

Заклад вищої освіти „Подільський державний університет”  
Факультет енергетики та інформаційних технологій  
Кафедра електротехніки, електромеханіки і електротехнологій

## ДИПЛОМНА РОБОТА

на тему:

### «ДОСЛІДЖЕННЯ ВИРОБІТКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ НАКОПИЧУВАЧІВ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ»

**Виконав:**

здобувач вищої освіти денної форми навчання освітнього  
ступеня «Магістр», освітньо-професійної програми  
«Енергетичний менеджмент»  
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка»

**ГРЕЧАНИЙ Сергій Вікторович**

Керівник професор

**МИХАЙЛОВА Людмила Миколаївна**

**Оцінка захисту:**

Національна шкала \_\_\_\_\_

Кількість балів \_\_\_\_\_ Шкала ECTS \_\_\_\_\_

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 р.

**Допускається до захисту:**

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 р.

Гарант освітньо-професійної програми  
«Енергетичний менеджмент» спеціальності  
141 «Електроенергетика, електротехніка  
та електромеханіка»  
докт. с-г. наук, канд. техн. наук, доцент

**Олег ТКАЧ**

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ ТА ПОТУЖНОСТІ В ОБ'ЄДНАНІЙ ЕНЕРГОСИСТЕМІ УКРАЇНИ .....	11
1.1 Аналіз стану генеруючих потужностей об'єднаної енергосистеми України .....	11
1.2 Фактори забезпечення якості існуючої об'єднаної енергосистеми України .....	13
1.3 Сучасна ситуація регулювання частоти та потужності в об'єднаній енергосистемі України.....	17
Висновок до розділу 1 .....	21
2 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ ТА ПОТУЖНОСТІ З УРАХУВАННЯМ РЕГУЛЮЮЧИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ТЕПЛОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ .....	22
2.1 Аналіз математичної моделі роботи системи автоматичного регулювання частоти та активної потужності з урахуванням можливостей регулюючих теплових електростанцій .....	22
Висновок до розділу 2 .....	31
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ В УКРАЇНІ ТА СВІТІ .....	32
3.1 Стан і розвиток сонячної та вітрової енергетики в провідних країнах світу. Статистика розвитку сонячної та вітрової електроенергетики України .....	32
3.2 Визначення основних викликів та загрози що пов'язані зі збільшенням частки відновлюваних джерел енергії в покритті загального балансу потужності в об'єднаній енергосистемі України .....	36
Висновок до розділу 3 .....	38

4 ФУНКЦІОНУВАННЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ, ЇХ ВПЛИВ НА ФОРМУВАННЯ БАЛАНСУ ПОТУЖНОСТІ В ОЕС УКРАЇНИ .....	39
4.1 Аналіз чинників та параметрів, які визначають ефективність використання сонячних електростанцій .....	39
4.2 Аналіз фактичного рівня виробітку сонячних електростанцій в об'єднаній енергосистемі України .....	40
4.3 Побудова середньодобових профілів виробітку сонячної електростанції для кожної пори року на протязі 2021-2022 років .....	42
Висновок до розділу 4 .....	43
5 ОГЛЯД СТАНУ ТА РОЗВИТКУ ЕНЕРГОАКУМУЛЮЮЧИХ ПОТУЖНОСТЕЙ І ТЕХНОЛОГІЙ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ .....	44
5.1 Типи систем зберігання електроенергії .....	44
5.2 Вартість систем зберігання та конструкції різного типу батарейних систем .....	49
5.3 Керування попитом .....	52
Висновок до розділу 5 .....	54
6 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КОМПЛЕКСНОГО ВУЗЛА СЕС ТА НАКОПИЧУВАЧА ЕНЕРГІЇ ТА АНАЛІЗ РЕЖИМІВ ЇХ РОБОТИ .....	55
6.1 Математична модель роботи сонячної електростанції .....	55
6.2 Розробка математичної моделі літію-іонних акумуляторів .....	57
6.3 Визначення економічної ефективності зберігання електричної енергії .....	61
6.4 Агрегована розрахункова схема енергосистеми з сонячною електростанцією та акумуляторною батареєю .....	62
Висновок до розділу 6 .....	67
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ .....	68
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	70

## ВСТУП

**Актуальність теми дослідження.** Системні аварії, що відбувалися в Україні останніми роками, свідчать про прийнятну ефективність її електроенергетичної системи. Однак такий стан справ може виявитися тимчасовим, оскільки на сучасному етапі він не може продовжуватися надовго через ряд причин, серед яких найбільш важливими є енергетична безпека України, економічні аспекти та інтеграція з європейською енергетичною системою.

Для забезпечення надійної роботи Оператора електричних систем України (ОЕС України) необхідно вирішувати проблеми щодо стійкості системи, зокрема:

**Енергетична безпека:** Функціонування ОЕС України є основою її паливно-енергетичного комплексу. Ненадійне функціонування чи відключення системи може призвести до серйозних наслідків для економіки та соціальної сфери країни. Наприклад, в разі відключення ліній електропередачі між Україною та Росією може виникнути колапс системи, якщо для стабілізації частоти в ОЕС України використовуватимуться лише автоматичні регулятори турбін.

**Економіка:** Наразі енергосистема України отримує безоплатні системні послуги від Росії, проте ця ситуація може змінитися. Для забезпечення надійної роботи ОЕС України російські гідроелектростанції мають тримати в резерві додаткові потужності, що може призвести до економічних труднощів.

**Інтеграція з європейською енергетичною системою:** Вступ України до Європейського Союзу передбачає об'єднання ОЕС України з європейською енергетичною системою ENTSO-E. Це потребує підготовки та вирішення ряду питань, зокрема, щодо виокремлення певних електростанцій та їх приєднання до європейської системи.

Такі виклики вимагають серйозного уваги та ретельного планування з боку енергетичних організацій України для забезпечення стабільності та ефективності електроенергетичної системи країни.

**Метою дипломної роботи** є вирішення сучасних проблем об'єднаної енергетичної системи України, таких як енергетична безпека, ефективність економічної моделі в енергетиці та інтеграція в європейську енергосистему, потрібно провести аналіз сучасної ситуації щодо первинного, вторинного та третинного регулювання частоти та активної потужності в ОЕС України. Також важливо визначити тенденції найбільш динамічного та впроваджувального типу відновлювального джерела електроенергії (ВДЕ).

Далі, необхідно розробити концепцію акумуляції регулюючих можливостей для первинного, вторинного та третинного регулювання частоти та активної потужності. Ця концепція повинна враховувати можливості інтеграції цієї моделі з можливостями резервування потужності для подальшого її регулювання. Такий підхід дозволить оптимізувати роботу енергосистеми, забезпечуючи стабільність та надійність її функціонування, а також сприятиме збалансованому розвитку енергетичного сектору України в контексті європейських стандартів та вимог.

#### **Об'єкт дослідження.**

Об'єднана енергосистема України включає в себе гідро-, тепло- та сонячні електростанції. Ця інтегрована система генерує електроенергію з різних джерел, таких як гідроенергія, теплова енергія та енергія сонячних панелей. Завдяки різноманітності джерел енергії об'єднана енергосистема забезпечує стабільний та надійний постачання електроенергії для різних регіонів країни. Такий підхід сприяє зменшенню вуглецевих викидів, розвитку відновлювальної енергетики та забезпеченню енергетичної безпеки України.

**Предмет дослідження.** Інтеграція систем накопичення в систему сонячних електростанцій, визначення їх ефективності, надійності, та фінансової доцільності.

**Наукова новизна** даної роботи полягає у вперше проведеному аналізі резервів регулюючих можливостей первинного, вторинного та третинного регулювання частоти та активної потужності з децентралізованого підходу. Це сприяє економічному розвитку, оскільки розглядається можливість використання різних джерел енергії для регулювання системи. Також у роботі розглянута

тенденція використання відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) та їх включення в систему резервування, що вирішує питання енергетичної безпеки України та підвищує можливості включення країни в ENTSO-E.

**Практична значимість роботи.** Висновки дипломної роботи пропонують механізм створення резервування для регулювання частоти та активної потужності, що одночасно сприяє отриманню матеріальної вигоди всім учасникам ринку:

1. Для держави - впровадження стимулюючих механізмів для встановлення акумулюючих установок на балансі кожного виду відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) підвищить її безпеку та дозволить приєднатись до системи ENTSO-E.
2. Для юридичних осіб - це відкриває можливість альтернативного продажу електричної енергії, а також збільшення їх автономного використання електроенергії.
3. Для фізичних осіб - це дає можливість споживання електроенергії без використання державних та компаній-монополістів, тим самим не переплачуючи за електроенергію.

**Методологія і методи дослідження.** У процесі вирішення поставлених завдань у роботі були проведені узагальнення та аналіз науково-технічної літератури, використано методи математичного аналізу та імітаційного моделювання у програмних пакетах Matlab / Simulink, а також методи обробки статистичних даних та теоретичних та експериментальних досліджень.

## ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

У роботі було успішно вирішено важливу наукову задачу, яка полягала у розробці моделей та засобів для забезпечення стабільності частоти і потужності в усталених режимах енергосистем, що включають потужні вітрові та сонячні електростанції. Отримані наступні результати:

1. Розроблена та досліджена узагальнена математична модель процесів регулювання частоти і потужності в енергосистемах з великими обсягами вітрових та сонячних електростанцій. Ця модель містить формалізацію всіх важливих елементів і показників регулювання, забезпечуючи високий рівень точності та адекватності.

2. Встановлено, що для забезпечення стабільності енергосистеми потужність активних балансувальних установок (АБ) повинна бути не меншою за сумарну потужність вітрових та сонячних електростанцій, якщо регулювання здійснюється виключно за допомогою акумуляторних батарей.

3. Досліджено оптимальне використання активних балансувальних установок та гідроелектростанцій для забезпечення стабільності частоти в енергосистемах з великими обсягами вітрових та сонячних електростанцій.

Отримані результати дозволять удосконалити структуру та роботу енергосистеми України, сприяючи обґрунтованому збільшенню потужностей відновлюваних джерел енергії.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сонячна енергетика [Електронний ресурс]: Режим доступу до ресурсу: [https://pidruchniki.com/1579122737970/ekologiya/sonyachna\\_energetika](https://pidruchniki.com/1579122737970/ekologiya/sonyachna_energetika).
2. Енергозбереження в Україні [Електронний ресурс]: Монографія / Д. В. Зеркалов. – Електрон. дані – Режим доступу до ресурсу: <http://zerkalov.org/files/ezu-mz.pdf#4>
3. Особливості гелевих акумуляторів [Електронний ресурс]: Режим доступу до ресурсу: <https://kgrant.ru/uk/how-to-fill-the-gel-battery-how-to-properly-charge-the-gel-battery/>.
4. Типи сонячних електростанцій [Електронний ресурс]: Режим доступу до ресурсу: <http://nek-npo.ru/novaya-energetika/solnechnaya-energetika/tipy-solnechnyhelektrostantsii> – Загол. з титул екрану.
5. Автоматика і автоматизація технологічних процесів: підручник / Т. Б. Головка, К. Г. Рего, Ю. О. Скрипник.– К. : Либідь, 1997.– 232 с
6. Електронний ресурс: URL: <https://www.entsoe.eu/theassociation/members/>
7. Р. Титко Відновлювальні Джерела Енергії (досвід Польщі для України) : навч. посібник / Р. Титко, В. М. Калініченко. – Варшава : OWG, 2010. – 530 с
8. Математичне моделювання електроенергетичних систем в ринкових умовах: монографія / С. Є. Саух, А. В. Борисенко. — К.: «Три К», 2020. — 340 с.
9. Перхач В.С. Математичні задачі енергетики. –Львів.: Вища школа. Вид.при Львівському університеті, 1989.-232 с.
10. Кириленко О.В. Математичне моделювання в електроенергетиці: Підручник/ О.В.Кириленко,М.С.Сегеда, О.Ф.Буткевич. Львів: Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2010.-608 с
11. Бурбело М.Й. Математичні задачі енергетики. Математичне моделювання електропостачальних систем: навч посібник/ М.Й.Бурбело . - Вінниця: ВНТУ,2016.-185с



12. Коваль В. П. Енергетична ефективність систем позиціонування плоских сонячних панелей / В. П. Коваль, Р. Р. Івасенчко, К. М. Козак // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2015. – № 3. – С. 2-10  
Дрьомін І.В. Узагальнені моделі та засоби з підвищення ефективності автоматичного регулювання частоти і потужності в об'єднаних енергосистемах: автореф. дис. канд. техн. наук за спеціальністю 05.14.01 – Енергетичні системи та комплекси. К.: Інститут загальної енергетики НАН України, 2011.

13. Кулик М.М., Згуровець О.В. Особливості використання гідроелектростанцій та акумуляторних батарей для стабілізації частоти в енергосистемах. Энерготехнологии и ресурсосбережение. 2018. № 3. с. 3—11.

14. 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. Відроджена енергетика. 2018. № 3(54). с. 6—14.

15. 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 (Міжнародні бази наукометричних даних Google Scholar, Index Copernicus International).

16. Никитин А.А., Олефир Д.А., Франчик Е.Н. Особенности развития балансирующего рынка и рынка вспомогательных услуг в ОЭС Украины. Электропанорама. 2010. № 4.

17. Павлов Г.М., Меркурьев Г.В. Автоматика энергосистем. 2001

18. Сидоров А.Ф., Воевода А.И., Денисевич К.Б. О необходимом количестве энергоблоков для регулирования частоты и мощности и их размещения по электростанциям Украины. Энергетика и Электрификация. 2000. № 5 с. 32—36

19. Жидецький В.Ц. Основи охорони праці. Підручник/ В.Ц.Жидецький, В.С Джигирей, О.В.Мельников. – Вид. 5-те, доповнене. – Львів: Афіша, 2000. – 350 с.

20. Стеблюк М.І. Цивільна оборона та цивільний захист: Підручник. – 2-ге вид., перероб. Затверджено МОН / М.І. Стеблюк.– К., 2010. – 487 с.
21. СОУ-Н ЕЕ 04.157:2009. Методики і рекомендації щодо організації первинного та вторинного регулювання частоти та потужності на енергоблоках ТЕС (ТЕЦ). К.: Мінпаливенерго України, 2009. 56 с.
22. СОУ-Н ЕЕ 04.158:2009. Методики і рекомендації щодо організації первинного та вторинного регулювання частоти та потужності на ГЕС. К.: Мінпаливенерго України, 2009. 46 с.
23. СОУ-Н ЕЕ 04.159:2009. Методики і рекомендації щодо організації первинного та вторинного регулювання частоти та потужності на енергоблоках АЕС. К.: Мінпаливенерго України, 2009. 39 с.
24. СОУ-Н ЕЕ ЯЕК 04.156:2009. Вимоги до регулювання частоти і потужності в ОЕС України. К.: Мінпаливенерго України, 2009. 54 с.