ПІД-закону. При цьому коефіцієнти ПІД-закону мають значення, які повинні цілком задовольнити умови стійкості системи управління. Діаграми $P_{BEC}(t)$, $P_{AB}(t)$ та їх сумарної потужності надані на рис. 9.

Варіант 2 також забезпечує зазначену вимогу ENTSO-E, однак через відсутність при цьому адаптивної складової коефіцієнти A_{AB} , Q_{AB} та S_{AB} вимушено зростають більш ніж на порядок, що може створити проблеми із забезпеченням стійкості системи регулювання частоти.

Варіант 3 демонструє, що при незначному (на 10–15%) зменшенні коефіцієнтів у ПІД-законі європейські вимоги щодо стабільності частоти перестають виконуватись навіть при сумісному з ним застосуванні адаптивної складової.

Таблиця 3 – Залежність відхилення частоти від структури закону регулювання

Варіант	Структура закону регулювання				$ \Delta f _{\max}$, Гц
	ПІД-закон			D_a	
	A_{AB}	Q_{AB}	S_{AB}		
1	660	396	33	+	0,020
2	7950	4770	398	0	0,020
3	575	345	29	+	0,021
4	7950	4770	398	+	0,003
5	0	0	0	+	0,043
6	660	396	33	0	0,180
7	575	345	29	0	0,198

максимально допустиме.

Вимоги щодо відхилення частоти в ОЕС України можуть бути виконані також і без використання адаптивної складової, використовуючи лише ПІД-закон. Згідно варіантів 6, 7 значення його коефіцієнтів не повинні загрожувати втратою стійкості системи регулювання частоти. Але при цьому не забезпечуються вимоги по частоті, що діють в енергосистемі ENTSO-E.

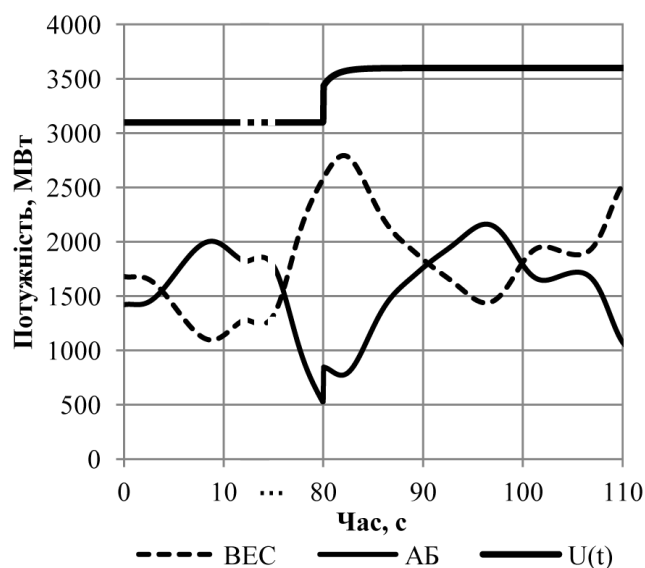


Рисунок 9 – Потужності AB, BEC та їх сумарна потужність $U(t)$; $A_{AB} = 660$; $Q_{AB} = 396$; $S_{AB} = 33$

Використання коефіцієнтів ПІД-закону із варіанта 2 разом із адаптивною складовою зменшує максимальне відхилення частоти згідно варіанта 4 майже у 7 разів, яке становить при цьому 0,003 Гц.

Відповідно до варіанта 5 для забезпечення вимог щодо стабільності частоти, які діють в ОЕС України, у складі регулюючої потужності $P_{AB}(t)$ достатньо використати лише адаптивну складову $D_a(t)$. При цьому максимальне відхилення частоти буде майже у 4 рази меншим за

ВИСНОВКИ

В роботі вирішена важлива наукова задача розроблення моделей та засобів забезпечення стабільності частоти і потужності в усталених режимах енергосистем при наявності у їх структурі потужних вітрових і сонячних електростанцій. В процесі виконання роботи отримані наступні результати.

1. Розроблена і всебічно досліджена узагальнена математична модель процесів регулювання частоти і потужності в енергосистемах з потужними ВЕС та СЕС, яка на відміну від існуючих містить формалізацію практично усіх важливих елементів і показників регулювання, а саме, нелінійні обмеження на регулюючі потужності та їх похідні, зони нечутливості, допустимого відхилення частоти, врахування частотних характеристик традиційних генераторів і навантаження, формалізацію натурних даних зміни швидкості вітру та інсоляції, що забезпечує розробленій моделі високий рівень точності і адекватності.

2. Розроблено та використано у структурі моделі новий адаптивний закон регулювання частоти і потужності в енергосистемах з вітровими і сонячними електростанціями, регулююча потужність якого, на відміну від існуючих, складається із двох частин, а саме, адаптивної складової та ПІД-закону. Знайдено оптимальне відношення між цими складовими, що забезпечує максимальний регулюючий ефект. Поєднання зазначених складових в одному законі надає якісно кращі результати із забезпечення точності по частоті та стійкості системи регулювання.

3. Вперше розроблено проблемно-орієнтований програмно-інформаційний комплекс «Частота-М», що дозволяє досліджувати процеси стабілізації частоти в нормальних режимах енергосистем з великими обсягами вітрової та сонячної генерації. До складу програмного забезпечення комплексу входять розроблені вперше програмні модулі для числового розрахунку математичних моделей функціонування вітрових, сонячних електростанцій та швидкодіючих генераторів-регуляторів на базі акумуляторних батарей. Були розроблені модулі для інтеграції комплексу з програмними пакетами MathCAD та MS Excel. В результаті отримано сучасний інструментарій для вирішення широкого класу задач режимного і структурного характеру для енергосистем з великими обсягами потужностей ВЕС та СЕС.

4. Встановлено, що для забезпечення національних і європейських вимог стабільності по частоті потужність АБ в енергосистемі повинна бути не меншою сумарної потужності ВЕС та СЕС, якщо регулювання забезпечується лише за допомогою акумуляторних батарей.

5. У випадку, коли регулювання по частоті в енергосистемі забезпечують лише ГЕС, їх робоча потужність повинна бути у 3–5 разів більшою за сумарну потужність ВЕС в залежності від швидкості зміни цієї потужності.

6. Сумісне використання АБ та малопотужних ГЕС в контурі стабілізації частоти енергосистеми з потужними ВЕС та СЕС є недоцільним, оскільки згідно виконаних в роботі досліджень малопотужні ГЕС через свою низьку швидкодію блокують роботу АБ. В результаті ефективна робоча потужність регулювання буде дорівнювати різниці потужностей АБ та ГЕС.

7. Наявність узагальненої математичної моделі та проблемно-орієнтованого програмно-інформаційного комплексу «Частота-М» для дослідження режимів роботи і структури системи регулювання частоти і потужності в енергосистемі з великими потужностями ВЕС та СЕС у її складі надає можливість удосконалення структури Об'єднаної енергосистеми України у напрямках обґрунтованого збільшення потужностей відновлюваних джерел енергії.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

В яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Кулик М.М., Дрьомін І.В., Згуровець О.В. Дослідження режимів роботи об'єднаних енергосистем з потужними вітровими електростанціями та акумуляторними батареями. *Проблеми загальної енергетики*. 2018. Вип. 2(53). С. 15—20. (НМБД *Google Scholar*, *Index Copernicus International*).

2. Кулик М.М., Дрьомін І.В., Згуровець О.В. Можливості використання великих накопичувачів електроенергії для стабілізації частоти в об'єднаних енергосистемах з потужними сонячними електростанціями. *Відновлювана енергетика*. 2018. № 3(54). С. 6—14.

3. Згуровець О.В. Вплив зони нечутливості та швидкодії регулятора на процес стабілізації частоти в енергосистемі з потужними вітровими електростанціями та акумуляторними батареями. *Проблеми загальної енергетики*. 2018. Вип. 2(53). С. 31—35. (НМБД *Google Scholar*, *Index Copernicus International*).

4. Кулик М.М., Згуровець О.В. Особливості використання гідроелектростанцій та акумуляторних батарей для стабілізації частоти в енергосистемах. *Енерготехнології и ресурсосбережение*. 2018. № 3. С. 3—11.

5. Кулик М.М., Згуровець О.В. Адаптивна модель регулювання частоти і потужності в енергосистемах з вітровими електростанціями. *Проблеми загальної енергетики*. 2018. Вип. 4(55). С. 5—10. (НМБД *Google Scholar*, *Index Copernicus International*).

6. Дерій В.О., Згуровець О.В. Дослідження графіків електричних навантажень енергосистеми для визначення можливостей їх ущільнення шляхом використання електричних теплогенераторів. *Проблеми загальної енергетики*. 2017. Вип. 4(51). С. 52—60. (НМБД *Google Scholar*, *Index Copernicus International*).

Які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. Кулик М.М., Дрьомін І.В., Згуровець О.В. Моделювання процесів регулювання частоти в об'єднаних енергосистемах з потужними сонячними електростанціями та акумуляторними батареями. Збірка праць конференції Моделювання-2018. Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України: 12-14 вересня 2018 р. Київ. С. 143—146.

8. Кулик М.М., Дрьомін І.В., Згуровець О.В. Перспективи використання потужних акумуляторних батарей для стабілізації частоти в об'єднаних енергосистемах з вітровими електростанціями. ХІХ міжнародна науково-практична конференція «Відновлювана енергетика та енергоефективність у ХХІ столітті» 26—28 вересня 2018 року. Київ. С. 413—418.

АНОТАЦІЯ

Згуровець О.В. Розвиток моделей та засобів забезпечення стабільного функціонування вітрових і сонячних електростанцій в енергосистемах. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук із спеціальності 05.14.01 «Енергетичні системи та комплекси». – Інститут загальної енергетики НАН України, м. Київ, 2019.

Розроблено узагальнену математичну модель процесів регулювання частоти і потужності в енергосистемах (ЕС) з потужними вітровими (ВЕС) та сонячними (СЕС) електростанціями. Розроблено та використано у структурі моделі новий адаптивний закон регулювання, що складається з адаптивної складової та ПІД-закону. Це дозволило підвищити точність підтримки частоти в ЕС та стійкість системи регулювання. На основі створеної математичної моделі розроблено проблемно-орієнтований програмно-інформаційний комплекс (ПК) «Частота-М» та проведена серія розрахунків із дослідження процесів стабілізації частоти у таких ЕС.

Встановлено, що для забезпечення вимог стабільності по частоті необхідна потужність регулятора в разі використання швидкодіючих накопичувачів на базі акумуляторних батарей (АБ) повинна бути в 3–5 разів меншою за необхідну потужність в разі використання гідроелектростанцій та бути співставною з сумарною потужністю ВЕС і СЕС. Використання узагальненої математичної моделі та ПК «Частота-М» для дослідження режимів роботи і структури системи регулювання частоти і потужності в ЕС з великими потужностями ВЕС та СЕС у її складі надає можливість удосконалення структури Об'єднаної енергосистеми України у напрямках обґрунтованого збільшення потужностей відновлюваних джерел енергії.

Ключові слова: накопичувачі на базі акумуляторних батарей, вітрова електростанція, сонячна електростанція, стабілізація частоти, об'єднана енергосистема.

АННОТАЦИЯ

Згуровец А.В. Развитие моделей и средств обеспечения стабильного функционирования ветровых и солнечных электростанций в энергосистемах. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.01 «Энергетические системы и комплексы». – Институт общей энергетики НАН Украины, г. Киев, 2019.

Предложено решение важной научной задачи по разработке моделей и средств обеспечения стабильного функционирования ветровых (ВЭС) и солнечных (СЭС) электростанций в энергосистемах.

Разработана обобщенная математическая модель процессов регулирования частоты и мощности, которая в отличие от существующих дает возможность исследовать процессы регулирования в энергосистемах с ВЭС и СЭС как с традиционными регуляторами, такими как гидроэлектростанции (ГЭС), так и с

быстродействующими накопителями энергии на базе аккумуляторных батарей (АБ). Полученная модель дает возможность анализа результатов автономной или совместной работы ВЭС и СЭС с генераторами-регуляторами различных типов.

Разработана адаптивная модель регулятора частоты и мощности в энергосистемах с ВЭС и СЭС, регулирующая мощность которой в отличие от существующих состоит из двух частей, а именно, адаптивной составляющей и ПИД-закона. Сочетание указанных составляющих в одном законе предоставляет качественно лучшие результаты по обеспечению точности поддержания частоты и устойчивости системы регулирования.

Исследованы основные свойства нелинейных ограничений, обусловленных технологическими особенностями регуляторов и характер их влияния на процессы регулирования частоты и мощности. Формализован ряд особенностей функционирования объектов энергосистемы при регулировании частоты и мощности, в том числе, ВЕС и СЕС, а также АБ.

На основе предложенной модели разработан программно-информационный комплекс (ПИК) «Частота-М». Для решения поставленных задач исследования были разработаны программные модули для численного расчета математических моделей функционирования ветровых, солнечных электростанций и быстродействующих генераторов-регуляторов на базе аккумуляторных батарей. Были разработаны так же модули для интеграции комплекса с программными пакетами MathCAD и MS Excel.

Применение ПИК «Частота-М» позволило провести серию численных экспериментов, в которых было установлено, что лучшие показатели по стабилизации частоты предоставляет полная модель, в которой используется как адаптивная составляющая, так и ПИД-закон. При этом обеспечивается европейское требование по стабилизации частоты ($|df|_{max} \leq 0,02$ Гц), и значения коэффициентов ПИД-закона являются вполне приемлемыми, исходя из критерия устойчивости системы регулирования частоты. Использование в регулирующей мощности только адаптивной составляющей обеспечивает требование стабильности частоты, действующей в Объединенной энергосистеме Украины, однако не может удовлетворить требования энергосистемы ENTSO-E. Использование в регулирующей мощности только ПИД-закона может удовлетворить требования энергосистемы ENTSO-E только при условии, что коэффициенты этого закона будут более, чем на порядок превышать их значения, фигурирующие в полной модели регулирования. Это обеспечивает значительное преимущество полной модели по сравнению с ПИД-законом.

Использование предложенной модели и ПИК «Частота-М» позволило установить так же, что для эффективного регулирования частоты в энергосистеме с мощными ВЭС достаточно иметь АБ, суммарная мощность которых сопоставима с суммарной мощностью ВЭС. Также было определено, что при таких условиях ГЭС могут обеспечить эффективное регулирование частоты в энергосистеме с большими ВЭС только в случае, когда их мощность в 3 и более раза будет выше суммарной мощности ВЭС. При этом от ГЭС будет отбираться мощность, сопоставимая с мощностью ВЭС. Совместная работа мощных ГЭС и АБ является допустимой и полезной. Совместная работа малых ГЭС (мощность сопоставима с мощностью

ВЭС) и АБ является малоэффективной, поскольку при этом малые ГЭС блокируют работу АБ.

Предложены способы обеспечения стабильного функционирования ветровых и солнечных электростанций в энергосистемах, основанные на выборе соотношения между имеющимися в энергосистеме значениями генерирующих мощностей различных видов возобновляемых источников энергии (ветровые и солнечные электростанции) и регуляторов (АБ, ГЭС).

Наличие обобщенной математической модели и проблемно-ориентированного ПИК «Частота-М» для исследования режимов работы и структуры системы регулирования частоты и мощности в энергосистеме с большими мощностями ВЭС и СЭС в ее составе предоставляет возможность усовершенствования структуры Объединенной энергосистемы Украины в направлениях обоснованного увеличения мощностей возобновляемых источников энергии.

Ключевые слова: накопители на базе аккумуляторных батарей, ветровая электростанция, солнечная электростанция, стабилизация частоты, объединенная энергосистема.

SUMMARY

Zgurovets A.V. Development of models and means of ensuring the stable functioning of wind and solar power plants in power systems. – Qualifying scientific work on the manuscript.

Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences by specialty 05.14.01 “Power systems and complexes” – Institute of General Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2019.

A generalized mathematical model of the processes of frequency and power regulation in electric power systems (EPSs) with large wind power (WPPs) and solar power (SPPs) plants has been developed. A new adaptive law of regulation, consisting of the adaptive component and proportional-integral-differential law, was developed and used in the structure of the model. This allowed to increase both the accuracy of frequency stabilization in the EPS and the stability of the control system. On the basis of the created mathematical model, problem-oriented software “Chastota-M” was developed and a series of calculations on the study of frequency stabilization processes in such EPSs was carried out.

It was established that in order to meet the requirements of frequency stability, the power of the regulator in the case of using high-speed battery energy storage systems (BESSs) should be 3 to 5 times less than the required power in case of use of hydroelectric power plants and be comparable to the total power of WPPs and SPPs. The use of the generalized mathematical model and problem-oriented software “Chastota-M” for studying the operating modes and structure of the frequency and power control system in the EPSs with the large capacities of the WPPs and the SPPs in its composition provides an opportunity to improve the structure of the Integrated Power System of Ukraine in the direction of a reasonable increase in the capacity of renewable energy sources.

Keywords: battery energy storage systems, wind power plant, solar power plant, frequency stabilization, integrated power system.