

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ЕНЕРГЕТИКИ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

другого (магістерського) рівня освіти

на тему: **«ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ГІДРОЕНЕРГІЇ ГІРСЬКИХ РІЧОК ДЛЯ ЕЛЕКТРОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СПОЖИВАЧІВ»**

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело _____ В. М. Візний

Виконав: студент групи Ен-61

Спеціальності 141 – «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
(шифр і назва)

Візний Володимир Михайлович
(Прізвище та ініціали)

Керівник: Бабич Михайло Іванович
(Прізвище та ініціали)

Рецензент Луб Павло Миронович
(Прізвище та ініціали)

Дубляни 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА
ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ЕНЕРГЕТИКИ

Рівень вищої освіти – другий «магістерський» рівень.

Спеціальність: 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Завідувач кафедри _____

доцент, к. т. н. С. В. Сиротюк

“ ____ ” _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу студенту

Візному Володимиру Михайловичу _____.

1. Тема роботи: «Підвищення ефективності використання гідроенергії гірських річок для електрозабезпечення споживачів»

Керівник роботи: Бабич Михайло Іванович, кандидат технічних наук, доцент затверджені наказом по університету від 28 квітня 2023 року № 133/к-с.

2. Термін подання студентом роботи 30.12.2023 р.

3. Вихідні дані до роботи: *матеріали літературного огляду, патентного пошуку і аналізу існуючих типів гідроелектростанцій та схем електрозабезпечення, довідкова та спеціальна література, аналіз останніх досягнень науки і техніки в галузі енергозабезпечення за рахунок потенціалу малої гідроенергетики.*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити)

Вступ

1. Аналіз стану питання в теорії та практиці

2. Обґрунтування системи електрозабезпечення автономного об'єкта за рахунок використання гідроенергії гірської річки

3. Методика обґрунтування параметрів мікрогідроелектростанції на гірській річці

4. Охорона праці та безпеки у надзвичайних ситуаціях

5. Техніко-економічне обґрунтування розробок кваліфікаційної роботи

Висновки

Перелік джерел посилання

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Графічний матеріал представлено у вигляді презентації.

6. Консультанти з розділів:

Розділ, №_	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
4	<i>Городецький І. М., доцент кафедри управління проектами та безпеки виробництва</i>	28.04.23р.	28.04.23р.

7. Дата видачі завдання

28 квітня 2023 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Написання першого розділу</i>	<i>28.04.23-27.05.23</i>	
2	<i>Виконання другого розділу</i>	<i>28.05.23-05.07.23</i>	
3	<i>Виконання третього розділу</i>	<i>06.07.23-15.08.23</i>	
5	<i>Написання розділу: «Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях»</i>	<i>16.08.23-10.09.23</i>	
6	<i>Розрахунок економічної ефективності розробок кваліфікаційної роботи</i>	<i>11.09.23-29.09.23</i>	
7	<i>Завершення оформлення розрахунково- пояснювальної записки та ілюстративної частини</i>	<i>30.09.23-26.10.23</i>	
8	<i>Завершення кваліфікаційної роботи в цілому</i>	<i>27.10.23-30.12.23</i>	

Студент _____ Візний В. М.
(підпис)Керівник роботи _____ Бабич М. І.
(підпис)

Кваліфікаційна робота: 52 ст. текстової частини, 4 табл., 27 рис., 29 найменувань бібліографічних джерел.

Підвищення ефективності використання гідроенергії гірських річок для електрозабезпечення споживачів. Візний Володимир Михайлович. Кваліфікаційна робота. Кафедра енергетики. Дубляни, Львівський НУП, 2024.

У кваліфікаційній роботі обґрунтовано електрозабезпечення автономної вівчарні за допомогою мікроГЕС на гірській річці Бронька.

Встановлено, що для ефективного виконання усіх процесів вівчарні необхідне джерело енергії встановленою потужністю від 7 кВт, а теоретична потужність у досліджуваному створі річки Бронька складає 11,77 кВт.

Обґрунтовано тип, схему керування з використанням баластного навантаження, структуру і характеристики мікроГЕС, зокрема обґрунтовано гідроагрегат у складі пропелерної турбіни Hydro-e KIDS TypeS і синхронного генератора PMG Windkraft-10. З врахуванням втрат, визначено встановлену потужність мікроГЕС, яка становить 7,27 кВт.

Розглянуто питання охорони праці та безпеки у надзвичайних ситуаціях.

Встановлено, що річний виробіток електричної енергії складатиме 58080 кВт·год/рік при собівартості 0,85 грн/кВт·год, а вкладені кошти в будівництво мікроГЕС окупляться за 6,7 років.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ В ТЕОРІЇ ТА ПРАКТИЦІ.....	8
1.1. Аналіз стану та перспектив відновлюваних джерел енергії.....	8
1.2. Аналіз автономних систем енергозабезпечення за рахунок відновлюваних джерел енергії.....	12
1.3. Обґрунтування теми, мети та об'єкту досліджень.....	16
2. ОБҐРУНТУВАННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОНОМНОГО ОБ'ЄКТА ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ ГІДРОЕНЕРГІЇ ГІРСЬКОЇ РІЧКИ.....	18
2.1. Аналіз автономного об'єкта електроспоживання.....	18
2.2. Обґрунтування структури і типу мікроГЕС для електрозабезпечення вівчарні.....	21
2.3. Визначення гідроенергетичного потенціалу досліджуваної річки.....	24
3. МЕТОДИКА ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ МІКРО ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ НА ГІРСЬКІЙ РІЧЦІ.....	28
3.1. Розрахунок параметрів гідроагрегату мікроГЕС	28
3.1.1 Вибір і розрахунок параметрів гідротурбіни.....	28
3.1.2 Підбір гідрогенератора та обґрунтування способу передачі потужності від гідротурбіни до генератора.....	32
3.2 Обґрунтування способу передачі електроенергії від мікроГЕС до вівчарні.....	34
3.3 Компонування гідротехнічних споруд мікроГЕС.....	36
3.4 Схема керування мікроГЕС за допомогою баластного навантаження.....	38
4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	41
4.1 Структурно-функціональний аналіз процесу виробництва електричної енергії на гідроелектростанціях та розроблення моделі травмонебезпечних та аварійних ситуацій.....	41

4.2 Вимоги безпеки під час експлуатації гідроелектростанції.....	42
4.3. Безпека в надзвичайних ситуаціях.....	45
5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РОЗРОБОК	
КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ.....	46
ВИСНОВКИ	49
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	50

ВСТУП

На сьогоднішній день відновлювана енергетика є напрямком в енергетиці що розвивається найшвидшими темпами. Загалом відновлювану енергетику можна охарактеризувати як галузь господарства, науки і техніки, що охоплює виробництво, передачу, перетворення, накопичення та споживання електричної, теплової та механічної енергії, що отримується за рахунок використання поновлюваних джерел енергії. Широке використання цих джерел енергії відповідає вищим пріоритетам і завданням енергетичної безпеки будь якої країни. Крім того, включення системи відновлюваних джерел електроенергії в систему енергетичного балансу забезпечить найбільш надійне та стійке постачання енергії та може стати найвигіднішим способом зменшення нашої залежності від викопного палива [8].

Енергія відновлюваних джерел в звичайних умовах виявляється дорожче, ніж традиційних, за винятком можливо гідроелектростанцій. Проте там, де відсутні традиційні джерела, зокрема гірські та передгірські регіони Карпат, де відсутнє енергозабезпечення, ситуація інша. Тому використання відновлюваних джерел енергії може виявитися вигідним, зокрема в цих регіонах, де для енергозабезпечення автономних споживачів невеликої потужності, в яких прокладання ліній електропередач або газопроводів обходиться занадто дорого [7].

З огляду на це, робота в якій розглядається питання електрозабезпечення споживачів за рахунок використання гідроенергії гірських річок є важливою і актуальною.

1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ В ТЕОРІЇ ТА ПРАКТИЦІ

1.1 Аналіз стану та перспектив відновлюваних джерел енергії

Війна в Україні та її наслідки для глобального енергопостачання та особливо ЄС, а також погіршення наслідків зміни клімату є основними питаннями, які є в порядку денному чи не кожного заходу за участі світових лідерів. Спостерігається нестабільність світових цін на енергоносії, занепокоєння щодо нестачі енергії взимку та рекордні посухи, які впливають на сільськогосподарське виробництво в той час, коли ціни на продовольство вже зростають [24].

Усі означені питання є пов'язаними між собою. Якби ми змогли замінити викопне паливо великою кількістю відновлюваних джерел енергії, ми знизили б ціни на енергоносії, скоротили викиди та зменшили майбутні ризики зміни клімату, зокрема вплив на виробництво продуктів харчування.

Викопне паливо, таке як нафта, газ і вугілля, виготовляється з розкладених рослинних і тваринних залишків, які трансформувалися в свої нинішні форми протягом мільйонів років у земній корі та її шарах. Викопне паливо містить хімічну енергію, яка виділяється разом із різними забруднювачами при спалюванні. У порівнянні з електроенергією, яку можна виробляти з відновлюваних джерел, таких як сонячна та вітрова енергія, але яку досить важко зберігати, викопне паливо легше зберігати та транспортувати до кінцевих споживачів. Енергетична інфраструктура та технології, розроблені з часів промислової революції, здебільшого базуються на використанні викопного палива.

В останні роки політика ЄС встановила амбітні цілі щодо прискорення переходу до сталої енергетики. І вони почали приносити свої плоди: зростаюча частка енергетичних потреб Європи задовольняється за рахунок відновлюваних джерел енергії [24].

У 2021 році більше 22% валової кінцевої енергії, спожитої в ЄС, надходило з відновлюваних джерел. Однак частка відновлюваних джерел енергії в енергетичному балансі суттєво відрізняється в ЄС: у Швеції вона становить близько 60%; у Данії, Естонії, Фінляндії та Латвії понад 40%; а в Бельгії, Угорщині, Ірландії, Люксембурзі, Мальті та Нідерландах від 10% до 15%. Зокрема у 2020 році на загальне виробництво електроенергії використано 36 % вітрової енергії, 33% гідроенергії, 14% сонячної енергії, 8% твердого біопалива та 8% інших відновлюваних джерел (рис 1.1) [24].

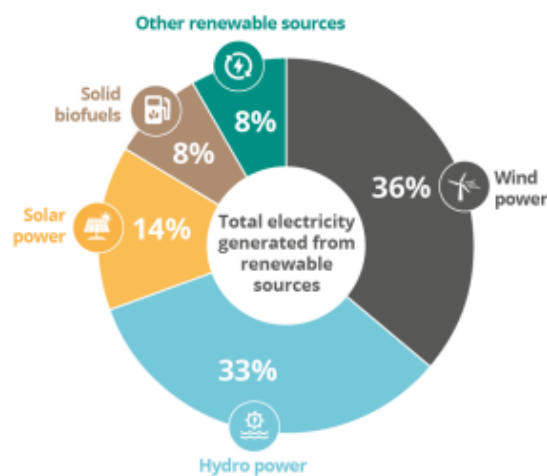


Рисунок 1 – Електроенергія отримана з відновлюваних джерел

Природні джерела, такі як сонце, вітер, припливи та геотермальна енергія, можуть створити набагато більше енергії, ніж зараз потрібно світові. Проте цей потенціал не відповідає тому, що ми можемо досягти зараз. Одним із завдань є створення достатньої потужності для захоплення енергії, наприклад, сонячного світла чи вітру, і її подальше перетворення. Ще одна проблема полягає в тому, щоб мати можливість транспортувати енергію туди, де вона потрібна, або зберігати її для подальшого використання.

Енергетична система майбутнього має бути стійкою та адаптуватися до неминучих наслідків зміни клімату – посухи, спека та шторми. Оскільки частка вітрової та сонячної енергії зростає, система також має бути гнучкою, щоб добре функціонувати, навіть коли не дме вітер або не світить сонце.

Гнучка система живлення може забезпечити стабільне постачання енергії та зменшити пікове споживання. Крім забезпечення різноманітності джерел енергії, систему можна вдосконалити, наприклад, шляхом покращення накопичення енергії, розумної інтеграції секторів опалення, транспорту та промисловості або вирішення піків попиту за допомогою динамічного ціноутворення або розумних мереж і приладів.

Багато останніх проектів у Європі починають демонструвати величезний потенціал відновлюваної енергії (рис. 2). У серпні 2022 року в Іспанії Iberdrola запустила найбільшу в Європі сонячну електростанцію з близько 1,5 мільйона сонячних панелей і потужністю 590 мегават, яка вироблятиме електроенергію, достатню для забезпечення понад 330 000 домогосподарств. 49 вітрових турбін у данській морській вітряній електростанції Horns Reef 3 мають загальну потужність 407 мегават і, за оцінками, задовольняють річне споживання електроенергії приблизно 425 000 домогосподарствами Данії [24].

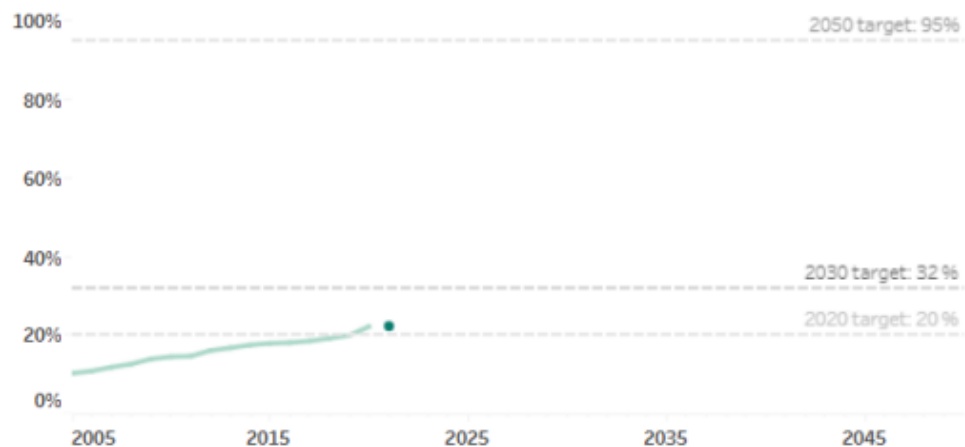


Рисунок 2 – Частка енергії ЄС з відновлюваних джерел

Португалія встановлює найбільший в Європі плавучий сонячний парк на водосховищі Алкева, що складається з 12 000 панелей. У квітні Греція урочисто відкрила сонячну електростанцію потужністю 204 МВт з двосторонніми панелями, які можуть збирати світло з обох сторін.

План REPowerEU щодо прискорення переходу на відновлювані джерела енергії та зменшення залежності від російського викопного палива

спрямований на стимулювання таких проєктів. Стратегія ЄС щодо сонячної енергії передбачає подвоїти потужність сонячної енергії до 2025 року, а Європейська ініціатива сонячних дахів запровадить зобов'язання встановлювати сонячні панелі на великих громадських і комерційних будівлях, а також поступово на нових житлових будинках. Також має пришвидшитися процес отримання дозволів на великі проєкти ВДЕ.

Щоб забезпечити надійне енергопостачання, сприяти використанню відновлюваних джерел енергії та зменшити витрати на передачу електроенергії, деякі регіони заохочують, наприклад, власників будинків або підприємства стати виробниками-споживачами — споживачами — виробляти електроенергію за допомогою сонячних панелей, споживаючи частку електроенергії, це та подача надлишкової потужності в мережу.

Багато постачальників електроенергії також почали заохочувати домогосподарства коригувати споживання енергії відповідно до рівня виробництва. Це можливо завдяки динамічному ціноутворенню, яке залежить від часу доби. У часи надлишкового виробництва споживачі можуть отримати майже безкоштовну електроенергію, яку можна використовувати, наприклад, для зарядки електромобілів.

Аналіз ЕЕА показав, що зростання використання відновлюваних джерел енергії зменшило багато глобальних навантажень на навколишнє середовище та клімат, і що цілеспрямовані дії можуть допомогти мінімізувати деякі несприятливі наслідки, такі як екотоксичність прісної води та зайнятість землі.

Збільшення постачання чистої електроенергії потребує зростання генераційних потужностей та коригування інфраструктури. Це означає більше сонячних панелей і більше вітрових турбін на стороні постачання, а також краще підключену інтелектуальну мережу та – що важливо – розумних користувачів, які приділяють увагу енергоефективності. Якби рішення ми не приймали, ми повинні враховувати ці міркування довгострокової стійкості.

1.2 Аналіз автономних систем енергозабезпечення за рахунок відновлюваних джерел енергії

Використання відновлюваних джерел енергії дозволяє комплексно вирішити проблеми які виникли в традиційній енергетиці, зокрема:

- знизити негативний вплив теплової енергетики на навколишнє середовище;
- забезпечити потреби в енергії визначеної частини населення, що проживає насамперед в сільській місцевості та районах, розташованих далеко від централізованих джерел енергозабезпечення;
- зниження використання органічного палива в низькопотенційних процесах і збереження його як сировини для хімічної промисловості.

На сьогодні відновлювані джерела необхідно розглядати не як альтернативу традиційним джерела енергії, а як додаткове джерело, яке крім основної своєї функції – енергозабезпечення, вирішує важливі екологічні та соціально-економічні завдання.

Загалом, у світі, до відновлюваних джерел відносять: вітрову, сонячну, геотермальну, гідравлічну енергію; енергію морських течій, хвиль, приливів, температурного градієнта морської води, низькотемпературного тепла Землі, повітря; біомасу тваринного, рослинного і побутового походження, водневу енергетику [16].

Розглянемо особливості енергозабезпечення автономних споживачів, зокрема особистих селянських господарств, за допомогою найпоширеніших відновлюваних джерел для умов досліджуваної місцевості, а саме вітрової, сонячної та гідроенергії.

На рисунку 3 представлено структурну схему автономної фотоелектричної системи, яка крім сонячних панелей, складається з контролера заряду/розряду та акумуляторної батареї. Також для забезпечення споживачів стандартною напругою 220/380 В змінного струму в системі має бути інвертор [16].

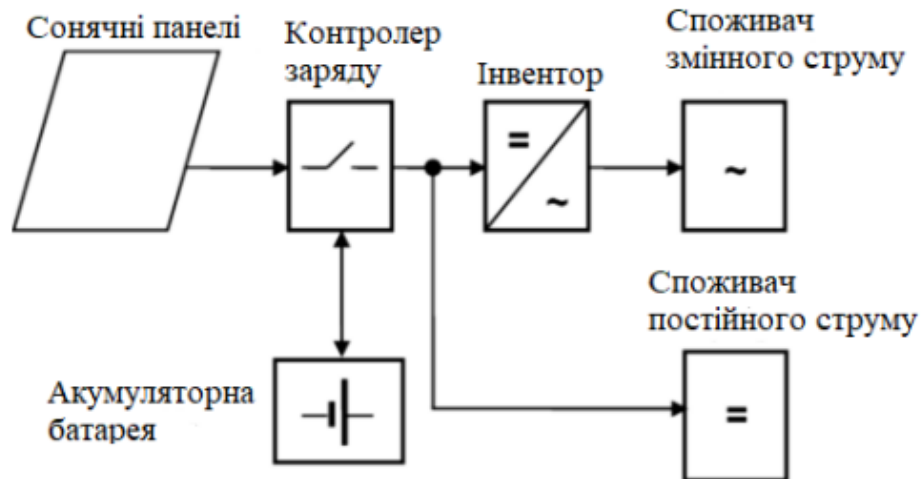


Рисунок 3 – Автономна фотоелектрична система енергозабезпечення

На параметри такої системи, зокрема їх кількість, потужність, впливає багато факторів, а саме: середньодобове споживання господарства, середньомісячні показники сонячної радіації, система орієнтації сонячних панелей, кількість несонячних днів у даній місцевості тощо. Оскільки дані системи можуть виробляти електроенергію лише у періоди доби коли світить сонце, їх встановлена потужність має обґрунтовуватись з врахуванням того, що запасу енергії за день має вистачати на гарантоване забезпечення споживачі протягом доби. Для цього необхідно значно збільшувати встановлену потужність такої системи та ємність акумуляторів.

Крім своїх переваг, як автономна фотоелектрична система для енергозабезпечення споживачів має певні і недоліки, а саме: високі початкові витрати, залежність продуктивності фотоелектричних установок від погоди, монтаж та обслуговування сонячних електростанцій вимагають залучення спеціалізованих компаній, для розміщення сонячних панелей потрібно багато простору з хорошим освітленням. Тому дану систему доцільно використовувати як резервне джерело енергозабезпечення.

Іншим поширеним відновлюваним джерелом є енергія вітру. На рисунку 3 подано структурну схему енергетичної системи з використанням енергії вітру [16].

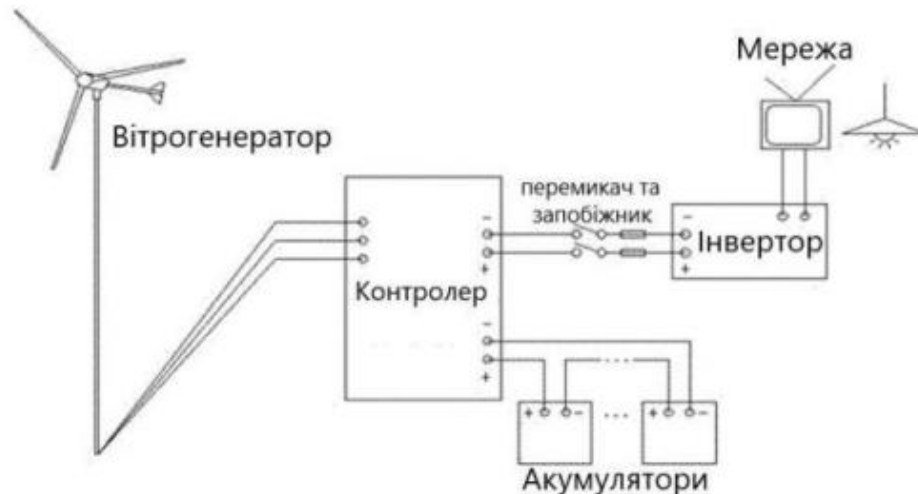


Рисунок 3 – Структурна схема енергетичної системи з використанням енергії вітру

Як бачимо з рисунку, така автономна система складається з вітрогенератора, контролера, інвертора, акумуляторних батарей, допоміжного обладнання. За рахунок обертання вітрового колеса з лопатями під дією вітру, від вітротурбіни крутний момент передається через систему передачі на вал генератора, який виробляє електричний струм.

Наведені приклади автономних систем енергозабезпечення з відновлюваних джерел ненадійні через залежність від кліматичних умов, зокрема сонячна електростанції не може забезпечити гарантоване виробництво в несонячні дні, а вітрова електростанція – в періоди коли немає вітру. Тому ці дві системи комбінують в гібридну, що є більш ефективним і популярним рішенням зараз у світі.

На рисунку 4 подано схему типової гібридної енергетичної системи з використанням енергії вітру та сонця. Система складається з вітрової і сонячної установок. Вироблена потужність установками має змінний струм, і змінну частоту і амплітуду, які потім можуть бути перетворені у постійний струм для зарядки акумуляторної батареї. Для захисту батареї від надмірної зарядки/розрядки є контролер, а інвертор перетворює постійний струм низької напруги в змінний з напругою 220 В і частотою 50 Гц [7].



Рисунок 4 – Структурна схема типової гібридної енергетичної системи з використанням енергії вітру та сонця

Надійнішим в плані сталого виробітку електричної енергії з відновлюваних джерел є використання гідроенергії, якщо звичайно в досліджуваній місцевості є річка. Собівартість виробленої електроенергії на гідроелектростанції є дешевшою в порівнянні з іншими відновлюваними джерелами. Початкові капіталовкладення є теж нижчими. На рисунку 5 наведено схему мікрогідроелектростанції (мікроГЕС потужністю до 100 кВт).

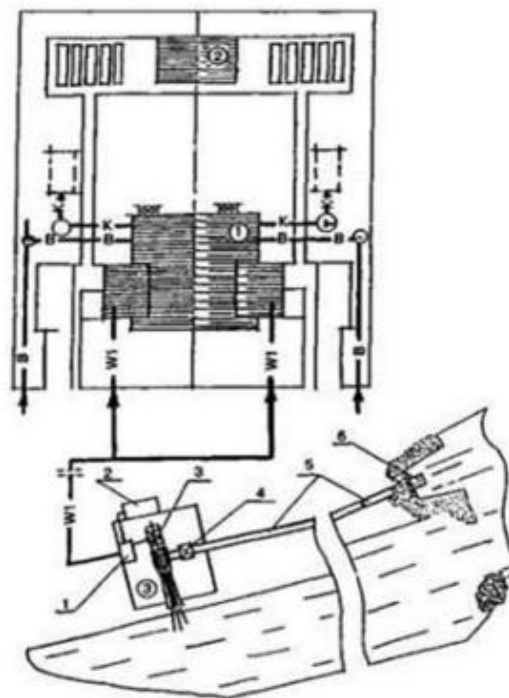


Рисунок 5 – План розташування мікро-ГЕС дериваційного типу: 1 – блок системи регулювання; 2 - пристрій баластного навантаження; 3 – гідроагрегат; 4 - запірна засувка; 5 - підвідний трубопровід; 6 - водозабірний пристрій. К – каналізаційна мережа; В – водопровідна мережа; W1 –

повітряна або кабельна лінія напругою до 1 кВ. (1) – житловий будинок; (2) – допоміжні приміщення; (3) - будівля мікро ГЕС

Відповідно до схеми, вода напірним трубопроводом потрапляє на гідротурбіну і обертає її, що призводить до обертання ротора генератора. Статорні обмотки генератора за допомогою блока регулювання підключають до електропостачання споживача. Блок регулювання призначений для узгодження режимів вироблення електричної енергії шляхом підключення баластного навантаження. За допомогою автоматичного вимикача здійснюють захист генератора від струмів короткого замикання та перевантаження [19].

Для систем електропостачання на базі мікроГЕС немає потреби в залученні резервного джерела, якщо вона стабільно працює протягом року. Також перевагою є можливість автоматизованої роботи мікроГЕС без обслуговуючого персоналу.

1.3 Обґрунтування теми, мети та об'єкту досліджень

Ефективне функціонування будь-якого господарства залежить від значної кількості різного роду енергії для виконання різноманітних процесів. Оскільки ціна на традиційні енергоресурси постійно зростає, ефектним є освоєння відновлюваних джерел регіону в якому розташоване господарство. Аналіз доступних відновлюваних джерел, зокрема енергії вітру, сонця та води, показав про ефективність використання гідроенергії, яку можна використовувати стабільно протягом року на відміну від інших джерел. З огляду на це, кваліфікаційна робота на тему «Підвищення ефективності використання гідроенергії гірських річок для електрозабезпечення споживачів» є актуальною і важливою.

Метою кваліфікаційної роботи є обґрунтування параметрів мікроГЕС для електрозабезпечення вівчарні.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

- здійснити аналіз стану та перспектив освоєння відновлюваних джерел енергії;
- проаналізувати доступні автономні системи енергозабезпечення за рахунок відновлюваних джерел енергії ;
- проаналізувати енергоспоживання вівчарні;
- визначити основні показники річки;
- обґрунтувати тип і структуру мікроГЕС та розрахувати основні її показники в умовах малої річки;
- обґрунтувати схему керування мікроГЕС з використанням баластного навантаження;
- обґрунтувати способі передачі електроенергії від мікроГЕС до вівчарні;
- розробити заходи щодо охорони праці та безпеки у надзвичайних ситуаціях;
- визначити економічну ефективність від розробок магістерської роботи.

Об'єкт дослідження – річка, мікро гідроелектростанція, процеси виробництва електроенергії на основі використання гідроенергії.

Предмет дослідження – є залежність функціональних показників мікро ГЕС від характеристик річки та енергопотреб споживача.

Методи дослідження. У роботі використані такі методи досліджень:

- аналізу і узагальнення сучасної науково-технічної літератури для формування вимог до систем виробництва електроенергії на річках;
- математичної статистики для визначення витрати води та напору досліджуваної річки;
- системного аналізу для обґрунтування параметрів мікроГЕС в умовах річки з врахування енергоспоживання вівчарні.

2 ОБҐРУНТУВАННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОНОМНОГО ОБ'ЄКТА ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ ГІДРОЕНЕРГІЇ ГІРСЬКОЇ РІЧКИ

2.1 Аналіз автономного об'єкта електроспоживання

У даному дослідженні об'єктом електрозабезпечення за рахунок гідроенергії гірської прийнято вівчарню, адже розвиток вівчарства безпосередньо пов'язаний з таким господарюванням, які віддалені від населених пунктів і розташовані в місцевості з відкритим трав'яним ареалом де відсутній доступ до централізованих мереж енергопостачання.

У Карпатського регіоні такі вівчарні переважно розташовані у передгірській місцевості, зокрема прийнята вівчарня розташовано біля річки та передбачає прогресивну технологію утримання овець до 100 голів з стійлово-пасовищною системою неспеціалізованого вівчарського господарства спільного утримання овець різних статевих-вікових груп в умовах баз-навісів, що передбачають ягніння маток при кошаро-базовому і роздільно-контактному способі вирощуванні ягнят (рис. 6). Технологія стійлово-пасовищної передбачає випасання овець у період квітня по листопад, та стаціонарне утримання у вівчарні з грудня по березень [16].

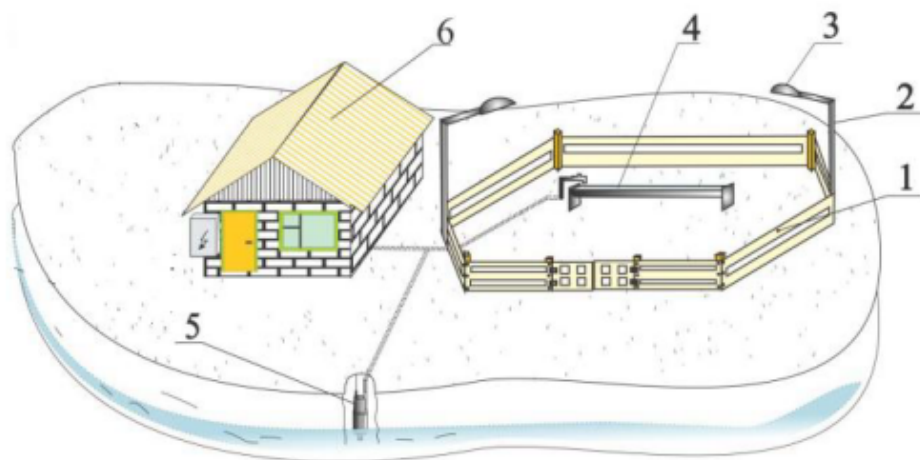


Рисунок 6 – Загальний вигляд стійлово-пасовищної системи утримання овець

Вівчарня облаштована відкритою базою 1 площею 200 м², має форму замкнутого кола з огорожею, яка освітлюється за допомогою світлодіодних світильників 3 розміщених на стійках 2. В середині є напувалка 4 до якої подає воду глибинний насос 5. Для здійснення технологічного процесу передбачена будівля 6, яка складається з приміщень для чергового персоналу, для зберігання концентрованих кормів та інвентарю, вигульно-кормового майданчику, приміщення для утримання баранів, маток, відгодівельного поголів'я, молодняку та ягнят.

Для напування тварин нами передбачено використання шахтного колодязя з використанням глибинного насоса. Але так як в денний період випасу вівці п'ють воду з річки, доцільно використовувати насос для підкачування води в цистерну.

Ефективна робота електроприладів вівчарні залежить від безперебійного електропостачання. Розрахунок максимальної споживаної потужності вівчарні визначається енергоспоживанням споживачів, їх кількістю, споживаною потужністю, тривалістю експлуатації (табл. 1).

Таблиця 1 – Характеристика електроспоживачів вівчарні

№ з/п	Споживачі	Споживана потужність, кВт	Кількість одиниць, шт	Час роботи на добу, год	Навантаження, кВт·год/добу
1	Глибинний насос	1	1	2	2
2	Лампи люмінесцентні	0,03	6	4	0,72
3	Лампи світлодіодні	0,04	8	4	1,28
4	Ноутбук/телефон	0,11	2	8	1,76
5	Водонагрівач	1,3	1	4	5,2
6	Проточний водонагрівач	1,5	1	4	6
7	Холодильник	0,2	1	6	1,2
8	Електрочайник	1	1	0,5	0,5
9	Мікрохвильова піч	0,9	1	0,4	0,36
10	Високочастотна стригальна машинка	0,1	1	1	0,1
	ВСЬОГО				$P_{\Sigma}=19,12$

Обсяг електричної енергії P_c , що використовується споживачем (електроприладом) визначимо з виразу, кВт·год

$$P_c = P_n \cdot t_e \cdot i_e, \quad (1)$$

де P_n – споживана потужність електроприладу, кВт; t_e – тривалість роботи приладу, год; i_e – кількість електроприладів, шт.

Кількість електроенергії споживана за добу $P_{\Sigma c}$ визначимо кВт·год/добу

$$P_{\Sigma c} = \sum_{i=1}^{n_m} P_n \cdot t_e \cdot i_e, \quad (2)$$

Використовуючи [26], побудовано добовий графік споживання електричної енергії у вівчарні (рис. 7).

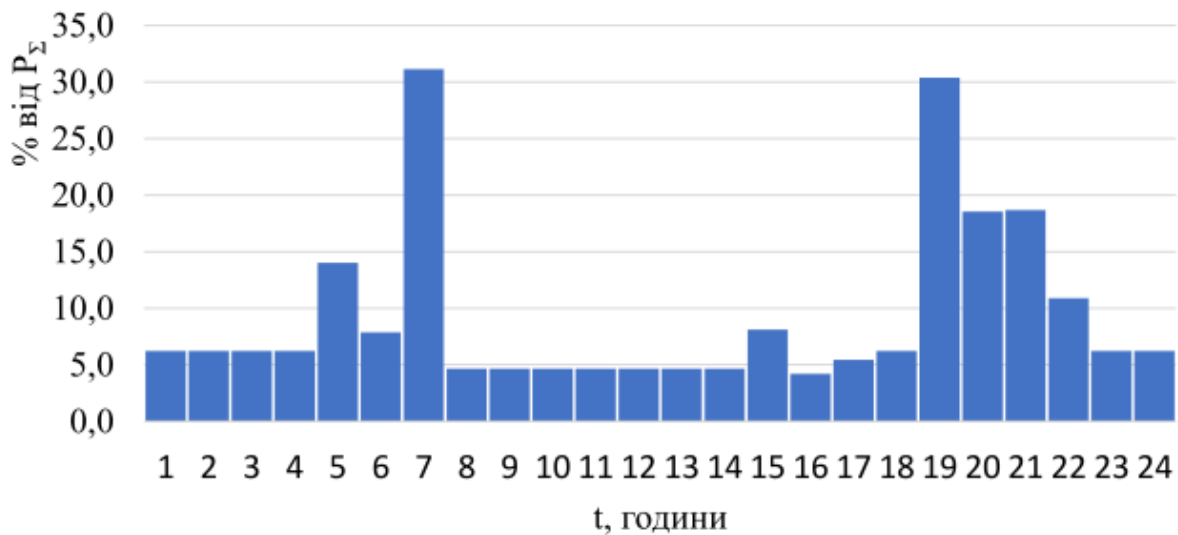


Рисунок 7 – Графік добового споживання електроенергії у вівчарні

Проектування електропостачання вівчарні розраховується на таку споживану потужність навантаження, за якої споживається максимум енергії. Як бачимо з графіка цей максимум є короткочасним і є дійсною споживаною потужністю. Максимальне навантаження P_{max} визначимо

$$P_{max} = P_{\Sigma c} \cdot k_o \cdot k_z, \quad (3)$$

де k_o – коефіцієнт одночасної роботи споживачів; k_z – коефіцієнт завантаження споживачів.

Коефіцієнти k_o і k_z залежать від режиму роботи, особливостей і числа споживачів. Для вівчарні кожен з коефіцієнтів можна приймати по 0,6 [26], і

підставивши значення у формулу (3) отримаємо $P_{\max}=6,88$ кВт, що є більшим за максимальне електроспоживання протягом доби, а саме з 7^{00} до 8^{00} $P_c=6,63$ кВт.

Отже, для електрозабезпечення споживачів, з врахуванням запасу потужності, потрібно обґрунтувати мікроГЕС, яка зможе задовольнити максимальне добове навантаження вівчарні рівне 7 кВт.

2.2 Обґрунтування структури і типу мікроГЕС для електрозабезпечення вівчарні

За результатами аналізу енергоспоживання вівчарні встановлено, що для задоволення її потреб в електроенергії необхідно обґрунтувати параметри автономної автоматизованої мікроГЕС (гідроелектростанції до 100 кВт згідно класифікації ООН). Відмінність між мікроГЕС і великими ГЕС полягає у встановленій потужності, а відповідно і у виробітку електроенергії.

Робота гідроелектростанції залежить від двох показників – напору і витрати води, які залежать від місцевості де буде її встановлено. Напір може створюватись штучно, за рахунок греблі, або за рахунок водовідведення русла спеціальним каналом (деривацією) (рис. 8) [29].

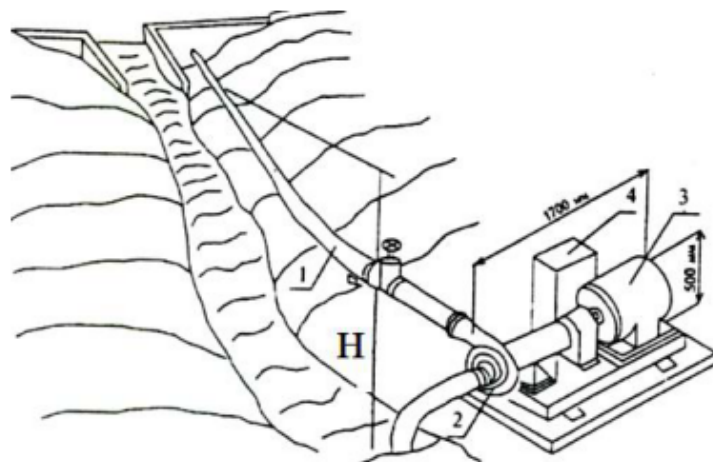


Рисунок 8 – Схема водовідведення мікроГЕС: Н – напір, 1 – напірний трубопровід, 2 – гідротурбіна, 3 – гідрогенератор, 4 – блок управління

Загалом, існує декілька видів основних мікроГЕС за створенням напору [15]:

а) *греблеві*, де напір створюється за допомогою греблі, а вода на турбіну подається турбінним трубопроводом;

б) *дериваційні*, застосовують природний ухил річки, де вода відводиться на турбіну напірним трубопроводом, а потім скидається в річку;

г) *греблево-дериваційні*, де напір створюється поєднанням греблі та відповідного напірного трубопроводу;

д) *вільнопоточні*, які реалізують кінетичну енергію потоку, з встановленням мікроГЕС безпосередньо в потоці рідини (актуальні для рівнинних глибинних річок).

Використання кожного з описаних видів мікроГЕС залежить від характеристик річки. Для Карпатського регіону, де розташовані типово гірські річки, які характеризуються значними ухилами та малими витратами води, актуальними є безплотинні мікроГЕС з використанням напірного водовідвідного трубопроводу (рис. 9) [21].

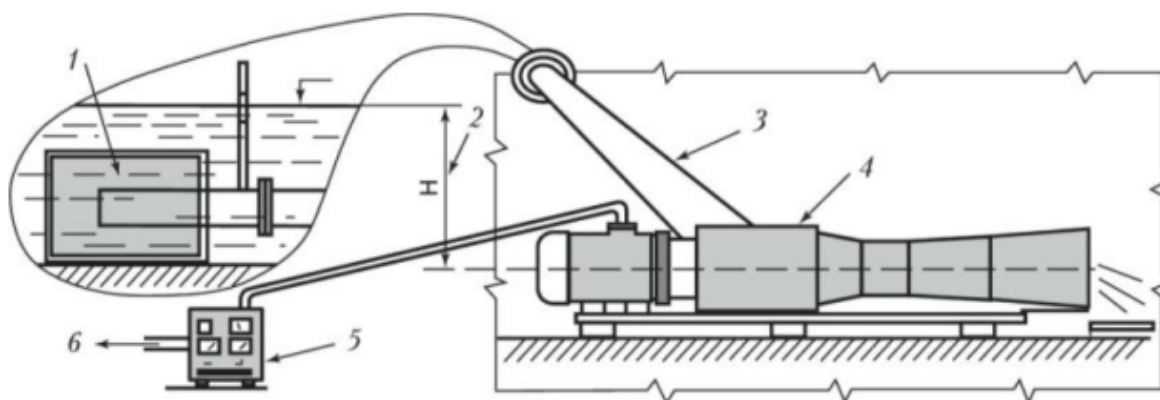


Рисунок 9 – Схема мікроГЕС: 1 – водозабірний пристрій; 2 – напір води; 3 – напірний водопровід; 4 – гідроагрегат; 5 – пристрій автоматичного регулювання; 6 – струм до споживача

Обладнання для такого типу мікроГЕС широко представлено на вітчизняному та закордонному ринках, і включає водозабірний пристрій, гідротурбіну та гідрогенератор, пристрої автоматичного регулювання та

збудження, мультиплікатор, систему автоматичного управління та блок баластного навантаження.

Основним елементом мікроГЕС є гідроагрегат, який включає в себе гідротурбіну та гідрогенератор. Для мікроГЕС переважно застосовуються активні гідротурбіни, що встановлюються в напірному трубопроводі і використовують кінетичну енергію потоку води. А гідрогенератори можуть бути як синхронні так і асинхронні. Генератори є також важливими елементами в плані не лише генерування електроенергії, а й забезпечення стабільних якісних її параметрів.

Для автономних систем електрозабезпечення, зокрема із використанням мікроГЕС, важливо не лише забезпечити потреби споживача у кількості електроенергії, але і щоб вироблена електроенергія характеризувалась стабільними параметрами для широкого діапазону зміни навантаження.

Для досягнення сталих витрат води гідротурбіни, міняючи величину навантаження можна регулювати частоту її обертання, зокрема можна здійснювати регулювання електричного навантаження генератора, що значно спрощує конструкцію гідроагрегатів, без залучення спеціального обладнання. На рисунку 10 подано схему стабілізації параметрів мікроГЕС з застосуванням автобаластного навантаження [27].

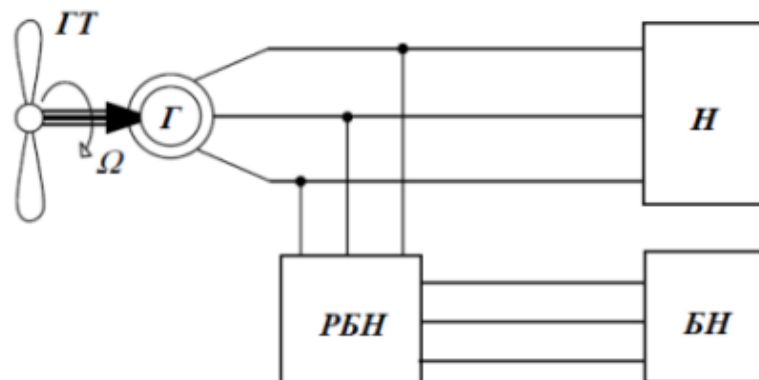


Рисунок 10 – Структурна схема стабілізації параметрів мікроГЕС:

ГТ – гідротурбіна, Г – генератор, БН – баластне навантаження,
РБН – регулятор баластного навантаження, Н – корисне навантаження

Як видно зі схеми, застосовуючи регулятор, паралельно до корисного навантаження гідроелектростанції підключають аналогічне за величиною додаткове баластне навантаження. Якщо є зміна корисного, величина баластного навантаження теж міняється за допомогою регулятора, для того щоби немінялося сумарне навантаження гідрогенератора. Як правило, в якості баластного навантаження застосовують елементи теплонагріву, зокрема теплову енергію можна використати на потреби вівчарні.

На підставі аналізу обладнання для мікроГЕС та схем для створення напору, і врахувавши характеристики гірських річок, ефективним буде для електрозабезпечення вівчарні застосування мікроГЕС з відвідним напірним трубопроводом для створення напору, і використанням схеми стабілізації параметрів мікроГЕС з застосуванням автобаластного навантаження.

2.3 Визначення гідроенергетичного потенціалу досліджуваної річки

Для електрозабезпечення потреб вівчарні використаємо гідроенергію гірської річки Бронька, яка протікає територією Закарпатської області (рис. 11).



Рисунок 11 – Типово гірська річка Бронька (Закарпатська область)

Бронька є правою притокою річки Боржава. Довжина її складає 19 км а площа водозабору 96 км². Річка є типово гірською з похилом 53 м/км, що є

добре для створення природного напору гідроелектростанції. Долина вузька, залісна, V-подібна з слабозвивистим кам'янистим річищем. Річка починається з південних схилів гори Кук і тече спочатку на південь, а далі на південний захід впадаючи в річку Боржаву поблизу села Бронька [5].

Визначення гідропотенціалу на досліджуваній ділянці річки передбачає визначення витрати води Q та статичного напору H (рис. 12).

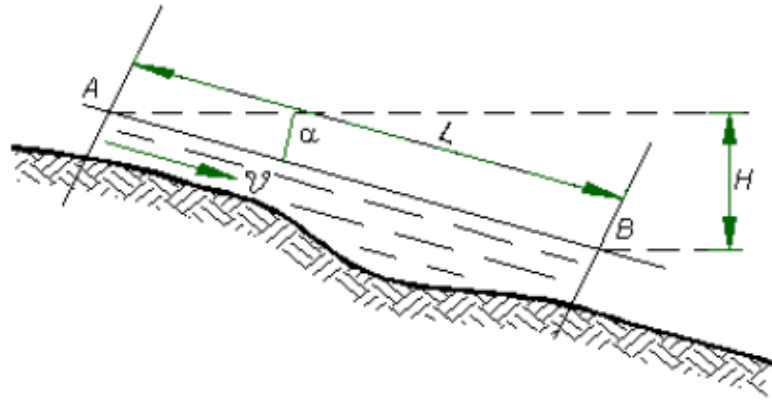


Рисунок 12 – Схема для визначення гідропотенціалу на ділянці річки

Потенційну потужність потоку можна визначити з виразу [15]

$$A = \rho \cdot g \cdot \omega \cdot L \cdot v \cdot \sin \alpha \cdot t. \quad (4)$$

Потужність P знайдемо з виразу [11]

$$P = \rho \cdot g \cdot \omega \cdot L \cdot v \cdot \sin \alpha, \quad (5)$$

де ρ – густина води, $\rho=1000$ кг/м³; v – середня швидкість, м/с, ω – площа живого перерізу, м²; L – довжина ділянки, м; g – прискорення вільного падіння, $g = 9.81$ м/с².

Врахувавши, що у формулі (2.4) $v \cdot \omega = Q$ середня витрата води на ділянці АВ, а $L \cdot \sin \alpha = H$ – напір (рис. 12) визначимо потужність потоку P у кВт [2]:

$$P = 9,81 \cdot Q \cdot H. \quad (6)$$

Оскільки річка Бронька впадає в річку Боржаву, для відслідковування витрат води, особливо у періоди відлиги коли є загроза паводку, в місці впадання облаштований водомірний пост № 49. Згідно даних облводгоспу, витрати води для різних відсотків забезпеченості подано в таблиці 2 [1].

Таблиця 2 – Узагальнені витрати води різної забезпеченості в розрахунковому створі

№ створу	Річка	Площа водозабору, м ²	Витрати води (м ³ /с) забезпеченістю:						
			0,1%	0,5%	1,0%	5,0%	10%	25%	50%
49	Бронька	96	113	72,8	61,2	39,2	31,2	21,4	7,4

Для виробництва електроенергії на гідроелектростанціях важливо знати розподіл витрати води за місяцями. Для гірських річок Закарпаття можна приймати розподіл стоку наведений в таблиці 3.

Таблиця 3 – Розподіл стоку за місяцями у відносних одиницях

Місяць	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Рік
Сток в частках	0,46	0,48	1,38	3,23	1,7	0,82	0,64	0,59	0,79	0,94	0,57	0,4	1

Користуючись даними таблиці 2.3, а також знаючи показники витрати води річки Бронька для різної забезпеченості (таблиця 2.3) можна визначити місячні витрати води в досліджуваному створі. Зокрема для середньої витрати води $Q_{50\%} = 7,4$ м³/с розподіл витрати води за місяцями в абсолютних одиницях у досліджуваному створі отримаємо в таблиці 4.

Таблиця 4 – Розподіл стоку за місяцями річки Бронька

Місяць	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Сток в м ³ /с	3,40	3,55	10,21	23,9	12,6	6,07	4,7	4,36	5,85	6,95	4,22	2,96

Як бачимо з рисунка 13, найбільші витрата води навесні, зокрема у квітні – 23,9 м³/с, а найменші витрати води у зимові місяці, для прикладу у грудні – 2,96 м³/с.

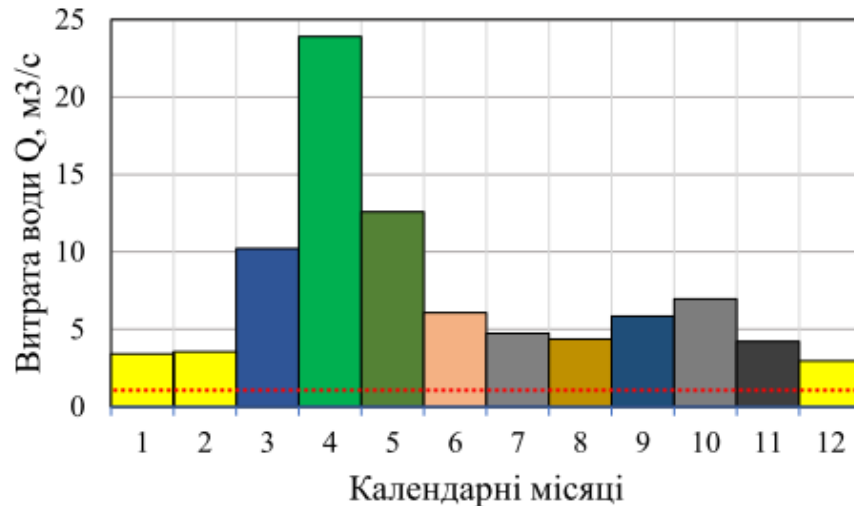


Рисунок 13 – Діаграма розподілу витрат води за місяцями річки Бронька

Згідно екологічних вимог, неможна забрати усю воду на з річки для потреб ГЕС. Враховуючи те, що ефективніше коли мікроГЕС працює при постійних показниках витрати води і напору, приймаємо для роботи гідроелектростанції $Q = 0,45 \text{ м}^3/\text{с}$, що складає біля 13 % від найменшої витрати води місяця грудня та є прийнятним згідно екологічних вимог до роботи мікроГЕС. Також зважаючи на значних ухил річки Бронька – 53 м/км, не виникне проблем зі створення напору, зокрема за рахунок споруд для відведення води з річки для подачі на гідротурбіни. Для попередніх розрахунків приймаємо напір $H = 3 \text{ м}$. Отже за формулою (6) визначимо потужність водотоку

$$P = 9,81 \cdot 0,45 \cdot 3 = 11,77 \text{ кВт.}$$

Якщо врахувати що виробництво електроенергії триватиме протягом роботи мікроГЕС – 8000 годин на рік, тоді можливо порахувати потенційний виробіток електроенергії у досліджуваному створі

$$E_e = P \cdot t = 11,77 \cdot 8000 = 94160 \text{ кВт}\cdot\text{год.} \quad (7)$$

Визначені показники є потенційними гідроенергетичними ресурсами в досліджуваному створі. Для визначення реальних показників потрібно обґрунтувати параметри гідроелектростанції на річки Бронька.

3 МЕТОДИКА ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ МІКРОГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ НА ГІРСЬКІЙ РІЧЦІ

3.1 Розрахунок параметрів гідроагрегату мікроГЕС

3.1.1 Вибір і розрахунок параметрів гідротурбіни

Гідроагрегат будь якої гідроелектростанції, складається з основних елементів – гідротурбіни та гідрогенератора.

Гідротурбіна перетворює кінетичну чи потенціальну енергію потоку рідини у механічну енергію обертання. На сьогоднішній день гідротурбіни доступні різних типів і форм відповідно до умов експлуатації [28].

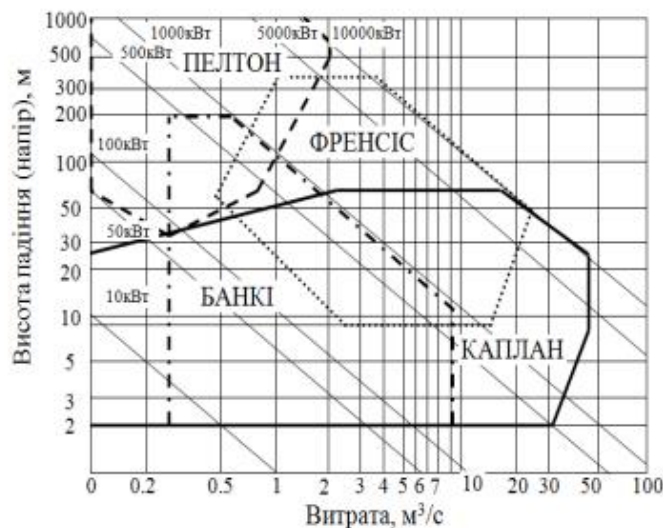


Рисунок 14 – Номограма основних типів гідротурбін

Як бачимо з рисунка 14, в залежності від напору і витрати води, гідротурбіни поділяються на чотири основні види [26]:

- високонапірні турбіни Пелтона;
- реактивні середньонапірні турбіни Френсіса;
- низьконапірні пропелерні турбіни Каплана;
- вільнопоточні (використовують кінетичну енергію потоку) турбіни Банкі (Тайсона).

Вибір того чи іншого типу турбіни залежить від умов використання, а конкретніше – від витрати води Q і створеного напору H (рис. 15).

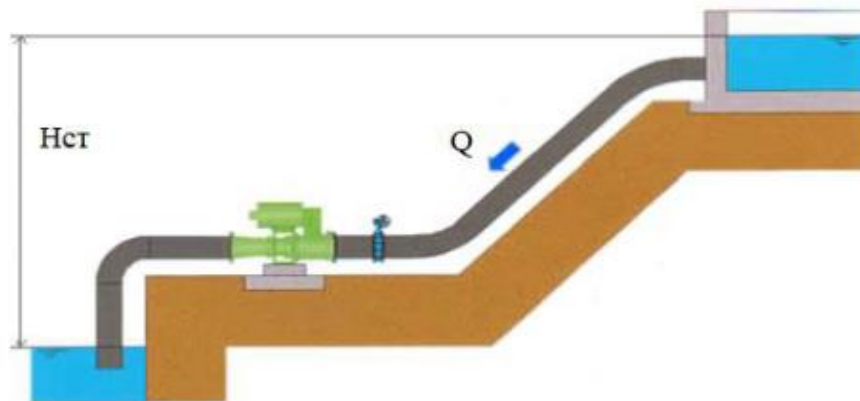


Рисунок 15 – До питання визначення напору мікроГЕС

При чому для забезпечення синхронної частоти обертання n_s показники витрати води і напору мають бути постійними.

Значний ухил річки – 53 м/км, дозволяє забезпечити напір $H_{cm} = 3$ м на незначній ділянці. Довжина трубопроводу, яким відводиться вода з річки на турбіну (рис. 8) складає 10 м. Робочий напір H визначимо з виразу

$$H = H_{cm} - h_w. \quad (8)$$

де h_w – гідравлічні втрати напору у напірному трубопроводі, турбіні та водозабірнику мікроГЕС, м.

ККД прийнятої гідротурбіни враховує втрати напору, а втрати напору у водоприймачі і трубопроводі можна прийняти в межах 5 – 7 % від статичного напору [15].

$$H = H_{cm} - 0,06 \cdot H_{cm} = 3 - 0,06 \cdot 3 = 2,82 \text{ м.}$$

Таким чином за отриманими показника робочого напору $H = 2,82$ м і витратою води $Q = 0,45$ м³/с можна здійснити вибір турбіни. Для отриманих показників оптимальним є пропелерний тип турбіни – розраховані на напір від 2 м і витрати води від 0,1 м³/с. Для визначення конкретних характеристик турбіни необхідно поррахувати її потужність, частоту обертів та діаметр робочого колеса, допустиму висоту відсмоктування [15].

Діаметр робочого колеса гідротурбіни визначимо [29]

$$D = 0,55 \cdot \sqrt{\frac{Q}{\sqrt{H}}} \text{ м.} \quad (9)$$

$$D = 0,55 \cdot \sqrt{\frac{0,45}{\sqrt{2,82}}} = 0,285 \text{ м.}$$

Приймаємо найближчий більший стандартний діаметр робочого колеса $D=0,32$ м.

Визначимо частоту обертання колеса n_T за формулою [29]:

$$n_T = 30 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot H}{\pi \cdot D}}, \text{ об/хв.} \quad (10)$$

$$n_T = 30 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \cdot 2,82}{3,14 \cdot 0,32}} = 222,5 \text{ об/хв.}$$

Розрахованим значенням найкраще відповідає пропелерна низконапірна турбіна Hydro-eKIDS TypeS (рис. 16), яка може використовуватися при $H= 2-15$ м, $Q= 0,1-0,5$ м³/с, $N= 5-25$ кВт, коефіцієнт швидкохідності $n_s = 550$ об/хв, ККД $\eta_T=0,86$ [23].

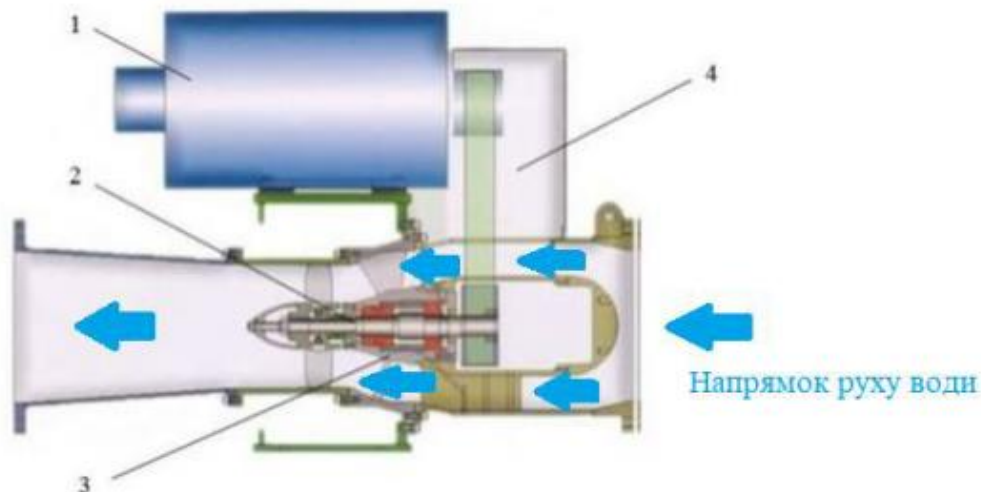


Рисунок 16 – Загальний вигляд гідроагрегату Hydro-eKIDS TypeS:

1 – генератор; 2 – турбіна; 3 – підшипники; 4 – передача

Здійснимо перерахунок потужності обраної гідротурбіни [1; 25]:

$$P_T = g \cdot Q \cdot H \cdot \eta_T, \text{ кВт} \quad (11)$$

де g – прискорення вільного падіння, $g=9,81 \text{ м/с}^2$; η_T – ККД пропелерної турбіни $\eta_T=0,86$.

$$P_T = 9,81 \cdot 0,45 \cdot 2,82 \cdot 0,86 = 10,7 \text{ кВт}.$$

Критичне число обертів $n_{кр}$ для обраної гідротурбіни порахуємо [29]:

$$n_{кр} = \frac{n'_{кр} \cdot \sqrt{H}}{H \cdot D}, \text{ об/хв}, \quad (12)$$

де $n'_{кр}$ – приведенне число обертів для даної гідротурбіни.

$$n_{кр} = \frac{750 \cdot \sqrt{2,82}}{0,32 \cdot 2,82} = 1395,7 \text{ об/хв}.$$

Для мікроГЕС на річці Бронька знайдемо, яка має бути допустима висота всмоктування з виразу

$$H_S = 10 - \frac{V}{900} - 1,05 \cdot \sigma \cdot H, \text{ м}, \quad (13)$$

де V – висота розташування турбіни над рівнем моря ($V=450 \text{ м}$ для с. Бронька), м; σ – для пропелерних гідротурбін коефіцієнт кавітації $\sigma = 0,35$.

$$H_S = 10 - \frac{450}{900} - 1,05 \cdot 0,35 \cdot 2,82 = 8,5 \text{ м}.$$

Рохрахунки правильні і умова виконується, оскільки робочий напір $H=2,82 \text{ м}$, є значно меншим за допустиму висоту всмоктування $H_S=8,5 \text{ м}$.

3.1.2 Підбір гідрогенератора та обґрунтування способу передачі потужності від гідротурбіни до генератора

У даному дослідженні нами було розглянуто роботу синхронного генератора у складі мікроГЕС. Генератори даного типу є простими за конструкцією, високої потужності і енергетичних показників. Зокрема зупинимось на синхронних генераторах PMG Windkraft із збудженням від постійних магнітів, які розташовані на роторі і для них не потрібно зовнішнє джерело енергії, застосовуються для вітрогенераторів і гідроелектростанцій.

Визначимо активну потужність генератора

$$P_G = P_T \cdot \eta_z \cdot \eta_{пер}, \text{ кВт}, \quad (14)$$

де P_T – потужність турбіни, 10,7 кВт; η_G – коефіцієнт корисної дії генератора, 0,93; $\eta_{пер}$ – коефіцієнт корисної дії приводу від турбіни до генератора (для механічної передачі приймають 0,95-0,98).

Прийmemo зв'язок турбіни з генератором через клинопасову передачу, що складається з двох шківів із заглибленнями та ременя із зубцями (рис. 17). ККД передачі $\eta_{пер}=0,95$.

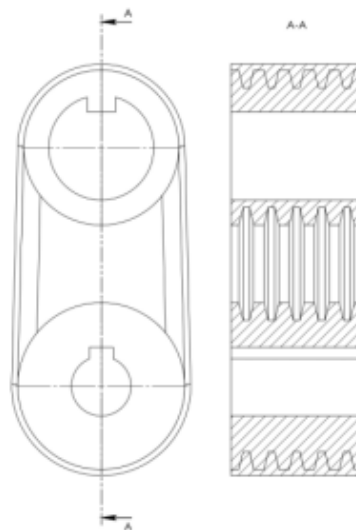


Рисунок 17 – Клинопасова передача

Отже, потужність генератора визначимо

$$P_G = 10,7 \cdot 0,93 \cdot 0,95 = 9,45 \text{ кВт}.$$

Передавальне число клинопасової передачі визначимо з формули:

$$u = \frac{n_T}{n_r} \quad (15)$$

де n_T – частота обертання робочого колеса турбіни, об/хв; n_r – частота обертання вала гідрогенератора, об/хв.

$$u = \frac{222,5}{500} = \frac{1}{2,25}$$

Число пар полюсів генератора визначимо:

$$p = \frac{60 \cdot f}{u \cdot n_T} = \frac{60 \cdot 50}{2,25 \cdot 222,5} = 6. \quad (16)$$

де f – частота струму, 50 Гц.

Частота обертання синхронного генератора

$$n_c = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{6} = 500 \text{ об/хв.}$$

Відповідно до результатів розрахунків обираємо трьохфазний синхронний генератор українського виробництва PMG Windkraft -10 (рис. 18) з характеристиками: потужність – 10 кВт, частота обертання – 500 об/хв, ККД – 0,86, коефіцієнт потужності генератора $\cos \phi$ – 0,8, маса – 91 кг [9].



Рисунок 18 – Загальний вигляд синхронного генератора PMG Windkraft -10

Перерахуємо потужність P_r обраного генератора мікроГЕС[15]:

$$P_r = P_T \cdot \eta_e \cdot \cos \phi \cdot \eta_{nep} = 10,7 \cdot 0,93 \cdot 0,95 \cdot 0,8 = 7,56 \text{ кВт.} \quad (17)$$

На рисунку 19 наведено схему підключення синхронного генератора мікроГЕС, що працює на автономного споживача, зокрема вівчарні.

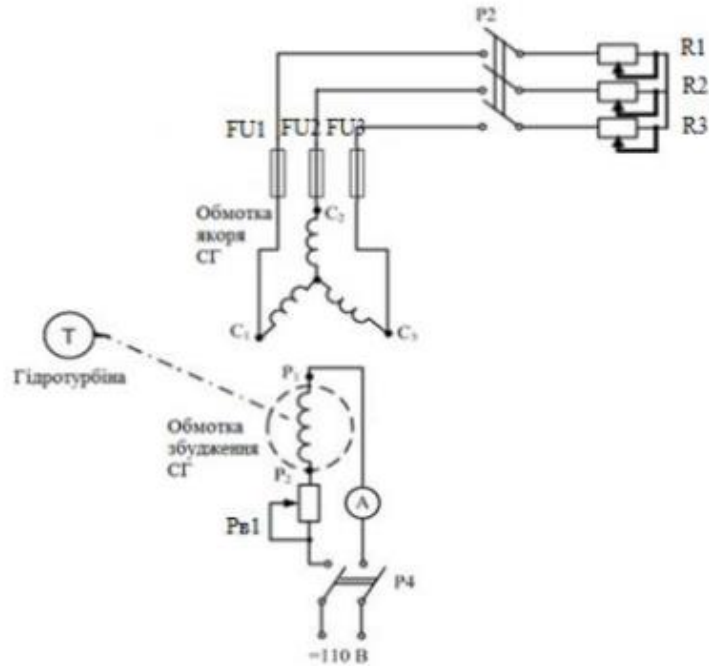


Рисунок 19 – Схема підключення синхронного генератора на автономну роботу

Таким чином генератор обрано правильно і він задовільняє потреби по потужності мікроГЕС.

3.2 Обґрунтування способу передачі електроенергії від мікроГЕС до вівчарні

Для передачі енергії від мікроГЕС до вівчарні застосуємо чотири провідну лінію 380/220 В. Навантаження – 7,56 кВт, коефіцієнт потужності $\cos \phi = 1$, довжина ділянки 150 м. Проведемо розрахунок мережі для визначення втрат напруги (рис. 20), для $\Delta U=4\%$ – допустимої втрати напруги.

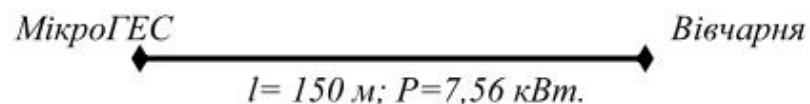


Рисунок 20 – Розрахункова схема повітряної чотирипровідної мережі 380/220 В

За методикою в [16], порахуємо коефіцієнт a_1 за формулою

$$a_1 = \frac{100}{\gamma \cdot U_H^2}, \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м} \cdot \text{кВ}^2, \quad (18)$$

де U_H – номінальна міжфазна напруга мережі, кВ; γ – провідність алюмінію ($\gamma = 31,7 \text{ м/Ом} \cdot \text{мм}^2$).

$$a_1 = \frac{100}{31,7 \cdot 0,38^2} = 21,9, \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м} \cdot \text{кВ}^2.$$

Значення моменту навантаження для лінії знайдемо

$$Ma = P \cdot l = 7,56 \cdot 0,15 = 1,134, \text{ кВт} \cdot \text{км}. \quad (19)$$

Допустимий мінімальний перетин лінії визначимо

$$F = a_1 \cdot \frac{Ma}{\Delta U} = 21,9 \cdot \frac{1,134}{4} = 6,47 \text{ мм}^2. \quad (20)$$

Тоді приймаємо площу перерізу лінії $F = 10 \text{ мм}^2$.

Для нульового проводу порахуємо площу поперечного перерізу:

$$F_0 = \frac{F}{2} = \frac{10}{2} = 5 \text{ мм}^2. \quad (21)$$

Приймаємо провід, який відповідає розрахованим значенням, зокрема СІП-5 4x10 – самоутримний ізолюваний провід (СІП) [20].

Для передачі виробленої електроенергії від мікроГЕС до вівчарні приймаємо прокладені вздовж дороги три опори ПЛ-4 з довжиною прольоту 50 м (рис. 21).

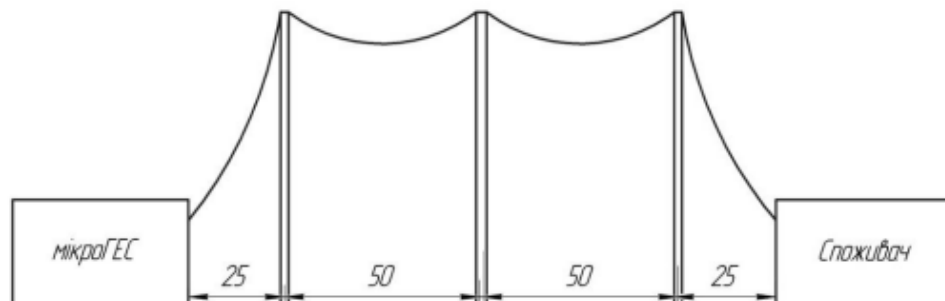


Рисунок 21 – Розміщення опор ПЛ 0,38 кВ

З врахуванням 4% втрат виробленої електричної енергії на мікроГЕС у лініях електропередач, визначимо кінцеву потужність мікроГЕС для електрозабезпечення вівчарні

$$P = P_{Г} - P_{Г} \cdot 0,04 = 7,56 - 7,56 \cdot 0,04 = 7,26 \text{ кВт.} \quad (22)$$

Таким чином, встановлена потужність мікроГЕС на річці Бронька, забезпечує потреби в електроенергії споживачів вівчарні.

3.3 Компонування гідротехнічних споруд мікроГЕС

Для використання водних ресурсів будують інженерні споруди, які називають гідротехнічними. Щодо мікроГЕС, то можна виділити наступні гідроспоруди:

- водозабірний вузол;
- водовідвідний трубопровід;
- будівля мікроГЕС, де розташований гідроагрегат з відсмоктувальною трубою і додаткове обладнання.

У даному дослідженні обґрунтовано дериваційну схему створення напору на річці Бронька. Для відведення частини потоку з русла до гідротурбіни використовують водозабірний шлюз. Зокрема пропонуємо використати водозабірну конструкцію подану на рисунку 22.

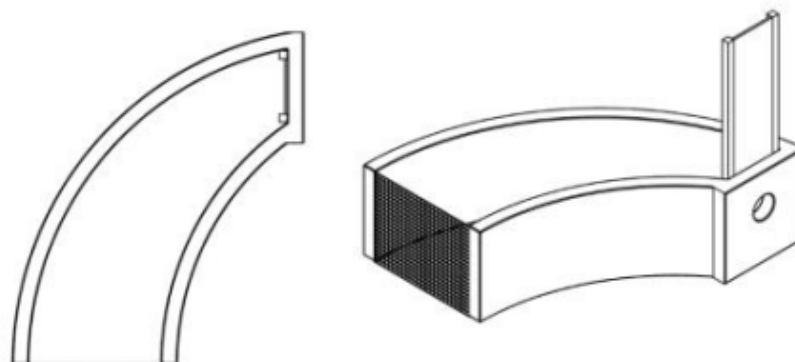


Рисунок 22 – Водозабірний шлюз

Фундамент і стінки виконані з залізобетону з армованою металевою сіткою. А для того щоб на турбіну не потрапляло сміття з річки пропонуємо встановити металеву сітку. Затвором, виконаним з металевої пластини можемо перекривати впускний отвір.

Наступним елементом є напірний трубопровід для подачі води з річки на турбіну. Встановлено, що довжина такого трубопроводу складає 10м, а там де з'єднані частини труби є опори з суцільного залізобетону (рис. 23).

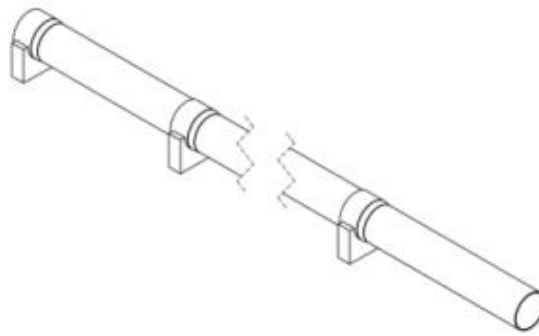


Рисунок 23 – Загальний вигляд напірного трубопроводу

Для скидання відпрацьованої води з турбіни назад в річку облаштуємо водоскид, в якому постійно затоплена відсмоктувальна труба (рис. 22). Для того щоб не розмивало канал, необхідно зробити бетонне облицювання кругом відсмоктувальної труби.

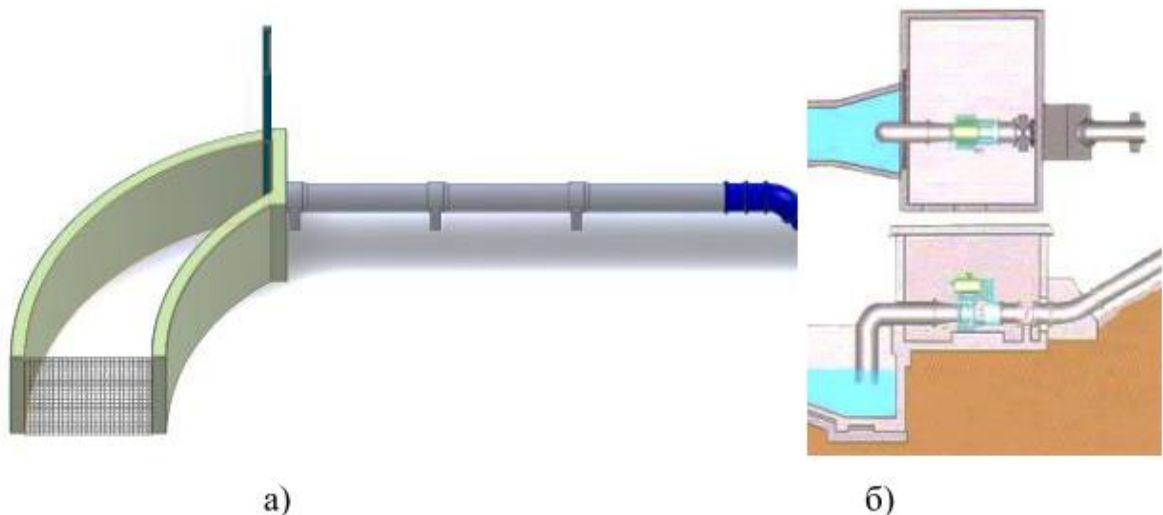


Рисунок 24 – Гідропоруди мікроГЕС на річці Бронька: а) водозабірний вузол з напірним трубопроводом; б) будівля з енергообладнанням

Що стосується будівлі мікроГЕС, то для ефективної роботи гідроагрегату, підлога має бути вирівняна з високою точністю. В будівлі розміщують пропелерну гідротурбіну, синхронний генератор, пристрої керування і контролю мікроГЕС, різноманітне допоміжне обладнання тощо. Сама будівля виконується суміщеною з водоскидом. Дана мікроГЕС не потребує спеціального обслуговуючого персоналу адже більшість процесів є автоматизованими [22].

3.4 Схема керування мікроГЕС за допомогою баластного навантаження

Для регулювання таких параметрів, як швидкість обертання гідротурбіни, стабілізації вихідної напруги і частоти струму використовують систему управління мікроГЕС. Для забезпечення стабільної напруги та частоти струму на мікроГЕС необхідно дотримуватись постійної швидкості обертання гідротурбіни. Проте у випадку роботи на автономну мережу, на швидкість обертання гідротурбіни ще впливає мінливість електронавантаження. Для регулювання електронавантаження можна застосувати систему баластного навантаження, що дозволить ефективно застосувати надлишкову потужність мікроГЕС на енергопотреби вівчарні (рис. 25) [27].

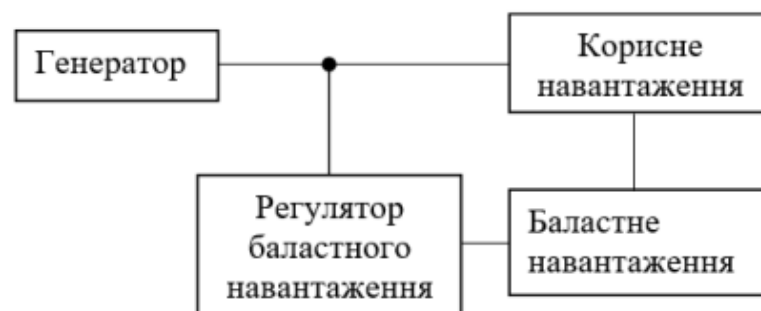


Рисунок 25 – Система баластного навантаження мікроГЕС

Зміст баластного навантаження розглянемо на нашому прикладі. Відповідно до здійснених розрахунків, потужність мікроГЕС на річці

Бронька становитиме 7,26 кВт·год, а корисне навантаження мінливе протягом доби (рис. 7). У пікові години вироблена потужність співпадає з корисним навантаженням, але є години коли корисне навантаження менше зокрема в години доби 20-21, 21-22 складає 4,26 кВт·год. Оскільки в цей момент часу генератор недостатньо завантажений швидкість обертання турбіни збільшується, що тягне за собою ріст напруги і частоти струму в мережі, що може призвести до поломок електрообладнання. Є декілька варіантів, які можна використати для вирішення даної задачі для нашого випадку. По перше, можна регулювати витрату води, яка попадає на турбіну, якщо турбіна дозволяє, або скидати частину води в річку. По-друге, можна підключити баластне навантаження для компенсації різниці між виробництвом і споживанням електроенергії.

Також баластне навантаження можна використати з користю для вівчарні. Зокрема можна прийняти баластне навантаження (рівне споживаній активній потужності корисного навантаження) з 8 трубчастих нагрівачів типу ТЕН для нагріву води, що використовуватиметься як для напування овець (для цих тварин важливо підігрівати воду) так і для побутових потреб.

Для усунення можливого несиметричного завантаження фаз на кожній фазі генератора застосовують в якості давачів трансформатори струму. Для цього є регулятор баластного навантаження, який реагує на величину струму корисного навантаження, а його принципова схема подана на рисунку 26.

Відповідно до наведеної схеми, напруга генератора U_r попадає на навантаження R_n , і на баластне навантаження R_b по первинних обмотках трансформаторів струму Т1-Т3. Баластне навантаження ввімкнене в «зірку» через силовий вентиляний перетворювач що складається з діодів VD1-VD3 і тиристорів VS1-VS3 [28]. Включення баластного опору здійснюється через включення його на випрямлену напругу перетворювача. Керування кутами ввімкнення тиристорів VS1-VS3 відбувається за рахунок управляючого випрямляча VD4-VD9, що живиться від трансформаторів струму Т1-Т3, вихідна напруга яких пропорційна фазним струмам навантаження I_n ,

прикладається до резистора управління R_y і випрямляється. Для діодів VD10-VD12 напруга управління має запираючу полярність, тому вони можуть відкриватися, включаючи відповідні тиристори VS1-VS3 коли лінійна напруга генератора перевищить величину управляючої напруги на резисторі R_y . Коли струм навантаження рівний нулю і напруга управління дорівнює нулю і повністю відкриті тиристори VS1-VS3 для забезпечення максимальної потужності, що споживається баластним навантаженням R_6 R'_6 . Фазове регулювання потужності баласту за номінального струму навантаження I_H в схемі здійснюється за допомогою формування кутів управління тиристорами в результаті порівняння на резисторі R_y лінійної напруги генератора з напругою управління, пропорційною струму навантаження станції.

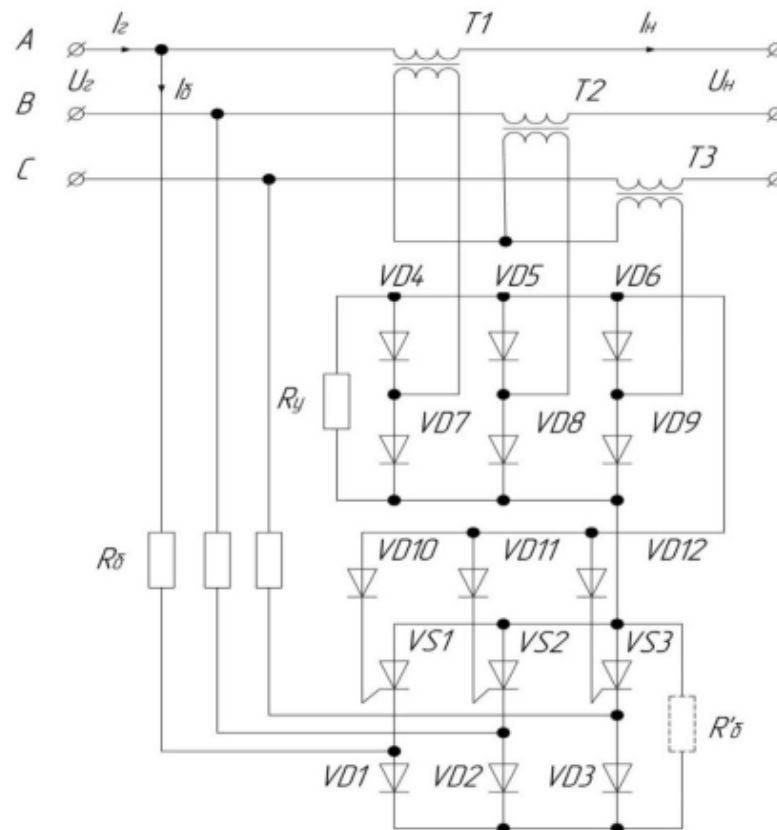


Рисунок 26 – Принципова електрична схема регулятора автобаластного навантаження мікроГЕС

Отже запровадження баластного навантаження сприяє стабілізації частоти обертання турбіни, а відповідно показників струму і напруги.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Структурно-функціональний аналіз процесу виробництва електричної енергії на гідроелектростанціях та розроблення моделі травмонебезпечних та аварійних ситуацій

Для моделювання процесів виникнення травм, аварій і катастроф зручно застосовувати метод логічного моделювання. Метод логічного моделювання процесів формування, виникнення небезпечних ситуацій та їх наслідків доцільно застосовувати для аналізу існуючих, або потенційних небезпек, що виявлені при обстеженні робочих місць, окремих марок машин, агрегатів, а також різних споруд, будівель, виробничих процесів і технологій.

Розробка заходів з охорони праці розпочинається з визначення оцінюючих показників безпеки при роботі силового устаткування гідроелектростанцій [18].

Гідросилове устаткування включає гідротурбіну й гідрогенератор; допоміжне устаткування на агрегатному рівні; систему автоматичного регулювання роботи гідротурбіни; систему автоматичного керування допоміжним устаткуванням; систему збудження гідрогенератора. Це обладнання, з погляду безпеки праці, є акумуляторами ряду специфічних небезпечних і шкідливих виробничих чинників. Розглянемо основні з них.

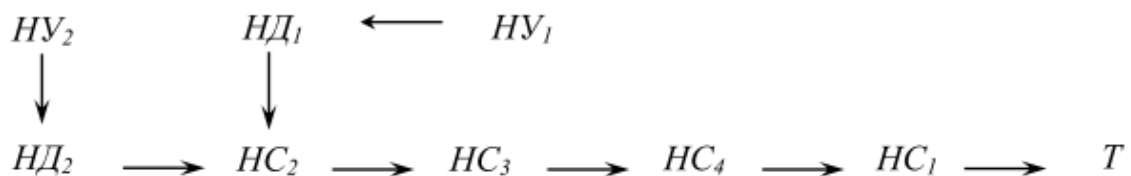


Рисунок 14 – Модель процесу

Для технологічного процесу виробництва електроенергії на гідроелектростанціях характерний такий небезпечний фактор, як травмування електричним струмом через несправність захисного заземлення,

використання пошкоджених кабелів і електропроводів або неналежний санітарний стан підлоги приміщення.

Проаналізуємо даний фактор:

1. Вид робіт: робота біля щита керування гідроелектростанції;
2. Небезпечна умова (НУ): відсутні захисні дерев'яні щити на підлозі НУ₁; вийшов з ладу захист заземлення НУ₂;
3. Небезпечна дія (НД): при роботі працюючий стоїть у небезпечній зоні НД₁; при роботі працюючий знаходиться не у зазначеному місці НД₂;
4. Небезпечна ситуація (НС): ураження струмом через відсутність дерев'яних щитів НС₁; ураження струмом через неналежний стан підлоги НС₂; ураження струмом через пошкодження кабелів НС₃; ураження струмом через неналежний захист заземлення НС₄.
5. Травма (Т).

Для запобігання небезпечним ситуаціям необхідно здійснювати заходи. Зокрема необхідно перевіряти стан захисного заземлення, усувати несправність захисного заземлення, проводити нагляд за пошкодженнями електропроводів, виготовити необхідну кількість захисних щитів на підлогу.

4.2 Вимоги безпеки під час експлуатації гідроелектростанції

Гідроагрегати і допоміжне устаткування, які знаходяться в експлуатації, повинні бути повністю автоматизовані. Пуск гідроагрегату в генераторний режим і режим синхронного компенсатора та виведення з генераторного режиму і режиму синхронного компенсатора, переведення гідроагрегату з генераторного режиму в режим синхронного компенсатора і навпаки повинні здійснюватися від одного командного імпульсу [19].

Гідроагрегати повинні працювати з повністю відкритими затворами, установленими на турбінних водоводах; граничне відкриття напрямного апарата гідротурбіни повинно бути не вище ніж значення, що відповідає

максимально допустимому навантаженню гідроагрегату (генератора, генератора-двигуна) при даному напорі і висоті всмоктування.

Граничне відкриття напрямного апарата насос-турбіни, що працює в насосному режимі при мінімальному напорі і допустимій висоті всмоктування, повинно бути не вище ніж значення, яке відповідає максимальній потужності генератора-двигуна в насосному режимі.

Гідроагрегати повинні працювати в режимі автоматичного регулювання частоти обертання. Переведення регулятора гідротурбіни в режим роботи на обмежувачі відкриття або на ручне управління допускається у виняткових випадках з дозволу технічного керівника ГЕС. Під час автоматичного регулювання гідроагрегату необхідно забезпечити:

- автоматичний і ручний пуск і зупинки гідроагрегату;
- стійку роботу гідроагрегату у всіх режимах;
- плавне (без поштовхів і гідроударів в оливопроводах) переміщення регулювальних органів у разі зміни потужності гідроагрегату;
- автоматичну зміну обмеження максимального відкриття напрямного апарата під час зміни напору.

Умови, які дозволяють пуск гідроагрегату мікроГЕС, його нормальний та аварійний стан та незаплановану зміну навантаження, повинні бути викладені в інструкціях з експлуатації, затверджених технічним керівником гідроелектростанції, які знаходяться на робочих місцях персоналу.

Значення усіх параметрів, які визначають умови пуску гідроагрегату та режим його роботи, повинні бути встановлені на підставі даних заводів-виробників та спеціальних натурних випробувань.

Пуск гідроагрегату забороняється у випадках:

- напору, що виходить за межі допустимих значень, встановлених заводом-виробником гідротурбін;
- дефектів системи регулювання гідроагрегату, які призводять до невиконання гарантій регулювання і нормального управління гідроагрегатом;

- несправності пристроїв дистанційного управління аварійними затворами, клапанів зриву вакууму, клапанів впуску повітря і неробочих випусків, системи гальмування гідроагрегату.

Гідроагрегат повинен бути негайно зупинений дією захистів або персоналом у таких випадках:

- пожежі в генераторі;
- зниженні тиску оливи в системі регулювання нижче допустимої межі;
- припинення потоку мастила через підшипник гідроагрегату;
- підвищенні частоти обертання ротора гідроагрегату понад значення, встановлене заводом-виробником;
- обриву тросу зворотного зв'язку у системі регулювання (за його наявності) або зникнення електричного сигналу зворотного зв'язку;
- виявлення несправності технологічних та/або електричних захистів, що діють на зупинення гідроагрегату.

Гідроагрегат повинен бути розвантажений або зупинений за узгодженням з технічним керівником мікроГЕС у таких випадках:

- несправній роботі системи регулювання;
- появі стукоту і невластивих шумів у проточній частині гідротурбіни або всередині генератора;
- збільшенні биття вала гідроагрегату і вібрації опорних вузлів агрегату, оливопроводів і золотників системи регулювання;
- зменшенні подачі води на змащування турбінного підшипника;
- підвищенні рівня води на кришці турбіни або в капсулі вище від допустимого значення у разі відмови або недостатній продуктивності дренажних насосів;
- порушенні нормальної роботи допоміжного устаткування, якщо усунення причин порушення неможливе без зупинки агрегату.

Значення усіх параметрів, що обмежують пуск і роботу гідроагрегату, повинні бути установлені на підставі даних заводів-виробників або спеціальних випробувань і вказані в інструкції з експлуатації.

4.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях

Заходи щодо захисту цивільного населення плануються проводитись в населеному пункті де розташоване господарство. Водночас характер та зміст захисних засобів встановлюється в залежності від виду та ступеня загрози, місцевих умов з урахуванням важливості виробництва для безпеки населення і інших економічних і соціальних чинників.

Ефективність захисту населення у НС може бути досягнута тільки на основі усвідомленого урахування принципів забезпечення безпеки у надзвичайних ситуаціях і ефективному використанні всіх засобів і способів, що послаблюють її негативні впливи та збільшують безпеку населення [18].

Основний засіб захисту населення в надзвичайних ситуаціях – це евакуація населення, його *укриття в захисних спорудах*, наприклад у бомбосховищах, використання засобів індивідуального захисту і медичної профілактики.

Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) населення захищають від потрапляння всередину організму, на шкірні покриви та одяг радіоактивних, отруюючих речовин і бактеріальних засобів. Важливу роль в цьому відіграють медичні засоби індивідуального захисту, які призначені для профілактики і надання медичної допомоги населенню, постраждалому у НС. З їх допомогою можна зберегти життя, попередити або значно зменшити ступінь розвитку поразки людей, підвищити стійкість організму людини до впливу деяких небезпечних і шкідливих чинників. До них відносяться радіопротектори, антидоти, протибактеріальні засоби, а також засоби часткового санітарного опрацювання.

5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РОЗРОБОК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Для визначення ефективності впровадження мікроГЕС на річці Бронька для забезпечення вівчарні в електроенергії здійснимо техніко-економічне обґрунтування, що передбачає розрахунок капіталовкладень, терміну окупності, собівартості виробленої електроенергії, річного виробітку електроенергії [1; 3].

Для визначення капіталовкладень у спорудження мікроГЕС розглянемо структуру розподілу витрат будівництва мікрогідроелектростанції (рис. 27), яка відрізняється від малих та середніх ГЕС, зокрема питома вартість 1 кВт встановленої потужності на мікроГЕС є вищою в порівнянні з більшими гідроелектростанціями [5].

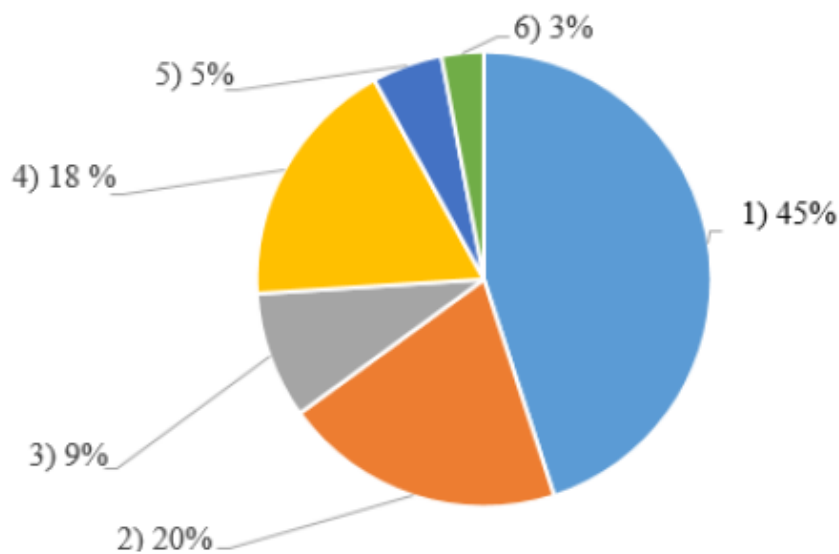


Рисунок 27 – Структура затрат будівництва мікроГЕС:

- 1) будівельні роботи; 2) проектні роботи; 3) затрати непередбачувані;
- 4) затрати на гідроагрегат; 5) затрати на електрообладнання допоміжне;
- 6) інше обладнання

Як видно з рисунка, 45 % від загальних витрат припадає на будівельні роботи і лише 23 % на обладнання мікроГЕС.

Вартість гідроустаткування та електрообладнання мікроГЕС отримано з прайс-листів фірм виробників [13; 23] і наукових праць в яких розглядається питання ефективності впровадження мікроГЕС як в Україні так і за кордоном [27; 28]. Зокрема для мікроГЕС встановленою потужністю до 100 кВт питомі затрати на: ЛЕП – від 1200 грн/кВт, гідроагрегати – 14000-25000 грн/кВт допоміжне обладнання – 1600-1900 грн/кВт [2; 5]. Розміри капіталовкладень визначимо [3]:

$$K = Z_T + Z_G + Z_B + Z_C + Z_D + Z_L \text{ грн,} \quad (23)$$

де Z_T – затрати на турбіну, грн; Z_G – затрати на генератор, грн; Z_B – затрати на спорудження водозабірної вузла і трубопроводу, грн; Z_C – затрати на будинок з гідроагрегатом та водовідводом, грн; Z_D – затрати на допоміжне електрообладнання грн; Z_L – затрати на спорудження ЛЕП, грн.

$$K = 143000 + 53500 + 287000 + 95000 + 35500 + 90000 = 704000 \text{ грн.}$$

Відрахування на мікроГЕС річні знайдемо з виразу

$$B = I_b \cdot K, \text{ грн,} \quad (24)$$

де I_b – амортизаційні відрахування для мікроГЕС (для мікроГЕС, I_b можна приймати від 2 до 7% від капіталовкладень [28].

$$B = 0,07 \cdot 704000 = 49280 \text{ грн.}$$

Собівартість виробленої електричної енергії з визначимо, грн/ кВт·год:

$$z = \frac{B}{W_r}, \text{ грн./кВт·год,} \quad (25)$$

де W_r – виробіток електричної енергії, кВт·год/рік.

$$W_r = P \cdot t, \text{ кВт·год/рік,} \quad (26)$$

де P – потужність мікроГЕС, кВт; t – період роботи мікроГЕС (приймаємо $t=8000$ год), год.

$$W_r = 7,26 \cdot 8000 = 58080 \text{ кВт·год/рік.}$$

Тоді собівартість виробленої електроенергії на мікроГЕС визначимо:

$$z = \frac{49280}{58080} = 0,85 \text{ грн/кВт·год.}$$

Для визначення прибутку і терміну окупності мікроГЕС порівняємо з варіантом коли б вівчарня живилася від централізованої електромережі. Оскільки з 1 червня 2023 року вартість електроенергії складає 2,64 грн за 1 кВт·год, можна порахувати прибуток від електроенергії з мікроГЕС

$$A = W_r(z' - z), \text{ грн,} \quad (27)$$

де z' – вартість електроенергії з мережі, грн/кВт·год.

$$A = 58080 \cdot (2,64 - 0,85) = 103963 \text{ грн.}$$

Тоді термін окупності $T_{ок}$ визначимо:

$$T_{ок} = \frac{K}{A} = \frac{704000}{103963} = 6,7 \text{ років.} \quad (28)$$

Отже термін окупності витрачених коштів на впровадження мікроГЕС на річці Бронька складає 6,7 років, а собівартість виробленої електроенергії 0,85 грн/кВт.

ВИСНОВКИ

У гірських районах Карпат багато споживачів не мають доступу до централізованих мереж електропостачання тому постає питання пошуку альтернативних джерел енергії для задоволення їхніх потреб. Одним з таких джерел є гідроенергія гірських річок, яка має здатність забезпечувати потреби споживачів в електроенергії цілий рік. Тому нами обґрунтовано електрозабезпечення автономної вівчарні за допомогою мікроГЕС на гірській річці Бронька.

Проаналізувавши потреби в електроенергії вівчарні, встановлено, що для ефективного виконання усіх процесів вівчарні необхідно джерело енергії встановленою потужністю від 7 кВт. Разом з цим, досліджено потенціал гірської річки, яке протікає на відстані 150 м від вівчарні, та встановлено, що теоретична потужність у досліджуваному створі складає 11,77 кВт.

Нами обґрунтовано дериваційну схему створення напору на даній ділянці, схему керування з використанням баластного навантаження, структуру і характеристики мікроГЕС, зокрема обґрунтовано гідроагрегат у складі пропелерної турбіни Hydro-e KIDS TypeS і синхронного генератора PMG Windkraft-10. Врахувавши усі втрати, визначено встановлену потужність мікроГЕС, яка становить 7,27 кВт.

Розглянуто питання охорони праці та безпеки у надзвичайних ситуаціях і запропоновано рекомендації щодо їх покращення.

Проведено техніко-економічні розрахунки, на підставі яких встановлено, що річний виробіток електричної енергії складатиме 58080 кВт·год/рік при собівартості 0,85 грн/кВт·год, а вкладені кошти в будівництво мікроГЕС окупляться за 6,7 років.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Бабич М. І. Обґрунтування варіантів конфігурації проекту мікрогідроенергетики Карпатського регіону України. *Вісник Львівського державного аграрного університету : агроінженерні дослідження*. 2007. № 11. С. 37–43.
2. Бабич М. І., Коробка С. В. Методика обґрунтування параметрів турбіни та дериваційного каналу мікрогідроелектростанції для умов гірської річки. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання*. 2023. Вип. 13, том 1. 10 с.
3. Боярчук В., Бабич М., Кригуль Р., Шолудько Я. Дослідження функціональних та вартісних показників малих гідроелектростанцій. *Вісник Львівського національного аграрного університету : агроінженерні дослідження*. 2013. № 17. С. 281-286.
4. Бронька (річка): веб-сайт. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D1%80%D0%BE%D0%BD%D1%8C%D0%BA%D0%B0_\(%D1%80%D1%96%D1%87%D0%BA%D0%B0\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D1%80%D0%BE%D0%BD%D1%8C%D0%BA%D0%B0_(%D1%80%D1%96%D1%87%D0%BA%D0%B0)) (дата звернення: 21.05.2023).
5. Васько П. Ф., Мороз А. В. Потенціал використання гідроенергетичних ресурсів основних малих річок України. *Відновлювальна енергетика України*. 2016. № 3. С. 50-56.
6. Васько П. Ф. Сучасний стан, потенційні можливості та передумови подальшого розвитку малої гідроенергетики в Україні. *Відновлювальна енергетика*. 2006. № 1. С. 60–66.
7. Відновлювані джерела енергії для домогосподарств. URL: <https://saee.gov.ua/uk/content/renewables> (дата звернення: 11.12.2020).
8. Відновлювані джерела енергії / За заг. ред. С.О. Кудрі. Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020. 392 с.
9. Віхорєв Ю. О. Аналіз особливостей впровадження об'єктів малої гідроенергетики в Україні та європейських країнах. *Гідроенергетика*

України. 2005. № 3. С. 56–60.

10. Власюк Ю. С., Стефанишин Д. В. Про проблеми та перспективи малої гідроенергетики в Україні. Математичне моделювання в економіці. 2018. № 1. С. 126-138.

11. Вовчак В., Тесленко О., Самченко О. Мала гідроенергетика України. Інститут проблем екології та енергозбереження. Київ, 2018. Т. II. Технологічні особливості малих ГЕС. 145 с.

12. Вовчак В., Тесленко О., Самченко О. «Мала гідроенергетика України. Аналітичний огляд. Том I». Інститут проблем екології та енергозбереження. Київ. 2018. 181 с.

13. Генератори на постійних магнітах. веб-сайт. URL: <http://www.windkraft.com.ua/product/generatory-na-postojannyh-magnitah-10-kvt-500-obmin/> (дата звернення: 29.07.2023).

14. Гідроенергетика. веб-сайт. URL: <https://saee.gov.ua/uk/ae/hydroenergy>. (дата звернення: 29.10.2023).

15. Золотухін В.І., Лутаєв В.В. Водноенергетичні розрахунки при проектуванні гідроелектростанцій : навч. посіб. Рівне, 2005. 203 с.

16. Комплексне використання відновлюваних джерел енергії: Курс лекцій [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: М.П. Кузнецов, О.А. Мельник. Електронні текстові дані (1 файл: 7,93 Мбайт). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 304 с.

17. Ландау Ю. М., Сіренко Л. І. Гідроенергетика і навколишнє середовище. Київ: Лібра, 2004. 481 с.

18. Пістун І. П. Безпека життєдіяльності: навч. посіб. Суми : Унів. кн., 1999. 301 с.

19. Прилуцький Є.В. Аналіз режимів роботи мікрогідроелектростанцій під час паралельної роботи на автономній мережі. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2019. Т. 30 (69) Ч. 2 № 3. С. 14–19.

20. Проводи СІП URL: <http://www.lizo.lviv.ua/production-left/provodi-sip/provodi-sip> . (дата звернення: 10.03.2023).
21. Сегеда М. С., Олійник М. Й., Дудурич О. Б. Нетрадиційні та відновлювані джерела електроенергії: навчальний посібник / Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2019. 204 с.
22. Щербина О. М. Енергія для всіх : техн. довідник. Ужгород : Вид-во В. Падяка, 2000. 192 с.
23. Hydro-eKIDS Type M. Micro hydro power generating equipment. URL: <http://www.bur-oak-resources.ca/attachments/ekids.pdf>. (дата звернення: 11.09.2023).
24. A future based on renewable energy. URL: <https://www.eea.europa.eu/signals-archived/signals-2022/articles/a-future-based-on-renewable-energy> (дата звернення: 15.07.2023).
25. Ashfaq H., Saood M., Singh R. Autonomous micro-hydro power system for distributed generation: a power quality analysis. International journal of current engineering and scientific research. 2015. Vol. 2(9). p. 1–6.
26. Ali W., Farooq H., Rasool A., Sajjad I., Zhenhua C., Ning L. Modeling and Analysis of the Dynamic Response of an Off-Grid Synchronous Generator Driven Micro Hydro Power System. International Journal of Renewable Energy Development. 2021. Vol. 10 (2). p. 373-384.
27. Micro Hydropower System - A Buyer's Guide. URL: https://energypedia.info/wiki/File:Micro_Hydropower_System_-_A_Buyer%27s_Guide.pdf (дата звернення: 19.06.2023).
28. Mukhammadiev M. M. , Dzuraev K. S., Abduaziz A., Murodov H. The use of micro hydroelectric power plants with existing hydraulic systems. AIP Conference Proceedings 2552. 2023. P. 1–8. <https://doi.org/10.1063/5.0111916Published> (дата звернення: 24.05.2023).
29. Renewable energy – Hydro power. URL: <https://www.global.toshiba/ww/products-solutions/renewable-energy/products-technical-services/hydro-power.html>. (дата звернення: 29.10.2023).