

Центральноукраїнський національний технічний університет
Центр заочної та дистанційної освіти
Кафедра “Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент”

“ Дopusчено до захисту ”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
канд. техн. наук., професор
_____Петро ПЛЕШКОВ
“ ____ ” _____2023р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої
освіти
на тему
“ Система акумулювання електричної енергії на
основі гідроакумулюючої установки ”

Виконав здобувач вищої освіти
2 курсу магістратури, групи ЕЕ-22Мз
ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____Андрій КЛЮЧАР
« ____ » _____

Керівник роботи
канд. техн. наук, доцент
_____Валентин СОЛДАТЕНКО
« ____ » _____

Рецензент _____

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет центр заочної та дистанційної освіти

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма «Електротехнічні системи електроспоживання»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри ЕТС та ЕМ

канд. техн. наук, професор

Петро ПЛІШКОВ.

«___» _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Ключару Андрію Дмитровичу

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) Система акумулювання електричної енергії на основі гідроакумулюючої установки

Electricity storage system based on a hydroelectric storage unit

2. Керівник роботи (проекту) Солдатенко Валентин Петрович, канд. техн. наук., доц.
(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту 28.12.2023 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту) Метою роботи є вибір параметрів системи акумулювання електричної енергії на основі гідроакумулюючої установки із замкнутим циклом використання води та дослідження режимів її роботи шляхом моделювання. Завдання роботи: провести порівняльний аналіз сучасних технологій акумулювання електричної енергії та можливості їх використання для накопичення та зниження нерівномірності вироблення енергії від відновлюваних джерел; удосконалити математичну модель комбінованої системи акумулювання електричної енергії на основі гідроакумулюючої установки з гідротараном та живленням електричних насосів від фотоелектричних батарей за умови замкнутої циркуляції води; розробити комп'ютерну імітаційну модель системи акумулювання та її складових елементів; виконати моделювання роботи системи акумулювання з визначенням енергетичних показників елементів та аналізом ефективності роботи системи.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>к.т.н, доц. Савеленко І.В.</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вступ</i>	<i>10.10.2023 р.</i>	
2	<i>Аналітичний огляд стану технологій акумулювання електричної енергії від відновлюваних джерел</i>	<i>13.10.2023 р.</i>	
3	<i>Розробка математичної моделі системи акумулювання електричної енергії на основі гідроакumuлюючої установки</i>	<i>25.10.2023 р.</i>	
4	<i>Комп'ютерне імітаційне моделювання роботи системи акумулювання електричної енергії на основі гідроакumuлюючої установки</i>	<i>15.11.2023 р.</i>	
5	<i>Охорона праці</i>	<i>30.11.2023 р.</i>	
6	<i>Загальні висновки</i>	<i>07.12.2023 р.</i>	
7	<i>Оформлення пояснювальної записки КР</i>	<i>11.12.2023 р.</i>	
8	<i>Оформлення презентаційної частини КР</i>	<i>15.12.2023 р.</i>	

Дата видачі завдання

«___» _____ 2023 р.

Підпис керівника _____

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 2023 р.

Підпис здобувача _____

АНОТАЦІЯ

Ключар А.Д. Система акумулювання електричної енергії на основі гідроакумулюючої установки.

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». – Центральноукраїнський національний технічний університет. – м. Кропивницький, 2023р.

Метою роботи є вибір параметрів системи акумулювання електричної енергії на основі гідроакумулюючої установки із замкнутим циклом використання води та дослідження режимів її роботи шляхом моделювання.

Виконаний аналіз перспектив розвитку технологій накопичення електроенергії, зокрема гідроакумулювання, у поєднанні з відновлюваними джерелами. Відзначено перспективність розвитку комбінованих систем з гідроакумулюванням енергії відновлюваних джерел в Україні.

Запропоновані та удосконалені імітаційні моделі окремих компонентів та системи керування для дослідження режимів роботи системи акумулювання електроенергії шляхом застосування гідроакумулюючої установки. Зокрема удосконалено імітаційні моделі споживача електроенергії, фотоелектричної станції, гідротурбіни з генератором, насосної станції, гідравлічного тарана, водного балансу резервуарів, системи керування рівнями води.

Проведене комп'ютерне імітаційне моделювання роботи системи акумулювання та визначені енергетичні показники її складових елементів, проведений аналіз ефективності роботи системи.

Ключові слова: акумулювання електроенергії, відновлювані джерела енергії, гідроакумулююча електростанція, гідравлічний таран, фотоелектрична станція, комп'ютерне імітаційне моделювання

THE SUMMARY

Kliuchar A. Electricity storage system based on a hydroelectric storage unit.

Specialty 141 – "Electric power, electrical engineering and electromechanics". – "Electrical power consumption systems". – Central Ukrainian National Technical University. – Kropyvnytskyi, 2023

The purpose of the work is to select the parameters of the electric energy storage system based on a hydroaccumulating installation with a closed cycle of water use and to study the modes of its operation by modeling.

An analysis of the prospects for the development of electricity storage technologies, in particular hydroaccumulation, in combination with renewable sources has been carried out. The perspective of the development of combined systems with hydroaccumulation of energy from renewable sources in Ukraine was noted.

Proposed and improved simulation models of individual components and the control system for researching the operation modes of the electric energy storage system by using a hydraulic storage unit. In particular, simulation models of an electricity consumer, a photovoltaic plant, a hydro turbine with a generator, a pumping station, a hydraulic ram, water balance in tanks, and a water level control system have been improved.

A computer simulation of the operation of the storage system was carried out and the energy indicators of its constituent elements were determined, an analysis of the efficiency of the system was carried out.

Key words: electricity storage, renewable energy sources, hydroaccumulating power plant, hydraulic ram, photovoltaic plant, computer simulation modeling

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	4
ЗМІСТ	6
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СТАНУ ТЕХНОЛОГІЙ АКУМУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ВІД ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ	11
1.1 Аналітичний огляд сучасних технологій для акумулювання електроенергії.....	11
1.2 Гідроакумулюючі електростанції як найбільш перспективний напрямок акумулювання електричної енергії.....	18
1.3 Комбінована гідроакумулююча установка з живленням від фотоелектричної станції.....	21
1.4 Висновки до першого розділу.....	22
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ АКУМУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ ГІДРОАКУМУЛЮЮЧОЇ УСТАНОВКИ	24
2.1 Структурна схема системи акумулювання електричної енергії на основі гідроакумулюючої установки автономного типу.....	24
2.2 Блок моделювання споживачів електричної енергії.....	26
2.3 Блок моделювання фотоелектричної станції	28
2.4 Моделювання роботи резервуарів води	30
2.5 Блок моделювання турбіни з генератором.....	33
2.6 Моделювання роботи гідронасоса	37
2.7 Блок моделювання насосної станції.....	48
2.8 Висновки до другого розділу	52

РОЗДІЛ 3 КОМП'ЮТЕРНЕ ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ АКУМУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ ГІДРОАКУМУЛЮЮЧОЇ УСТАНОВКИ	56
3.1 Моделювання та аналіз добових режимів роботи системи акумулювання на основі гідроакумулюючої установки	56
3.2 Моделювання та аналіз річних режимів роботи системи акумулювання на основі гідроакумулюючої установки	64
3.3 Висновки до третього розділу.....	73
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ	77
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	83
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	85

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ВДЕ – відновлювані джерела енергії

ВР – верхній резервуар

ГАЕС – гідроакумуюча електростанція

ККД – коефіцієнт корисної дії

НР – нижній резервуар

ВСТУП

Актуальність теми. В сучасній сонячній та вітровій енергетиці гостро постає питання акумулювання та зберігання електроенергії через стохастичність та мінливість її надходження протягом доби. Ефективне та надійне електропостачання можна забезпечити за допомогою систем акумулювання, що перетворюють енергію відновлюваних джерел у потенційну енергію води шляхом її підйому електронасосами у резервуар-акумулятор з подальшим використанням за потребою. Застосування саме гідроакumuлюючих станцій обумовлено порівняно невисокою вартістю цієї технології та прийнятним рівнем ризиків за наявності відповідних топографічних та гідрологічних умов.

Мета і задачі дослідження. *Метою роботи є вибір параметрів системи акумулювання електричної енергії на основі гідроакumuлюючої установки із замкнутим циклом використання води та дослідження режимів її роботи шляхом моделювання.*

Для досягнення мети в потрібно вирішити наступні задачі:

1. Провести порівняльний аналіз сучасних технологій акумулювання електричної енергії та можливості їх використання для накопичення та зниження нерівномірності вироблення енергії від відновлюваних джерел.
2. Удосконалити математичну модель комбінованої системи акумулювання електричної енергії на основі гідроакumuлюючої установки з гідронасосом та живленням електричних насосів від фотоелектричних батарей за умови замкнутої циркуляції води.
3. Розробити комп'ютерну імітаційну модель системи акумулювання та її складових елементів.
4. Виконати моделювання роботи системи акумулювання з визначенням енергетичних показників елементів та аналізом ефективності роботи системи.

Об'єкт дослідження – процеси отримання електричної енергії із потенційної енергії водного масиву верхнього резервуара гідроакумуючої електростанції.

Предмет дослідження – параметри режиму роботи системи акумулювання електроенергії на основі гідроакумуючої установки, що працює за замкнутим циклом циркуляції води.

Методи дослідження. Під час виконання досліджень були застосовані методи математичного моделювання, метод фізичного аналога, метод комп'ютерного імітаційного моделювання.

Наукова цінність роботи полягає у вдосконаленні моделювання роботи системи акумулювання електричної енергії на основі гідроакумуючої установки із замкнутим типом циркуляції води та отриманні даних про оптимальні режими роботи такої системи в кліматичних умовах України.

Практична цінність роботи полягає в розробленій комп'ютерній імітаційній моделі системи акумулювання електроенергії на основі гідроакумуляційної установки з гідронасосом та живленням електронасосів від фотоелектричної батареї.

Структура роботи: кваліфікаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, переліку посилань. Повний обсяг роботи складає 86 сторінок. Основна частина викладена на 84 сторінках друкованого тексту, містить 31 рисунок та 2 таблиці. Список використаних джерел містить 18 джерел та викладений на 2 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СТАНУ ТЕХНОЛОГІЙ АКУМУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ВІД ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1 Аналітичний огляд сучасних технологій для акумулювання електроенергії

Із зростанням використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) виникає питання накопичення та зберігання виробленої електроенергії через нерівномірність її генерації протягом доби. Ця проблема особливо гостро постає перед невеликими споживачами, які покладаються на відновлювані джерела, зокрема фотоелектричні станції. Одним із можливих рішень є використання гідроакумуючих установок у поєднанні з фотоелектростанціями. Подібні системи базуються на принципі роботи гідроакумуючих електростанцій, котрі витрачають дешеву електроенергію для підняття води вгору, акумулюючи потенціальну енергію, а потім використовують її для вироблення електроенергії в періоди пікового споживання. Така технологія дозволяє оптимізувати використання енергії від відновлюваних джерел та підвищити надійність енергопостачання.

Варто зазначити, що подібні гідроакумуючі системи можуть застосовуватися як для індивідуального використання невеликими споживачами, так і в масштабі цілих енергосистем. Наприклад, надлишкова сонячна електроенергія, вироблена протягом дня, може використовуватися для підняття та зберігання води у водосховищах чи штучних басейнах. Це дозволяє розвантажувати традиційні електростанції протягом дня та економити органічне паливо. Вночі ж акумульована потенціальна енергія води може використовуватися гідроелектростанціями для задоволення пікового попиту на електроенергію. Така гібридна схема дозволяє покращити інтеграцію ВДЕ в енергосистему та підвищити її гнучкість.

Використання мікро гідроакумуючих установок дійсно може значно підвищити ефективність накопичення енергії від відновлюваних джерел в індивідуальних господарствах та невеликих мережах.

Оскільки існує гостра потреба в надійних та економічно ефективних системах акумулювання великих обсягів енергії, порівняння різних технологій накопичення за ключовими параметрами, такими як вартість, коефіцієнт корисної дії (ККД), ресурс роботи тощо, є вкрай важливим.

Наразі розроблено чимало різних технологій накопичення енергії, серед яких: гідроакумуючі установки, електрохімічні акумулятори, маховики, системи стисненого повітря, теплові накопичувачі тощо. Кожна з цих технологій має свої переваги та недоліки, оптимальну сферу застосування.

Порівняння різних видів накопичувачів за вартістю, надійністю, ефективністю та іншими ключовими характеристиками дозволяє обрати найбільш підходящий варіант для конкретних потреб та умов. Інтеграція різних типів накопичувачів в єдині гібридні системи також може суттєво підвищити ефективність акумулювання енергії.

Електролітичні конденсатори мають найвищий ККД серед накопичувачів енергії, проте їхня вартість за одиницю накопиченої енергії є досить значною. Вони також можуть швидко заряджатися та розряджатися. Суперконденсатори, у свою чергу, здатні накопичувати значно більше енергії на одиницю об'єму порівняно зі звичайними конденсаторами (до декількох тисяч фарад ємності). Вони також демонструють швидкі темпи зарядки/розрядки. Разом з тим, суперконденсатори поступаються акумуляторам за питомою ємністю, схильні до саморозряду і вимагають захисту від перенапруг. Їхня вартість вища за звичайні конденсатори, але нижча за акумулятори. Таким чином електрохімічні конденсатори мають низку переваг для швидкого накопичення електроенергії, проте обмежені за ємністю. Вони краще підходять для частих циклів зарядки/розрядки невеликих обсягів енергії.

Акумуляторні батареї є одним з найпоширеніших типів накопичувачів електроенергії завдяки оптимальному поєднанню характеристик для багатьох застосувань. Зокрема, свинцево-кислотні акумулятори тривалий час домінували на ринку завдяки низькій вартості, хоча й поступаються за питомими характеристиками. Натомість літій-іонні та літій-полімерні акумулятори демонструють вищу питому ємність, ККД, енергетичну щільність та кількість циклів перезарядки. Втім, сучасні акумулятори все ще мають певні обмеження, зокрема обмежену кількість циклів заряду/розряду (1-10 тисяч), схильність до деградації, а також високу вразливість до перезаряду чи розряду. Окрім цього, акумулятори потребують систем контролю та захисту для безпечної та надійної експлуатації. Їх вартість також залишається відносно високою в порівнянні з деякими іншими технологіями зберігання енергії. Незважаючи на помітний прогрес останніми роками, акумулятори як накопичувачі енергії все ще мають певні обмеження, які потрібно враховувати при проектуванні систем накопичення.

Системи зберігання енергії на основі насосно-акумулюючих гідроелектростанцій використовують гравітаційний потенціал води, щоб конвертувати електричну енергію в потенціальну енергію. Вони складаються з двох водоймищ розташованих на різних висотних позначках, між якими циркулює вода. Коли є надлишок електроенергії в мережі, вода переміщується насосами з нижнього резервуара у верхній, акумулюючи потенціальну енергію. У періоди підвищеного попиту на електрику, вода скидається у нижній резервуар через гідротурбіни, які обертають генератор для вироблення електроенергії. Однією з головних переваг таких накопичувачів енергії є їх здатність миттєво реагувати на пікові навантаження в енергосистемі. Їх швидкісні характеристики роблять такі станції ідеально підходящими для стабілізації мереж, до яких підключені переривчасті джерела відновлюваної енергії, зокрема вітрові та сонячні електростанції. Крім того, обладнання станцій має надійний та довговічний термін експлуатації, здатний функціонувати десятиліттями з мінімальним технічним обслуговуванням.

Водночас, головним недоліком таких систем зберігання енергії є висока вартість будівництва водоймищ, насосного та енергогенеруючого обладнання. А тому, незважаючи на всі технічні переваги, впровадження насосних гідроакumuлюючих станцій часто гальмується внаслідок значних капіталовкладень, необхідних на стадії будівництва.

Основним недоліком великих гідроакumuлюючих станцій є специфічні вимоги до місцевості – як за географічною висотністю, так і наявністю водойм. Тому відповідні ділянки для будівництва, у більшості випадків, знаходяться в горбистих чи гірських районах з унікальними ландшафтами. Виникають також питання соціального та екологічного характеру, які часто гальмують реалізацію таких проектів.

В умовах України постає питання альтернативних рішень для накопичення електроенергії. Зокрема, перспективним є застосування автономних гідроакumuлюючих станцій у парі з фотоелектричними станціями. Такі комбіновані системи дозволяють накопичувати надлишки електроенергії вдень та використовувати їх в нічний час для задоволення побутового попиту на електрику.

Автономні гідроакumuлюючі електростанції у парі з фотоелектричними станціями потужністю 0,1-100 кВт мають низку переваг, а саме:

- низькі питомі капіталовкладення порівняно з великими ГАЕС;
- не потребують наявності великих природних озер чи водоймищ;
- менший вплив на навколишнє середовище відносно інших джерел енергії. Це дозволяє суттєво зменшити площі водних басейнів і в багатьох випадках використовувати штучні наземні резервуари швидкого зведення. Такий підхід значно знижує екологічне навантаження на природу.

Зазначені характеристики роблять невеликі автономні ГАЕС привабливою альтернативою для накопичення енергії, особливо в поєднанні з відновлюваними джерелами, такими як сонячні батареї.

Більшість сучасних досліджень в галузі енергозберігаючих систем зосереджені на продуктивності, масштабованості та функціональності різних

технологій зберігання енергії. Детальні технічні огляди фокусуються на енергоємності систем, їх інтеграції в розподільчі мережі та визначенні оптимальної потужності. Вони демонструють значний технологічний прогрес і потенціал щодо оптимізації розміщення накопичувачів енергії в енергосистемах. Такі огляди є корисними для глибшого розуміння технічних показників та наявних обмежень різних технологій зберігання електроенергії.

Комбіновані системи з гідроакumuлюючими та фотоелектричними станціями також є перспективним напрямком для подальших наукових досліджень та практичного застосування.

Із зростанням використання відновлюваних джерел енергії, виникає потреба в дослідженнях економічних аспектів технологій зберігання електроенергії. Такі дослідження необхідні для визначення доцільності впровадження систем накопичення енергії та підвищення ефективності функціонування непостійних поновлюваних генеруючих потужностей. Комплексний аналіз обраних технологій з урахуванням різних чинників - прибутковості, технічних характеристик та екологічного впливу, є цінним доповненням до існуючих досліджень систем акумулювання електроенергії.

У даній роботі також проаналізовано перспективи розгортання потужностей для зберігання електроенергії в контексті зростання частки відновлюваної генерації в енергосистемах.

Станом на 2021 рік, у світовій практиці застосовується широкий спектр технологій для накопичення електроенергії (табл. 1.1): гідроакumuлюючі електростанції (ГАЕС); накопичувачі енергії на стисненому та зрідженому повітрі (НЕСП, НЕРП); енергія маховиків (FESS); літій-іонні акумулятори (Li-ion); свинцево-кислотні (Pb); нікель-кадмієві (Ni-Cd); натрій-сірчані (NaS); ванадієво-відновлювальні (Vrb); інші хімічні та електричні системи.

Їх сукупна потужність складає понад 200 ГВт, що свідчить про зростаючий інтерес до технологій акумулювання електричної енергії.

Відповідно даних бази DOE, станом на 2021 рік традиційні гідроакumuлюючі електростанції (ГАЕС) значно домінують зі 182 ГВт

встановленої потужності (табл. 1.1). Серед інших технологій найбільші обсяги займають електромеханічні та теплоакумуючі системи. Водночас прогнозується, що встановлена потужність усіх накопичувачів енергії (за винятком електромобілів) зросте від 30 ГВт-год у 2020 році до 9000 ГВт-год у 2050 році. Це пов'язано з очікуваним стрімким нарощуванням обсягів відновлюваних джерел енергії.

Таблиця 1.1 – Світова потужність електроакумуючих установок

Технологія	Потужність установок, МВт
Свинцево-вуглецевий акумулятор	0,392
Накопичення енергії в рідкому повітрі	5,350
Накопичення енергії стисненого повітря	8,410
Зберігання водню	20,485
Електрохімічний акумулятор	338,878
Літій-іонний акумулятор	754,610
Термонакопичувач	1869,639
Електромеханічний акумулятор	1923,688
ГАЕС	181910,506

Досягнення таких показників вбачається можливим за умови оптимального вибору технологій та параметрів систем накопичення як з техніко-економічної, так і практичної точок зору.

Параметри встановлення систем акумулювання енергії в електромережах значною мірою залежать від їх технічних характеристик. Зокрема, такі показники як потужність, енергоємність, питома енергоємність, ККД та швидкодія впливають на сфери застосування накопичувачів та оптимальне місце їх розташування в системі. На рис. 1.1 наведено узагальнені значення цих параметрів для різних технологій зберігання електроенергії на основі даних літературних джерел.

Тип накопичення	Потужність, МВт	Об'ємна густина потужності, кВт/м³	Об'ємна густина енергії, кВт*год/м³	Масова густина енергії, кВт*год/м³	ККД, в.о.
ГАЕС	10-5000	-	-	-	0,75-0,85
	-	0,1-0,2	0,2-2	0,2-2	0,70-0,80
		0,5-1,5	0,5-1,5	0,5-1,5	0,70-0,85
		0,01-0,10	0,5-1,3	0,3-1,3	0,65-0,90
	10-1000	-	-	0,1-0,4	0,65-0,80
Стиснене повітря	5-1000	-	-	-	0,70-0,89
	-	0,2-0,6	-	-	0,41-0,75
		0,5-2	3-6	30-60	-
		0,04-10	0,4-20	3-60	0,60-0,90
	50-300	-	-	0,0032-0,0055	0,70-0,73
Li-ion	0-100	-	-	-	0,85-0,90
	-	1 300-10 ⁴	200-400	60-200	0,85-0,98
		1 500-10 ⁴	200-500	75-200	0,90-0,97
		60-800	90-500	30-300	0,70-0,100
	0,1-50			0,08-0,15	0,78-0,88
Pb	0-40	-	-		0,70-90
	-	90-700	50-80	30-45	0,75-0,90
		10-400	50-80	30-50	0,70-0,80
		10-400	25-90	10-50	0,60-0,90
	0,005-10			0,03-0,05	0,75-0,80
Ni-Cd	0-40				0,60-0,65
	-	75-700	15-110	15-45	0,60-0,80
		80-600	60-150	50-75	0,60-0,70
		40-140	15-150	10-80	0,60-0,90
	45			0,03-0,05	0,72
Водневі паливні комірки	0-58,8	-	-	-	0,25-0,58
	-	>500	500-3000 100-370	800-10000 150-250	0,20-0,50 0,75-0,90
	0,1-50	-	-	-	0,35-0,42
Конденсатори	0-0,05	-	-	-	0,60-0,65
	-	>10 ⁵	2-10	0.05-5	0,60-0,70
Супер конденсатори	0-0,03	-	-	-	0,90-0,95
	-	(40-120)·10 ³	10-20	1-15	0,85-0,98
		>10 ⁵	10-30	2,5-15	0,90-0,97
Супер провідні магнітні матеріали	0,1-10				0,95-0,98
	-	2 600	6	-	0,75-0,80
		-	0,2-2,5	0,5-5	0,95-0,97
		300-4 000	0,2-14	0,3-75	0,80-0,99
	0.05-0.25		-	0.002-0.069	0,80-0,95

Рисунок 1.1 – Порівняння технічних характеристик технологій
акумуляції енергії

З наведеного аналізу рис. 1.1 видно, що гідроакумуючі станції та пневмоакумуючі системи здатні забезпечувати значні обсяги потужності (кілька ГВт) протягом декількох хвилин з середнім ККД близько 70%. При цьому термін їх експлуатації може перевищувати 50 років. Механічні маховики і батареї реагують швидше за час менше 1 с, проте мають обмеження за потужністю та енергоємністю (до 100 МВт). Супер конденсатори та магнітні системи здатні забезпечити до 10 МВт (питома потужність до 120 000 кВт/м³), але поки що недостатньо зрілі для широкого застосування в мережах. Перспективною технологією для довготривалого зберігання великих обсягів енергії є водень. Основна проблема – низький ККД (близько 50 %) через сучасні методи конверсії.

1.2 Гідроакумуючі електростанції як найбільш перспективний напрямок акумулювання електричної енергії

Усі технології накопичення електроенергії можна класифікувати за формою енергії, що використовується ними для подальшої генерації електрики. З цієї точки зору виділяють механічні системи накопичення, основою роботи яких є потенційна гравітаційна енергія води (ГАЕС).

Гідроакумуючі системи почали розроблятися на початку XX століття, проте активне спорудження ГАЕС розпочалося після 1945 року. В Європі 80% потужностей цих станцій було введено в експлуатацію у період з 1960 по 1990 роки, в основному в гірських регіонах. Завдяки величезній здатності до акумулювання енергії (182 ГВт встановленої потужності у світі), ГАЕС стали найпоширенішою технологією для зберігання електроенергії. Принцип їх роботи полягає в такому: коли попит високий - енергія виробляється шляхом скидання води з верхнього резервуару в нижній через гідротурбіну, в періоди низького попиту вода перекачується у верхній басейн за допомогою

електроенергії з мережі. Така система дозволяє балансувати попит і пропозицію електроенергії, підтримуючи стабільність мережі.

Аналіз існуючих у світі традиційних ГАЕС, а також гібридних систем на їх основі показує, що існують системи: фотоелектричні + гідроакумуючі, вітрові + гідроакумуючі, вітромеханічні + гідроакумуючі. З техніко-економічної точки зору, ГАЕС є оптимальним рішенням для автономних мереж та накопичення енергії у масштабі мереж. Проте головним стримувальним фактором є географічні обмеження розташування ГАЕС. Тому активно розвиваються технології накопичення води в умовах невеликих перепадів висот.

В останні роки спостерігається підвищений інтерес до ГАЕС завдяки їх мінімальній інерційності, гнучкості та можливості динамічного регулювання мереж. Деякі країни вбачають у розвитку ГАЕС основний шлях досягнення цільової частки відновлюваних джерел енергії. Проте на практиці це ускладняється через обмеженість площадок та особливості ринків електроенергії. Для інвесторів одним з варіантів є перепрофілювання наявних гідровузлів в ГАЕС, що також сприятиме суспільному добробуту.

Класична міні-ГАЕС складається з двох резервуарів з водою - верхнього та нижнього б'єфу, розташованих на відстані 7-10 м по вертикалі. Вдень, коли є надлишок сонячної електроенергії, насосна станція перекачує воду з нижнього басейну у верхній (відбувається заряд системи). В нічний час вода з верхнього резервуару скидається в нижній через гідротурбіну, обертаючи ротор синхронного генератора, який розміщений поблизу споживача. Так виробляється електроенергія для потреб об'єкту (ферми, парника тощо) в темний час доби (розряд системи).

Детальніше принцип роботи запропонованої міні-ГАЕС розглянуто в наступних розділах даної роботи.

Отже, надлишки виробленої сонячної електростанції вдень використовуються для заряду міні-ГАЕС, яка виконує функцію потужного електронакопичувача. Якщо розглядати живлення приватного будинку, то

відомо, що споживання електроенергії в побуті суттєво змінюється протягом доби. Тому акумульована вдень у міні-ГАЕС енергія може використовуватися для забезпечення нічного попиту на електрику в приватному секторі.

Розглянемо режим роботи мікро-ГАЕС при живленні побутового споживача. Вночі, коли люди сплять, спостерігається мінімальне енергоспоживання. Вранці, коли люди починають збиратися на роботу, використовуючи побутову техніку, відбувається зростання навантаження. Це так званий «ранковий пік» між 7:00 та 10:00.

Він характеризується істотним збільшенням попиту на електроенергію в побутовому секторі. Саме для покриття таких «піків» і може використовуватися акумульована в мікро-ГАЕС енергія.

Після ранкового піку споживання електроенергії дещо знижується і залишається відносно постійним до вечора. Натомість увечері (з 18:00 до 23:00) відбувається стрімке зростання навантаження до максимальних значень - так званий "вечірній максимум". У цей час люди повертаються з роботи та активно використовують побутову техніку та освітлення. Після 23:00 електроспоживання знову знижується. Типовий графік зміни навантаження побутової мережі протягом доби наведено на рис. 1.2.



Рисунок 1.2 – Графік добового навантаження за даними НАК Укренерго

1.3 Комбінована гідроакumuлююча установка з живленням від фотоелектричної станції

Сонячна енергетика стрімко набирає популярності в останні роки. Частка фотоелектричної енергії в загальному енергобалансі зростає, що створює виклики для забезпечення балансу попиту і пропозиції на ринку електроенергії. Протягом 2010-2020 років вартість сонячних панелей впала на 85%, тому домогосподарства активно встановлюють фотоелектричні системи для власних потреб. Однак власне споживання сонячної енергії має свої проблеми. Зокрема, спостерігається високий пік попиту ввечері та надлишок пропозиції вдень, коли генерується максимум сонячної електроенергії.

Використання побутових накопичувачів енергії, які зберігають надлишкову електроенергію з сонячних панелей вдень, а віддають її в мережу ввечері, може вирішити проблему дисбалансу. Зниження вартості технологій акумуляторів робить їх застосування економічно вигідним для домогосподарств. За прогнозами Міжнародного енергетичного агентства, до 2030 року частка накопичувачів енергії в загальній потужності відновлюваних джерел може досягти 15%, тому інтеграція накопичувачів енергії в сонячні електростанції сприятиме стабілізації мережі та забезпечить взаємовигідне використання сонячної енергії як домогосподарствами, так і операторами систем розподілу.

Стохастичність вітрової та сонячної генерації також створює проблеми в енергосистемі. ГАЕС можуть виступати резервом для згладжування коливань і забезпечення пікових навантажень. Визначення оптимального розміру накопичувальних потужностей є важливим питанням. Згідно досліджень, найбільш економічно ефективними є хімічні акумулятори, за винятком систем накопичення тепла.

Інтеграція накопичувачів дозволяє подолати проблему високої вартості проектів відновлюваної енергетики. Збільшення частки непередбачуваних ВДЕ потребує розвитку гнучких технологій на зразок накопичення енергії.

Отже, поєднання відновлюваних джерел та накопичувачів є перспективним напрямком розвитку енергосистеми.

1.4 Висновки до першого розділу

1. Встановлено, що за прогнозами, встановлена потужність накопичувачів збільшиться в 300 разів з 30 ГВт-год у 2020 році до 9000 ГВт-год у 2050 році. Це дійсно колосальне зростання, яке свідчить про те, що накопичення енергії стане ключовим елементом майбутніх енергосистем з великою часткою відновлюваних джерел. Таке масштабне нарощування потужностей накопичувачів необхідне для забезпечення гнучкості системи та надійного постачання електроенергії за умови зростання частки сонячної та вітрової генерації. Отже, технології накопичення енергії матимуть ключове значення у процесі переходу до чистої енергетики.

2. Проведений аналіз основних технологій акумулювання електроенергії за показниками потужності, об'ємної густини енергії, масової густини енергії, коефіцієнта корисної дії, часу реакції на електромагнітні зміни та терміну життя проєкту. Визначено, що ГАЕС станом на сьогодні є найбільш зручною технологією акумулювання енергії відновлюваних джерел енергії зважаючи на відносно високий ККД (до 85%), потужність установок до 5ГВт, більш ніж достатнім терміном служби (50-100 років), швидкістю реакції до кількох секунд. А менша об'ємна густина енергії (1 кВт год / м³ у ГАЕС проти 300 кВт·год/м³ у літій-іонних акумуляторів) не стає на заваді використання ГАЕС, адже вони виграють внаслідок своєї простоти та питомої вартості капіталовкладень.

3. Використання ГАЕС у комбінації з вітровими та сонячними електростанціями дає значні переваги: підвищення рентабельності вітрових та сонячних проєктів завдяки можливості накопичення надлишкової енергії та подальшого її використання; згладжування графіка генерації за рахунок компенсації нестабільності вітру і Сонця, що полегшує роботу мережі;

створення автономних систем на основі ВДЕ і ГАЕС без необхідності підключення до зовнішньої мережі, причому такі системи придатні для віддалених об'єктів. Таким чином поєднання гідроакумулювання з вітро- та сонячною генерацією є взаємовигідним та перспективним напрямком розвитку відновлюваної енергетики.

4. Проведений аналіз графіка споживання потужності за даними НАК Укренерго показує наявність ранкового та вечірнього піків навантаження, причому нічне зниження менше денного через вплив споживання промисловості. Для приватних домогосподарств характерне приблизно рівномірне споживання вдень та вночі, а пікові навантаження вранці та ввечері сягають 200-300% середньодобового рівня. Ці особливості графіка навантаження вказують на потенціал використання ГАЕС для покриття вечірніх піків за рахунок накопичення енергії у години надлишку від ВДЕ. Такі гібридні системи дозволять підвищити загальну ефективність енергосистеми України.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ АКУМУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ ГІДРОАКУМУЛЮЮЧОЇ УСТАНОВКИ

2.1 Структурна схема системи акумулювання електричної енергії на основі гідроакumuлюючої установки автономного типу

Система акумулювання електричної енергії на основі гідроакumuлюючої установки автономного типу включає кілька блоків, а її структурна схема приведена на рис. 2.1.

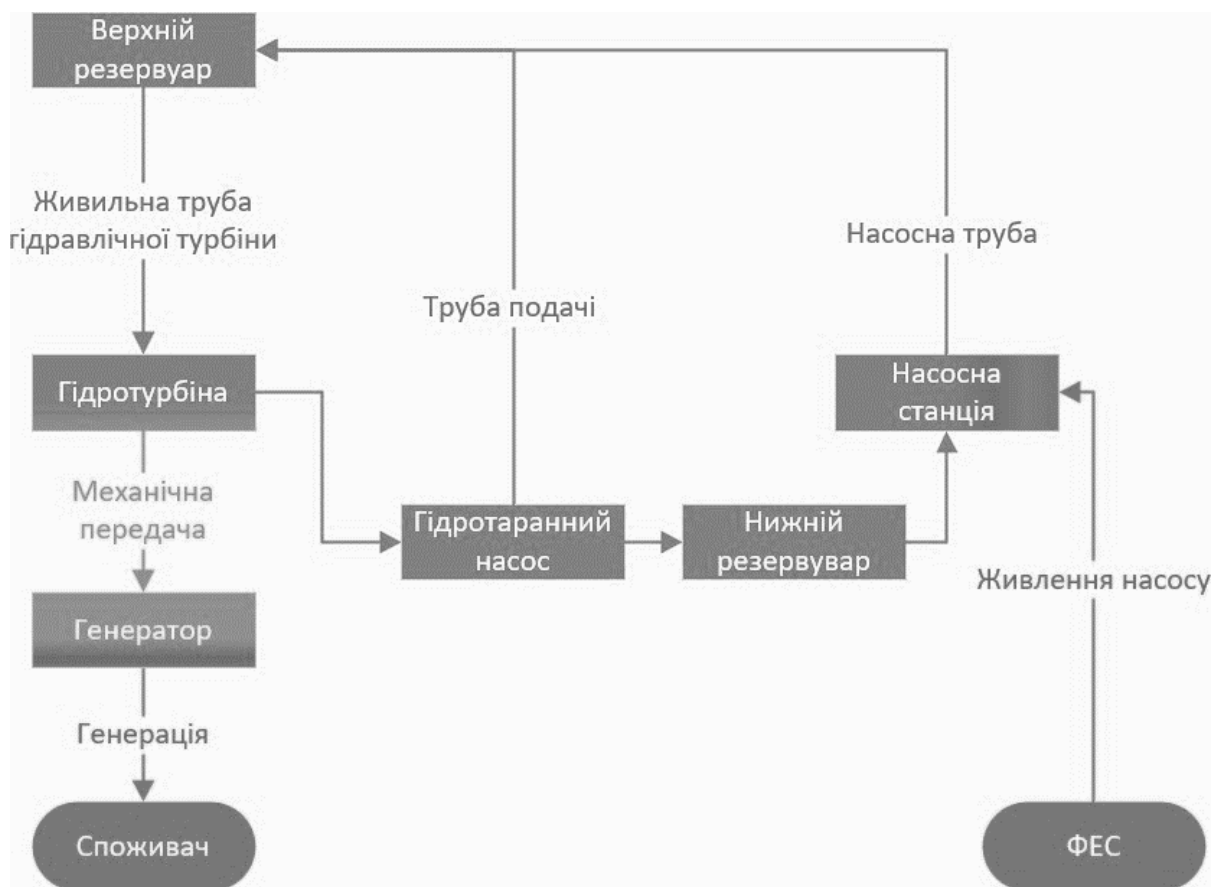


Рисунок 2.1 – Структурна схема системи акумулювання електричної енергії на основі гідроакumuлюючої установки автономного типу

Верхній резервуар призначений для зберігання води на певній висоті, накопичуючи її потенційну енергію. До нього вода подається за допомогою насосної станції та гідронасоса по трубопроводах.

З верхнього резервуара вода надходить живильною трубою до гідротурбіни, обертаючи її лопаті та ротор під'єданого електричного генератора, який виробляє електроенергію. Ця енергія використовується для живлення електроспоживачів.

Після проходження через турбіну, потік води надходить до гідронасоса. Він перетворює кінетичну енергію води на механічну, обертаючи лопаті та турбіну гідронасоса. Остання через вал приводить в рух насос, який подає частину води по трубі зворотно у верхній резервуар. Решта води скидається у нижній резервуар для подальшого використання.

Додатково встановлена фотоелектрична станція – сонячні батареї з інверторами, що живлять насосну станцію електроенергією. Це дозволяє підтримувати циклічний рух води між нижнім та верхнім резервуарами.

Для моделювання роботи автономної гідроакумуючої електростанції використовується розроблена комплексна імітаційна модель, що складається з декількох взаємопов'язаних частин:

1. блок моделювання інсоляції, що генерує дані про поточну сонячну радіацію в кВт/м², що падає на фотоелектричні панелі;
2. блок моделювання фотоелектричної станції, що розраховує кількість електроенергії, яка виробляється сонячними батареями на основі даних про інсоляцію;
3. блок моделювання насосної станції – визначає об'єм води, що буде перекачано з нижнього резервуару у верхній з урахуванням генерації ФЕС та поточного рівня води у верхньому резервуарі;
4. блок моделювання турбіни з генератором – розраховує витрати води через турбіну та вироблення електроенергії на основі даних про поточне споживання;

5. блок моделювання споживачів електричної енергії - генерує дані про зміну електричної потужності, що витрачається на навантаження;

6. блок моделювання роботи гідронасосу – визначає частину води після турбіни, що буде повернута у верхній резервуар, а решту – скинута у нижній.

Така модель дозволяє відтворити у віртуальному середовищі реальні фізичні процеси в гідроенергетичній системі з урахуванням змін сонячної активності, споживання енергії та об'ємів води.

Запропонована комп'ютерна імітаційна модель створена у середовищі Matlab. Усі зв'язки між блоками відповідають структурній схемі, що зображена на рис. 2.1. Виконаємо детальний опис складових блоків комп'ютерної імітаційної моделі.

2.2 Блок моделювання споживачів електричної енергії

Блок моделювання споживачів електричної енергії приведений на рис. 2.2 і може працювати у двох режимах.

Перший режим – за заданим графіком споживання. Тобто на основі попередньо підготовленого профілю зміни електричного навантаження протягом певного проміжку часу.

Другий режим – з використанням випадкових впливів. В цьому режимі задаються статистичні параметри розподілу ймовірностей споживання та флуктуацій навантаження. На їх основі генеруються псевдовипадкові зміни графіку електроспоживання, що імітує реальні умови експлуатації системи зі змінним зовнішнім середовищем.

Така гнучкість дозволяє моделювати різні режими роботи станції - як за типового передбачуваного графіку навантажень, так і з урахуванням випадкових стрибків та коливань попиту на електроенергію.

Базовий графік електроспоживання задається у блоці *Signal Builder*. Цей сигнал *Signal 1* подається на вхід 1 перемикача *Multiport Switch*. Блок *Band-Limited White Noise* генерує випадкові коливання споживання за нормальним

законом розподілу. Їх амплітуда додається до базового графіку та подається на вхід 2 перемикача. Положення перемикача визначається значенням *Constant 4*. Так обирається або фіксований, або випадковий графік споживання. Сигнал споживання P_{cons} порівнюється з потужністю, що генерується гідротурбіною. За допомогою блоку порівняння перевіряється рівень води у верхньому резервуарі. Якщо він нижче критичного, споживач вимикається.

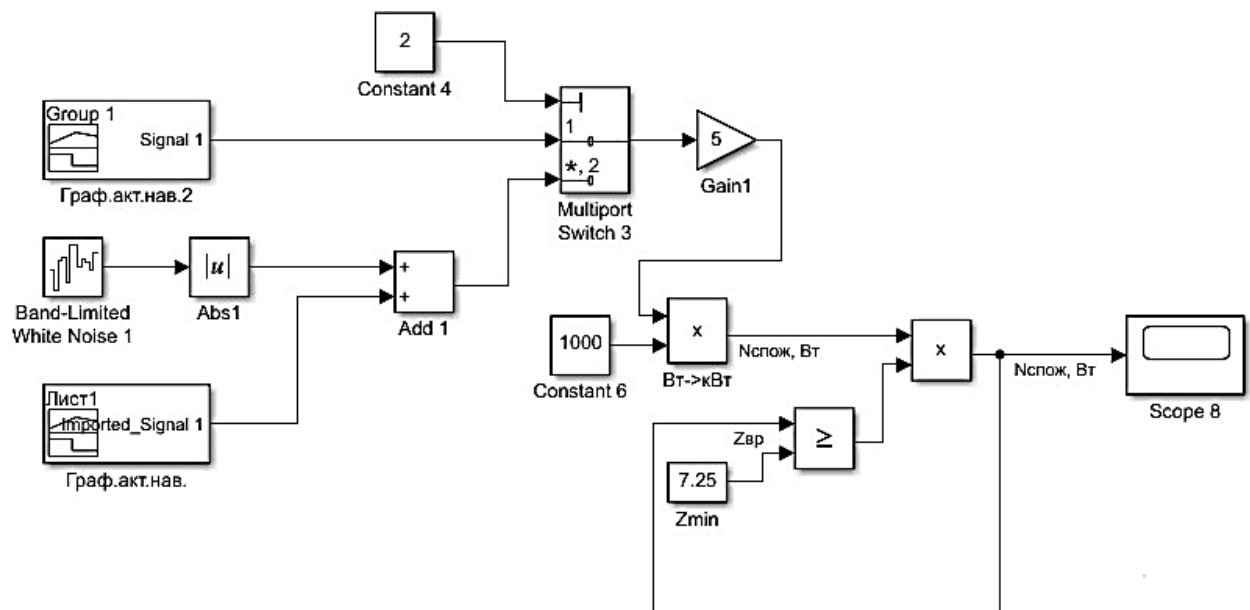


Рисунок 2.2 – Блок моделювання споживачів електричної енергії

Блок моделювання споживачів електричної енергії таким чином генерує сигнал про споживання потужності з урахуванням імовірнісного фактору випадкової зміни електронавантаження. На рис. 2.3 зображено один із прикладів графіку споживання активної потужності з урахуванням нормально розподіленої випадкової зміни електроспоживання автономної гідроакumuлюючої електростанції.

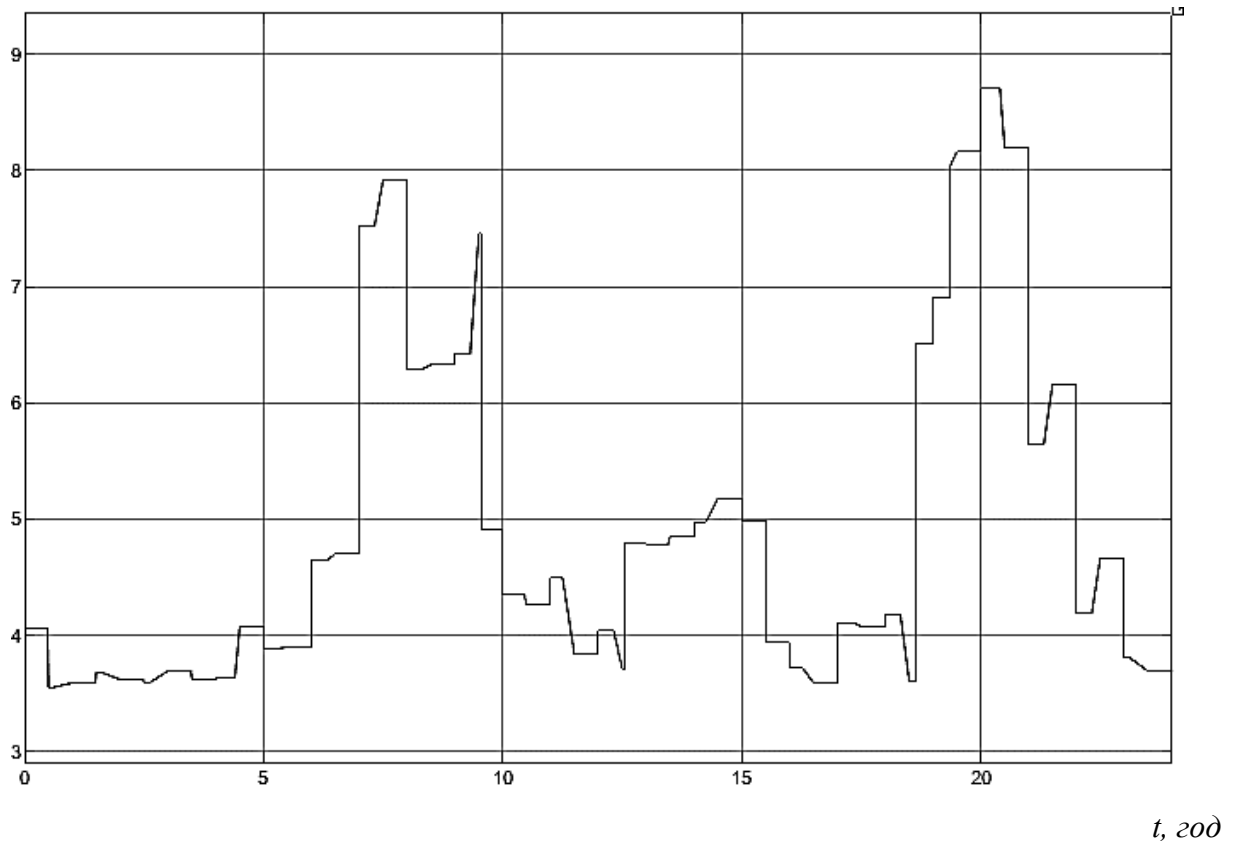


Рисунок 2.3 – Результируючий графік електроспоживання отриманий як сума базового споживання та нормально розподіленої випадкової величини навантаження автономної гідроакумуючої електростанції

2.3 Блок моделювання фотоелектричної станції

З метою моделювання фотоелектричної панелі використовується модель джерела потужності, характеристика якого описується наступним рівнянням:

$$P_{PV}(t) = \eta \cdot S \cdot I(t), \quad (2.1)$$

де $P_{PV}(t)$ – поточна генерована потужність фотопанелей, кВт;

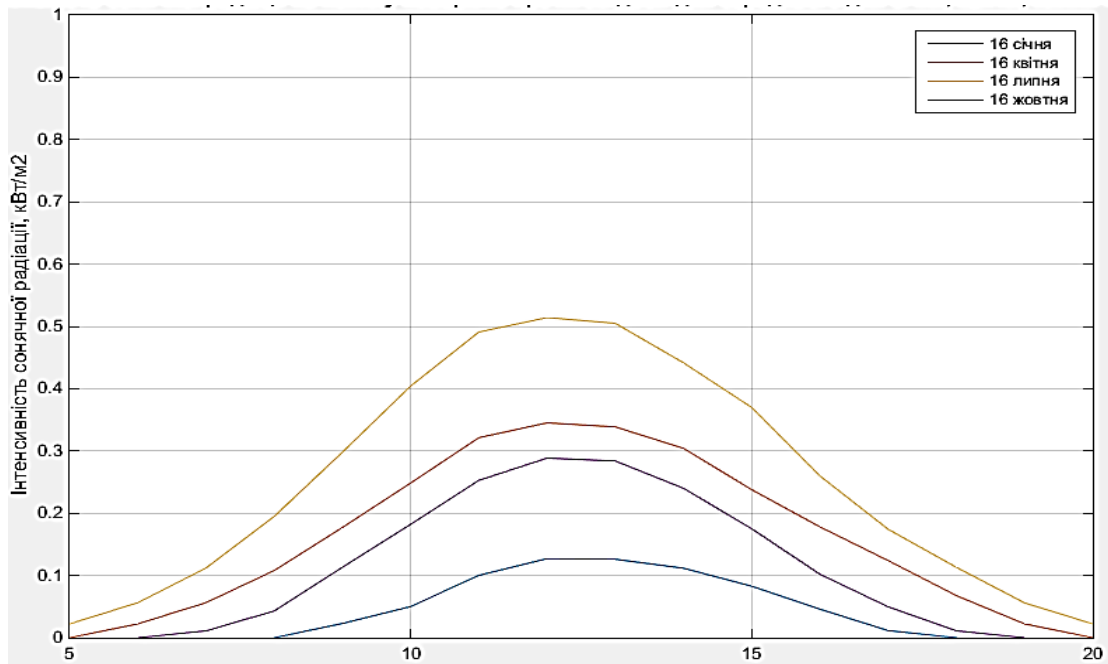
η – коефіцієнт ефективності фотопанелей, в.о.;

S – загальна площа фотосприймаючої поверхні фотопанелей, м²;

$I(t)$ – поточна сумарна (пряма та розсіяна) інсоляція, що надходить на поверхню фотопанелей з урахуванням їх нахилу, кВт / м²;

t – час доби, год.

Для ілюстрації на графіку рис. 2.4 зображено дані стосовно сонячної інсоляції, яка досягає активної поверхні фотоелектричних панелей з урахуванням їх нахилу на протязі доби за результатами усереднення для днів у місяцях січень, квітень, липень і жовтень.



t , год

Рисунок 2.3 – Добові залежності рівня інсоляції сонячного випромінювання

Приймемо для моделювання умови сонячного опромінення на території центральноукраїнського регіону, а саме м. Кропивницький. Географічна широта міста складає $48^{\circ}30'$. Оптимальний кут нахилу визначимо з виразу $48^{\circ}30' \cdot 0,76 + 3,1^{\circ} \approx 40^{\circ}$. Орієнтація фотопанелей передбачена строго на південь, під азимутальним кутом 0° .

Блок моделювання фотоелектричної станції приведений на рис. 2.4. Дані про величину інсоляції $I(t)$ для 4 пір року вводяться у вигляді таблиць Excel. За допомогою стандартного блоку *Signal Builder* ці табличні дані завантажуються в Simulink у вигляді 4 окремих сигналів *Imported_Signal_1...4*. За допомогою перемикача вибирається один з цих сигналів, що відповідає

поточній порі року. Обраний сигнал надходить на блок множення, де множиться на коефіцієнти з виразу 2.1 для розрахунку поточного значення інсоляції I , переводиться блоком підсилення в одиниці вимірювання у ватах, а результат відображається у вигляді графіка сигналу $I(t)$ на блоці *Scope 7*. Таким чином на основі вхідних даних у вигляді таблиць модель дозволяє розрахувати та відобразити значення інсоляції, що змінюється протягом року.

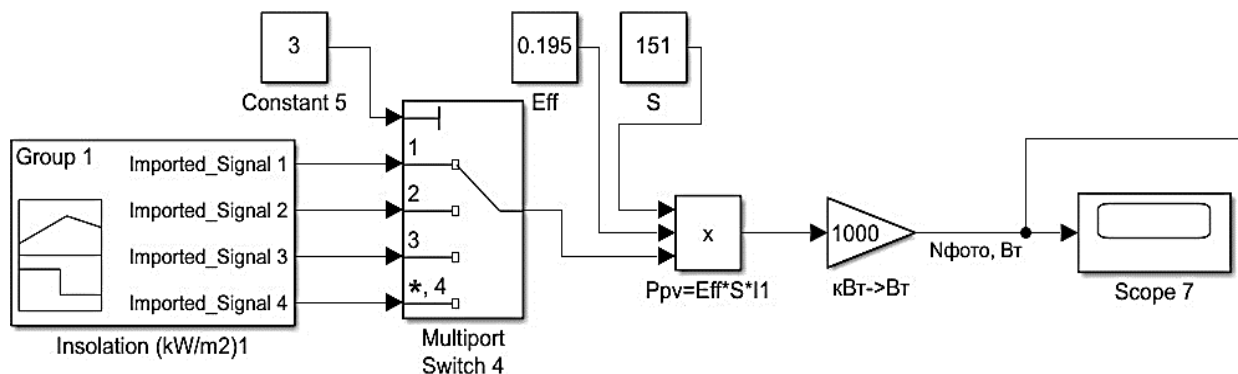


Рисунок 2.4 – Блок моделювання фотоелектричної станції

В процесі моделювання було прийнято ефективність фотоелектричних панелей на рівні 19,5 %, а їх площу рівною 151 м². Значення змінної блоку *Constant 5* дає можливість виконувати моделювання роботи системи за умови зміни пори року.

2.4 Моделювання роботи резервуарів води

Для моделювання сховищ води найважливішим параметром є рівень води на момент початку моделювання. Розрахунок поточного рівня водосховищ проводиться за наступним виразом:

$$V(t) = V_{\text{поч}} \pm \int_{t_0}^{t_1} Q_{\text{вс}} dt, \quad (2.2)$$

де $V_{\text{поч}}$ – об’єм водосховища у початковий момент часу, м^3 ;

$Q_{\text{вб}}$ – витрата води для акумуляційного бака, $\text{м}^3 / \text{с}$ (знак «+» відповідає закачуванню води насосною станцією в сховище, а знак «-» відповідає витраті води на турбіну).

Блоки для моделювання роботи верхнього та нижнього водосховищ приведені на рис. 2.5.

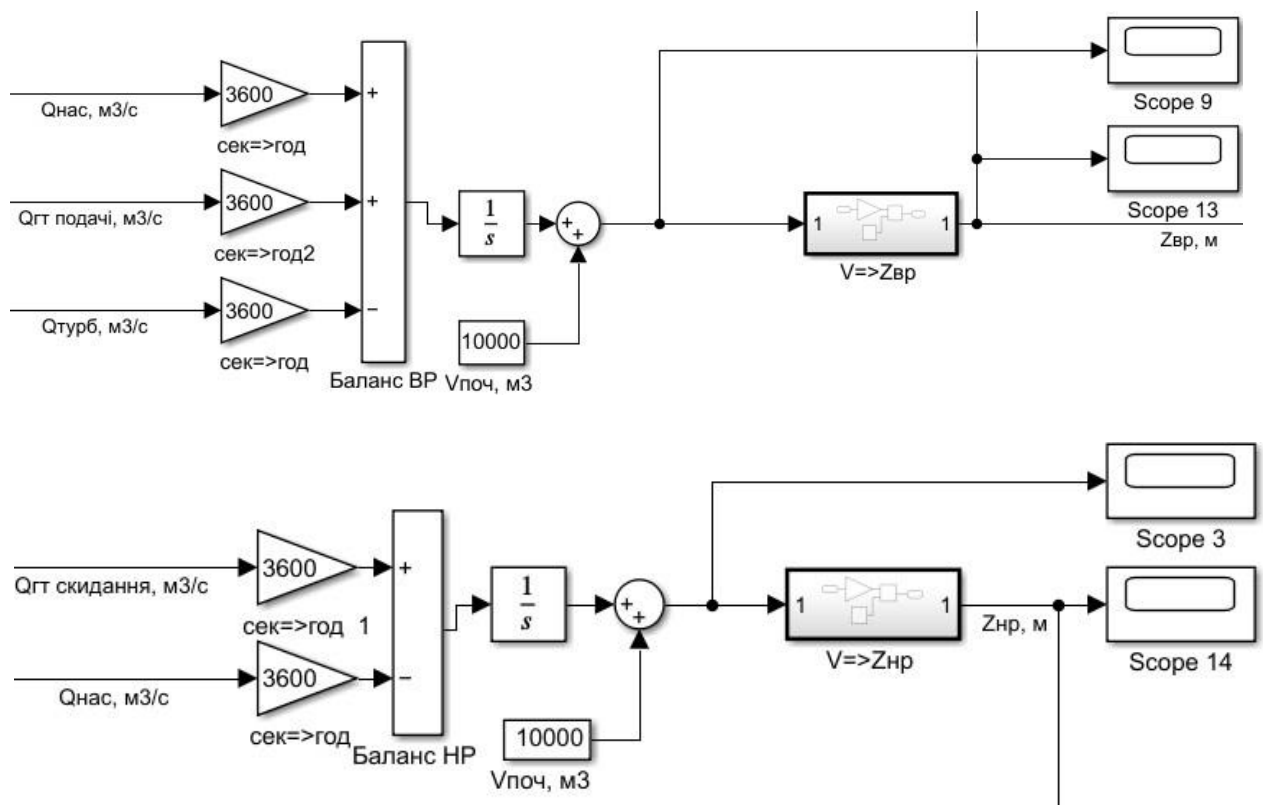


Рисунок 2.4 – Блоки моделювання верхнього (а) та нижнього (б) водосховищ

Для моделювання верхнього резервуару гідроакумуючої станції необхідно скласти рівняння водного балансу, яке враховує приплив і відплив води, розрахувати поточний рівень води H в резервуарі за його морфометричною кривою. За базову відмітку $Z_{\text{поч}}$ приймемо рівень 7м, а зміну рівня води на одиницю об’єму приймемо рівною $0,05 \text{ м}/1000 \text{ м}^3$.

Моделювання резервуарів виконується наступним чином. Приплив води в резервуар складається з витрат від насосної станції $Q_{\text{нас}}$ та гідронасоса $Q_{\text{гт.подачі}}$. Витрата з резервуару рівна потоку води через гідравлічну турбіну $Q_{\text{турб}}$. Різниця припливу та відпливу визначає зміну об'єму води в резервуарі за одиницю часу та визначається в блоці додавання *Баланс ВР*, вихідний сигнал по водному небалансу якого піддається інтегруванню за допомогою блоку *integrator 1/s*. Після додавання до цього значення початкового рівня води $V_{\text{поч}}$ отримуємо відомості про поточну динамічну зміну наповнення резервуару. Відповідно з морфометричною характеристикою резервуарів визначається абсолютне значення рівня води, а відповідний блок моделювання приведений на рис. 2.6.

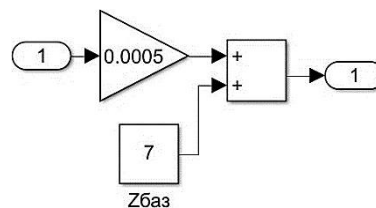


Рисунок 2.6 – Модель блоку обчислення рівня води $Z_{\text{ВР}}$ у верхньому резервуарі за відповідної зміни об'єму води відносно базового рівня $Z_{\text{баз}}$

За аналогічним підходом побудована та працює модель нижнього резервуару гідроакумуючої станції, що і для верхнього, але з урахуванням особливостей водного балансу. Рівняння водного балансу для нижнього резервуару враховує приплив води, який складається зі скидання гідронасосу $Q_{\text{гт.скидання}}$ та витрати води насосною станцією $Q_{\text{нас}}$.

Інтегруючи різницю припливу та відпливу за часом, отримуємо зміну об'єму води в резервуарі. Додаючи її до початкового об'єму, визначаємо поточне значення. За морфометричною кривою знаходимо відповідний рівень води. Отже, динаміка об'єму і рівня в нижньому резервуарі також моделюється з урахуванням балансу води, що надходить і відводиться.

2.5 Блок моделювання турбіни з генератором

Проведемо вибір гідротурбіни та гідроагрегату для моделі, а також параметрів їх роботи. Позначка, на якій буде встановлено обладнання гідротурбіни складає $Z_{ГТ} = 2$ м. Напір, що його створює вода в напірній трубі рівний $H = 5$ м. Необхідна витрата води через турбіну приблизно $2 \text{ м}^3 / \text{с}$. Виходячи з цих даних, обираємо гідротурбіну типу Каплан – найбільш ефективна при невеликих напорах та великих витратах. Для приводу генератора використовується горизонтальний гідроагрегат виробництва Chengdu Forster з характеристиками, що приведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічні дані гідротурбінного пристрою

Показник	Значення
Номінальна потужність гідроагрегату	40-50 кВт
Максимальна витрата води $Q_{\max}$	$1,1 \text{ м}^3 / \text{с}$
Мінімальна витрата води $Q_{\min}$	$0,31 \text{ м}^3 / \text{с}$
Проектне значення напору H	5 м
Мінімальне значення напору води $H_{\min}$	4,5 м
Максимальне значення напору $H_{\max}$	5,2 м

Таким чином, запропоноване устаткування задовольняє умовам експлуатації та вимогам моделі гідротурбіни та генератора.

Механічна потужність на валу гідроагрегату визначається виразом:

$$N_{\text{тр}} = 9,81 \cdot \rho \cdot \eta \cdot Q_{\text{тр}} \cdot H_{\text{тр}}, \quad (2.3)$$

де ρ – густина води, $\text{кг} / \text{м}^3$;

η – коефіцієнт ефективності гідротурбіни, в.о.;

$Q_{\text{тр}}$ – витрата води, $\text{м}^3 / \text{с}$;

$H_{\text{тр}} = (Z_{\text{ВР}} - Z_{\text{ГТ}})$ – гідростатичний напір, м.

Розглянемо детальніше фактори, від яких залежить ефективність гідротурбіни Каплана.

Розміри турбіни. Чим більша турбіна, тим вища її ефективність, оскільки збільшується активна площа захоплення потоку води лопатями. Однак є конструктивні обмеження на максимальний діаметр.

Конструкція лопатей. Профіль лопаті, кут установки, кількість – все це впливає на ефективне використання енергії потоку. Сучасні технології дозволяють оптимізувати ці параметри.

Витрата води. Існує оптимальне співвідношення витрати і напору, за якого ККД турбіни максимальний. Збільшення витрати не завжди підвищує ефективність.

Для конкретної моделі турбіни потрібно комплексно аналізувати всі ці фактори з урахуванням реальних умов експлуатації на гідроелектростанції.

Збільшення витрати води через турбіну Каплана в принципі підвищує її ефективність, оскільки більше води приводить в рух лопаті і виробляє більше механічної енергії.

Втім, існують певні технічні обмеження. Максимальна пропускна здатність турбіни за витратою води обмежена, а якщо перевищити його то можливе пошкодження установки. Виникає збільшення кавітації та ерозії лопатей при великих витратах, що знижує ресурс роботи. Можливе зниження ККД турбіни при відхиленні від оптимального режиму за витратою і напором. Саме тому для кожної конкретної моделі турбіни існує діапазон оптимальних витрат для максимізації ефективності з урахуванням цих обмежень. Його потрібно визначити і дотримуватися.

Щоб дослідити вплив витрати робочого тіла (води) на ефективність конкретної гідротурбіни Каплана потужністю 50 кВт, потрібна додаткова технічна інформація, а саме: детальні технічні характеристики цієї моделі турбіни - її габарити, діаметр робочого колеса, кількість лопатей тощо; креслення та опис конструкції лопатей робочого колеса - їх профілю, кута установки, матеріалів виконання; дані про умови експлуатації на конкретній

гідроелектростанції – величина напору, розрахункові витрати води, режими роботи; графіки або результати випробувань, що показують залежність ККД цієї турбіни від витрат при різних напорах. Лише за умови детального аналізу всіх цих параметрів можна зрозуміти оптимальний режим роботи даної гідротурбіни та зв'язок характеристик з її ефективністю.

Зазначені дані можливо отримати, якщо використати дані універсальних гідромеханічних характеристик. Найближчим аналогом для обраного типу гідроагрегата є фізична модель ПЛ 7/854-Г-46, для якої на рис. 2.7 приведено графік залежності $\eta = f(Q)$.

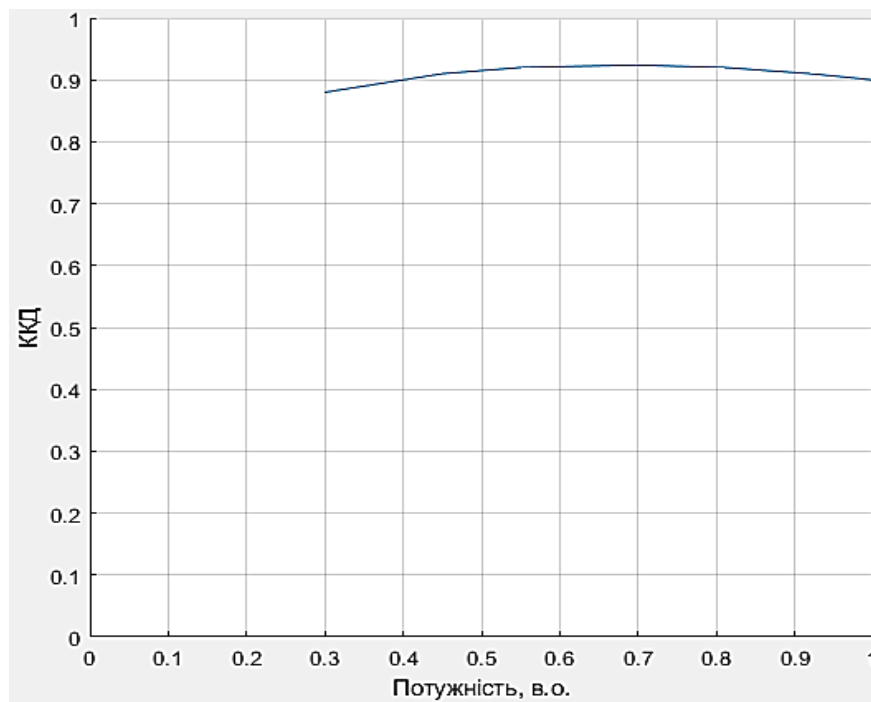


Рисунок 2.7 – Зміна ефективності турбіни ПЛ 7/854-Г-46 від витрати робочого тіла при частоті обертання 2,5 об / с

Залежність ККД від відносної витрати $\eta = f(Q)$ на рис. 2.7 показує, що турбіна починає ефективно працювати при $Q \geq 0.3$, генеруючи потужність. Діапазон оптимальних витрат становить $0.3 \leq Q \leq 1.0$ – саме в ньому ККД максимальний. При $Q < 0.3$ турбіна або зупинена, або працює з незадовільною

ефективністю. Тому в цій зоні слід вважати потужність $N = 0$. При $Q > 1,0$ спостерігається зниження ККД через перевантаження турбіни потоком. Отже, аналіз універсальних характеристик дозволяє правильно налаштувати модель турбіни на різні режими роботи.

Графічну залежність ККД турбіни від відносної витрати, показану на рис. 2.7, можна апроксимувати в моделі за допомогою блоку *Lookup Table*. На вхід подається розрахункове поточне значення відносної витрати $Q_{в.о.}$. На виході блоку *Lookup Table* видається відповідне значення ККД η у відсотках. Витрата через турбіну $Q_{тр}$ однакова як на її вході ($Q_{подачі}$) так і на її виході ($Q_{скидання}$), тобто $Q_{подачі} = Q_{тр} = Q_{скидання}$. Величина витрати робочого тіла через турбіну $Q_{тр}$ розраховується в залежності від потужності споживання та поточного ККД з урахуванням формули (2.3) за наступним виразом:

$$Q_{тр} = \frac{N_{тр}}{9,81 \cdot \rho \cdot \eta \cdot H_{тр}} = \frac{\frac{P_{cons}}{\eta_{ген}}}{9810 \cdot \eta(Q_{тр}) \cdot (Z_{ВР} - Z_{ГТ}) H_{тр}}, \quad (2.4)$$

де P_{cons} – потужність електроспоживачів, які живляться від генератора гідроакумулюючої установки, кВт;

$\eta_{ген}$ – коефіцієнт ефективності електрогенератор, в.о.

Загальний вигляд блоку моделювання гідротурбіни з електрогенератором приведений на рис. 2.8. На вхід подаються дані про потужність споживання електроприймачами та рівень води у верхньому резервуарі. За цими даними обчислюється необхідна витрата води через турбіну $Q_{тр}$, що в динаміці відображається на графіку блоку *Score 12*.

Така модель дозволяє розрахувати витрату води через турбіну залежно від режимів (споживання, напору тощо) та особливостей даного обладнання.

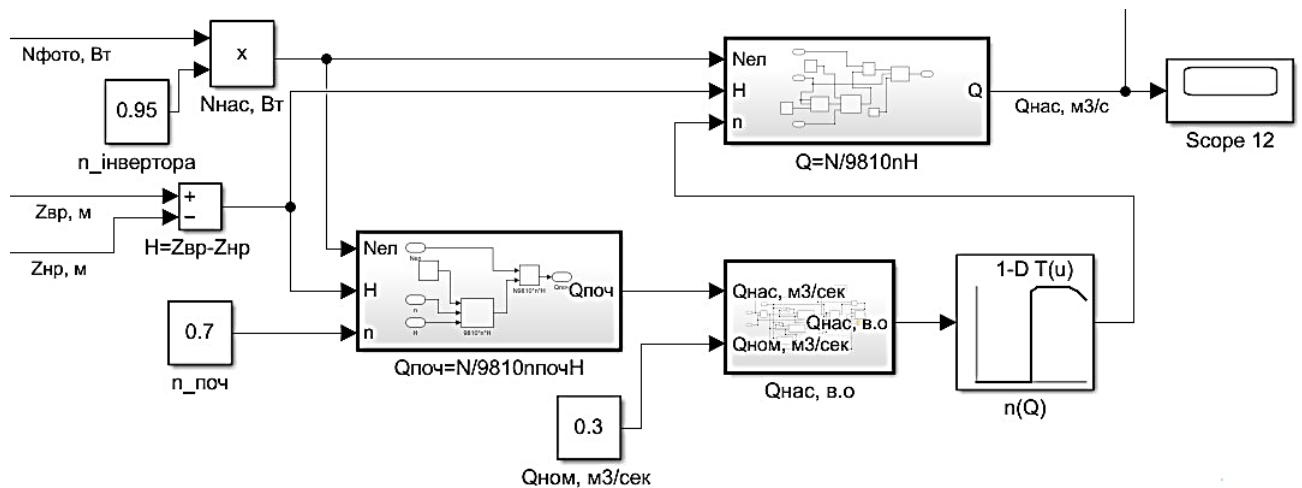


Рисунок 2.8 – Загальний вигляд блоку моделювання турбіни з генератором

Модель виконує розрахунок за ітераційним алгоритмом. Спочатку задається деяке наближене значення ККД турбіни, за яким обчислюється грубе значення витрати. Наступним кроком значення ККД уточнюється блоком *Lookup Table*, і більш точне його значення вже використовується для розрахунку уточного значення витрати.

2.6 Моделювання роботи гідронасоса

У численних регіонах планети сільські поселення та аграрні угіддя розташовані поблизу природних водних джерел. Забезпечення достатньої кількості води для споживання та іригації в таких населених пунктах стало найважливішим завданням для місцевих мешканців. Внаслідок високої вартості передачі електроенергії на значні відстані і складності транспортування через складний ландшафт, багато людей досі не мають простого доступу до електрики чи водогінної води. Їм доводиться постачати воду за допомогою неефективної фізичної праці або тяглової сили тварин, що істотно стримує місцеву економіку і соціальний прогрес. Отже, ефективний водозабір став нагальною потребою, яку необхідно задовольнити.

Гідронасосний насос – це пристрій для підйому води, що працює автономно, без підведення зовнішньої енергії. Він перетворює потенційну енергію великого обсягу води з невеликим напором на високонапірну енергію невеликої кількості рідини. Отже, його можна застосовувати для вирішення проблеми нестачі потужності водопідйому без додаткового джерела живлення. Добре спроектований гідронасос здатний функціонувати десятиліттями, адже його єдиними рухомими частинами є два зворотні клапани. Крім високої довговічності, такий насос також екологічно чистий, адже під час роботи він не споживає викопне паливо чи інші ресурси. Водночас варто пам'ятати, що гідронасос спроможний підняти лише малу частку загального обсягу води, яку він пропускає, на більшу висоту, а решта рідини стікає під дією гравітації. Ця особливість певною мірою обмежила популяризацію та застосування даного типу насосів. Зазвичай гідронасос підходить для ділянок з великими водними ресурсами, перепадом рівня понад 0,5 метра, але з невисокою потрібною потужністю підйому.

Робочий цикл гідронасоса поділяється на декілька окремих фаз відповідно до стану випускного та напірного клапанів. Кожну фазу аналізують окремо для визначення тривалості, витрат подачі і зворотного потоку тощо. На основі цього розраховують продуктивність насоса. Кількість виділених фаз сильно варіюється, оскільки науковці по-різному розуміють та спрощують робочий процес. Хоча принцип дії гідронасоса досить простий, його аналіз, проектування та виготовлення можуть бути складними.

Деякі конструкції мають додаткові клапани для регулювання тиску чи потоку, що ускладнює моделювання. Але подальші дослідження в цій сфері допоможуть покращити ефективність та надійність гідронасосних насосів.

Гідронасос використовує складну систему трубопроводів та резервуарів для створення високого тиску води. Вона складається з декількох основних компонентів, як проілюстровано на рис. 2.9.

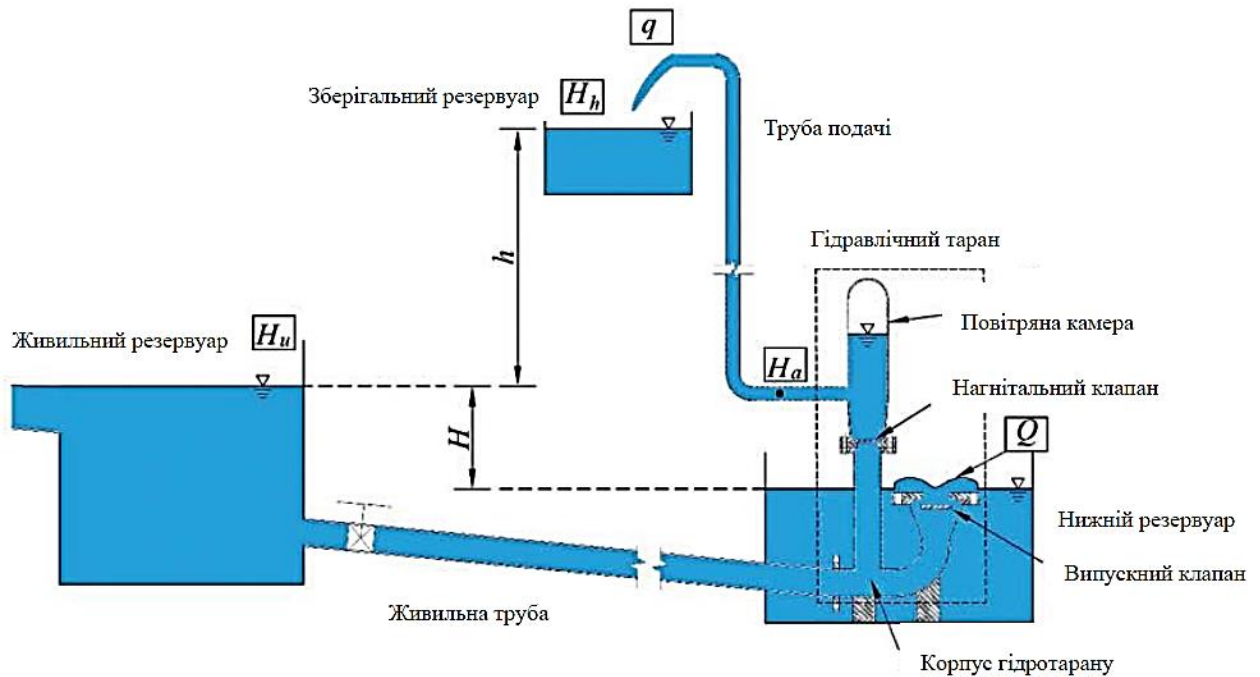


Рисунок 2.9 – Загальний вигляд елементів гідронасосу

В першу чергу це верхній резервуар, який також називають живильним баком або напірним резервуаром. Він містить великий обсяг води, готової для подачі в систему. Ця вода надходить через живильну або напірну трубу. Другий важливий компонент – це тіло гідронасосу з випускним та нагнітальним клапанами і повітряною камерою. Саме цей елемент створює високий тиск, необхідний для ефективної роботи системи та примушує воду рухатися через подаючу трубу (нагнітальна труба) до резервуара зберігання (наливний резервуар або резервуар подачі). Відпрацьована вода для подальшого використання збирається в третьому компоненті – нижньому резервуарі.

Верхній резервуар відіграє функцію акумулятора перекачуваної води. Живильна труба сполучає верхній резервуар та сам гідронасос і виконується із сталі для можливості створення високошвидкісної хвилі, що є запорукою високої енергетчної ефективності та значного напору у нагнітальній трубі, через яку реалізується подача води до резервуару зберігання. В такій системі з гідронасосом виділяють чотири основні робочі параметри: напір живлення

$H = H_u - H_a$, напір подачі $h = H_h - H_u$, витрата відпрацьованої води Q , витрата води в нагнітальній трубі q .

Коефіцієнт енергетичної ефективності гідронасоса обчислюється як відношення енергії на виході (збільшення потенціальної енергії води в нагнітаючому потоці) до енергії на вході (зниження потенціальної енергії стікаючого потоку) та виражається формулою:

$$\eta_{\text{гг}} = \frac{qh}{QH}. \quad (2.5)$$

Зазвичай гідронасосного насоса включає клапан в отворі випуску потоку води (імпульсний, приводний), клапан в отворі нагнітання (насосний клапан), камеру заповнену повітрям та сам корпус. Конструкція типового гідронасоса з вказанням режимів роботи приведено на рис. 2.10.

Розглянемо детально цикл роботи гідронасоса. На першому кроці циклу (рис. 2.10, а) клапан у випускному отворі відкритий внаслідок дії сили тяжіння (або інших сторонніх сил), а клапан у нагнітальному отворі закритий. Внаслідок наявності напору води H між верхнім та нижнім резервуарами рідина буде стікати вниз через живильну трубу та гідравлічний насос. Потік води чинить тиск на сприймаючу поверхню клапана у випускному отворі та закриває його. При досягненні швидкості потоку води певного порогового значення, що перевищує дію сторонніх сил на сприймаючу поверхню зливного клапана (сила тяжіння, сила пружини), клапан у зливному отворі закривається, а гідронасос переходить у стан, що показаний на рис. 2.10, б. Закриття клапану в зливному отворі створює ефект гідроудару в корпусі гідронасосу, при цьому в ньому різко зростає тиск, який при перевищенні тиску у нагнітальному трубопроводі відкриває нагнітальний клапан і установка переходить у стан, що показаний на рис. 2.10, в.

Через відкритий нагнітальний клапан вода частково надходить у повітряну камеру стискаючи повітря з підвищенням його тиску, а частково

прямує через нагнітальний трубопровод у резервуар для зберігання. При цьому тиск у корпусі гідронасоса знижується і з часом нагнітальний клапан закривається, а випускний клапан відкривається. Установка переходить в стан, що продемонстрований на рис. 2.10, г. і цикл роботи повторюється. В період часу при закритому нагнітальному клапані відбувається поступове розширення повітря в повітряній камері з витісненням води в резервуар для зберігання.

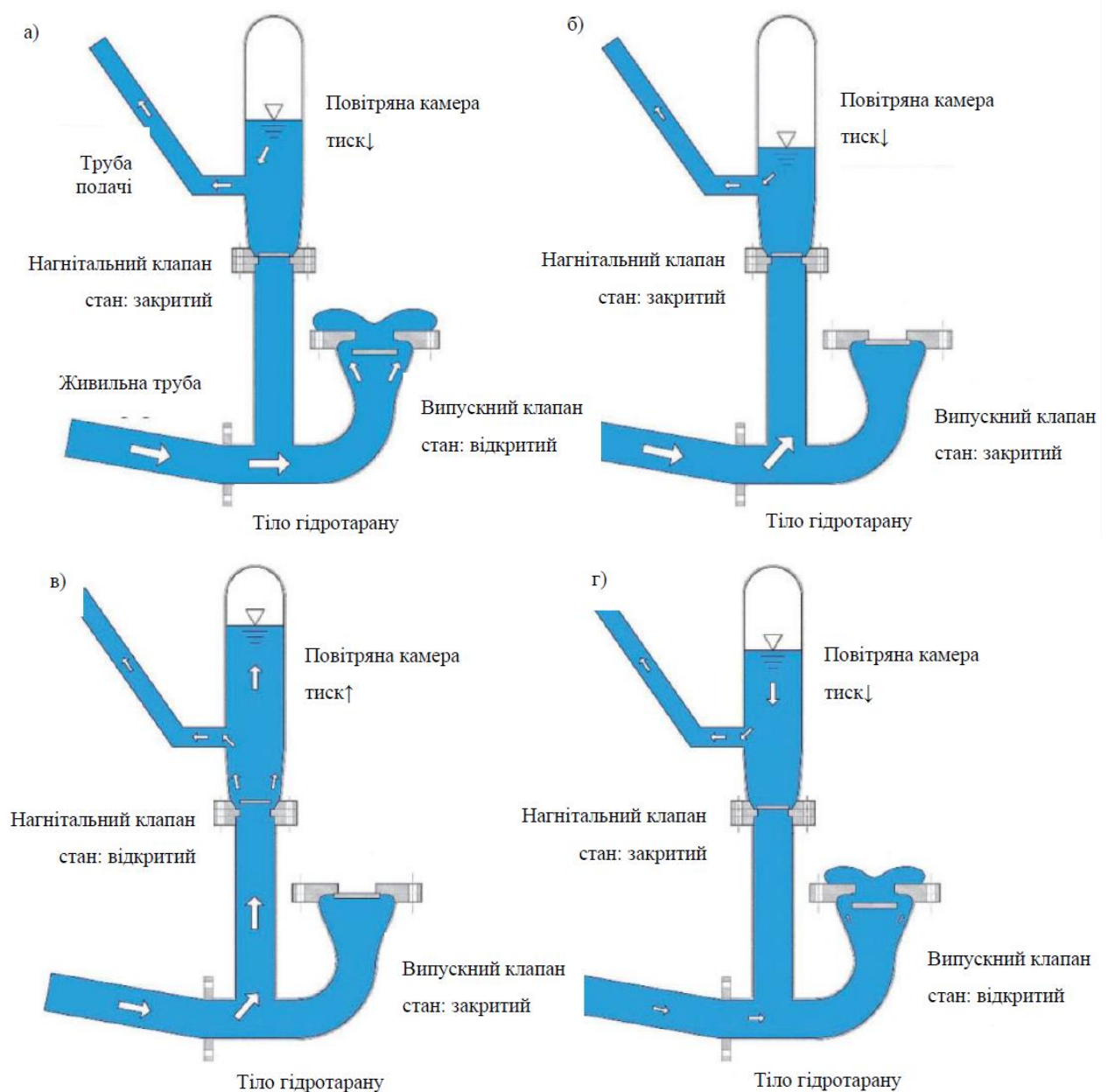


Рисунок 2.10 – Конструкція та робочий цикл гідронасоса

В процесі проектування гідронасосного насосу мають бути враховані опір потоку рідини та тиск на випускному клапані, які мають бути максимально малими та рівномірними. Для отримання задовільної гідравлічної ефективності канали гідронасосу слід виконувати гладкими вздовж руху робочого тіла, уникаючи різких розширень чи звужень.

Проведення реальних експериментів на фізичних прототипах гідронасосів є досить тривалим і витратним процесом. Для ґрунтовного дослідження потрібно протестувати цілу низку різних конструкцій. Це потребує ще більше часу та значних фінансових вкладень.

Альтернативним підходом є створення та використання комп'ютерних моделей. Сучасні обчислювальні методи дозволяють досить точно симулювати поведінку рідини в різних умовах. За допомогою комп'ютерного моделювання можна проаналізувати продуктивність альтернативних конструкцій гідронасосів, не витрачаючи коштів на виготовлення реальних прототипів.

Таким чином вдається значно прискорити процес розробки, зекономити ресурси та раціональніше розподілити бюджет. Комп'ютерне моделювання дозволяє обрати найкращі конструктивні рішення, які потім будуть реалізовані в реальних прототипах для остаточного тестування. Вдало підібрана комбінація оціночних показників та адекватної розрахункової моделі є запорукою успішного комп'ютерного моделювання гідравлічних систем.

Розглянемо детальніше показники, за якими можна оцінити ефективність роботи гідронасоса.

Аналіз роботи гідронасоса доцільно здійснювати за показниками, що описані нижче.

Коефіцієнт втрати напору. Він характеризує відношення втраченого напору в системі до початкового напору. Чим менше це значення, тим ефективніше працює система, оскільки менше енергії витрачається даремно на подолання гідравлічних опорів.

Коефіцієнт чолового опору. Цей показник пов'язаний з силою удару струменя води об диск клапана. Занадто велике значення призведе до надмірних механічних навантажень та можливих пошкоджень елементів конструкції.

Ексцентрична відстань тиску на випускному клапані. Через особливості конструкції, розподіл тиску по поверхні клапана є асиметричним. Це створює додаткові моменти та сили, що негативно впливає на роботу гідронасоса, скорочує термін його експлуатації, призводить до зниження продуктивності.

Рівномірність розподілу швидкості на виході. Нерівномірний розподіл вказує на можливі завихрення та відриви потоку, що також погіршує робочі характеристики.

Для розрахунку цих показників використовуються методи обчислювальної гідродинаміки. Вони дозволяють отримати повну картину руху рідини в системі та дати кількісну оцінку запропонованим критеріям якості роботи гідронасоса і детальніше розглянуті нижче.

Коефіцієнт втрати напору. Коефіцієнт втрати напору визначається за наступною формулою:

$$\xi = \frac{E_1 - E_2}{v^2 / 2g}, \quad (2.6)$$

де $E_1 = v_1^2 / 2g + p_1 / \rho g + z_1$ – результуючий напір води, м;

$v_1^2 / 2g$ – кінетична енергія одиниці маси води (швидкісний напір);

$p_1 / \rho g$ – потенційна енергія одиниці маси води, яка пов'язана із наявністю тиску p_1 (п'єзометричний напір);

z_1 – потенційна енергії одиниці маси води (геометричний напір);

1 – величина віднесена до вихідного отвору гідронасоса;

2 – величина віднесена до вхідного отвору гідронасоса;

v – швидкість води живлячій трубі, м / с.

Коефіцієнт чолового опору. Сила водяного потоку на випускаючому клапані визначається за виразом:

$$F = F_L - F_U, \quad (2.7)$$

де F_L – площа нижньої поверхні пластини випускного клапана;

F_U – площа верхньої пластини випускного клапана, які можна розрахувати за наступним виразом:

$$F_j = \int_{A_w} p dA \approx \sum_{j=1}^n p_j A_j, \quad (2.8)$$

де A_w – площа пластини випускного клапана;

p_j – тиск на елемент поверхні диска випускного клапана;

A_j – площа елемента поверхні диска випускного клапана.

Падіння тиску на випускному клапані визначається виразом:

$$\Delta p = \frac{F}{A_w}. \quad (2.9)$$

Тоді коефіцієнт опору визначається наступним виразом:

$$\varphi = \frac{\Delta p}{\rho g} \bigg/ \frac{v^2}{2g}, \quad (2.10)$$

Закривання випускного клапана відбувається за умови зрівняння дії на пластину сили тиску водяного потоку та сили тяжіння згідно виразу:

$$F = m_{BK} g, \quad (2.11)$$

де $m_{\text{БК}}$ – маса диску випускного клапана.

Критична швидкість водного потоку, при якій починає закриватися випускний клапан розраховується за виразом:

$$v_0 = \left(\frac{2m_{\text{БК}}g}{\rho\Phi A_w} \right)^{0,5}, \quad (2.12)$$

Таким чином з рівняння (2.11) видно, що збільшення критичної швидкості водного потоку можливо досягти шляхом збільшення маси пластини випускного клапана. Однак варто враховувати, що імпульсна сила більша при закриванні випускного клапана. Також важчий випускний клапан призводить до більш жорстких конструктивних гідронасоса, що є недоліком. Для конкретного гідронасоса радіус випускного клапана перевищує радіус вихідного отвору спускного клапана, на що неможливо істотно вплинути. Тому підвищити критичну швидкість зазвичай вдається досягти на етапі зміни конструкції для регулювання чолового опору.

Ексцентрична відстань. З метою визначення ексцентричної відстані виконується розрахунок двох координат за наступними виразами:

$$x = \frac{\int_{A_w} p x dA}{\int_{A_w} p dA} \approx \frac{\sum_{j=1}^n p_j x_j A_j}{\sum_{j=1}^n p_j A_j}, \quad (2.13)$$

$$y = \frac{\int_{A_w} p y dA}{\int_{A_w} p dA} \approx \frac{\sum_{j=1}^n p_j y_j A_j}{\sum_{j=1}^n p_j A_j}, \quad (2.14)$$

де x та y – декартові координати відстані між центром одного елементарного блока та центром диску випускного клапана.

Рівномірність розподілу швидкості на виході. Від рівномірності розподілу швидкості водяного потоку на виході буде залежати продуктивність гідравлічного насосу, а вираз для визначення цієї величини має вигляд:

$$v_u = \left[1 - \frac{1}{\sqrt{n \sum_{j=1}^n \left(\frac{u_{ai}}{u_a} - 1 \right)^2}} \right] 100\%, \quad (2.15)$$

де u_a – осьова швидкість гідроагрегата, м / с;

u_{ai} – середнє значення осової швидкості на виході, м / с.

Для моделювання гідронасоса необхідними вихідними даними є потік води від гідравлічної турбіни, напір у живильній та подавальній трубі. Тоді з рівняння 2.5 визначимо витрату води у трубопроводі подачі гідронасосу:

$$q = \eta_{\text{гг}} Q \frac{H}{h}. \quad (2.16)$$

Коефіцієнт ефективності можна визначити із виразу:

$$\frac{1}{\eta} = \frac{H}{h} + \frac{\ln \frac{1}{1-k^2} \cdot \left(1 - \frac{H}{h} (1-0,7k^2) \right)}{k^2 - \left(\frac{u}{v_c} \right)^2}, \quad (2.17)$$

де k – розгонний коефіцієнт;

v_c – усталена швидкість водяного потоку, що рівна

$$v_c = \sqrt{\frac{2gH}{1+\xi}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \cdot 2}{1+8,5}} = 2,03 \text{ м/с} \quad (2.18)$$

u – хвильова зміна швидкості, що рівна

$$u = \frac{gh}{a}. \quad (2.19)$$

Система виразів (2.16-2.19) утворює математичну модель гідронасоса, блок моделювання якого приведений на рис. 2.11.

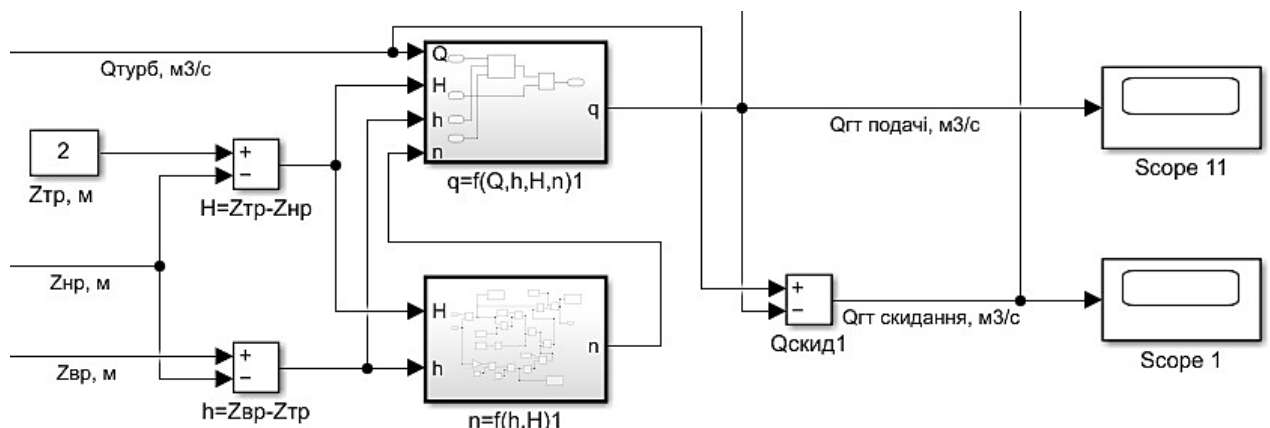


Рисунок 2.11 – Блок моделювання гідронасоса

В моделі гідронасоса в якості вихідних даних використовується витрата води через трубопровід сполучення турбіни та гідронасоса $Q_{\text{турб}}$, поточні значення рівнів води у верхньому та нижньому накопичувальних басейнах $Z_{\text{вр}}$ та $Z_{\text{нр}}$ відповідно. На основі цих даних обчислюється витрата води $Q_{\text{гт подачі}}$, що подається до верхнього резервуару гідронасосу за формулами 2.20 та 2.21. Динаміка зміни цього параметра відображається у блоці *Scope 11*. Також

розраховується витрата через скидний клапан $Q_{\text{гт скидання}}$. Вона дорівнює різниці між загальною витратою $Q_{\text{турб}}$ та витратою крізь напірний клапан $Q_{\text{гт подачі}}$. Розроблена модель дозволяє визначити баланс води в системі на основі вхідних даних про рівні води у верхньому та нижньому басейнах і загальну витрату з турбіни. Це дає можливість проаналізувати режими роботи гідронасоса.

2.7 Блок моделювання насосної станції

Для обґрунтування вибору насоса для гідронасоса врахуємо, що необхідний напір становить близько 7 м, відома витрата води на гідротурбіні, що живить гідронасос та задане пікове значення генерованої фотоелектричною батареєю електричної потужності. Виходячи з цих даних, було обрано відцентровий насос Calpeda NM 17. Ця модель забезпечує необхідні параметри тиску і витрати. Крім того, відцентрові насоси відрізняються високим ККД, надійністю та довговічністю.

Рівняння для визначення витрати води насосом має вигляд:

$$Q_{\text{нас}} = \frac{P_{\text{ел}}}{9,81 \cdot \rho \cdot \eta \cdot H_{\text{нас}}}, \quad (2.20)$$

де $P_{\text{ел}}$ – електрична потужність, що споживається насосом, кВт;

ρ – густина води, кг / м³;

η – коефіцієнт ефективності насоса, в.о.;

$Q_{\text{нас}}$ – витрата води крізь насос, м³ / с;

$H_{\text{нас}} = (Z_{\text{вр}} - Z_{\text{нр}})$ – гідростатичний напір, м.

Енергетична ефективність роботи електричного насоса залежить від багатьох чинників. Одним з ключових параметрів є витрата рідини, яку перекачує насос. Зазвичай, зі збільшенням витрати ККД насоса зростає. Це

пов'язано з тим, що при вищих витратах зменшуються відносні втрати на тертя та вихрові утворення у потоці. Однак для більш ґрунтовних висновків стосовно оптимального режиму роботи конкретного насоса необхідно проаналізувати його характеристики, зокрема криві напору, потужності та ККД в залежності від витрати, робочий діапазон витрат та напорів, конструктивні особливості та геометрію робочого колеса. Лише комплексний аналіз цих даних дозволить зробити обґрунтований висновок щодо оптимальної продуктивності та режиму експлуатації насоса.

Числові дані про залежність коефіцієнта корисної дії від витрати $\eta = f(Q)$ були отримані з паспортних гідравлічних характеристик даного насоса та представлені на рис. 2.12 у вигляді графіка в діапазоні робочих витрат гідротурбіни.

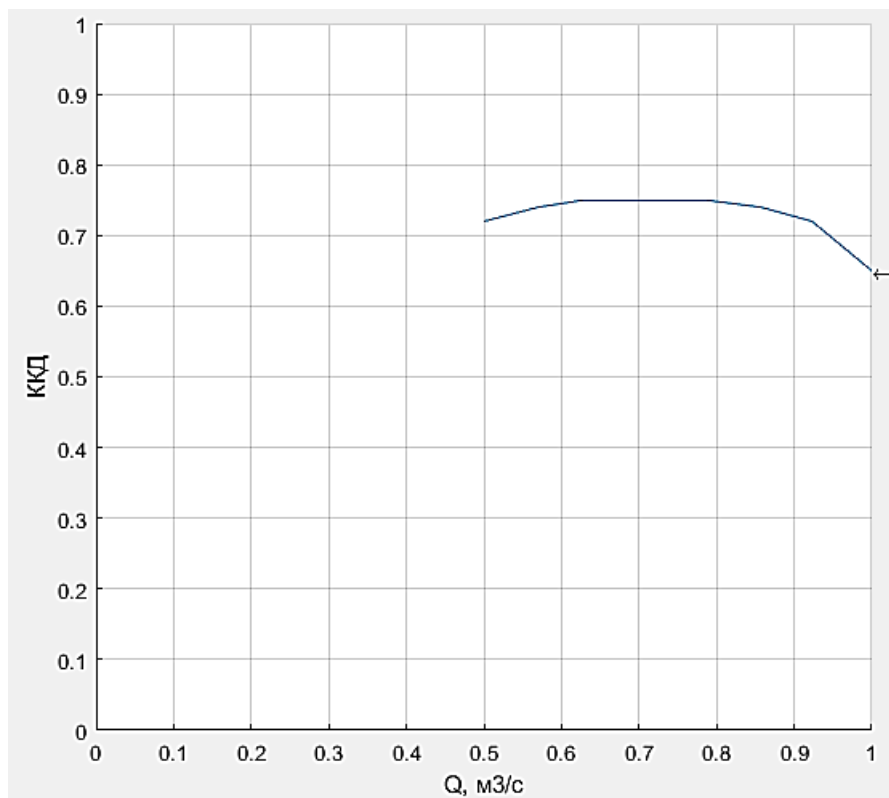


Рисунок 2.12 – Залежність $\eta = f(Q)$ для електричного насосу

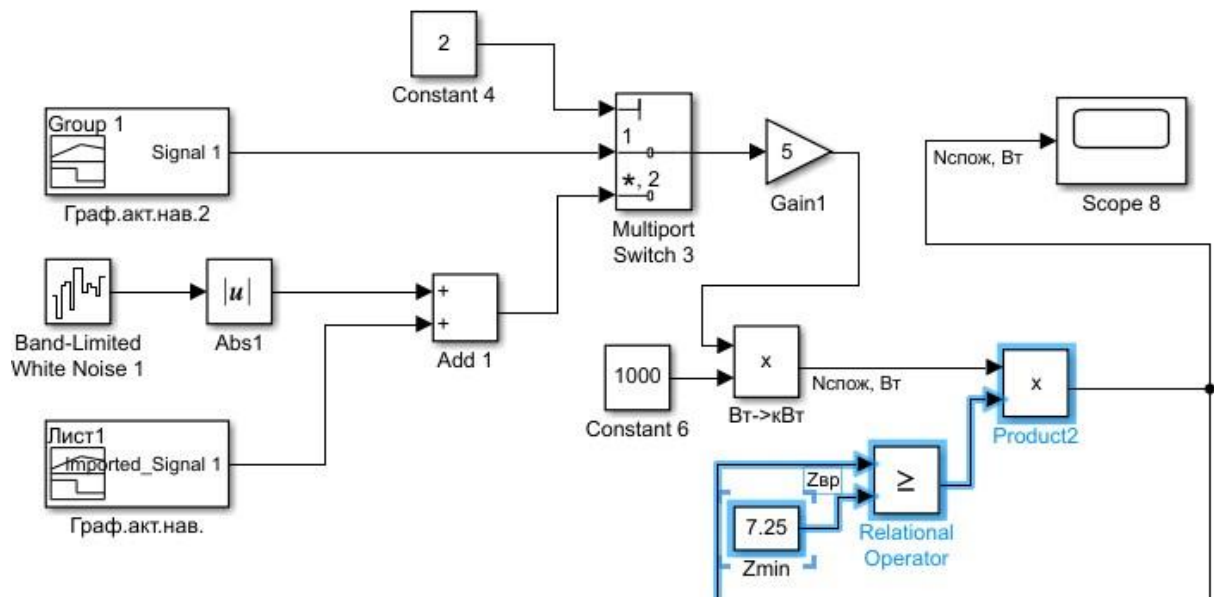


Рисунок 2.15 – Обмеження роботи гідротурбіни за рівнем води Z_{BPmin}

2.8 Висновки до другого розділу

1. Розроблена імітаційна модель споживача електроенергії є важливим компонентом для адекватного моделювання всієї системи. Вона відображає реальну поведінку навантаження та взаємодію з іншими елементами схеми. Основні можливості цієї моделі є імітація споживання потужності навантаженням, виведення поточних даних, можливість примусового відключення споживача при досягненні критично низького рівня води у верхньому резервуарі. Це відображає реальну ситуацію, коли через дефіцит сонячної генерації вода витрачається на турбіну швидше ніж встигає закачуватись насосом. Загалом, така модель дозволяє комплексно досліджувати роботу всієї системи та оптимізувати її параметри і режими експлуатації.

2. Розроблена імітаційна модель фотоелектричної станції для аналізу її роботи в складі гідроенергетичного комплексу. Вона складається з двох основних блоків, що моделюють розрахунок прогнозованої сонячної інсоляції

для конкретної місцевості і орієнтації сонячних панелей, власне моделі фотоелектростанції, на яку надходить значення інсоляції, а також характеристики обладнання (площа масиву панелей, ККД фотомодулів) і розраховує генеровану електричну потужність. Поєднання цих блоків дозволяє комплексно оцінити і спрогнозувати роботу сонячної електростанції за конкретних умов експлуатації. Така модель є надзвичайно корисною для оптимізації параметрів системи.

3. Розроблено комп'ютерну імітаційну модель для моделювання роботи блоку гідротурбіна-генератор. Ця імітаційна модель дає змогу на основі заданих на вхід параметрів – потрібної потужності споживання електроенергії, висоти води у водосховищах – розрахувати необхідну витрату води через турбіну для забезпечення споживачів електроенергією, а також ККД такого режиму генерації електроенергії. Модель враховує основні гідромеханічні характеристики обраної гідротурбіни, зокрема її потужнісну характеристику, залежність коефіцієнта корисної дії від навантаження, а також обмеження на мінімально та максимально допустимі витрати води через агрегат. Ця імітаційна модель може використовуватися для оптимізації режимів роботи гідроагрегату, зокрема підбору оптимальної комбінації потужності та витрати води для заданого навантаження. Крім того модель може застосовуватися для попередньої оцінки впливу зміни параметрів гідроагрегату, наприклад зносу або модернізації, на його енергоефективність.

4. Розроблено комп'ютерну імітаційну модель для дослідження режимів роботи насосної станції, що перекачує воду між нижнім та верхнім водосховищами. Ця модель дозволяє на основі вхідних даних – рівнів води у нижньому та верхньому резервуарах, а також заданої потужності живлення насосів від фотоелектричної станції – розрахувати такі вихідні параметри: витрату води через насоси за певний проміжок часу, кількість насосних агрегатів, що мають працювати для забезпечення необхідної витрати, а також їх середній коефіцієнт корисної дії з урахуванням поточного режиму експлуатації. Модель враховує основні технічні характеристики насосів,

зокрема: напірно-витратні графіки, залежності коефіцієнта корисної дії від навантаження, граничні значення подачі та напору. Також враховуються характеристики трубопроводу та геометрія резервуарів. Така імітаційна модель може застосовуватися на етапі проектування насосної станції для вибору необхідної кількості та типорозміру насосного обладнання. Крім того вона є корисною для оптимізації режимів роботи насосів залежно від поточних умов живлення станції відновлюваними джерелами енергії.

5. Розроблено комп'ютерну імітаційну модель для дослідження режимів роботи гідронасоса - пристрою, що використовує енергію води для підйому її на певну висоту. Модель дозволяє на основі таких вхідних даних: рівнів води у нижньому та верхньому резервуарах, витрати води на виході з гідротурбіни – розрахувати основні характеристики роботи гідронасоса: витрату води в напірному та скидному трубопроводах, коефіцієнт корисної дії перетворення енергії води. Модель враховує конструктивні параметри гідронасоса – діаметри трубопроводів, висоту підйому води, а також гідравлічні втрати тертя у трубопроводах та місцеві втрати в колінах і засувках. За допомогою моделі можна досліджувати вплив зміни конструкції гідронасосу чи режимів його експлуатації на ефективність перетворення гідроенергії. Така модель може застосовуватися при проектуванні та налагодженні гідронасосів для оптимізації їх параметрів та режимів роботи.

6. Розроблено комп'ютерну імітаційну модель для дослідження водного балансу та зміни рівнів у верхньому та нижньому водосховищах гідроенергетичного комплексу. Модель дозволяє в режимі реального часу розраховувати поточні об'єми води в резервуарах з урахуванням усіх надходжень та витрат водних ресурсів, а саме: подачі води насосною станцією з нижнього резервуару; скиду води гідротурбіною у нижнє водосховище після вироблення електроенергії; перепуску води гідронасосом у верхній резервуар; скиду надлишків води через водоскидний клапан у нижній резервуар. На основі розрахунку балансу води модель дозволяє визначити поточні рівні у кожному з резервуарів згідно з їх морфометричними даними - кривими об'єму

та площі дзеркала води. Така імітаційна модель може застосовуватися для оптимізації режимів роботи всього гідроенергокомплексу з метою раціонального використання наявних водних ресурсів.

7. Розроблено імітаційну модель системи керування для оптимізації використання водних ресурсів гідроенергокомплексу шляхом контролю рівнів у верхньому та нижньому водосховищах. Система містить наступні функції: порівняння фактичних рівнів з граничнодопустимими значеннями (верхніми та нижніми межами); автоматичне обмеження роботи гідроагрегатів у разі зниження рівня води у відповідному резервуарі нижче встановленого мінімального рівня. Зокрема, система запобігає скиду води через гідротурбіну з верхнього резервуару у разі зниження рівня води у верхньому резервуарі до небезпечної позначки. А також призупиняє роботу насосів для підкачування води у разі досягнення критично низького рівня у нижньому водосховищі. Така автоматика дозволяє підвищити надійність та безпеку експлуатації гідропоруд, а також ефективно використовувати водні ресурси гідровузла.

РОЗДІЛ 3

КОМП'ЮТЕРНЕ ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ АКУМУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ ГІДРОАКУМУЛЮЮЧОЇ УСТАНОВКИ

3.1 Моделювання та аналіз добових режимів роботи системи акумуляування на основі гідроакумуляуючої установки

Розроблена імітаційна модель призначена для дослідження та оптимізації режимів роботи автономної гідроенергосистеми з відновлюваними джерелами енергії протягом довільних проміжків часу. Зокрема, в моделі реалізовано можливість аналізу добових графіків генерації, акумуляування та споживання електроенергії.

Для адекватного відображення сезонних змін ресурсу сонячної енергії, в модель занесені усереднені профілі сонячного випромінювання для характерних днів кожної пори року: 15 січня, 15 квітня, 15 липня та 15 серпня. Також з урахуванням сезонних коливань попиту введені типові добові графіки електроспоживання.

За допомогою комп'ютерного моделювання можна дослідити взаємодію та оптимізувати режими роботи всіх складових системи: фотоелектричної станції, гідроагрегатів, насосів, а також системи акумуляування енергії за рахунок перепаду рівнів води.

На рис. 3.1 показано характерний добовий графік електроспоживання з урахуванням випадкових коливань навантаження. Загальне енергоспоживання за добу склало 117,512 кВт*год. Середнє навантаження дорівнює 4,896 кВт, максимальне зафіксоване споживання сягнуло 8,706 кВт.

Варто зазначити, що в досліджуваній моделі автономної енергосистеми річний графік електровикористання не залежить від сезонних змін і

залишається постійним. Проте передбачено відключення частини споживачів у випадку дефіциту генерації енергії.

$P_{\text{cons}}, \text{Вт}$

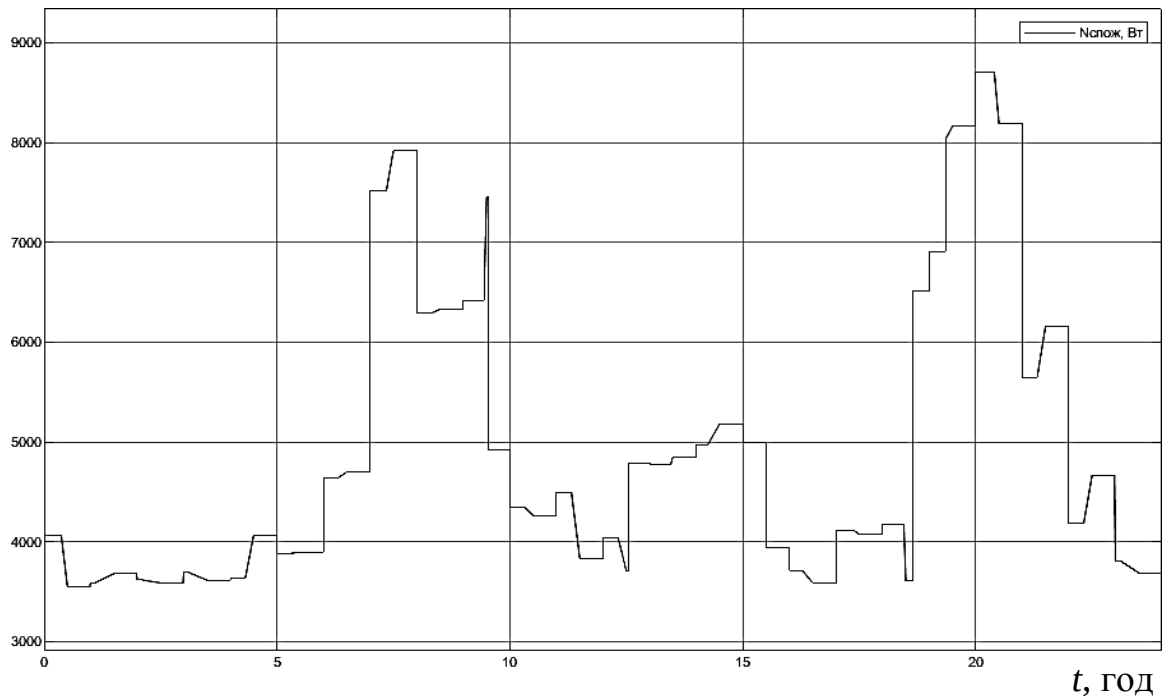


Рисунок 3.1 – Добовий графік споживання активної потужності

Для забезпечення енергопотреби зазначеного на рис. 3.1 графіка навантаження гідроагрегат електростанції має забезпечити протягом доби витрату води через турбіну, яка показана на рис. 3.2. Її значення визначаються з урахуванням поточних напору та ККД гідроагрегату.

Змінюючи параметри моделі можна оптимізувати сумісну роботу генеруючого обладнання для надійного забезпечення заданого графіка електровикористання.

На графіку витрат води через гідроагрегат (рис. 3.2) додатково показано витрату води, що прокачуються назад у верхнє водосховище за допомогою гідронасоса та електричного насоса. Цей потік становить 14-16% від загального об'єму води, що скидається турбіною у нижній резервуар. За рахунок використання енергії швидкісного потоку відпрацьованої води,

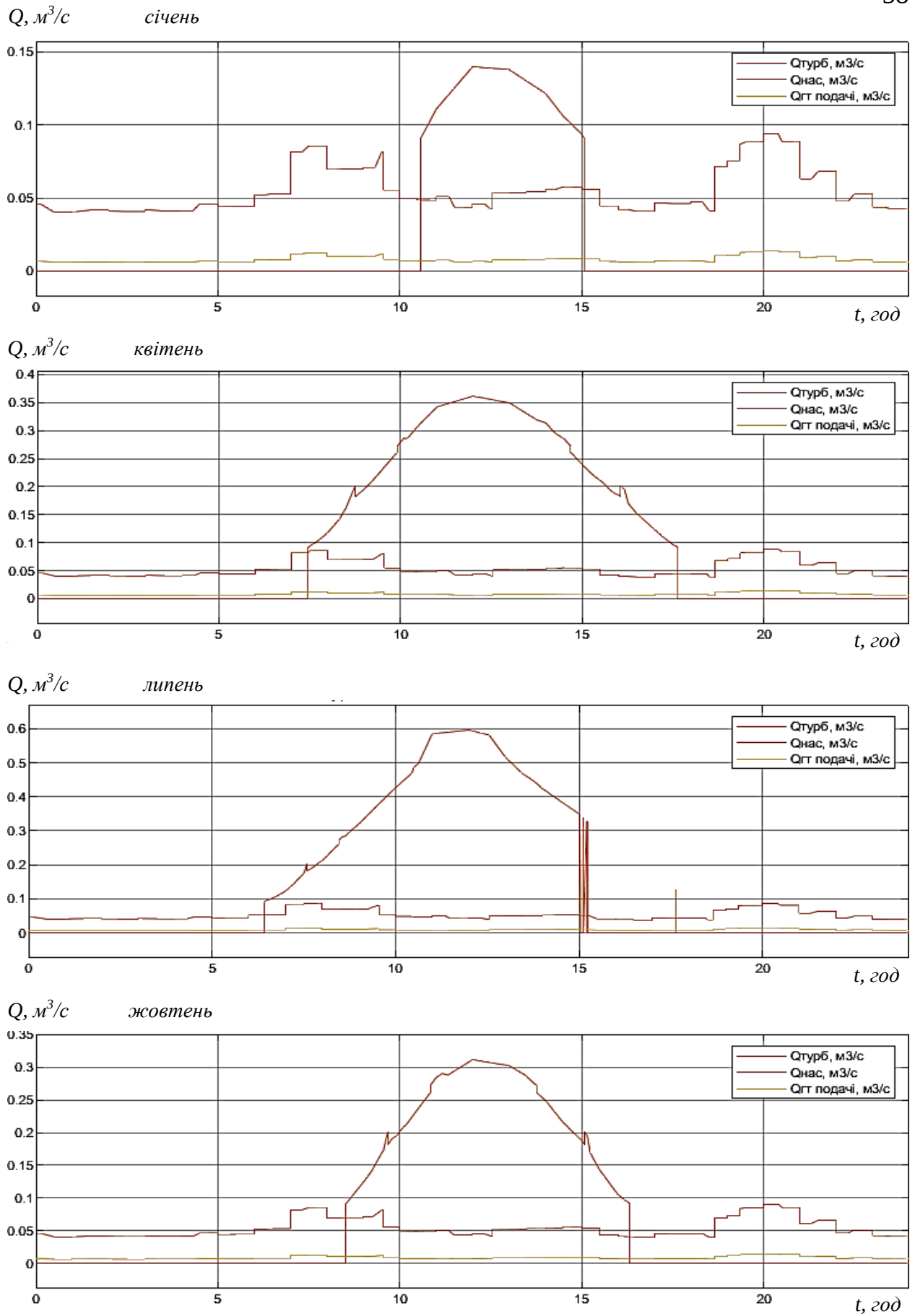


Рисунок 3.2 – Добова витрата води гідротурбіною, насосом і гідронасосом

гідронасос має ефективність 67-69% за даних умов. Це дозволяє зекономити електроенергію, яка б витрачалась насосами для повернення тієї самої кількості води у верхнє водосховище.

Таким чином застосування гідронасосу в системі акумулювання надає такі переваги:

- зменшення потужності насосів для підкачування води;
- збільшення запасу води у верхньому резервуарі;
- підвищення надійності електропостачання споживачів на 15%.

Комплексне використання гідроагрегату та гідронасосу є ефективним рішенням для управління водними ресурсами автономної енергосистеми.

Аналіз графіків витрат води (рис. 3.2) при початковому рівні у верхньому резервуарі 7,5 м показує, що за таких умов протягом усієї доби гідроагрегат забезпечує безперебійне електропостачання споживачів на повну потужність. Середня витрата води через турбіну становить $0,051 \text{ м}^3/\text{с}$, максимальна – $0,095 \text{ м}^3/\text{с}$.

Однак варто зауважити, що в зимовий період верхній резервуар, як правило, виснажений, тому рівень води в кінці доби знижується до мінімально допустимої позначки. Цього об'єму вже недостатньо для забезпечення роботи гідроагрегату наступної доби. Відповідно, у періоди з від'ємним водним балансом резервуару будуть періодичні відключення частини споживачів через нестачу генерованої потужності.

Ситуація зміниться з настанням паводків, коли приплив води перевищить її витрати і дозволить накопичити необхідний запас для безперебійної роботи гідроелектростанції. Ці режими докладніше розглянуто в наступному розділі.

Насосна станція, що перекачує воду з нижнього резервуару у верхній, живиться від фотоелектричної станції. Графіки роботи насосів за добу показано на рис. 3.2. та рис. 3.3.

Передумовою для запуску насосів є наявність достатнього рівня води у нижньому водосховищі. Крім того, пуск першого насоса відбувається лише за

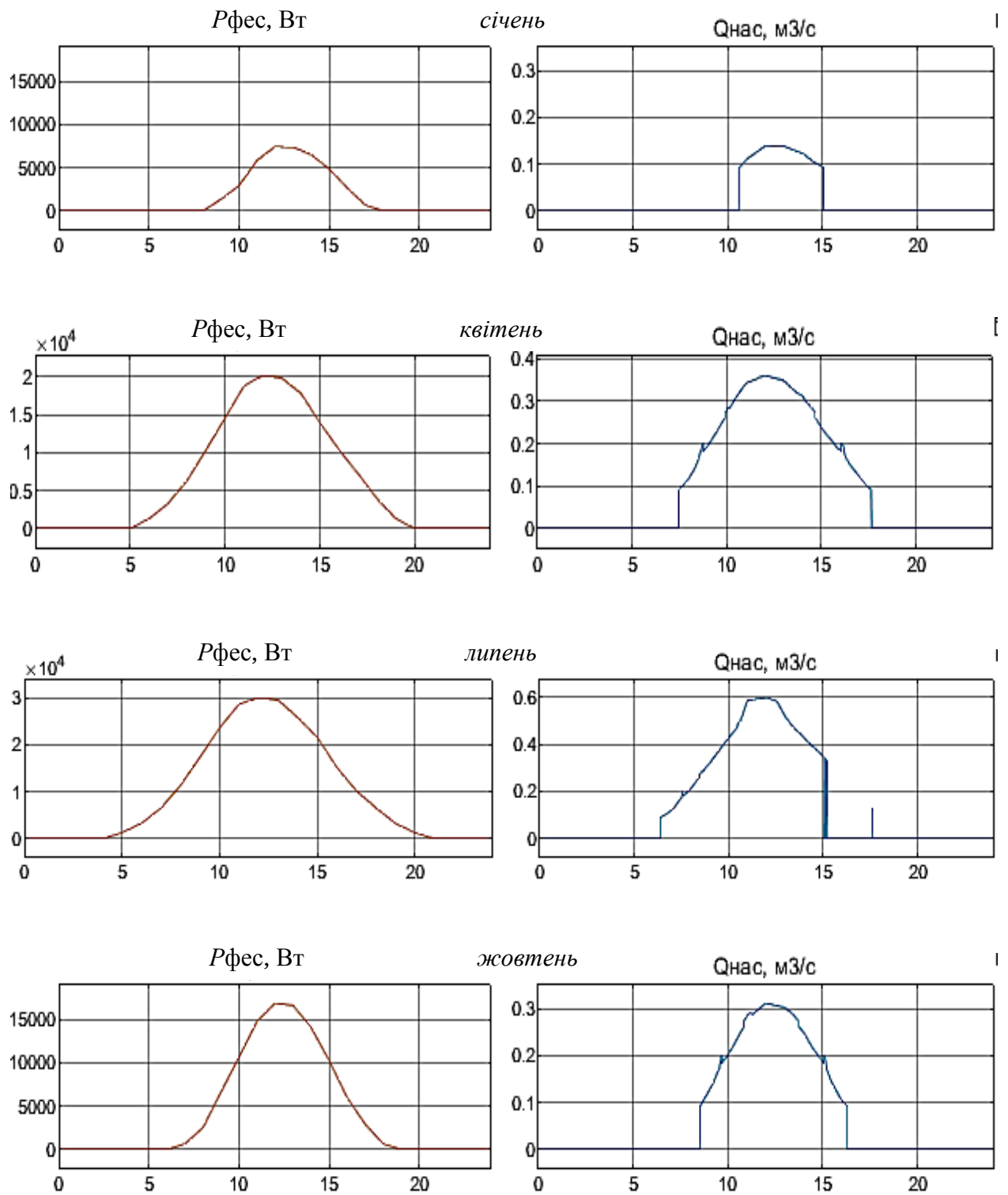


Рисунок 3.3 – Добові графіки генерації фотоелектростанцією
та подача води електричними насосами

умови генерації фотоелектростанцією мінімальної потужності приблизно 4200 Вт, що забезпечує живлення приводу одного насоса. Після запуску спостерігається різке зростання витрати до $0,1 \text{ м}^3/\text{с}$.

Подальше плавне нарощування потужності фотоелектростанції вранці призводить до почергового вмикання наступних насосів при досягненні витрат відповідно $0,2 \text{ м}^3/\text{с}$ та $0,3 \text{ м}^3/\text{с}$. Це відображається стрибкоподібною зміною витрати та пов'язано із переходом на нові режими роботи насосів з іншим коефіцієнтом корисної дії.

Така динаміка роботи насосної станції є характерною для систем з живленням від поновлюваних джерел енергії.

Витрата води насосною станцією залежить від поточної потужності генерованої фотоелектростанцією електроенергії (рис. 3.3), а також параметрів режиму та ККД роботи насосів.

Так, в січні працює лише один насос при середній витраті $0,12 \text{ м}^3/\text{с}$ протягом 4 год 40 хв, що дозволяє подати вгору $2\,013 \text{ м}^3$ води за добу. Натомість в квітні вже задіяні всі 3 насоси із сукупною середньою продуктивністю $0,25 \text{ м}^3/\text{с}$ протягом 10 год 9 хв, що забезпечує подачу $9\,135 \text{ м}^3$.

В липні насоси працюють на повну потужність та за 8 год 50 хв піднімають рівень у верхньому резервуарі до максимальної позначки, після чого спрацьовує переливний клапан і починає зливати надлишкову воду назад у нижній резервуар. Об'єм переміщеної води за добу складає $15\,552 \text{ м}^3$.

В цілому середньодобові витрати становлять $0,022 \text{ м}^3/\text{с}$ в січні, $0,101 \text{ м}^3/\text{с}$ в квітні, $0,145 \text{ м}^3/\text{с}$ в липні, $0,072 \text{ м}^3/\text{с}$ в жовтні.

На рис. 3.4 показано зміну рівнів води протягом доби у верхньому та нижньому водосховищах гідроенергокомплексу. У першій половині доби, коли немає сонячної енергії, відбувається спрацювання запасу верхнього резервуару - витрата води через гідротурбіну для генерування електроенергії та задоволення графіка навантаження споживача. Відповідно знижується рівень у верхньому басейні. Після сходу сонця починається генерація електроенергії фотоелектричною станцією, що дозволяє запустити насоси та

частково компенсувати витрати верхнього резервуару шляхом перекачування води з нижнього басейну. Така взаємодія всіх елементів системи протягом доби сприяє оптимальному використанню водних ресурсів та підтриманню безперервного електропостачання споживачів.

Поряд з гідроагрегатом до складу системи входить гідронасос, що дозволяє повертати частину відпрацьованої води безпосередньо до верхнього резервуару після проходження через турбіну.

Аналіз динаміки зміни рівнів води протягом доби дозволяє виділити три характерні режими роботи водосховищ: I – ранкове спрацювання запасу верхнього резервуару для живлення навантаження в ранкові години; II – денне відновлення рівня води за рахунок роботи насосної станції вдень, коли працює фотоелектростанція; III – вечірнє повторне спрацювання для забезпечення вечірнього максимуму енергоспоживання.

Переходи між режимами є стрибкоподібними, оскільки вихід насосних агрегатів на робочий режим відбувається ступеневим чином при досягненні певних порогів потужності.

Така взаємодія всіх елементів системи є характерною для автономних гібридних енергокомплексів з відновлюваними джерелами енергії.

Для зимового періоду характерним є триваліші I та III режими спрацювання верхнього резервуару - відповідно 10 та 9 годин на добу. При цьому спостерігається інтенсивне зниження рівня зі швидкістю 0,009 м/год.

Режим II відновлення рівня за допомогою насосів є короткочасним – 4 години, незважаючи на високу інтенсивність подачі води 0,015 м/год.

В результаті рівень води в кінці доби знижується на 0,11 м порівняно з початком, що дорівнює 11% від загального об'єму резервуару.

Отже, за умови максимального початкового заповнення верхнього водосховища, такий режим роботи дозволить забезпечувати безперервне електропостачання споживача протягом 9 діб. Далі рівень води впаде нижче критичної позначки і почнуться щоденні обмеження споживачів електроенергії шляхом їх відключення.

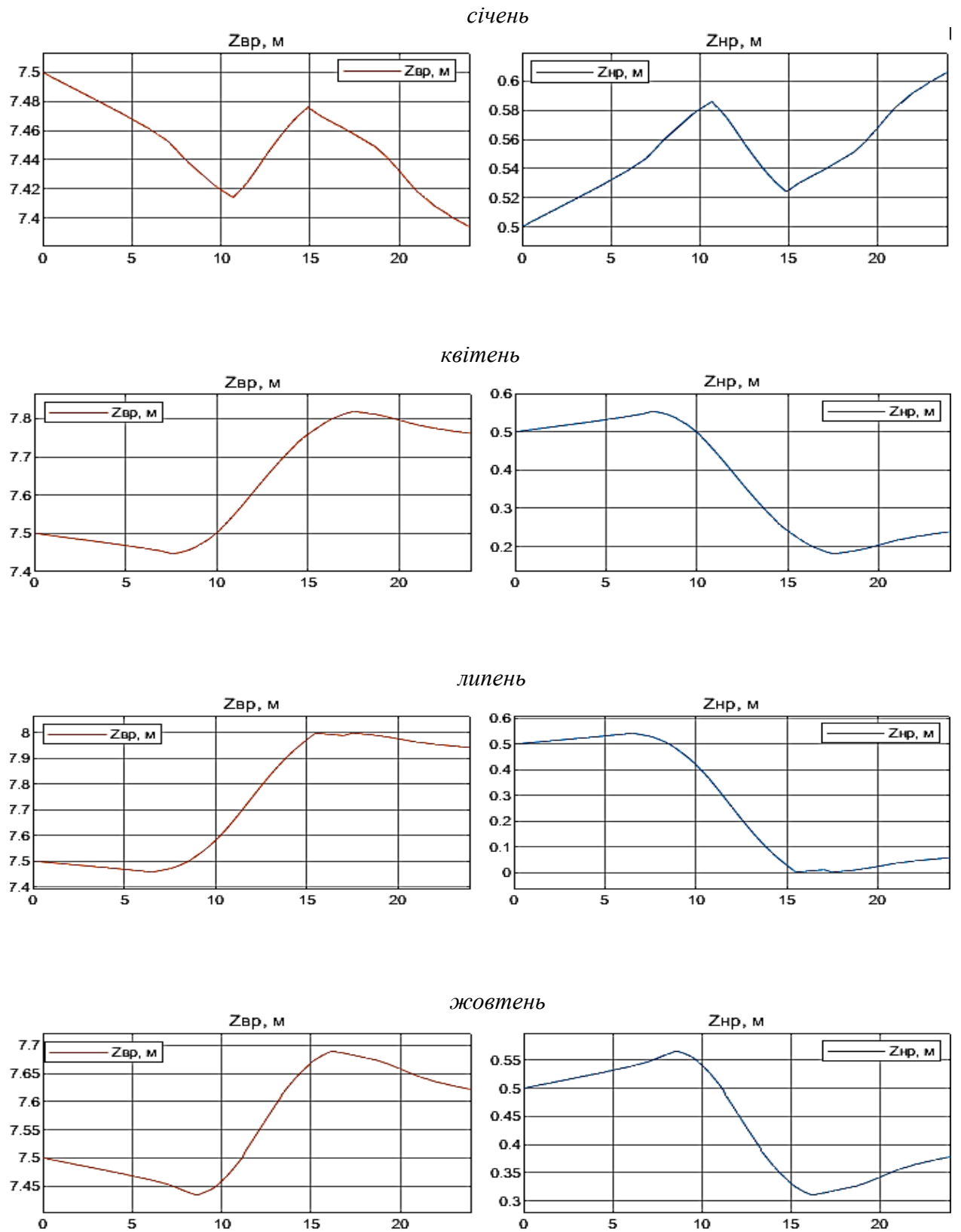


Рисунок 3.4. – Часові діаграми зміни рівня води у верхньому ($Z_{вр}$) та нижньому ($Z_{нр}$) резервуарах

На відміну від зимового періоду, весною та восени спостерігаються менш інтенсивні I та III режими спрацювання запасу води зі швидкістю 0,009 м/год, кожен тривалістю по 8 годин.

В той же час II режим відновлення рівня води за рахунок насосів є більш тривалим - 8 годин та характеризується високою швидкістю подачі води - 0,05 м/год.

Загалом це дає додатний добовий баланс за рівнем води у верхньому резервуарі: +0,25 м. Такий гарантований надлишок водних ресурсів забезпечує 100% рівень безперервного електропостачання споживачів протягом всього сезону до настання літньої межени.

Рациональне використання весняної повені та осінніх дощів дозволяє максимально накопичити водні ресурси на складний зимовий період.

Літній період характеризується надлишком водних ресурсів у верхньому резервуарі. Після завершення денного 2 режиму відновлення рівня близько 15:00, рівень води досягає максимальної позначки 8 м та спрацьовує аварійний зливний клапан. Протягом наступних 3 годин відбувається скидання надлишку води для утримання рівня по верхній межі резервуару. При цьому впродовж ранкового 10-годинного періоду акумулювання спостерігається інтенсивне зростання рівня зі швидкістю 0,06 м/год завдяки максимальній продуктивності фотоелектростанції та насосів у літній період. Такі режими переповнення верхнього водосховища необхідно враховувати при проектуванні гідроспоруд для запобігання аварійним ситуаціям.

3.2 Моделювання та аналіз річних режимів роботи системи акумулювання на основі гідроакумулюючої установки

Зазвичай режими роботи енергоустановок в енергосистемі аналізують в різних проміжках часу: доба, тиждень, сезон, рік, кількарічний період – на основі усереднених за певний період параметрів. Проте такий підхід не

дозволяє повною мірою відобразити особливості реального нестационарного процесу функціонування гідроакумуючих електростанцій (ГАЕС).

Більш точний аналіз потребує розгляду роботи ГАЕС у безперервному часі з урахуванням усієї множини факторів та характеристик, що впливають на режим в реальному масштабі часу. Однак побудова таких складних математичних моделей на сьогодні ускладнена внаслідок наявності великої кількості неформалізованих елементів та невизначених даних.

Тому створення адекватних моделей ГАЕС в неперервному часі є актуальним напрямком для подальших досліджень режимів їх роботи та оптимізації процесів управління.

Інтервал дискретизації математичної моделі за часом зазвичай обирається відповідно до конкретних завдань дослідження. Розглянемо роботу автономного гідроенергокомплексу із замкненим циклом водокористування на річному проміжку з кроком усереднення параметрів 1 година.

Графік генерації фотоелектричної станції задається у вигляді вектору з 8760 значень (кількість годин за рік) середньогодинної потужності, розрахованих за методикою описаною в другому розділі та приведений на рис. 3.5. При моделюванні враховується скидання надлишкової води з верхнього резервуару у нижній через переливний клапан у випадку досягнення рівнем води граничної позначки, як зазначалося вище. Такий підхід дозволяє дослідити річні графіки балансів потужності та водних ресурсів автономної системи з високою точністю за рахунок мінімізації усереднення вхідних даних.

На графіку витрат води насосною станцією, що приведений на рис. 3.6, спостерігаються ступінчасті перепади, що пов'язано з дискретним характером вмикання насосних агрегатів та нелінійним зв'язком електричної потужності та ККД насоса.

Кожен насос має мінімальний поріг потужності 50%, нижче якого він просто вимикається. Зі збільшенням кількості насосів поліпшується точність регулювання витрати води.

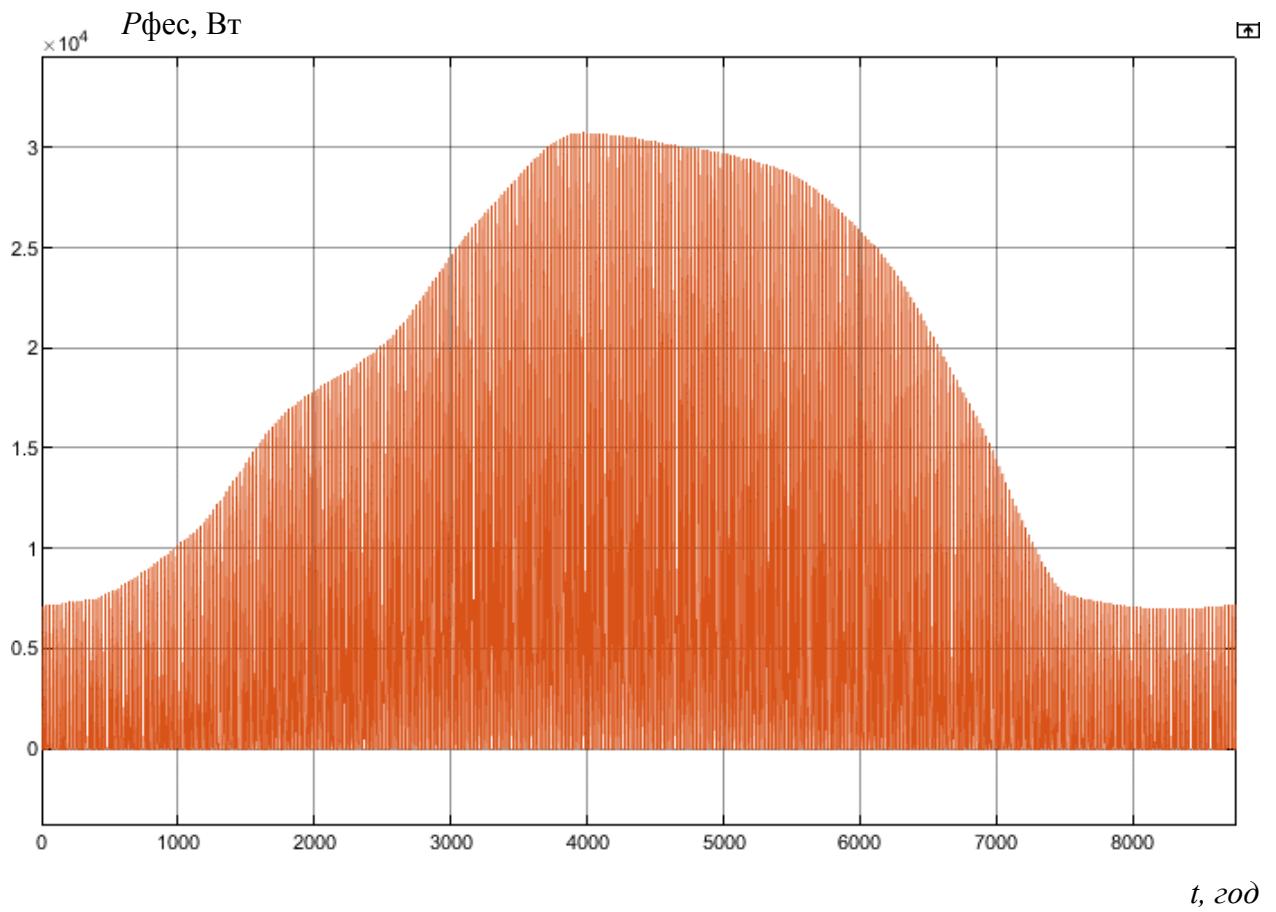


Рисунок 3.5 – Річна діаграма генерації фотоелектричною батареєю

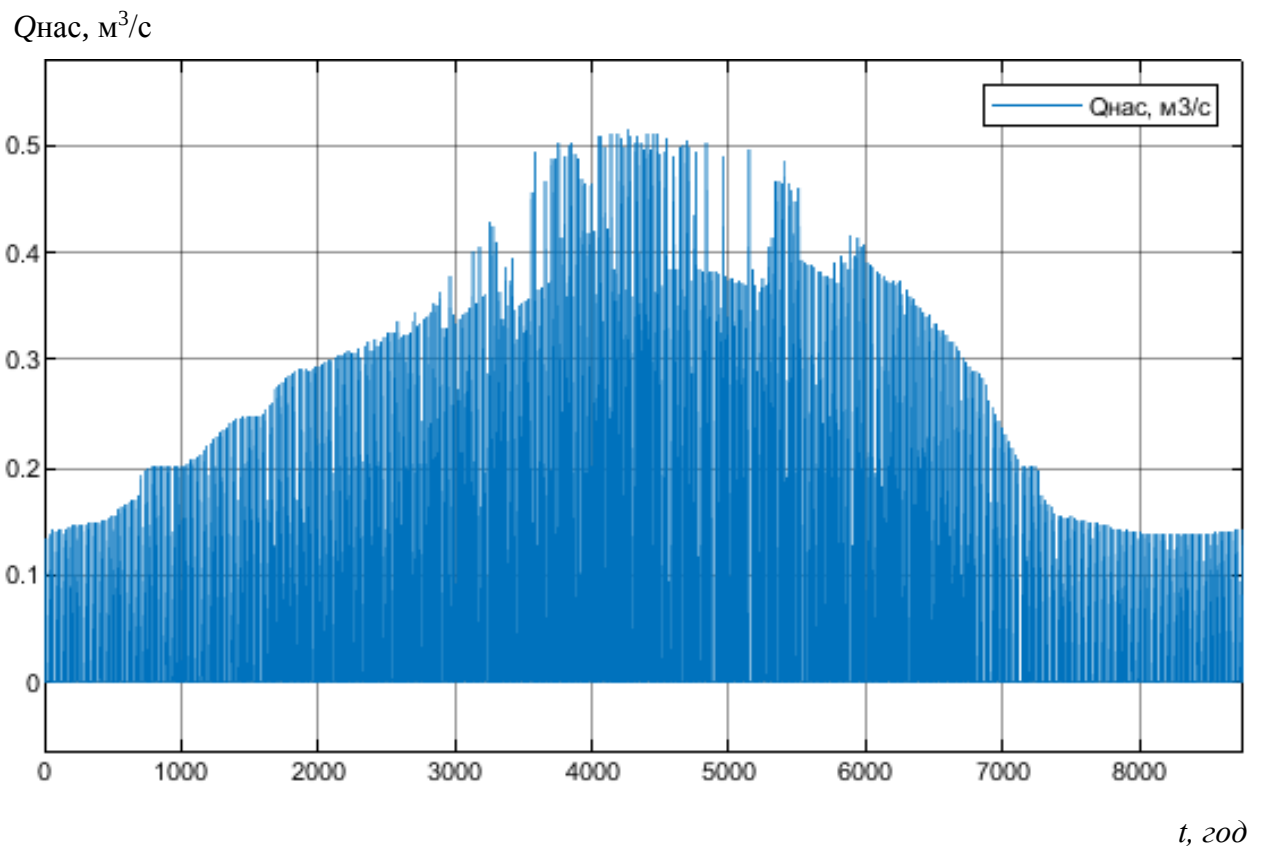


Рисунок 3.6. – Річна діаграма витрати води насосною станцією

В разі застосування турбін-насосів з регульованими лопатками можливе плавне регулювання витрати і залежність набуває лінійного характеру. У розглянутій моделі з фіксованим числом насосів перший агрегат працює у діапазоні витрат $Q = 0 \dots 0,17 \text{ м}^3/\text{с}$, два насоси – $Q = 0,17 \dots 0,33 \text{ м}^3/\text{с}$, три насоси – $Q = 0,33 \dots 0,5 \text{ м}^3/\text{с}$.

На рис. 3.7 показано графік кількості одночасно працюючих насосних агрегатів насосної станції протягом року.

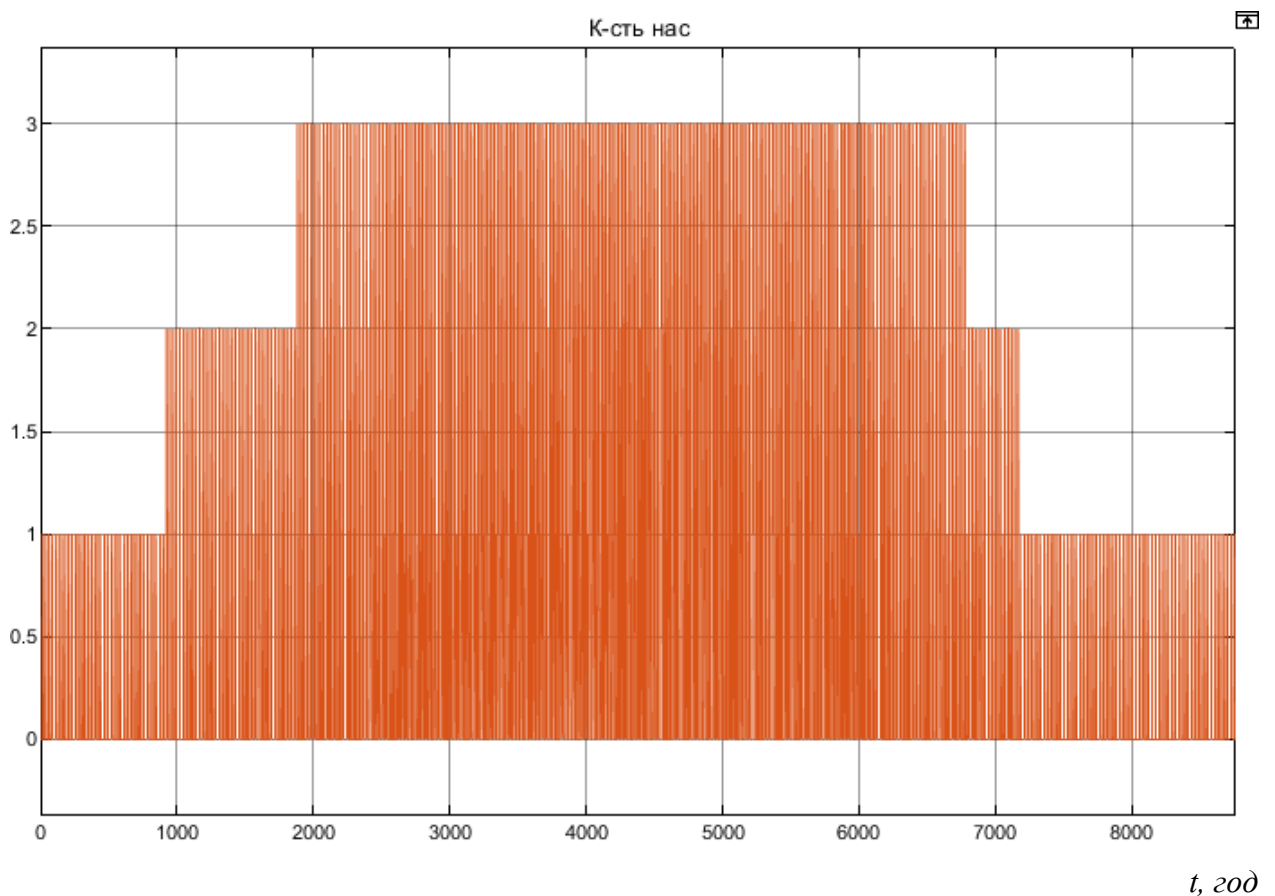


Рисунок 3.7 – Річна діаграма кількості задіяних насосів

Аналіз даних дозволяє виділити такі характерні періоди: з травня по жовтень – максимальне завантаження, одночасна робота 3 насосів; у січні-лютому – мінімальне завантаження, працює лише 1 насос; у перехідних місяцях (березень, грудень) задіяні 2 насосні агрегати. Така динаміка обумовлена сезонними змінами генерації фотоелектростанції, яка живить насоси. Влітку її потужності цілком достатньо для максимальної подачі води,

а взимку генерації вистачає лише на 1 насос. Тому кількість працюючих насосів є індикатором поточних режимів роботи всієї енергосистеми.

Ступінчата структура вмикання насосних агрегатів забезпечує високий середній ККД насосної станції в широкому діапазоні витрат – від 16,7...100 % витрати Q , що зображено на рис. 3.8. Зокрема, в зоні високих ККД (понад 70%) насосна станція працює 94% часу. Така ефективна робота досягається завдяки покриттю менших витрат шляхом послідовного вимикання зайвих насосів. Це дозволяє розширити нижню межу робочого діапазону витрат з 50% до 16,7% витрати Q . Таким чином багатоагрегатна структура насосної станції з автоматичним керуванням дозволяє максимально ефективно використовувати енергію фотоелектростанції для перекачування води у широкому операційному діапазоні.

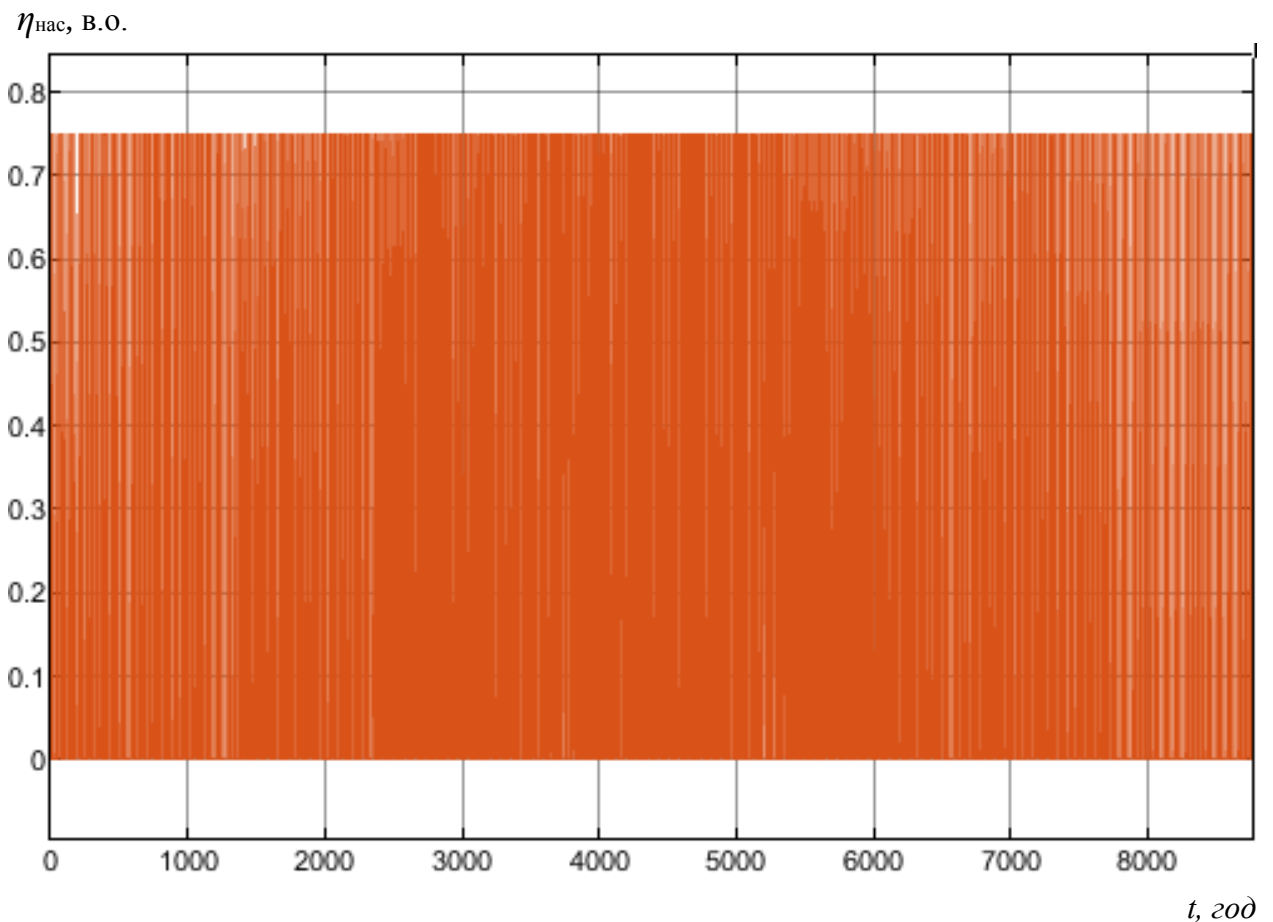


Рисунок 3.8 – Річна діаграма зміни ККД насосної станції

На рис. 3.9 приведений річний графік витрати води гідротурбіною, а на рис. 3.10 у збільшеному масштабі приведено частину річного графіка для днів з 200 по 225 та з 3025.

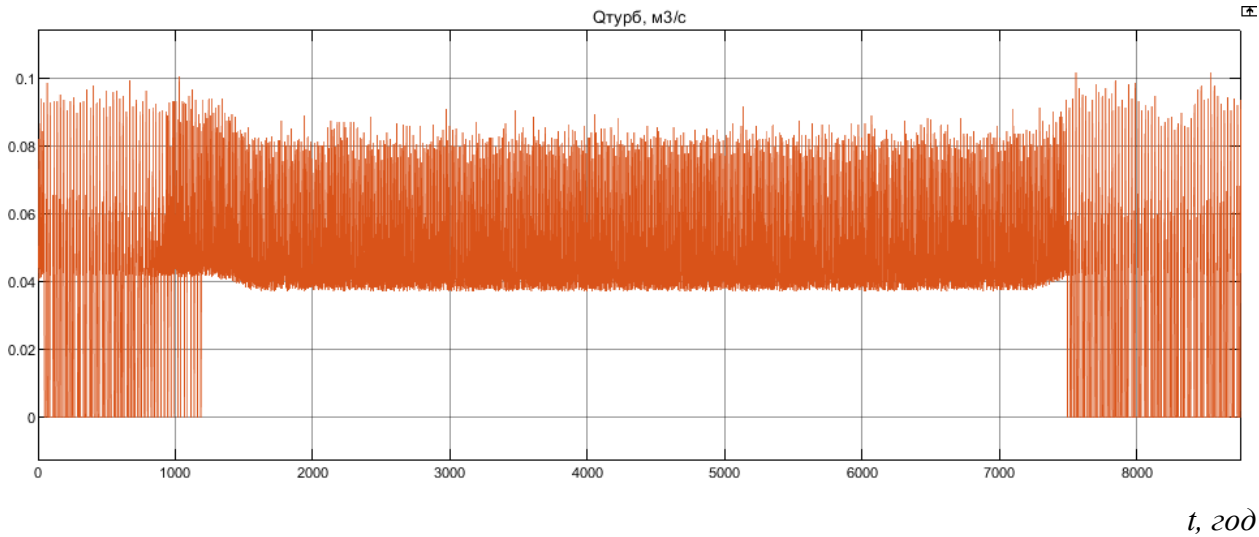


Рисунок 3.9 – Погодинний графік витрати води турбіною впродовж року

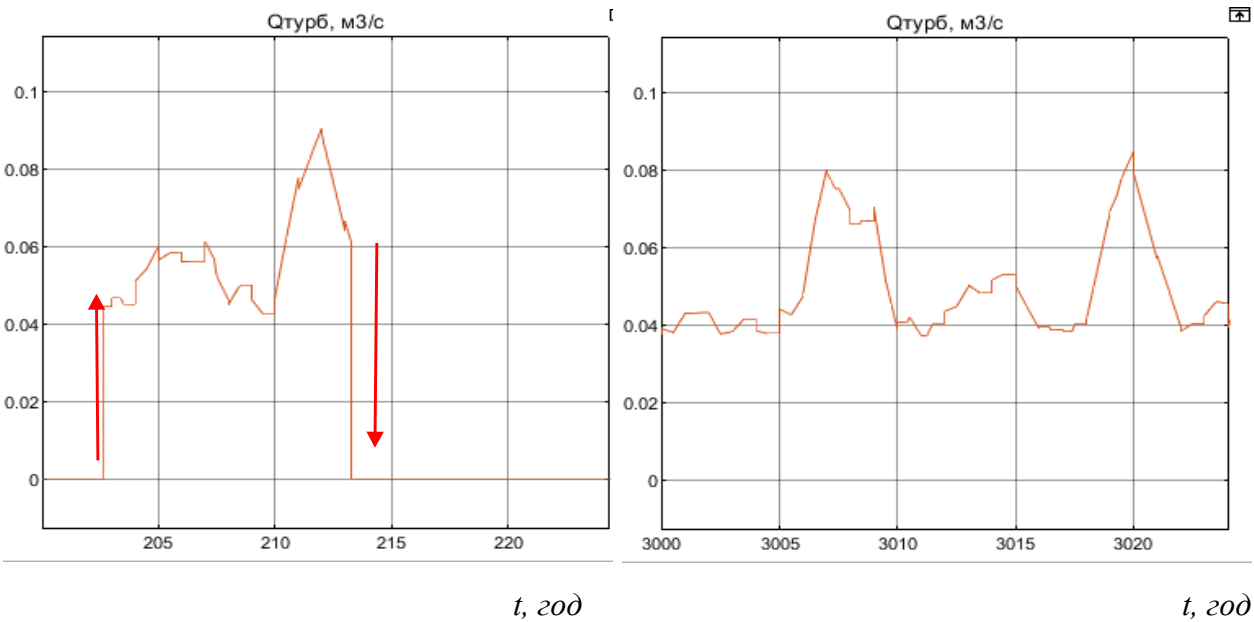


Рисунок 3.10 – Витрата води турбіною впродовж 9 та 126 дня року

Аналіз графіків витрат води гідротурбіною (рис. 3.9, рис. 3.10) свідчить, що в період з 49-го по 312-й день року (зимовий сезон) вона цілком забезпечує заплановане електроспоживання. Водночас в інші дні року щоденно

спрацьовує захист по досягненню рівнем води нижньої критичної позначки в нижньому резервуарі. Це призводить до часткового знеструмлення споживачів через обмеження генерації електроенергії гідротурбіною внаслідок браку водних ресурсів у системі. Отже, в літній період гідроресурсів достатньо для повної генерації запланованої потужності. А в зимовий проміжок часу необхідне комплексне використання всіх можливостей системи для максимізації виробництва електроенергії та забезпечення споживачів.

Аналіз динаміки рівня води у верхньому та нижньому резервуарах, річні графіки яких приведені на рис. 3.11 дозволяє виділити наступні характерні межі коливань. У період надлишку сонячної генерації з квітня по жовтень рівень води підтримується в діапазоні 7,85-8 м. В зимовий період дефіциту генерації рівень знижується до позначок 7,25-7,4 м. Перехідний період, коли станція повністю забезпечує споживача за рахунок накопиченого об'єму води, становить близько 9 діб. Прогнозований мінімальний період автономної роботи виключно за рахунок запасу верхнього резервуару за відсутності живлення від фотоелектростанції складає 4 доби.

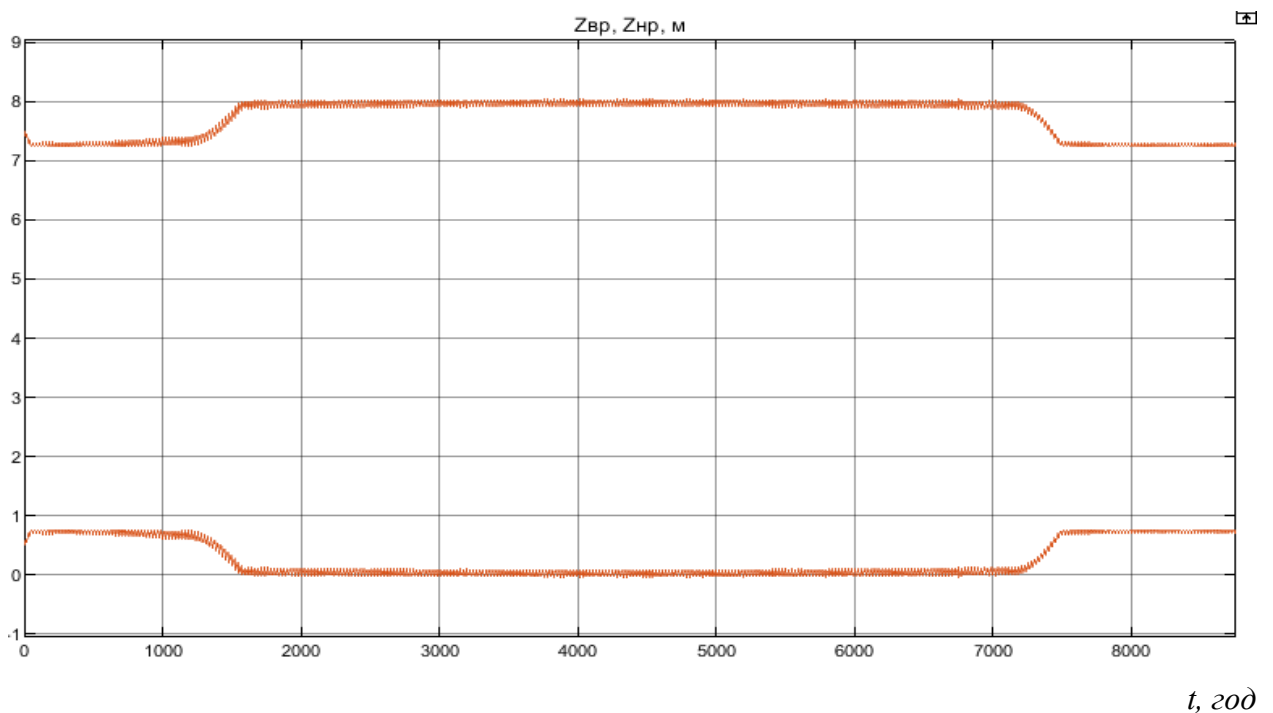


Рисунок 3.11 – Річний графік рівня води у верхньому та нижньому басейні

Загальний річний рівень забезпеченості електроспоживання в автономній системі становить близько 87%, а відповідний графік приведений на рис. 3.12. З наведеного графіка можна побачити, що з 1-го по 49-й день року відбувається поступове наростання рівня забезпечення від 45% до 100% по мірі наповнення верхнього резервуару талою і дощовою водою. В період з 49-го по 312-й день (весняно-літній період) - стабільні 100% забезпеченості завдяки компенсації нестачі води сонячною генерацією. Починаючи з 312-го дня до кінця року (осінньо-зимовий період) - поступове наростання обмежень через виснаження запасів води у верхньому резервуарі.

Тому раціональне поєднання гідроакумулювання та сонячної фотогенерації дозволяє мінімізувати періоди обмеження споживачів в електропостачанні.

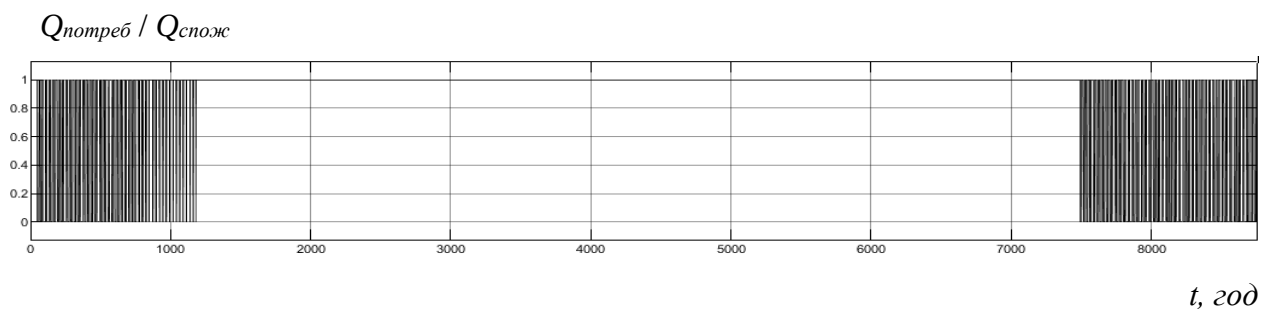


Рисунок 3.12 – Річна зміна відносного забезпечення витрати води на генерацію електроенергії

Аналіз графіка на рис. 3.13 показує пряму залежність між витратою води через гідротурбіну та обсягом ресурсу, що повертається назад у верхній б'єф за допомогою гідронасоса. Частка відновлювального потоку води рівна 13,5-17,5% від загальної кількості відпрацьованої турбіною води. При цьому спостерігається збільшення цієї частки в літній період в умовах нижчого рівня води у нижньому резервуарі та відповідно більшого напору у водогоні гідронасосу. Застосування гідронасосу дозволяє зекономити відповідну

частину електроенергії на підкачуванні того ж обсягу води назад у верхній резервуар, тим самим підвищуючи ефективність використання водних ресурсів автономної системи.

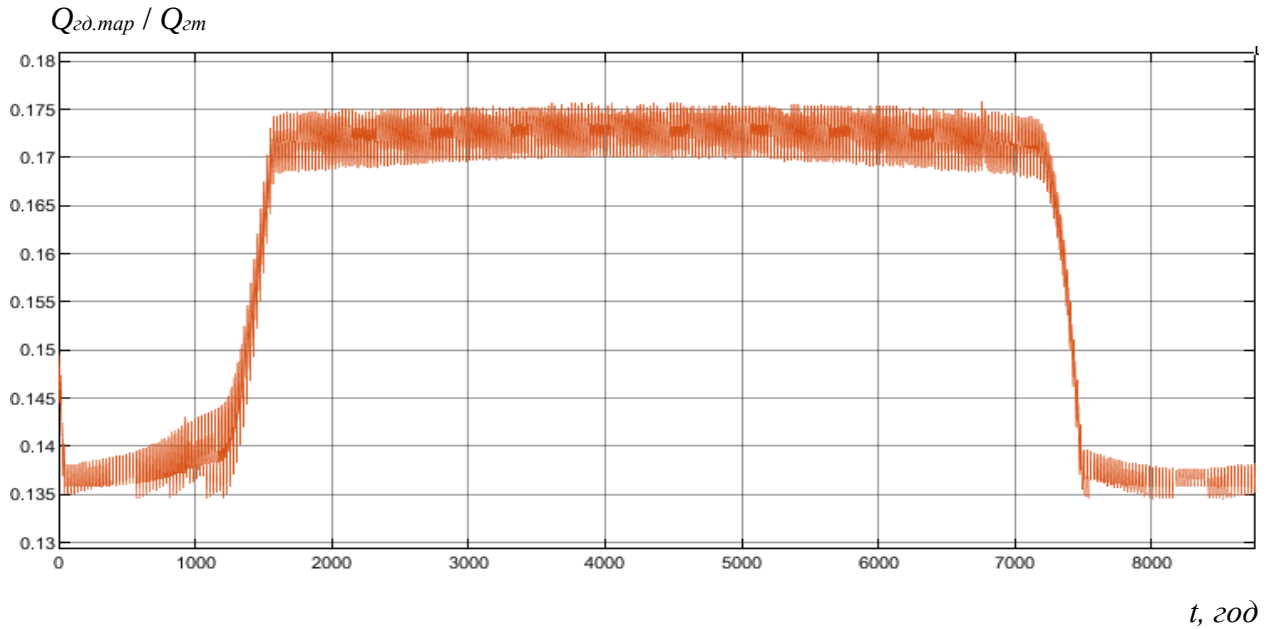


Рисунок 3.13 – Річний графік відношення витрат води гідронасосу та турбіни

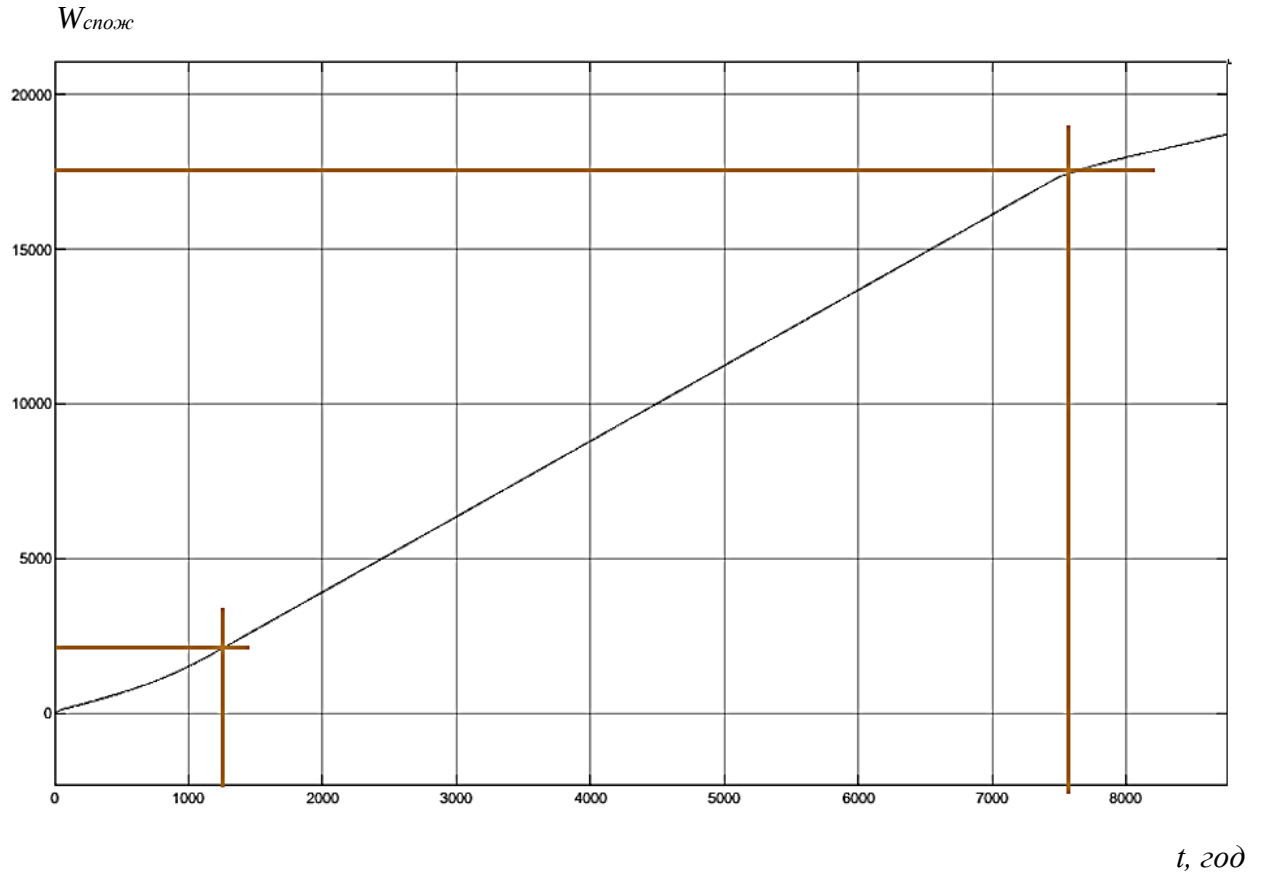


Рисунок 3.14 – Річний графік спожитої електроенергії за накопиченням

Аналіз графіка на рис. 3.14 показує, що за рік автономна енергосистема забезпечує споживачу 18730 кВт*год електроенергії. Детальніший розгляд динаміки накопиченого енергоспоживання дозволяє виділити наступні характерні періоди. З початку року до 49-го дня - зростання забезпечення від 45% до 100% по мірі наповнення водосховища талою водою. З 49-го дня (1176 год) по 312 день (7500 год) - стабільне 100% забезпечення потреб споживача. З 312-го дня до кінця року - поступове зниження рівня забезпеченості від 100% до 45% через виснаження запасів води. Рациональне використання сезонних надлишків водних ресурсів дозволяє максимізувати безперервне енергозабезпечення споживача протягом значної частини року.

3.3 Висновки до третього розділу

1. Проведено дослідження графіку електричного навантаження споживача в автономній системі впродовж року. Встановлено, що для нормального функціонування споживачу необхідний середньодобовий обсяг електроенергії на рівні 117,5 кВт*год. При цьому середня потужність споживання складає 4,895 кВт. Максимальне зафіксоване енергоспоживання сягало пікового значення 8,706 кВт.

2. Проведено детальний аналіз витрат води через гідротурбіну, гідронасос та електронасоси для задоволення графіка електричного навантаження споживача протягом доби на характерні дні різних сезонів: 15 січня, 15 квітня, 15 липня та 15 жовтня показали:

- за умови початкового рівня води у верхньому резервуарі 7,5 м протягом цілої доби забезпечується 100% покриття графіка електроспоживання незалежно від сезону;

- для цього в середньому потрібна витрата $0,051 \text{ м}^3/\text{с}$, максимальна (пікова) – $0,095 \text{ м}^3/\text{с}$;

- використання гідронасоса дозволяє зменшити потужність насосів, збільшити резерв води і надійність живлення споживача на 15%;

- взимку спостерігається від'ємний добовий баланс води і наростання дефіциту ресурсу;

- за рік система видає 18730 кВт*год електроенергії, а повна забезпеченість споживача спостерігається в період з 49-го по 312-й день року.

3. Проведено дослідження використання водних ресурсів насосною станцією та аналіз потужності, що генерується фотоелектричною станцією. Це дослідження дозволило зробити наступні висновки:

- споживання води насосною станцією прямо пропорційне кількості електроенергії, виробленої фотоелектростанцією;

- мінімальна потужність, необхідна для запуску роботи насосної станції з трьох насосів, становить близько 4,1 кВт, або 0,167 від загальної потужності станції, а по досягненні цього рівня генерації починається заповнення водосховища;

- характерні стрибки на графіку потужності свідчать про те, що при продуктивності системи 0,1 м³/с вмикається перший насос, при 0,2 м³/с – другий, а при 0,3 м³/с – третій;

- максимальна літня потужність фотоелектростанції 30 кВт забезпечує продуктивність системи на рівні 0,6 м³/с, що достатньо для заповнення половини резервуару за 8 годин. Після цього відкривається переливний клапан для зливу водних надлишків;

- число насосів, що працюють, варіюється залежно від поточного рівня вироблення електроенергії фотоелектростанцією. Наприклад, 15 січня працював лише 1 насос, в той час як 15 квітня, 15 липня та 15 жовтня у пікові години працювали всі 3 насоси. Протягом 15 січня насос з продуктивністю 0,12 м³/с за 4 години 40 хвилин перекачав 2013 м³ води. Натомість 15 квітня 3 насоси з сумарною продуктивністю 0,25 м³/с за 10 годин 9 хвилин перекачали 9135 м³. А 15 липня за 8 годин 48 хвилин було перекачано 15552 м³. Починаючи з 15 години дня протягом всього літнього періоду також відбувається зливання надлишків води.

4. Досліджено динаміку змін об'єму води у водосховищі та насосному резервуарі протягом 4 пір року. Аналіз показав наступне:

- взимку спостерігається перевищення споживання води над її акумулюванням, в результаті чого щоденне зниження рівня води в резервуарі становить 0,11 м, що дорівнює 14,7% загального об'єму і дозволяє підтримувати безперервне електропостачання лише протягом 9 днів після яких необхідну буде відмикати частину електроспоживачів;

- навесні та восени, на відміну від зими, фіксується додатний денний баланс об'єму води +0,25 м, що забезпечує 100% покриття потреб в електроенергії протягом усього періоду;

- влітку інтенсивне денне наповнення водосховища спостерігається на рівні +0,06 м/год впродовж 10 годин, а з 15 години рівень води сягає максимуму й утримується так 3 години до зниження потужності фотоелектростанції.

5. Було проведено аналіз ефективності роботи насосів та їх споживання електроенергії, що генерується фотоелектричною станцією протягом року. Це дослідження показало, що модульна конструкція насосної станції дозволяє підтримувати коефіцієнт корисної дії насосів на рівні понад 70% протягом 94% часу їх роботи. Крім того, завдяки оптимізації режимів роботи, вдалося досягти збільшення загального обсягу перекачаної за рік води на 24% порівняно з попередніми показниками.

6. Було проведено аналіз використання водних ресурсів гідравлічною турбіною протягом року. Дослідження показало, що у період з 49-го по 312-й день року споживач повністю забезпечений електроенергією, яка виробляється за рахунок води. Однак у зимовий час в день з найнижчою генерацією рівень забезпечення потреб споживача в електроенергії становить лише 45%. Тож, необхідно передбачити додаткові заходи для накопичення та зберігання водних ресурсів у зимовий період з метою забезпечення 100% потреб споживачів протягом усього року.

7. За результатами моделювання режимів роботи водосховища та насосного резервуару виявлено таку сезонну динаміку рівня води. У період з квітня по жовтень рівень води у водосховищі коливається в межах 7,85-8 м, а у лютому-березні - 7,25-7,4 м. Це пояснюється сезонними змінами обсягів виробленої фотоелектростанцією електроенергії та використанням води для генерації. Визначено, що за умов дефіциту сонячної енергії станція може повністю забезпечувати споживача електроенергією лише протягом 9 днів завдяки запасам води у водосховищі. А за повної відсутності сонячного випромінювання та генерації період автономного живлення скоротиться до 4 днів.

8. Проведено аналіз використання водних ресурсів гідронасосом у сполученні з гідротурбіною. Встановлено, що обсяг води, який перекачує гідронасос, прямо пропорційний витраті води через турбіну та складає 13,5-17,5% від цієї витрати.

Цей показник зростає влітку внаслідок підвищення тиску у живильній трубі та зниження тиску у подавальній трубі самого гідронасоса. Такі сезонні коливання пояснюються збільшенням обсягів води у водосховищі та її припливу в теплий період року.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

Забезпечення безпеки праці є вкрай важливим для будь-якого енергетичного об'єкту, зокрема автономної гідроакумуючої установки з фотоелектричною станцією. Така електростанція містить численні складні системи, котрі потребують безперервної роботи та гарантування захисту персоналу під час їх обслуговування. Хоч постійна присутність працівників у будівлі малої гідроелектростанції не обов'язкова, важливо врахувати фактори, що становлять загрозу для обслуговуючого персоналу.

Забезпечення охорони праці на елементах системи акумуляування енергії з гідроелектроустановкою та фотоелектричними панелями полягає у впровадженні безпечних процедур та політик для запобігання травматизму й аваріям. Розглянемо детальніше основні заходи з охорони праці на такій електростанції.

1. Організація безпеки робіт включає планування та координацію діяльності на електростанції, а також розробку правил техніки безпеки. Основні пункти таких інструкцій для автономної ГАЕС:

- обов'язкове дотримання всіх норм та правил безпеки під час робіт;
- заборона виконання небезпечних робіт однією людиною;
- вивчення технічної документації перед початком робіт;
- заборона допуску неповнолітніх до робіт;
- повна заборона паління та відкритого вогню на території станції;
- контроль доступу до небезпечних або неповністю укритих ділянок обладнання та приміщень;
- дотримання правил підйому вантажів та використання спеціальних засобів;
- заборона експлуатації пошкодженого або неправильно встановленого устаткування;

- регулярний контроль стану обладнання та його своєчасне обслуговування;
- заборона використання електрообладнання з пошкодженою ізоляцією чи проводкою;
- обов'язкове застосування засобів індивідуального захисту та спецодягу під час робіт з підвищеною небезпекою;
- використання лише спеціальних інструментів та устаткування для обслуговування електрообладнання;
- заборона проведення робіт на діючому обладнанні без належної підготовки та дозволу;
- суворе дотримання правил експлуатації та графіків технічного обслуговування й ремонту електроустановок;
- регулярне навчання персоналу з питань електробезпеки та безпечних методів роботи.

2. Контроль технічного стану обладнання передбачає перевірку працездатності систем електростанції перед початком робіт. Відповідальні працівники мають регулярно контролювати роботу всіх систем. До початку робіт необхідно здійснити:

- перевірку відповідності обладнання вимогам проектної та експлуатаційної документації;
- наявність необхідних документів на обладнання (паспорти, сертифікати тощо);
- перевірку оснащеності засобами захисту від небезпечних чинників (електрика, вогонь, вибух тощо);
- перевірка справності електричних та механічних засобів захисту, приладів та обладнання;
- наявність необхідних запчастин та матеріалів для оперативного усунення аварійних ситуацій;
- контроль працездатності систем вентиляції та кондиціонування;

- перевірка функціонування сигналізаційних систем та індикаторів стану обладнання;
- тестування роботи автоматичних систем управління, захисту і аварійного відключення;
- контроль якості заземлення та ізоляції електромережі;
- перевірка технічного стану та розміщення устаткування, функціонування електрообладнання;
- наявність і справність пожежних засобів, вентиляції, освітлення, водопостачання та каналізації;
- робота систем автоматичного контролю, захисту і пожежогашіння;
- цілісність зовнішнього блоку та сонячних елементів фотоелектричних батарей;
- відповідність параметрів напруги і струму паспортним значенням.

Усі перевірки мають виконуватися згідно з інструкціями безпечної роботи на автономній ГАЕС.

3. Контроль герметичності гідросистем та електромережі є важливою складовою безпеки на автономній ГАЕС. Регулярні перевірки на предмет витоків води з водосховищ та стоків електроенергії з електромереж дозволяють своєчасно виявити та усунути несправності, запобігти аваріям та травмуванню персоналу.

4. Захист від ураження електричним струмом є вкрай важливим при роботі електроустановок фотоелектростанції та енергомережі. Електричне поле навколо струмоведучих частин може завдавати шкоди персоналу:

- безпосередній негативний вплив під час перебування безпосередньо в електричному полі;
- ураження електричними розрядами при контакті з незаземленими конструкціями та складовими частинами машин, або рослинами та іншими заземленими частинами;
- вплив струму, що проходить через тіло при контакті з ізольованими об'єктами через явище струму витоку.

5. Правила зберігання, транспортування та монтажу компонентів фотоелектростанції - сонячних батарей, труб, кабелів та інших елементів з метою забезпечення їх цілісності та функціональності.

6. Вимоги щодо експлуатації, обслуговування та зберігання устаткування автономної ГАЕС - гідротурбін, генераторів, водосховищ тощо. Дотримання правил догляду, перевірки стану і зберігання дозволяє запобігти пошкодженням та продовжити строк служби обладнання.

7. Вимоги до профілактичного обслуговування та планових ремонтів обладнання автономної ГАЕС і фотоелектростанції мають забезпечувати безпеку персоналу та нормальні умови праці. До таких заходів належать:

- впровадження необхідних ізоляційних відстаней між частинами електромереж;
- захист від коротких замикань і перенапруги;
- системи контролю режимів робіт;
- освітлення робочих зон;
- блокування для запобігання помилковим діям персоналу;
- занулення та заземлення електроустаткування;
- використання засобів захисту персоналом (спецодяг, окуляри тощо).

Відповідно до норм пожежної безпеки, проєктована міні-ГЕС належить до категорії В енергооб'єктів та підлягає обов'язковому обладнанню автоматичною пожежною сигналізацією.

Крім того машинне відділення має бути забезпечене первинними засобами пожежогасіння: один вуглекислотний вогнегасник, один порошковий вогнегасник та ящик з 0,5 куб. м піску. Щит керування гідрогенератором повинен містити два вуглекислотні вогнегасники. У КТП має бути встановлено два вуглекислотні вогнегасники та ящик з 0,5 куб. м піску.

Такі протипожежні заходи дозволять запобігти виникненню та поширенню пожежі на об'єкті, а у разі виникнення загоряння - швидко ліквідувати осередки задля безпеки персоналу.

8. Забезпечення безпеки працівників від шумового та вібраційного впливу під час роботи з обладнанням автономної гідроакумуючої електростанції та фотоелектричної станції є важливим завданням.

Для запобігання або пом'якшення наслідків надзвичайних ситуацій необхідно:

- здійснювати контроль параметрів роботи устаткування та застосовувати електрообладнання відповідно до класів вибухо- та пожежонебезпеки приміщень згідно Правил улаштування електроустановок;
- виконувати блискавкозахист будівель і споруд;
- забезпечувати захист від проявів статичної електрики, що можуть призвести до пожежі;
- використовувати негорючі матеріали для основних будівельних конструкцій;
- передбачити автоматичне відключення технологічного процесу у разі виникнення загоряння.

9. Організаційні та технічні заходи запобігання надзвичайним ситуаціям включають:

- встановлення протипожежного режиму на території, зокрема визначення місць для куріння;
- проведення регулярних профілактичних оглядів та ремонтів обладнання;
- розробку інструкцій з пожежної безпеки під час технологічних процесів, експлуатації обладнання та виконання пожежонебезпечних робіт;
- встановлення порядку огляду і приведення приміщень у пожежобезпечний стан перед їх закриттям;
- розміщення знаків пожежної безпеки відповідно до норм;

- маркування дверей приміщень та зовнішніх установок за класами вибухопожежної небезпеки та зонами за ПУЕ.

Усі ці заходи є важливими для створення безпечних та здорових умов праці на автономній гідроакумуючій електростанції з фотоелектричною станцією. Особливу увагу слід приділяти регулярним інструктажам персоналу з питань пожежної безпеки та навчанню правилам поведінки у надзвичайних ситуаціях. Лише комплексний підхід дозволить мінімізувати ризики для працівників та збитки для підприємства.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті виконання кваліфікаційної роботи було вирішено наукове завдання щодо вдосконалення математичної моделі системи акумулювання електричної енергії на основі гідроакумулюючої установки із замкненим циклом використання робочого води та визначення робочих параметрів її складових частин.

1. Проведено аналітичний огляд сучасних технологій акумулювання енергії відновлюваних джерел за критеріями потужності, енергоємності, коефіцієнта корисної дії, часу пуску та терміну служби. Встановлено, що на даний час системи акумулювання на основі гідроакумулюючих установок є найбільш ефективним способом зберігання енергії від об'єктів відновлюваної енергетики. Це пов'язано з їх високим ККД, який може досягати 85%, потужністю до 5000 МВт, тривалим терміном експлуатації понад 50 років та можливістю швидкого пуску – від декількох секунд до хвилин.

2. Було вдосконалено математичну модель системи акумулювання електроенергії на основі гідроакумулюючої установки із замкненим циклом використання води шляхом додавання гідронасоса. Удосконалена модель дозволяє імітувати навантаження системи за допомогою гідронасоса, передбачати відключення споживача у разі вичерпання запасу води у верхньому резервуарі або відсутності води у нижньому резервуарі, отримувати дані про роботу гідронасосного вузла, гідрогенераторного вузла з урахуванням їх гідромеханічних характеристик, визначати витрати води по напірному та зливному трубопроводах гідронасоса, розраховувати поточний ККД окремих вузлів установки, складати баланс витрат води через насос, турбіну, гідронасос та зливний клапан, враховувати морфометричні особливості резервуарів при розрахунку поточного об'єму та рівня води.

3. В результаті аналізу роботи системи акумулювання на добовому та річному інтервалах встановлено, що для нормального функціонування

споживач потребує 117,5 кВт*год електроенергії на добу з піковою потужністю 8,705 кВт. Для забезпечення споживача енергією гідротурбіна в середньому витрачає 0,051 м³/с води, а для покриття пікових навантажень короткочасно - до 0,095 м³/с. На протязі року електроспоживачі використовують 18730 кВт*год енергії. У період з 49-го по 312-й день року споживач повністю забезпечений енергією. У період з 312-го по 49-й день рівень забезпечення енергією становить 45-100%.

4. Витрата води через гідронасос складає 13,5-17,5% витрати через турбіну. Використання гідронасоса дає надалі можливість зменшити необхідну встановлену потужність електронасосів, збільшити запас води в системі та рівень забезпеченості споживача енергією приблизно на 15%. Енергетична ефективність гідронасоса за результатами моделювання склала 0,67-0,69.

5. Проведене моделювання роботи системи та подальшого аналізу витрат води насосною станцією та генерації потужності ФЕС виявлено, що влітку максимальна потужність ФЕС досягає 30 кВт, що забезпечує продуктивність 0,6 м³/с. Цього достатньо для повного наповнення резервуару (+0,06 м/год протягом 10 годин) та відкриття переливного клапану після 15 годин. Навесні та восени денний баланс рівня води в резервуарі +0,25 м, що задовольняє 100% потреб споживача. Взимку в кінці дня рівень води на 0,11 м менший, ніж на початку. Тому безперервне забезпечення споживача енергією можливе на протязі 9 діб з послідовними плановим відключенням електроспоживачів або обмеженням їх електроспоживання.

6. Показано, що застосування модульної насосної станції дає можливість підтримувати ККД насосів на рівні вище 0,7 протягом 94% часу роботи та збільшує загальний обсяг води, перекачаний за рік, на 24%. Таким чином, модульність насосної станції оптимізує її роботу - підвищує ефективність насосів та загальну продуктивність за рахунок можливості підлаштовувати кількість працюючих агрегатів під поточні потреби системи. Це дозволяє раціональніше використовувати енергію і підвищує надійність водопостачання ГАЕС.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Відновлювані джерела енергії / За заг. ред. С.О. Кудрі. – Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020. – 392 с.
2. Дудюк Д.Л., Мазепа С.С., Гнатишин Я.М. Нетрадиційна енергетика: основи теорії та задачі: Навч. посіб. – Львів: «Магнолія 2006», 2008. – 188 с.
3. Енергетична стратегія України до 2035 року: «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». // Сайт Міністерства енергетики та вугільної промисловості України. URL: <http://mpe.kmu.gov.ua>.
4. Енергозбереження та використання поновлюваних джерел енергії. Частина I / Уклад.: О.П. Голик, Р.В. Жесан, І.В. Волков [та ін.]. – Кропивницький : Видавець Лисенко В.Ф., 2020 – 192 с.
5. Комплексне використання відновлюваних джерел енергії [Текст] : підручник / Бойко С. М. [та ін.] ; під ред. д-ра техн. наук, проф. Сінчука О. М. - Кременчук : Щербатих О. В. [вид.], 2021. - 202 с.
6. Кудря С.О. Основи конструювання енергоустановок з відновлюваними джерелами енергії: навч. посіб. / С.О. Кудря, В.М. Головка. – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – 184 с.
7. Півняк Г.Г. Альтернативна енергетика в Україні: монографія / Г.Г. Півняк, Ф.П. Шкрабець Нац. гірн. Ун-т. – Д.: НГУ, 2013. – 109 с.
8. Сегеда М.С. Нетрадиційні та відновлювані джерела електроенергії: навч. посібник / М.С. Сегеда, М.Й. Олійник, О.Б. Дудурич. – Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2019. – 204 с.
9. Альтернативні джерела енергії та технології їх використання : підручник / В. В. Клименко, В. П. Солдатенко, С. П. Плешков [та ін.] ; ред. В. В. Клименка. - Кропивницький : ПП Ексклюзив-Систем, 2023. - 268 с.
10. Kempener R., Borden E. Battery Storage for Renewables: Market Status and Technology Outlook. Абу-Дабі : International Renewable Energy Agency, 2015. 32 р.

11. Y. He, S. Guo, J. Zhou, F. Wu, J. Huang, H. Pei, The quantitative techno-economic comparisons and multi-objective capacity optimization of wind-photovoltaic hybrid power system considering different energy storage technologies/ Y. He et al. *Energy Conversion and Management*. 2021. № 229. С. 113.
12. П.Ф. Васько, А.П. Вербовий, М.Р. Ібрагімова, С.Т. Пазич. Гідроакмулювальні електростанції – технологічна основа інтеграції потужних вітро- та фотоелектричних станцій до складу електроенергетичної системи України // *Гідроенергетика України*. 2017. №1-2., с. 20-25.
13. Renewable Power Generation Costs in 2020. IRENA – International Renewable Energy Agency. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.irena.org/publications/2021/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2020>
14. Concept of Accumulation of Energy from Photovoltaic and Wind Power Plants by Means of Seawater Pumped Hydroelectric Energy Storage / P. Vasko, A. Verbovij ,A. Moroz, S. Pazych, M. Ibragimova, L. Sahno // 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (2019 IEEE ESS). April 17-19, 2019. Kyiv, Ukraine, pp. 188-191, doi: 10.1109/ESS.2019.8764167
15. Overview of energy storage systems in distribution networks: Placement, sizing, operation, and power quality / C. K. Das et al. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. №. 91. С. 1205–1230. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.068>
16. A. Blakers, B. Lu, M. Stocks, K. Anderson, A. Nadolny, Pumped hydro energy storage to support 100% renewable electricity (2018), С. 3672–3675
17. Koohi-Fayegh S., Rosen M. A. A review of energy storage types, applications and recent developments. *Journal of Energy Storage*. 2020. № 27.
18. Töpler J. Hydrogen as energy-storage-medium and fuel. *Renewable Energy and Environmental Sustainability*. 2016. № 1. С. 31. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://doi.org/10.1051/rees/2016033>