

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

ДИПЛОМНА РОБОТА
на тему:
**ДОСЛІДЖЕННЯ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ
ЕФЕКТИВНОСТІ МІНІ-ГІДРОАКУМУЛЮЮЧОЇ
ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ**

Виконав:

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

_____ **Олександр ШКЛЯРУК**

Керівник: канд. техн. наук, доцент

_____ **Олександр ОЛЕНЮК**

Оцінка захисту:

Національна шкала _____

Кількість балів _____ Шкала ECTS _____

Допускається до захисту:

«_____» _____ 2024 р.

Керівник проектної групи
(гарант освітньої програми)

«Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

кандидат технічних наук, доцент _____ **Павло ПОТАПСЬКИЙ**

м. Кам'янець-Подільський, 2024р.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ	5
РЕФЕРАТ	6
ВСТУП.....	9
1. СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ У ВИКОРИСТАННІ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ЕНЕРГОСИСТЕМ	11
1.1. Аналіз економічно доцільних накопичувачів енергії в умовах сучасного технологічного розвитку	11
1.2. Гідроакумулюючі електростанції	12
1.3. Історія розвитку гідроакумулюючих електростанцій.....	16
1.4. Сучасний стан ГАЕС малої потужності.....	17
1.5. Порівняння систем акумуляції.....	19
Висновки до першого розділу.....	20
2. АНАЛІЗ ТА ОЦІНКА ПАРАМЕТРІВ МІНІ-ГІДРОАКУМУЛЮВАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ.....	22
2.1. Ефективність згладжування навантаження при використанні ГАЕС ..	25
2.2. Будова міні-ГАЕС	27
2.3. Гідротурбіни	31
2.4. Конструкційні особливості міні-ГАЕС з розрахунком параметрів.....	37
Висновки до другого розділу	41
3. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ГІДРОАКУМУЛЮЮЧОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ.....	42
3.1. Оцінка ефективності роботи гідроакумулюючої електростанції	42
3.2. Перспективні схемні рішення для модульних міні-ГАЕС в умовах України.....	52
3.3. Особливості вибору та розрахунку гідроагрегатів для модулів міні- ГАЕС.....	58
Висновки до третього розділу.....	63

4. ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРСПЕКТИВНИХ НАПРЯМІВ УДОСКОНАЛЕННЯ МІНІ-ГАЕС ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ.....	64
4.1. Ефект Магнуса та його застосування у турбінах	64
4.2. Вінглети як засіб підвищення ефективності турбін.....	67
4.3. Розділові ребра для гідротурбін.....	69
4.4. Використання біоміметики та автоматизованого профілювання в гідротурбінах	72
Висновки до четвертого розділу	74
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	76
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	78
ДОДАТКИ.....	81

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

СКОРОЧЕННЯ

ГАЕС – Гідроакумулююча електростанція.

міні-ГАЕС – Міні-гідроакумулююча електростанція.

ККД – Коефіцієнт корисної дії.

ЕС – Енергосистема.

ТіВДЕ – Традиційні і відновлювані джерела енергії.

ПТ – Потужність турбіни.

РГС – Резервуар гідротехнічний сталевий.

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

$P_{\min}$, $P_{\max}$ – Мінімальна та максимальна потужність.

W – Спожита електроенергія.

ΔW – Втрати енергії.

$T_{\max}$ – Час використання максимального навантаження.

ТЕРМІНИ

Вінглети – Кінцеві елементи конструкції лопаток для зменшення індуктивного опору.

Ефект Магнуса – Явище утворення вихрових потоків навколо обертових об'єктів.

Кавітаційна ерозія – Руйнування матеріалу під впливом кавітуючого потоку.

Розділові ребра – Елементи для покращення гідродинамічних характеристик турбін.

РЕФЕРАТ

Структура і обсяг роботи. Магістерська робота на тему: «Дослідження шляхів підвищення ефективності міні-гідроакumuлюючої електростанції» складається з 77 сторінок, 28 рисунків, 5 таблиць, а також містить 27 джерел у списку використаної літератури.

Актуальність теми.

Сучасний енергетичний сектор стикається з низкою викликів, серед яких ключовими є забезпечення стабільності енергосистем в умовах збільшення частки відновлюваних джерел енергії та зростання нерівномірності навантажень. Вітрові та сонячні електростанції, хоч і мають значний потенціал, характеризуються залежністю від погодних умов, що ускладнює їх інтеграцію до існуючих енергосистем. Вирішення цієї проблеми можливе шляхом впровадження ефективних технологій накопичення енергії. Міні-гідроакumuлюючі електростанції є одним із найбільш перспективних рішень, оскільки вони здатні забезпечити згладжування графіка навантажень, зменшення втрат енергії та підвищення надійності енергопостачання.

Розвиток міні-ГАЕС особливо актуальний для України, де гостро стоять питання енергетичної незалежності та екологічної безпеки. Ці станції мають перевагу над великими ГАЕС завдяки меншим інвестиційним витратам, можливості інтеграції у складні географічні умови та мінімальному впливу на довкілля. Водночас технології міні-ГАЕС потребують удосконалення, спрямованого на підвищення ефективності, зменшення енергетичних втрат і адаптацію до сучасних викликів. Тому дослідження у цій сфері є надзвичайно важливими для забезпечення стійкого розвитку енергетики, особливо в умовах збільшення ролі відновлюваних джерел енергії.

Метою магістерської роботи є дослідження шляхів підвищення ефективності міні-гідроакumuлюючих електростанцій шляхом оптимізації їх технічних параметрів та впровадження інноваційних рішень для забезпечення стабільної роботи енергосистем.

Завдання дослідження.

Для досягнення зазначеної мети були вирішені наступні завдання:

1. Провести аналіз сучасних тенденцій використання міні-гідроакумулюючих електростанцій у світовій та вітчизняній енергетиці.
2. Оцінити конструктивні та експлуатаційні параметри міні-ГАЕС, які впливають на їхню ефективність.
3. Дослідити технічні рішення, спрямовані на зменшення енергетичних втрат та підвищення коефіцієнта корисної дії міні-ГАЕС.
4. Виконати розрахунок оптимальних параметрів міні-ГАЕС, зокрема висоти напору та об'єму резервуарів, для підвищення продуктивності.
5. Розробити рекомендації щодо використання інноваційних технологій, таких як вінглети, розділові ребра та адаптація ефекту Магнуса для гідротурбін.
6. Розробити практичні рекомендації для модернізації існуючих міні-ГАЕС та проектування нових установок.

Об'єкт дослідження. Міні-гідроакумулюючі електростанції як елемент системи накопичення енергії для забезпечення стабільності роботи енергосистем.

Предмет дослідження. Технічні рішення та параметри, що впливають на ефективність роботи міні-гідроакумулюючих електростанцій, а також методи їх оптимізації для підвищення продуктивності та зменшення втрат енергії.

Методи дослідження.

Для досягнення поставленої мети в роботі використовувалися аналітичні, експериментальні та розрахункові методи дослідження. Аналітичний метод застосовувався для вивчення сучасних тенденцій та існуючих технічних рішень у галузі міні-гідроакумулюючих електростанцій. Експериментальний підхід включав моделювання робочих процесів у міні-ГАЕС та оцінку ефективності впровадження інноваційних конструктивних елементів, таких як вінглети та розділові ребра. Розрахунковий метод

використовувався для оптимізації параметрів станції, зокрема висоти напору, об'єму резервуарів і характеристик гідротурбін, з метою підвищення їхньої ефективності та зниження втрат енергії.

Наукова новизна дослідження полягає у розробці та обґрунтуванні інноваційних технічних рішень для підвищення ефективності міні-гідроакумуючих електростанцій, зокрема впровадженні вінглетів, розділових ребер та використанні ефекту Магнуса в конструкції гідротурбін. Вперше запропоновано системний підхід до оптимізації параметрів міні-ГАЕС, що враховує взаємозв'язок між висотою напору, об'ємом резервуарів та втратами енергії на різних етапах роботи. Результати дослідження розширюють можливості адаптації міні-ГАЕС до сучасних умов енергосистем з нерівномірними навантаженнями та високою часткою відновлюваних джерел енергії.

Апробація результатів Матеріали роботи апробовані опублікуванням статті у збірнику наукових праць Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів та молодих науковців та на засіданні кафедри під час попереднього захисту дипломної роботи.

Програмне забезпечення. Для виконання моделювання магістерської роботи використовувалось програмне забезпечення: MATLAB, MathCAD, ANSYS CFX.

Ключові слова: ГІДРОАКУМУЮЮЧА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, ВІДНОВЛЮВАНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ, ГІДРОТУРБИНА, ВІНГЛЕТИ.

ВСТУП

Розвиток сучасної енергетики неможливий без вирішення проблем накопичення та раціонального використання енергії. Зі зростанням попиту на електроенергію, особливо в умовах активного впровадження відновлюваних джерел енергії, виникає необхідність у технологіях, здатних забезпечувати стабільність енергосистеми. Гідроакумуючі електростанції відіграють ключову роль у цьому процесі, оскільки вони дозволяють акумулювати надлишкову енергію в періоди низького споживання і використовувати її для покриття пікових навантажень.

У сучасних умовах великі ГАЕС мають значний вплив на екологію і потребують великих інвестицій для створення відповідної інфраструктури. Альтернативою є міні-гідроакумуючі електростанції, які завдяки своїм компактним розмірам та меншим вимогам до ресурсів можуть бути інтегровані навіть у регіони з обмеженими природними або економічними можливостями. Такі станції знижують навантаження на основну енергосистему, дозволяючи забезпечувати локальне вирівнювання графіка споживання електроенергії.

Однак міні-ГАЕС мають свої особливості та обмеження, які впливають на їхню ефективність. Наприклад, менший напір води і компактніші резервуари призводять до зниження коефіцієнта корисної дії в порівнянні з великими аналогами. Крім того, виникає потреба у використанні спеціальних конструктивних рішень для забезпечення стабільної роботи таких станцій. Це ставить перед інженерами завдання розробки нових технологічних підходів, які дозволять підвищити ефективність міні-ГАЕС та адаптувати їх до сучасних викликів.

Технічні рішення, спрямовані на вдосконалення міні-ГАЕС, охоплюють широкий спектр аспектів: від покращення конструкції гідротурбін і насосів до оптимізації розміщення резервуарів. Використання новітніх матеріалів і підходів, таких як ефект Магнуса, вінглети чи розділові ребра, може значно

зменшити втрати енергії і підвищити надійність роботи установок. Крім того, впровадження автоматизованих систем управління сприяє більш гнучкому використанню цих станцій у складі енергосистем різного рівня.

У роботі розглянуто різні аспекти підвищення ефективності міні-гідроакумуючих електростанцій. Проведено аналіз сучасного стану та можливостей впровадження перспективних технічних рішень, що сприятиме розвитку цієї технології. Вивчення шляхів оптимізації роботи міні-ГАЕС є важливим кроком до більш сталого та енергоефективного майбутнього.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Результати виконаного дослідження підтвердили важливість розвитку міні-гідроакumuлюючих електростанцій (міні-ГАЕС) як ефективного інструменту для забезпечення стабільності сучасних енергосистем. У ході роботи було детально проаналізовано ключові аспекти функціонування та оптимізації міні-ГАЕС, що дозволило запропонувати практичні рекомендації для їхнього вдосконалення.

Однією з основних переваг міні-ГАЕС є їхня здатність вирівнювати графіки навантаження в енергосистемах, що особливо важливо за умов інтеграції відновлюваних джерел енергії. На основі аналізу сучасних тенденцій та характеристик подібних станцій було виявлено, що основними проблемами є низький коефіцієнт корисної дії, значні втрати енергії на різних етапах роботи та недостатня адаптивність до змінних режимів навантаження. Для вирішення цих проблем у роботі запропоновано низку технічних і конструктивних рішень.

Проведений аналіз роботи існуючих міні-ГАЕС дозволив ідентифікувати ключові фактори, які впливають на їхню ефективність. Це, зокрема, висота напору, об'єм резервуарів, параметри гідротурбін і насосів, а також втрати енергії під час закачування та розрядки. У роботі запропоновано оптимізувати ці параметри шляхом використання сучасних матеріалів для резервуарів, впровадження інноваційних конструкцій гідротурбін, зокрема, із застосуванням вінглетів та розділових ребер.

Особливу увагу було приділено перспективним технологіям, таким як ефект Магнуса, що дозволяє суттєво підвищити коефіцієнт використання енергії потоку. Аналіз показав, що адаптація цієї технології для міні-ГАЕС може забезпечити зменшення втрат і підвищення продуктивності без значного збільшення вартості обладнання. Також перспективними виявилися використання вінглетів для зниження індуктивного опору та розділових ребер

для мінімізації кавітаційної ерозії. Ці рішення можуть бути інтегровані як у нові, так і в модернізовані системи.

Розрахунки показали, що підвищення висоти верхнього резервуара та оптимізація об'єму дозволяють значно зменшити витрати енергії на закачування води і збільшити кількість виробленої енергії під час розрядки. Використання модульного підходу до побудови міні-ГАЕС сприяє підвищенню гнучкості системи, спрощує її управління і дозволяє адаптувати станцію до конкретних умов експлуатації.

У роботі також розглянуто аспекти економічної доцільності впровадження міні-ГАЕС в умовах України. Показано, що найбільш перспективними є системи, інтегровані з відновлюваними джерелами енергії, такими як сонячні та вітрові електростанції. Використання існуючої інфраструктури, наприклад, водонапірних веж або затоплених шахт, дозволяє суттєво зменшити витрати на будівництво. Крім того, це сприяє зменшенню екологічного навантаження на регіони.

Практичне значення результатів дослідження полягає в можливості впровадження розроблених рекомендацій для підвищення ефективності існуючих міні-ГАЕС і проектування нових станцій. Запропоновані технічні рішення забезпечують не лише підвищення енергоефективності, а й зменшення експлуатаційних витрат і збільшення терміну служби обладнання.

У підсумку, проведене дослідження дозволяє стверджувати, що впровадження інноваційних технологій і рішень у проектування та експлуатацію міні-гідроакумуючих електростанцій є необхідною умовою для подальшого розвитку енергетичного сектору. Це не лише сприятиме підвищенню енергетичної безпеки країни, а й забезпечить більш екологічно чистий та економічно вигідний підхід до використання ресурсів.

Засвідчую, що у цій кваліфікаційній роботі (дипломній роботі) немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Здобувач вищої освіти _____ Олександр ШКЛЯРУК

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Методичні рекомендації щодо виконання та оформлення кваліфікаційної роботи магістра / Т.Д. Гуцол та інші / За загал. ред. Л. М. Михайлової. Кам'янець-Подільський : ЗВО «ПДУ», 2022. 30 с.
2. Бондаренко І. О. Гідроакумуючі електростанції в сучасних енергосистемах України. Львів: Політехніка, 2021. 250 с.
3. Левченко С. І., Кравченко Т. В. Інноваційні технології акумуляції енергії. Харків: ХНЕУ, 2020. 280 с.
4. Dunn B., Kamath H., Tarascon J. M. Electrical Energy Storage for the Grid: A Battery of Choices. *Science*, 334(6058), 2011, pp. 928–935.
5. Гуменюк А. В., Яворський П. В. Моделювання систем накопичення енергії в енергетиці. Вінниця: Універсум, 2022. 180 с.
6. Zakeri B., Syri S. Electrical Energy Storage Systems: A Comparative Study on Their Applications and Technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 2015, pp. 569–596.
7. Бутенко А. В., Чорний Ю. С. Накопичувачі енергії: аналіз ефективності. Київ : Наукова думка, 2023. 320 с.
8. Романчук О. Л. Відновлювана енергетика: інтеграція та акумуляція. Одеса: Чорноморська друкарня, 2022. 200 с.
9. Технології міні-гідроелектростанцій: аналітичний огляд. / Л. І. Буркат та ін. Київ : Академперіодика, 2021. 240 с.
10. Васильченко М. П. Сучасні гідроакумуючі системи малої потужності. Львів: Техніка, 2020. 280 с.
11. Barbour E. A Review of Pumped Hydro Energy Storage Development in Significant International Markets. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 61, 2016, pp. 421–432.
12. Кравець О. В. Особливості роботи міні-ГАЕС в локальних енергосистемах. Харків: ХНЕУ, 2019. 320 с.

13. Тонюк М. О. Застосування комплексних сонячних установок для енергозабезпечення підприємств агропромислового комплексу України. *Збалансоване природокористування*, 2020, № 3, с. 50–55.
14. Дмитренко І. А., Романенко, В. О. Гідроакумуляція для побутового та промислового використання. Київ: Техніка, 2022. 200 с.
15. Кравченко В. О. Енергетичний потенціал міні-ГАЕС в Україні: особливості розрахунку та впровадження. Київ: Наукова думка, 2022. 260 с.
16. Гуменюк І. В., Лисенко, О. М. Вплив добових графіків навантаження на параметри міні-гідроакумулявальних станцій. *Енергетика та екологія*, 2020, № 3, с. 45–55.
17. Zhang X., Jiang L. Optimization of energy storage for renewable energy systems. *Renewable Energy*, 140, 2019, pp. 563–572.
18. Сидоренко Н. Г. Розрахункові параметри гідротурбін для міні-ГАЕС. Харків: ХНЕУ, 2021. 220 с.
19. Дмитрук С. І., Кучер, А. М. Використання існуючої інфраструктури шахт для розташування міні-ГАЕС. *Сучасна енергетика*, 2019, № 2, с. 35–42.
20. Савчук О. П., та Задорожний, С. І. Оптимізація модульної структури міні-ГАЕС для умов України. *Енергетика України*, 2023, № 1, с. 50–65.
21. Magnus Effect in Modern Hydropower Applications: A Review. / Li Y. et al. *Journal of Fluid Mechanics*, 835, 2021, pp. 123–136.
22. Кравченко О. П. Вдосконалення гідротурбін для міні-ГАЕС на основі інноваційних технологій. Київ: Наукова думка, 2023. 230 с.
23. Дмитрук І. С., та Лисенко, О. І. Використання біоміметичних підходів у гідроенергетиці України. *Сучасна енергетика*, 2022, № 4, с. 40–50.
24. Advanced applications of winglets in renewable energy systems. / Kougias I. et al. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 95, 2019, pp. 300–315.
25. Сидоренко Н. М., Гуменюк А. В. Оптимізація параметрів гідротурбін для міні-ГАЕС за допомогою симуляційних методів. *Енергетика та технології*, 2021, № 3, с. 55–65.

26. Задорожний С. О. Інноваційні рішення в конструкціях гідроагрегатів для міні-ГАЕС. *Енергетика України*, 2023, № 1, с. 45–60.

27. Петренко М. С., Соколенко, Т. В. Впровадження автоматизованого профілювання у гідроенергетиці. *Науковий вісник України*, 2022, № 5, с. 30–40.