

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
 (повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
 (повна назва факультету)
 Кафедра електричної інженерії
 (повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Завідувач кафедри ЕІ

Коваль В.П.
 (підпис) (прізвище та ініціали)
 “ 05 ” січня 2026 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

- на здобуття освітнього ступеня бакалавр
 (назва освітнього ступеня)
 за спеціальністю 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
 (шифр і назва спеціальності)
 студенту Михайлюку Андрію Богдановичу
 (прізвище, ім'я, по батькові)
1. Тема роботи Моделювання роботи міні-ГЕС при генерації електричної енергії
 Керівник роботи Буняк Олег Андронікович, к.т.н., доцент,
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
 Затверджені наказом ректора від “31” грудня 2025 р. № 4/7-1164
2. Термін подання студентом завершеної роботи 10 червня 2026 року
3. Вихідні дані до роботи Параметри водойми для здійснення вибору обладнання міні-ГЕС: площа перерізу водойми – $S = 12\text{м}^2$; напір води – $H = 4\text{ м}$; швидкість руху потоку – $v=5\text{ км/год}$.
4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)
Вступ. 1. Аналітичний розділ. 2. Розрахунковий розділ. 3. Проектно-конструкторський розділ. 4. Безпека життєдіяльності, основи охорони праці. Загальні висновки. Перелік посилань.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)
Аналіз базових складових при проектуванні міні-ГЕС. Класифікаційна гідротурбін. Схема керування гідротурбіною. Математичне представлення міні-ГЕС. Моделювання міні-ГЕС (синхронний генератор; система збудження; турбіна). Дослідження роботи міні-ГЕС (графічне представлення).

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Безпека життєдіяльності, охорона праці	Гурик О.Я., к.т.н., доцент		

7. Дата видачі завдання 06 січня 2026 року**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний розділ	15.04.26 - 15.05.26	
2	Розрахунковий розділ	01.05.26 - 15.05.26	
3	Проектно-конструкторський розділ	10.05.26 - 01.06.26	
4	Заходи з безпеки життєдіяльності та основи охорони праці	15.05.26 - 01.06.26	
5	Формування пояснювальної записки та плакатів по кваліфікаційній роботі	15.05.26 - 10.06.26	
6	Попередній захист кваліфікаційної роботи	11.06.26 - 15.06.26	

Студент

(підпис)

Михайлюк А.Б.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Буняк О.А.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ЕТс-41. – Тернопіль.: ТНТУ, 2026.

У роботі проведено комплексне дослідження та моделювання роботи міні-ГЕС, орієнтоване на децентралізацію енергосистем із мінімальним екологічним навантаженням.

Обґрунтовано вибір поворотно-лопатевої турбіни Каплана та синхронного генератора з тиристорною системою збудження.

Розроблено структуру інтелектуального керування на базі мікропроцесорного контролера, що реалізує подвійне каскадне регулювання параметрів гідротурбіни.

Побудована математичну модель міні-ГЕС, яка дозволила детально врахувати електромагнітні процеси та механічну інерцію агрегату.

Проведений порівняльний аналіз результатів моделювання з теоретичними розрахунками, який показав високу точність системи з незначним відхиленням фазної напруги в межах допустимих втрат.

Ключові слова: міні-ГЕС, синхронний генератор, математична модель, схема керування.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	8
1.1 Аналіз базових складових при проектуванні міні-ГЕС	8
1.2 Аналіз системи керування гідротурбінними установками	13
1.3 Аналіз MatLab/Simulink для моделювання систем генерації	16
1.4 Висновки до першого розділу	18
2 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ	19
2.1 Розрахунок та вибір типу гідротурбіни та генератора	19
2.2 Вибір системи керування гідротурбіною	22
2.3 Математичне представлення міні-ГЕС	24
2.4 Висновки до другого розділу.....	28
3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	29
3.1 Моделювання міні-ГЕС в MatLab/Simulink	29
3.1.1 Імітаційна модель синхронного генератора	29
3.1.2 Дослідження роботи міні-ГЕС	37
3.2 Висновки до третього розділу	43
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	44
4.1 Вимоги до безпечного використання гідротехнічних об'єктів ГЕС	44
4.2 Заходи щодо безперебійної роботи гідротурбінного обладнання	45
4.3 Шляхи запобігання виникнення пожежі на ГЕС	48
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	51
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	53

ВСТУП

Актуальність теми.

На сучасному етапі розвитку світової енергетики питання переходу від органічного палива до відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) постає надзвичайно гостро. Масштабне використання викопних ресурсів супроводжується деструктивними процесами у сфері екологічної безпеки та зміною клімату. У цьому зв'язку використання енергії малих водних потоків викликає дедалі більший інтерес як екологічно безпечний і водночас ефективний спосіб вирішення проблеми енергозабезпечення споживачів [1].

Розвиток малої гідроенергетики зумовлений низкою стратегічних факторів [2]:

– енергетична незалежність регіонів: значна кількість територій змушена імпортувати енергоресурси, що робить актуальним освоєння місцевого гідро потенціалу;

– економічна доцільність: постійне зростання цін на рідке паливо та електроенергію, а також обмеження на підключення до централізованих мереж підвищують привабливість міні-ГЕС. Це особливо актуально для сільськогосподарських територій з навантаженням до 10 кВт/м^2 , де залучення місцевих поновлюваних ресурсів дозволяє значно знизити собівартість енергії.

– екологічний аспект: гідроенергетика не створює шкідливих викидів, що є ключовим фактором для сталого розвитку територій.

– технічний потенціал та інновації; мала гідроенергетика базується на ефективному перетворенні механічної енергії водного потоку на електричну, де основними перевагами при експлуатації є здатність працювати автономно або в складі локальних мереж, забезпечуючи стабільним живленням віддалені населені пункти. При цьому термін експлуатації таких станцій є значно довшим порівняно з іншими видами генерації;

- можливість відновлення малих ГЕС на базі існуючих гідроспоруд, що не експлуатуються, що суттєво зменшує капітальні витрати на будівництво;
- моделювання та створення енергокомплексів, в яких використання міні-ГЕС передбачає створення мультимодальних об'єктів, де гідровузли можуть виконувати роль «акумуляторів» для сонячної та вітрової енергії, знижуючи їхню нестабільність.

Проте, ефективне функціонування таких складних систем неможливе без точного моделювання процесів для оптимізації роботи системи гідротурбіна–редуктор–генератор під конкретні гідрологічні умови.

Таким чином, попереднє моделювання роботи міні-ГЕС для створення не тільки технічно досконалої а й економічно ефективної системи є необхідною умовою для забезпечення енергетичної стійкості.

Мета і завдання дослідження. Метою кваліфікаційної роботи є оцінка роботи міні-ГЕС на основі моделювання з розрахунком та вибором основного обладнання.

Відповідно до мети поставлені наступні завдання:

- провести аналіз базових складових при проектуванні міні-ГЕС та систем керування гідротурбінних установок;
- провести розрахунок та вибір основного обладнання міні-ГЕС за вхідними даними;
- здійснити математичний опис синхронно генератора для проведення чисельного моделювання;
- провести оцінку роботи міні-ГЕС на основі імітаційної моделі;
- провести аналіз заходів щодо безпечного використання гідротехнічних об'єктів та шляхів запобігання виникнення пожежі на ГЕС.

Об'єкт дослідження – процеси в системах генерування електричної енергії на базі відновлювальних джерел енергії.

Предмет дослідження – оцінка роботи міні-ГЕС на основі побудови імітаційної моделі.

Практичне значення отриманих результатів. Запропонована імітаційна модель дає можливість аналізувати та визначати параметри налаштування системи керування міні-ГЕС.

Структура роботи. Робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, переліку посилань (14 найменувань).

Загальний обсяг текстової частини – 55 сторінок, містить 2 таблиці та 27 рисунків.

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Аналіз базових складових при проектуванні міні-ГЕС

Сучасна енергетика орієнтована на децентралізацію та використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) [1].

У відповідності до міжнародної класифікації міні-ГЕС вважаються об'єкти з потужністю від 100 кВт до 1000 кВт, в яких основним принципом роботи є конвертація кінетичної енергії водного потоку в електричну енергію. Для оптимізації цього процесу в умовах малих річок часто вдаються до будівництва гребель або створення водосховищ, що дозволяє штучно збільшити напір (H) та стабілізувати витрату води (Q) [1, 2].

Як правило, на практиці, міні-ГЕС встановлюються в сільській місцевості для забезпечення постійного підключення до електроенергії споживачів, а також вирішує проблему з електропостачанням в віддалені райони де є водойми, оскільки міні-ГЕС може бути повністю автономним джерелом енергії [2].

Архітектура міні-ГЕС – це складний інженерний комплекс, де кожен елемент повинен бути чітко синхронізований за характеристиками.

Основний склад обладнання міні-ГЕС [2]:

- гідравлічна турбіна: первинний двигун, що перетворює енергію води на механічний момент;
- генератор: перетворювач механічної енергії в електричну;
- гідротехнічна арматура: входні клапани та затвори для регулювання подачі води;
- механічна трансмісія (мультиплікатори): пристрої для узгодження частоти обертання турбіни та генератора;
- силове електрообладнання: трансформатори струму та напруги для адаптації параметрів під мережеві стандарти;

– система автоматизації та захисту: цифрові контролери та системи аварійного живлення постійного струму.

За конструкцією міні-ГЕС можна поділити в залежності від напору води (H): низьконапірні (рис. 1.1) та високонапірні (рис. 1.2) [3].

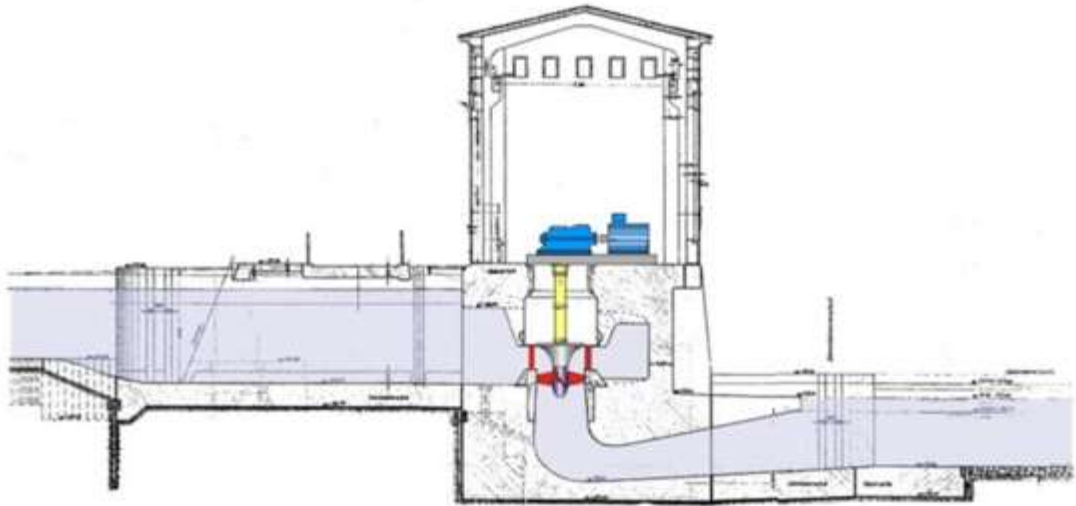


Рисунок 1.1 – Конструкція міні-ГЕС з низьким напором [3].

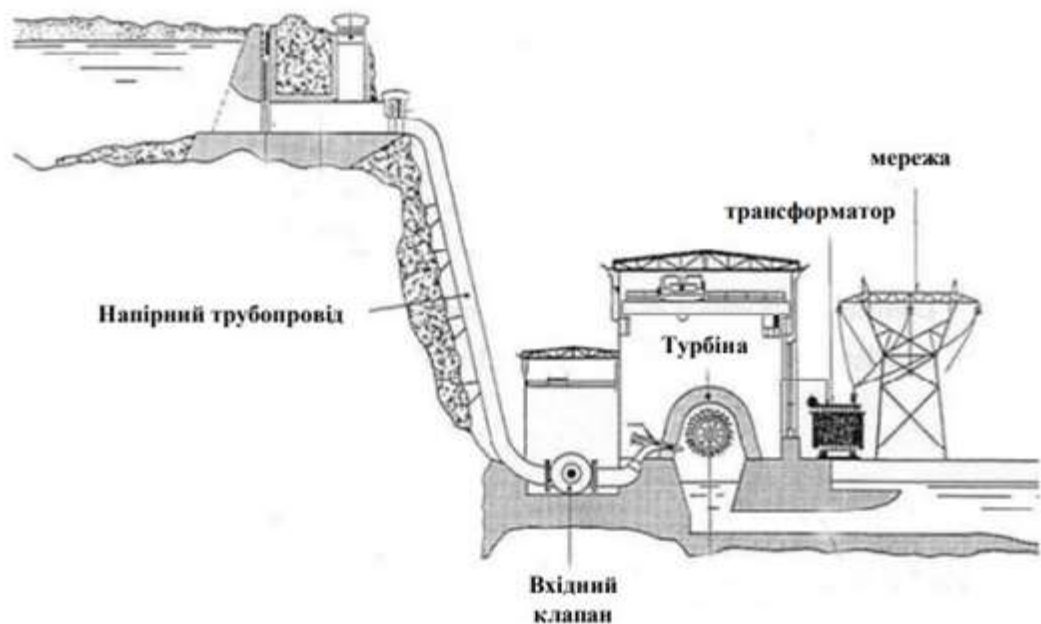


Рисунок 1.2 – Конструкція міні-ГЕС з високим і середнім напором [3].

Гідротурбіна є ключовим вузлом, її вибір визначає загальну ефективність станції. За фізикою взаємодії з потоком вони поділяються на дві великі групи (рис. 1.3) [1-2]:

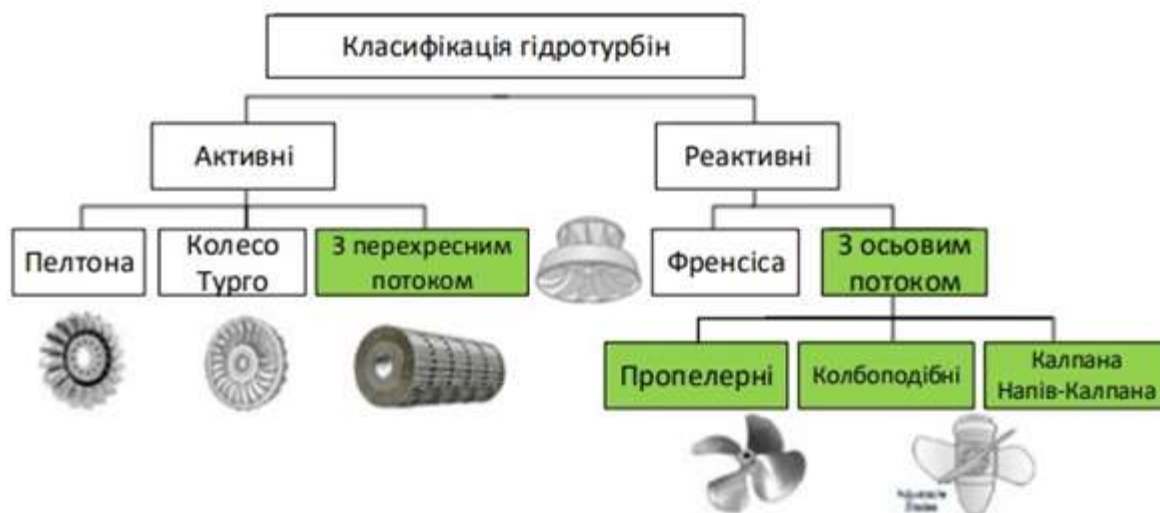


Рисунок 1.3 – Класифікація гідротурбін [3].

А) Активні турбіни (*Impulse Turbines*) – механізми, які використовують виключно кінетичну енергію, тобто, весь наявний тиск води перед робочим колесом перетворюється на швидкість у соплі:

– турбіна Пелтона (*Pelton*): оптимальна варіант для високих напорів води ($H > 60 \text{ м}$), де конструкція з ковшоподібними лопатями (до 40 одиниць) дозволяє розділяти струмінь води на дві частини, що мінімізує зношення осі;

– турбіна Турго (*Turgo*): модернізований варіант Пелтона для середніх напорів води ($H = 50 - 250 \text{ м}$), де потік води подається під кутом 20° , що дозволяє досягати вищої швидкості обертання при дещо нижчому *ККД*.

Б) Реактивні турбіни (*Reaction Turbines*) – механізми, які працюють за рахунок комбінації кінетичної енергії та потенціальної енергії тиску:

– турбіна Френсіса: чітко виражена радіально-осьова конструкція, де вода циркулює від периферії до центру, застосовується при високих напорах ($25 > H > 600 \text{ м}$), має високий *ККД*, але потребує точного регулювання напрямних лопаток;

– Турбіна Каплана: осьова турбіна в вигляді пропелера дозволяє здійснювати регулювання кута нахилу лопатей (подвійне регулювання) при

критично низьких значеннях напору води ($H = 2 - 40 \text{ м}$) зі змінною витратою води;

– перехресно-потоків турбіни (*Banki – Mitchell*): володіють нижчим *ККД* в діапазоні напору води ($H = 5 - 200 \text{ м}$), але прості в виробництві та ремонті та є ідеальними для встановлення в сільській місцевості.

Враховуючи, що міні-ГЕС встановлюються в місцях обмеженої кількості води при відсутності водосховища, тобто працюють при низькому напорі та великій швидкості потоку, то найбільш практичними для встановлення механізмами є осьові мікро-гідравлічні турбіни, або турбіни з перехресним потоком.

Синхронні та асинхронні генератори. Вибір генератора для міні-ГЕС залежить від режиму роботи: автономний (*Island mode*) або паралельно з енергосистемою [4].

А) Асинхронні генератори – поширені для малих потужностей завдяки низькій ціні та надійності: переваги – не потребують складної синхронізації при підключенні до мережі та мають компактні розміри; недоліки – необхідність в реактивній потужності для збудження та при роботі в автономному режимі вимагають встановлення потужних конденсаторних батарей.

Б) Синхронні генератори – для великої гідроенергетики та автономних систем: в якості збудження використовують статичні, які забезпечують швидку реакцію на коливання напруги, або безщіткові системи; дозволяють точно контролювати напругу та частоту незалежно від характеру навантаження (активне/індуктивне) [5, 6].

При проектуванні міні-ГЕС важливо враховувати не лише вартість обладнання, а й втрати в системі. Наприклад, використання асинхронного генератора з фазним ротором та частотним перетворювачем у колі ротора може бути ефективнішим за схему з перетворювачем на повну потужність. Хоча повне керування статором дає кращу підтримку мережі, воно генерує до 55 % загальних втрат в силовій електроніці [5].

Як показав аналіз основних складових міні-ГЕС, для умов малих річок найбільш практичними є осьові та перехресно-потоківі турбіни в поєднанні з асинхронними генераторами (при роботі в мережі) або синхронними машинами (для автономного живлення). Правильний вибір дозволяє перетворити міні-ГЕС на стабільне, економічно вигідне та екологічно безпечне джерело енергії.

Трансформатори. На міні-ГЕС виконують функції узгодження низької напруги генератора з напругою розподільчої мережі при необхідності роботи з мережею. При автономній роботі трансформатори виконують функції забезпечення власних потреб міні-ГЕС: живлення систем автоматики, приводів затворів, освітлення та обігріву [7].

Гідромеханічне обладнання. Виконує функції забезпечення безпеки споруд та керування енергетичним потенціалом водотоку. На ГЕС це: основні (робочі) затвори – регулюють подачу води до турбіни: дискові або кулькові засувки з гідравлічним або електричним приводом; аварійно-ремонтні: встановлюються перед основними для можливості осушення проточної частини при ремонті або в разі відмови робочої засувки [3].

Особливістю система затворів є необхідність в автономному джерелі енергії (акумулятори/гравітаційний механізм закриття): у разі повного знеструмлення станції ("*Black Start*") засувка повинна перекрити потік, запобігаючи розгону турбіни або затопленню машинної зали [3].

Захист міні-ГЕС – система, що поєднує механічні, гідравлічні та електричні компоненти [3].

В якості електричного захисту (*РЗА*) використовуються мікропроцесорні термінали захисту, які контролюють:

- захист від замикань на землю/міжфазні замикання – миттєве відключення генератора;
- захист від зворотної потужності – запобігає переходу генератора в режим двигуна (може пошкодити лопаті);

– захист за частотою – важливо для автономних систем, задля уникнення пошкодження споживачів.

В якості механічного та технологічного захистів, які контролюють фізичні параметри агрегату [5]:

– температурний захист – моніторинг підшипників турбіни та обмоток генератора;

– вібраційний моніторинг – виявлення кавітації/дисбалансу робочого колеса;

– захист від розгону – при перевищенні швидкості обертання турбіни номінальної на 15–20 % (скидання навантаження), система автоматично «скидає» затвори та дефлектори (турбіна Пелтона).

Ефективність міні-ГЕС залежить від спорідненої роботи трьох підсистем (трансформатор, затвори, захист). Наприклад, при спрацюванні захисту, система керування затворами повинна миттєво зреагувати на зміну моменту на валу для недопущення механічного перенавантаження турбіни.

1.2 Аналіз системи керування гідротурбінними установками

Система керування на міні-ГЕС – це інтелектуальний центр, що забезпечує стабільність енергогенеруючого процесу [8].

Основними функціональними одиницями в цій структурі виступають регулятори, які виконують функцію динамічної зміни параметрів водного потоку – це необхідно як для підтримки регламентованих показників вихідної потужності, так і для стабілізації кутової швидкості обертання вала, що безпосередньо корелює з частотою змінного струму.

У відповідності до міжнародного стандарту *IEEE № 75* в загальній системі керування (рис. 1.4) виділено чотири фундаментальні компоненти, які утворюють єдиний технологічний ланцюг [8]:

- елементи прецизійного вимірювання кутової швидкості – давачі, які фіксують найменші відхилення від номінального режиму обертання;
- підсистема керування регуляторами приводів – розрахунковий блок, що аналізує вхідні дані та формує логіку керування;
- система стабілізації та регулювання гідравлічного тиску – забезпечує необхідний енергетичний потенціал для роботи виконавчих органів;
- виконавчі сервомотори – пристрої, які здійснюють безпосередній механічний вплив на затвори (лопатки турбіни), трансформуючи сигнальну інформацію у фізичну дію.

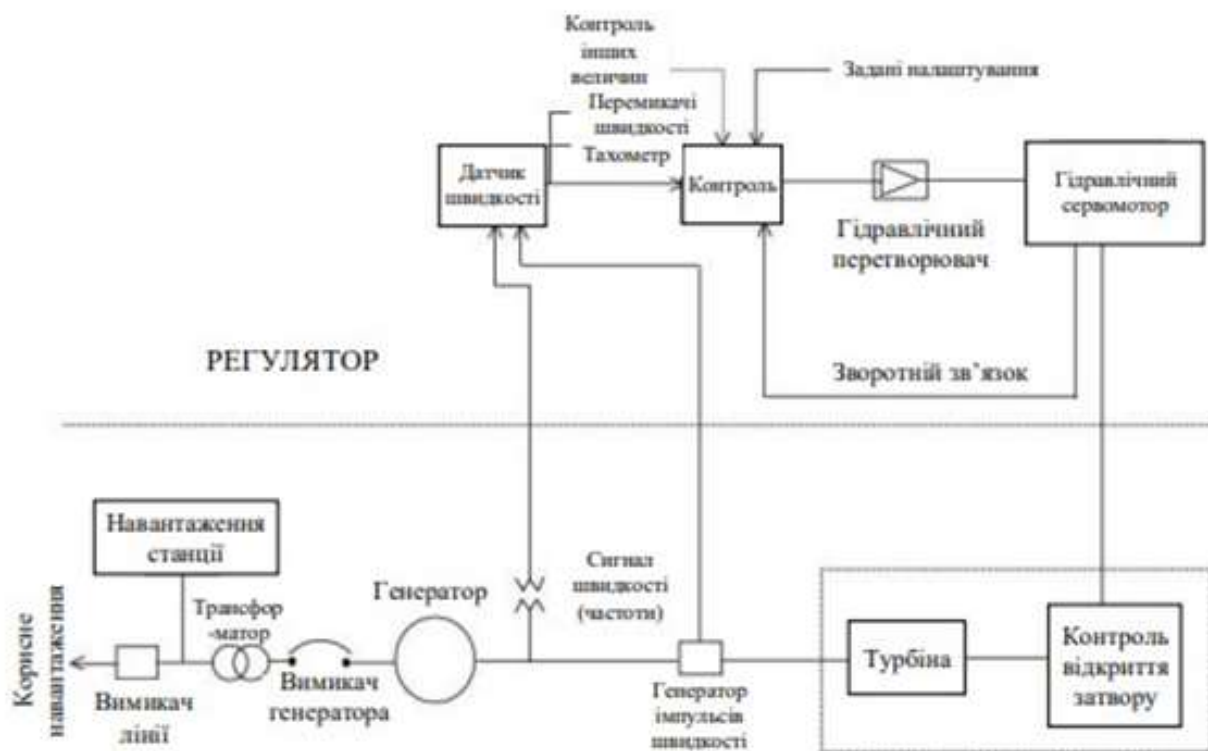


Рисунок 1.4 – Схема керування гідротурбіною [8].

Експлуатаційна надійність міні-ГЕС залежить від здатності регулятора виконувати ряд критичних функцій, які можна класифікувати за етапами роботи станції [8]:

- фаза синхронізації: первинно, регулятор забезпечує виведення агрегату на задану кутову швидкість для безпечного підключення до енергомережі/паралельної роботи з іншими генераторними установками;

- стабілізація частоти: забезпечення підтримки частоти системи, де регулятор автоматично коригує потужність турбіни у відповідь на зміну навантаження в мережі споживача;
- балансування та координація: забезпечення рівномірного або заданого пропорційного збалансування навантаження при роботі декількох агрегатів;
- інтерфейс керування: система забезпечує високу точність виконання команд диспетчера/оператора щодо оперативного регулювання потужності;
- безпека та захист: важливим аспектом є швидкодія під час штатного вимкнення та активація аварійного захисту в разі виникнення позаштатних ситуацій.

Вибір підходу до керування гідротурбіною безпосередньо залежить від архітектури мережі, в яку інтегрована міні-ГЕС:

А) Ізольовані системи (автономні ГЕС): жорстке регулювання частоти, так як будь-яка зміна навантаження в обмеженій мережі призводить до миттєвого відхилення частоти струму;

Б) Великі об'єднані енергосистеми: необхідність регулювання навантаження відповідно до встановлених квот потужності та графіків споживання.

Сучасний етап розвитку міні-ГЕС передбачає широке впровадження цифрових регуляторів [6]. На відміну від аналогових систем, цифрові пристрої окрім забезпечення високої точності, виконують комплексні функції захисту та інтегрованого керування всією інфраструктурою гідроелектростанції.

В основі базової системи керування (рис.1.4) лежить класична модель зворотного зв'язку – забезпечення безперервної фіксації фактичних значень [8]: кутової швидкості обертання; поточної електричної потужності генератора; рівня води у верхньому б'єфі (водосховищі).

Провівши порівняння отриманих значень зі значеннями контрольних точок (уставка), система вираховує відхилення та здійснює керування пристроями регулювання навантаження, що дозволяє міні-ГЕС адаптуватися до мінливих гідрологічних умов або вимог споживачів у режимі реального часу.

1.3 Аналіз MatLab Simulink для моделювання систем генерації

Інструменти моделювання синхронних генераторів (СГ) посідають ключове місце у процесах проектування та дослідження об'єктів електроенергетики. Висока значущість таких засобів зумовлена складністю структури СГ, значною кількістю параметрів та специфічними характеристиками, які критично важливо враховувати під час розробки. Використання сучасних методів симуляції дозволяє формувати прецизійні математичні моделі електричних машин, що детально відтворюють їхню динаміку в широкому спектрі експлуатаційних режимів та зовнішніх умов [9-10].

Застосування моделювання відкриває шлях до поглибленого вивчення перехідних процесів у синхронних генераторах, зокрема при виникненні мережових збурень або позаштатних ситуацій. Оцінка їхнього впливу на стабільність енергосистеми в цілому дає змогу оптимізувати процеси керування, підвищити рівень безпеки та загальну надійність енергопостачання [9].

Ефективне відтворення роботи СГ потребує спеціалізованого програмного забезпечення для чисельних розрахунків. Це дозволяє комплексно аналізувати електромеханічні властивості, електромагнітні явища, енергетичні втрати та вплив генератора на стійкість мережі. Крім того, цифрові платформи створюють умови для розробки та апробації алгоритмів оптимізації роботи обладнання [9]. Отже, засоби комп'ютерної симуляції забезпечують деталізацію характеристик СГ як елемента єдиної енергосистеми, що гарантує точність проектних рішень.

У даному дослідженні як основний інструментарій обрано середовище *MatLab*. Це універсальна інтегрована платформа, призначена для математичного аналізу, візуалізації та розв'язання складних інженерних задач.

MatLab вирізняється потужною матричною мовою програмування та розгалуженим набором вбудованих функцій. Можливості системи охоплюють чисельну алгебру, статистику, методи оптимізації та обробку сигналів [9-10], що забезпечує високу продуктивність при проведенні інтенсивних обчислень. Важливою перевагою *MatLab* є розвинений графічний апарат: користувачі

можуть генерувати деталізовані графіки та анімації, що є необхідним для інтерпретації результатів моделювання та підготовки наукових звітів [9].

Гнучкий графічний інтерфейс системи дозволяє створювати персоналізовані додатки та утиліти. Це дає змогу адаптувати робоче середовище під конкретні потреби користувача, керуючи параметрами моделі безпосередньо в процесі розрахунку [9]. Окрім цього, підтримка технологій паралельних обчислень дозволяє масштабувати завдання, максимально ефективно використовуючи потужність апаратного забезпечення.

Додаток *Simulink* розширює базовий функціонал *MatLab*, дозволяючи досліджувати динамічну поведінку систем у часі [9]. Головною особливістю *Simulink* є концепція візуального програмування: моделі будуються у вигляді блок-схем, де кожен блок імітує фізичний компонент або функцію, а зв'язки відображають інформаційні чи енергетичні потоки [9].

Використання *MatLab / Simulink* охоплює широку сферу – від аналізу простих електричних кіл до проектування складних автоматизованих комплексів. Наявність великих бібліотек стандартних блоків (регуляторів, джерел сигналів, математичних операторів) значно спрощує процес розробки моделей [17]. Додатковою перевагою є можливість симуляції в реальному часі, що критично важливо для налагодження систем керування та тестування прототипів перед їх впровадженням у виробництво. Повна інтеграція з іншими модулями системи дозволяє залучати потужні аналітичні алгоритми для обробки отриманих даних [9, 10].

Таким чином, *MatLab / Simulink* є ефективним інструментом, що поєднує графічну наочність, функціональну базу, можливість реалізації складних симуляцій у реальному часі.

1.4 Висновки до першого розділу

Проведений аналіз показав, що проектування міні-ГЕС базується на децентралізації енергосистеми та використанні кінетичної енергії малих

водотоків з мінімальним екологічним навантаженням.

Для умов малих річок з низьким напором найбільш обґрунтованим є застосування осьових або перехресно-потоківих турбін, які забезпечують стабільну генерацію навіть за мінливих гідрологічних умов.

Дослідження електричної складової показало, що вибір типу генератора безпосередньо залежить від режиму експлуатації станції: асинхронні машини є оптимальними для паралельної роботи з загальною мережею завдяки своїй простоті, тоді як синхронні генератори є незамінними для автономного живлення віддалених об'єктів через можливість точного контролю напруги та частоти. При цьому особлива увага має приділятися системі затворів та мікропроцесорному захисту, які запобігають механічному розгону турбіни та електричним пошкодженням у разі аварійних ситуацій.

Аналіз систем керування підтвердив, що стабільність роботи міні-ГЕС забезпечується інтелектуальними цифровими регуляторами, які функціонують за принципом зворотного зв'язку. Такі системи дозволяють у реальному часі адаптувати потужність агрегату до флуктуацій навантаження споживачів та змін рівня води.

Обґрунтовано доцільність використання програмного середовища *MatLab / Simulink* як основного інструментарію для подальшого моделювання. Дана платформа дозволяє створювати деталізовані математичні моделі синхронних генераторів та перехідних процесів у блок-схемах, що значно скорочує витрати на проектування та дає змогу апробувати алгоритми керування в безпечному віртуальному середовищі. Це створює необхідну базу для переходу до практичної частини дослідження – розробки прецизійної моделі системи генерації міні-ГЕС.

2 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

Для здійснення моделювання роботи міні-ГЕС, формування вхідних даних для комп'ютерного аналізу роботи, необхідно провести розрахунки щодо вибору турбіни, системи керування та синхронного генератора. Первинно керуємося параметрами заданими завданням на кваліфікаційну роботу:

- напір води (H): $H = 4 \text{ м}$;
- площа перерізу водойми (S): $S = 12 \text{ м}^2$;
- швидкість руху потоку (\mathcal{G}): $\mathcal{G} = 5 \text{ км/год}$.

2.1 Розрахунок та вибір типу гідротурбіни та генератора

Визначаємо витрату води для означення потужності, яку може забезпечити міні-ГЕС [2]:

$$Q = \mathcal{G} \cdot S = 1,39 \cdot 12 = 16,68 \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2.1)$$

де $\mathcal{G} = 5 \text{ км/год} \approx 1,39 \text{ м/с}$.

Враховуючи мале значення напору води ($H = 4 \text{ м}$) при великій її витраті до аналізу щодо вибору гідротурбіни можливо прийняти тільки реактивні турбіни осьового типу [2]:

- поворотно-лопатева турбіна Каплана, яка дає можливість проводити регулювання кут лопатей від рівня води або швидкості течії враховуючи практично без втрат роботу при малих значеннях напору ($2 - 20 \text{ м}$);

- пропелерна турбіна з жорстко закріпленими лопатями, яка ефективна при постійній витраті води, але дешева в варіанті низького напору;

- турбіна занурювальна (*Hydro-unit*), в якій турбіна й генератор перебуває під водою як моноблок, що забезпечує зручність в монтажі.

Для здійснення моделювання, враховуючи вихідні та розрахункові параметри, й керуючись діаграмою (рис.2.1) приймаємо поворотно-лопатеву турбіну Каплана.



Рисунок 2.1 – Графік застосування турбін [3].

Визначаємо теоретичну електричну потужність яку може передати потік води через гідротурбіну [2]:

$$P_{el} = \eta \cdot \rho \cdot g \cdot H \cdot Q = 0,75 \cdot 1000 \cdot 9,81 \cdot 4 \cdot 16,68 = 490,9 \text{ кВт}, \quad (2.2)$$

де η – коефіцієнт корисної дії, приймаємо $\eta = 0,75$, враховуючи втрати турбіна-редуктор-генератор;

ρ – густина води, $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$;

g – прискорення вільного падіння, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$;

H – напір води, $H = 4 \text{ м}$;

Q – витрата води, $Q = 16,68 \text{ м}^3/\text{с}$.

Виходячи з отриманого значення, рекомендована потужність генератора повинна складати 500 кВт .

Для міні-ГЕС означеної потужності вибираємо тип генератора з двох варіантів:

– перший, синхронний, який може працювати автономно з регулюванням напруги, але є дорогий і потребує складної системи збудження;

– другий асинхронний, який має просту конструкцію, дешевий, оптимальний при роботі з мережею, але вимагає від неї енергії для збудження.

Для здійснення моделювання приймаємо синхронний генератор $СГС-900F-12Н1$ разом з установкою $УВГС-500-0,4$, яка забезпечить статичну (тиристорну) систему збудження. Вибраний генератор електричної енергії забезпечує низьку швидкість обертання ротора (12 полюсів) – 500 об/хв , що дозволяє використати редуктор простої конструкції для підвищення швидкості обертання ротора при зниженні обертання валу гідротурбіни.

Основні дані синхронного генератора зведені в таблиці 2.1

Таблиця 2.1 – Дані синхронного генератора $СГС-900F-12Н1$ [12]

Номінальна потужність, кВт	Номінальна частота обертання, об/хв	Номінальна напруга, В	$\cos \varphi$	Кількість пар полюсів	ККД, %
500	500	400	0,8	6	94,1

Опираючись на дані таблиці 2.1 визначаємо параметри генератора:

– номінальну фазну напругу:

$$U_{н.ф} = U_{н.л} / \sqrt{3} = 380 / \sqrt{3} = 219,4 \text{ В}, \quad (2.3)$$

де $U_{н.л}$ – номінальна лінійна напруга, В ;

– номінальну повну потужність:

$$S_n = P_n / \cos \varphi = 500 \cdot 10^3 / 0,8 = 625 \text{ кВА}, \quad (2.4)$$

де $\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності;

– номінальний фазний струм:

$$I_{н.ф} = S_n / (\sqrt{3} \cdot U_n) = 625 \cdot 10^3 / (\sqrt{3} \cdot 380) = 949,6 \text{ А.} \quad (2.4)$$

2.2 Вибір системи керування гідротурбіною

Для задання опцій при моделюванні роботи гідротурбіни міні-ГЕС необхідно здійснити вибір схеми керування з врахування того, що вибрана гідротурбіна типу Каплана. [7].

Основна мета керування гідротурбіною – побудова зворотного зв'язку для зміни значення кутової швидкості в залежності від потоку води (швидкість, напір води) та забезпечення вихідної потужності гідротурбіни й постійної швидкості обертання ротора генератора (рис. 2.2). В нашому випадку мова йде про положення лопатей поворотно-лопатевої турбіни Каплана.



Рисунок 2.2 – Структура базової системи керування [8].

В якості регулятора використовуємо цифровий регулятор на базі промислового мікропроцесорного контролера *ComAp InteliDrive Hydro* для подвійного регулювання, який містить функції керування поворотно-лопатевиими турбінами [8].

У порівнянні з аналоговими системами прийнята система забезпечить вищу надійність, стабільність параметрів та гнучкість налаштувань через програмне забезпечення. Також, завдяки модульній конструкції такі системи

спрощують дистанційне керування та мінімізують кількість проводів та дозволяють оперативно адаптуватися до змінних умов експлуатації [2].

Окрім означеного, вони дозволяють здійснювати спільне керування декількома об'єктами та дистанційний моніторинг.

З позиції моделювання для подвійного регулювання використовуємо *ПД*-регулятор, який забезпечує реагування при зміні значення перехідного коефіцієнта підсилення та працює в каскаді [3]:

- контур швидкості: порівняння частоти з шаблоном (50 Гц) з формуванням вихідного сигналу на відкриття напрямного апарату (затвору);
- контур розміщення лопаток: на основі положення напрямного апарату розраховує кут повороту лопаток на базі *ПД*-регулятора серводвигуна.

Структурна схема *ПД*-регулятора для керування серводвигуном подано на рис. 2.3.

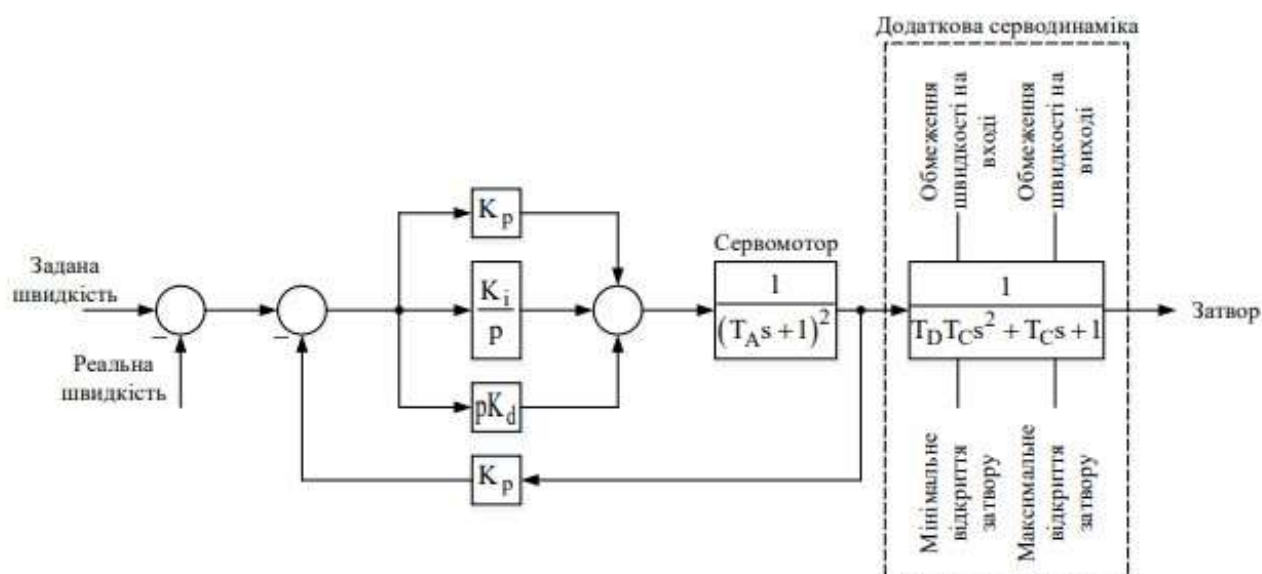


Рисунок 2.3 – Модель *ПД*-регулятора.

2.3 Математичне представлення міні-ГЕС

Математичне представлення синхронної машини в загальному та синхронного генератора ($СГ$), зокрема, базується на комплексному аналізі взаємодії магнітних полів статора та ротора. Ключову роль відіграють рівняння електромагнітних процесів, які відображають зв'язок між струмами й напругами в обмотках, а також враховують електричні параметри: активні та реактивні опори й індуктивності. Таке моделювання є критично важливим для дослідження динаміки обладнання в усталених та перехідних режимах, що дозволяє ефективно проектувати системи керування електроенергетичними комплексами [9-11].

Для спрощення розрахунків при виведенні рівнянь використовуємо певні припущення. Зокрема [7], вважаємо, що магнітна система є ненасиченою (індуктивність не залежить від струму), індукція в зазорі розподілена синусоїдально, а фазні обмотки розташовані симетрично. Також, враховуємо наявність двох демпферних контурів, які територіально збігаються з поздовжньою та поперечною осями ротора. Це дозволить обмежити опис електричної частини шістьма рівняннями: три для фаз статора, одне для обмотки збудження та два для демпферних ланцюгів [7].

Аналіз електромагнітних процесів проводимо на основі побудови векторної діаграми (рис. 2.4) в системі координат $d-q$, яка обертається синхронно з ротором. У цій системі вісь d орієнтована за напрямком магнітного потоку ротора, що формує відповідне потокозчеплення в обмотці статора. Використання такої системи координат дозволяє наочно продемонструвати кутове зміщення між потоками та спростити розрахунок взаємодії полів під час роботи $СГ$.

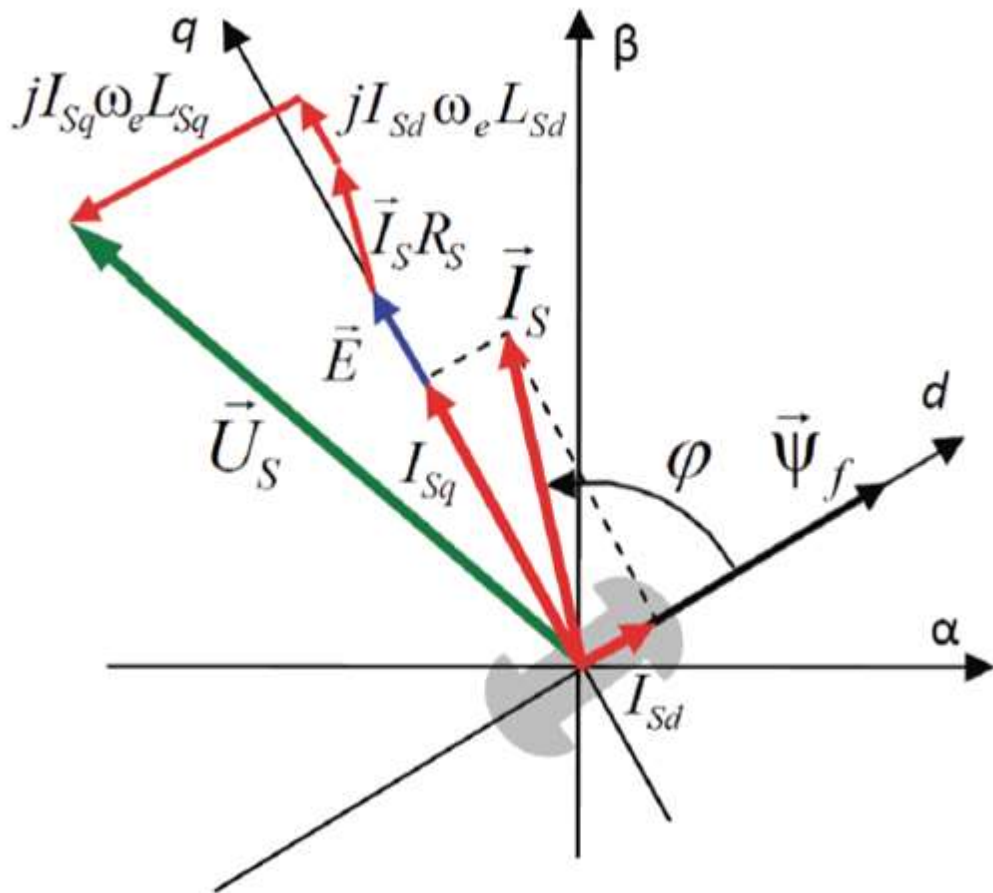


Рисунок 2.4 – Векторна діаграма синхронного генератора.

Враховуючи, що для проведення моделювання вихідні дані повинні представлятися у відновних одиницях (в.о.) використовуємо рівняння Парка-Горєва для електричної та механічної частин $СГ$.

Електрична частина: рівняння напруг статора, обмотки збудження, демпферних обмоток [7]:

$$\begin{aligned}
U_d &= R_a \cdot I_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_0 \cdot \psi_q; \\
U_q &= R_a \cdot I_q + \frac{d\psi_q}{dt} - \omega_0 \cdot \psi_d; \\
U_{fd} &= R_{fd} \cdot I_{fd} + \frac{d\psi_{fd}}{dt}; \\
U_{dd} &= R_{dd} \cdot I_{dd} + \frac{d\psi_{dd}}{dt}; \\
U_{1q} &= R_{1q} \cdot I_{1q} + \frac{d\psi_{1q}}{dt}; \\
U_{2q} &= R_{2q} \cdot I_{2q} + \frac{d\psi_{2q}}{dt},
\end{aligned} \tag{2.5}$$

де

$$\begin{aligned}
\psi_d &= L_d \cdot I_d + L_{ad} \cdot I_{fd} + L_{ad} \cdot I_{dd}; \\
\psi_q &= L_q \cdot I_q + L_{aq} \cdot I_{1q} + L_{aq} \cdot I_{2q}; \\
\psi_{fd} &= L_{fd} \cdot I_{fd} + L_{ad} \cdot I_d + L_{ad} \cdot I_{dd}; \\
\psi_{dd} &= L_{dd} \cdot I_{dd} + L_{ad} \cdot I_d + L_{ad} \cdot I_{fd}; \\
\psi_{1q} &= L_{1q} \cdot I_{1q} + L_{aq} \cdot I_q; \\
\psi_{2q} &= L_{2q} \cdot I_{2q} + L_{aq} \cdot I_q,
\end{aligned} \tag{2.6}$$

де U_d, U_q – значення напруги статора $СГ$ системі $d - q$;

U_{fd}, U_{dd} – значення напруги на обмотці збудження та демпферній обмотці по осі d до обмотки статора $СГ$;

U_{1q}, U_{2q} – значення напруги на демпферних обмотках до осі q ;

I_d, I_q – значення струмів статора $СГ$ системи $d - q$;

I_{fd}, I_{dd} – значення струму на обмотці збудження та демпферній обмотці по осі d до обмотки статора $СГ$;

I_{1q}, I_{2q} – значення струмів на демпферних обмотках до осі q ;

R_a – значення активного опору обмотки статора $СД$;

ω_0 – кутова (синхронна) швидкість обертання;

Ψ_d, Ψ_q – параметри потокозчеплення статора CG системи $d-q$;
 Ψ_{fq}, Ψ_{dd} – параметри потокозчеплення на обмотці збудження та демпферній обмотці по осі d до обмотки статора CG ;
 Ψ_{1q}, Ψ_{2q} – параметри потокозчеплення на демпферних обмотках до осі q ;
 L_d, L_q – індуктивності CG в системі $d-q$;
 L_{ad}, L_{aq} – індуктивності взаємоіндукції CG в системі $d-q$;
 U_d, U_q – значення напруги статора CG системи $d-q$;
 $L_{fd}, L_{dd}, L_{1q}, L_{2q}$ – індуктивності обмоток системи збудження та обмоток демпферування.

Схема заміщення CG подана на рис. 2.5.

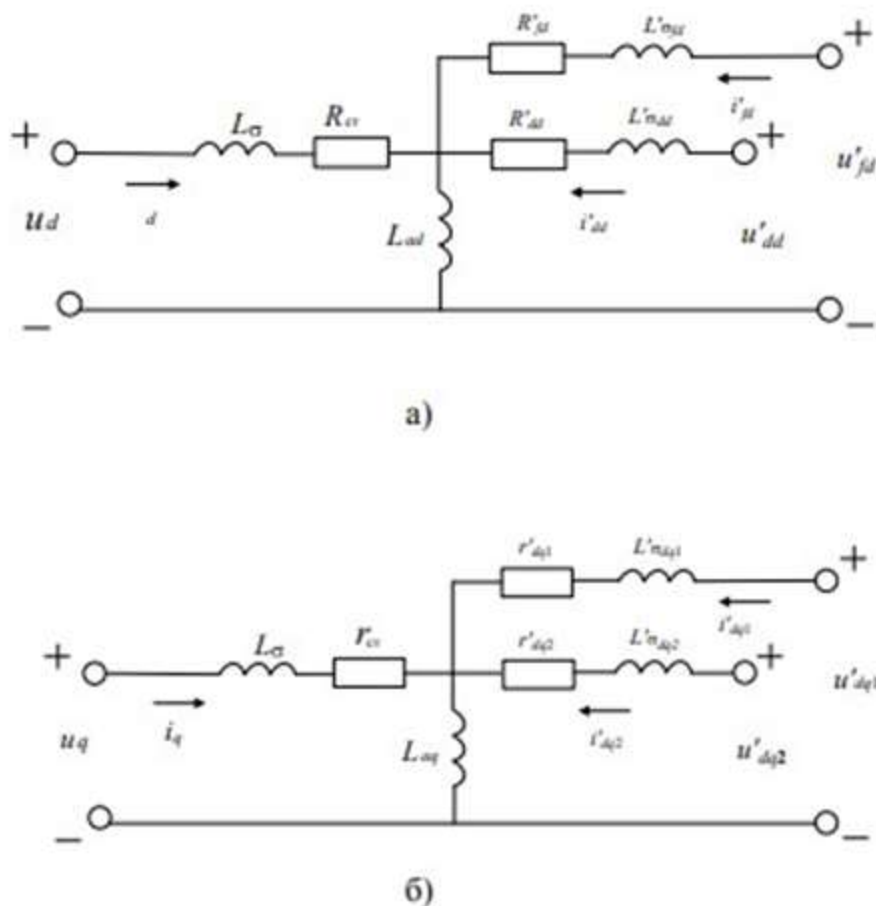


Рисунок 2.5 – Схема заміщення CG :

а) по осі d ; б) по осі q .

Механічна частина: рівняння руху ротора CG [7]:

$$T_j \cdot \frac{d\Delta\omega}{dt^2} + \gamma \cdot \Delta\omega = P_T - P_{el}, \quad (2.7)$$

де $\Delta\omega$ – відхилення швидкості обертання ротора CG (ω) від синхронної (ω_0), $\Delta\omega = \omega - \omega_0$;

T_j – постійна інерції CG ;

P_T – потужність турбіни, Bm ;

P_{el} – електрична потужність CG , Bm ;

γ – коефіцієнт демпфірування.

2.4 Висновки до другого розділу

У ході виконання розрахункового розділу було обґрунтовано вибір основного обладнання для проектованої міні-ГЕС.

Враховуючи низький напір води та значну витрату, для моделювання прийнято поворотно-лопатеву турбіну Каплана, яка забезпечує високу ефективність у широкому діапазоні робочих умов. Як генератор обрано синхронну машину потужністю 500 кВт із тиристорною системою збудження, що дозволяє використовувати редуктор спрощеної конструкції завдяки низькій швидкості обертання ротора та забезпечує можливість автономної роботи установки.

Для забезпечення стабільної частоти обертання та якості вихідної енергії визначено структуру системи керування на базі цифрового мікропроцесорного контролера. Застосування ПІД – регулятора в каскадній схемі (контур швидкості та контур положення лопаток) дозволяє реалізувати подвійне регулювання турбіни Каплана. Такий підхід гарантує високу динамічну точність, надійність та можливість дистанційного моніторингу параметрів роботи гідроагрегату порівняно з традиційними аналоговими системами.

Математичний опис роботи міні-ГЕС реалізовано через систему рівнянь Парка–Горєва, що дозволило перейти від складних часових залежностей

трифазної системи до двовимірної системи координат $d - q$. Сформована модель враховує електромагнітні процеси в обмотках статора, ротора та демпферних контурах, а також механічну інерцію агрегату.

Використання відносних одиниць у математичному представленні забезпечує уніфікацію розрахунків та створює необхідне підґрунтя для подальшого комп'ютерного аналізу усталених режимів роботи міні-ГЕС.

3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Моделювання міні-ГЕС в Matlab / Simulink

MatLab / Simulink Synchronous Machine pu Fundamental

3.1.1 Імітаційна модель синхронного генератора

Моделювання роботи синхронного генератора проводилося в системі *MatLab / Simulink* при використанні стандартних блоків електротехнічної бібліотеки *SimPowerSystem* для задання вихідних та розрахованих параметрів окремих елементів міні-ГЕС [13].

Побудована структурна модель, де синхронний генератор працює на активне навантаження за умови приведення в обертання гідротурбіною подана на рис. 3.1.

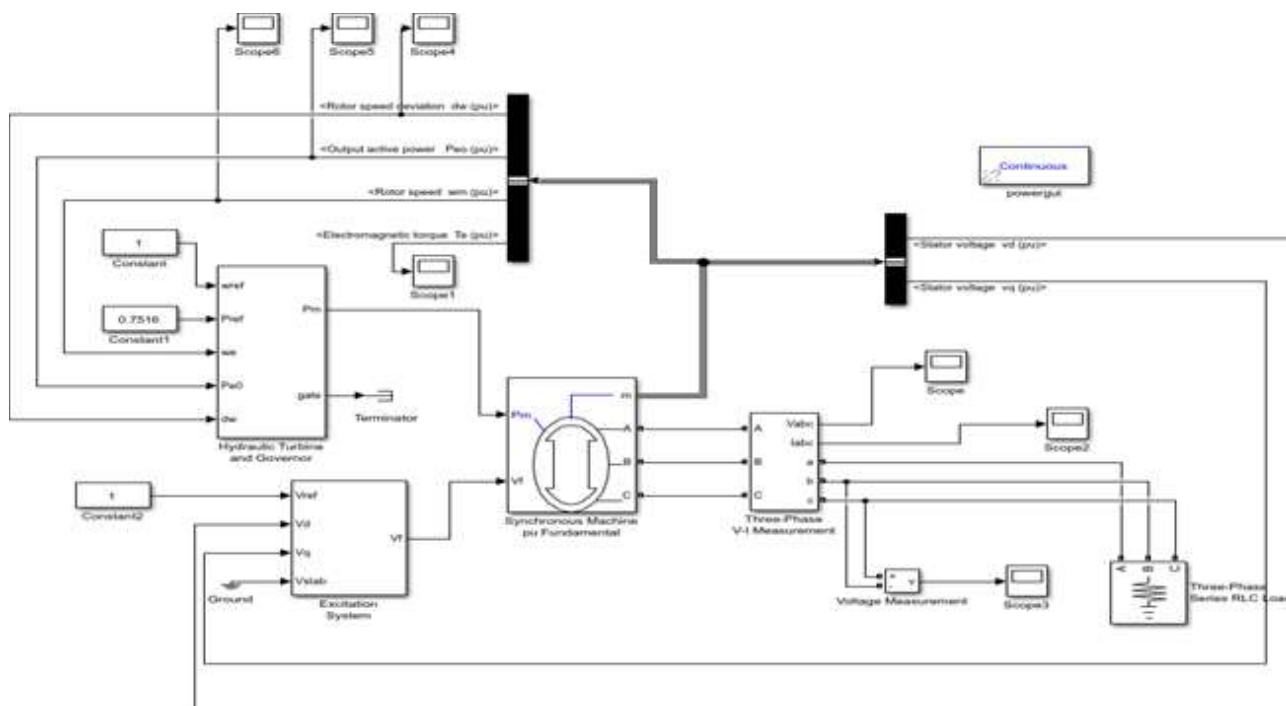


Рисунок 3.1 – Структурна схема моделі *СГ*.

Блок *Synchronous Machine pu Fundamental* – модель класичного *СГ* з демпферною обмоткою, де параметри та змінні вихідні дані задаються у *в.о.* (рис. 3.2) [12, 13].

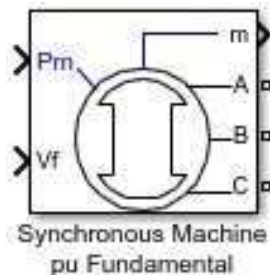


Рисунок 3.2 – Блок *Synchronous Machine pu Fundamental*.

Приведена схема на основі якої створений блок описується системою рівнянь (2.5-2.7), де порти моделі (A , B , C) – виводи статорної обмотки CG , а порт m_pu формує сигнал у векторній формі наступних елементів: i_a , i_b , i_c – струми обмоток статора; i_d , i_q – проекції струмів статора на осі d та q ; i_{fd} – струм збудження та i_{kd} та i_{kq} – проекції струмів демпферної обмотки – i_{kd} та i_{kq} ; φ_{md} , φ_{mq} , u_d , u_q – проекції потоків намагнічування та напруг статора на осі d і q , відповідно; $\Delta\theta$, ω – відхилення кута ротора; ω , $d\omega$ – швидкість та відхилення швидкості ротора, відповідно; P_{em} – електромагнітна потужність.

Сигнал, що рівний механічній потужності на валу CG подається на вхідний порт P_m , а на вхідний порт V_f – сигнал зі значенням напруги обмотки збудження.

Опис синхронної машини блоку *Synchronous Machine pu Fundamental* задається у вікнах (рис. 3.3 – 3.5).

В опції *Configuratin* (рис. 3.3) задається параметри генератора з явнополюсним ротором (*Salient – pole*) в системі $d-q$ при з'єднанні статора групою «зірка».

В опції *Parameters* задається (рис. 3.4):

– номінальна повна потужність ($P_n(BA)$), лінійна напруга ($V_n(B)$), частота ($f_n(\Gamma\mathcal{U})$);

– параметри статора: активний опір ($R_s(O\mathcal{M})$), індуктивність розсіювання ($L_1(\Gamma\mathcal{H})$), індуктивність поперечної реакції якоря ($L_{mq}(\Gamma\mathcal{U})$);

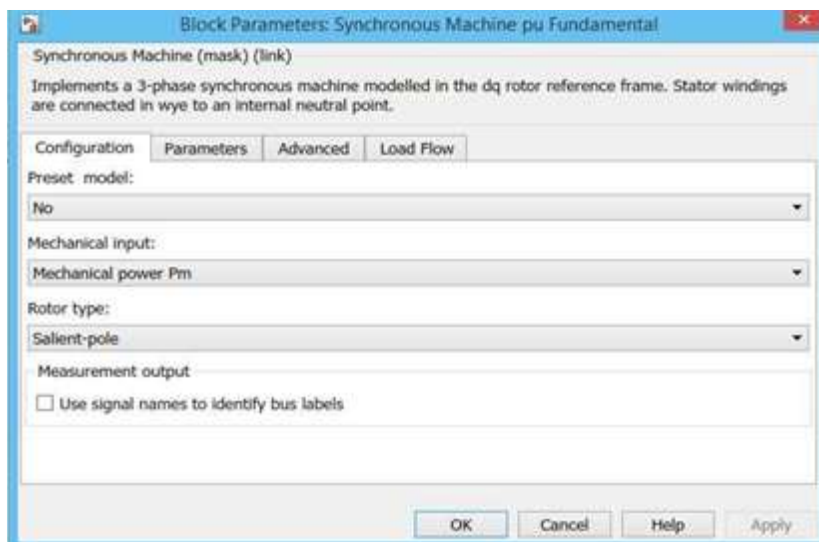


Рисунок 3.3 – Вікно параметрів блоку *Synchronous Machine pu Fundamental* (опція *Configuratin*).

– приведені параметри обмотки збудження: опір ($R_f (ОМ)$), індуктивність ($L_{fd} (Гн)$);

– приведені параметри демпферної обмотки: активні опори ($R_{kd} (ОМ), R_{kq} (ОМ)$) та індуктивності ($L_{1kd} (Гн), L_{1kq} (Гн)$) за поздовжньою та поперечною осями, відповідно;

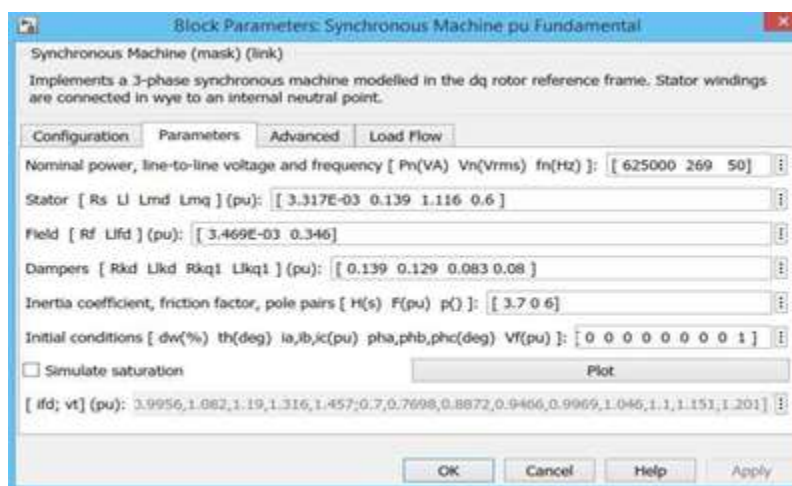


Рисунок 3.4 – Вікно параметрів блоку *Synchronous Machine pu Fundamental* (опція *Parameters*).

– значення: момент інерції ($J (кг \cdot м^2)$), коефіцієнта тертя ($F (Н \cdot м \cdot с)$), кількість пар полюсів (p); за поздовжньою та поперечною осями, відповідно;

– початкові умови: параметр задається в векторному представленні (0 або 1); задається значення напруги обмотки збудження ($V_f(B)$).

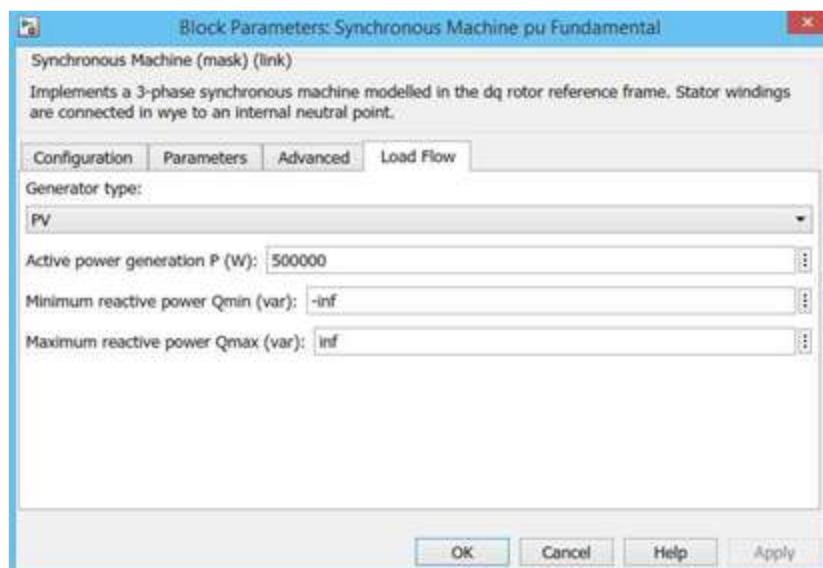


Рисунок 3.5 – Вікно параметрів блоку *Synchronous Machine pu Fundamental* (опція *Load Flow*).

В опції *Load Flow* (рис. 3.5) задаємо значення активної потужності генератора $P(Bm)$.

Блок *Excitation system* (рис.3.6, а) формує модель системи збудження для синхронної машини, яка працює в режимі генератора та дозволяє проводити регулювання напруги. Основу моделі являє збуджувач без врахування насичення ланцюга, тому, основними складовими системи збудження є регулятор напруги та збуджувач.

Параметри блоку *Excitation system* (рис.3.6, б):

- постійна часу фільтра (нижчі частоти) ($T_r(c)$);
- коефіцієнт підсилення (K_a) та постійна часу ($T_a(c)$) для регулятора;
- коефіцієнт підсилення (K_e) та постійна часу ($T_e(c)$) для збуджувача;

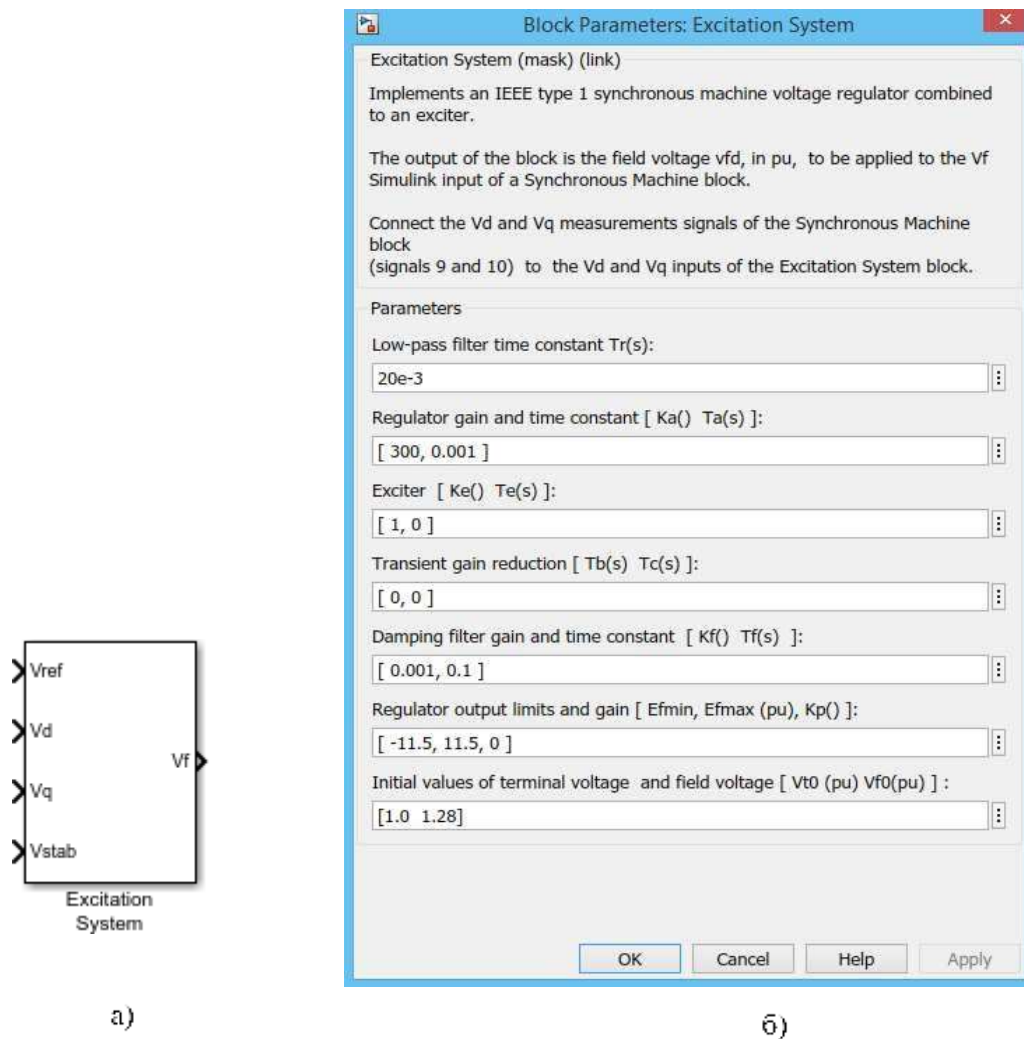
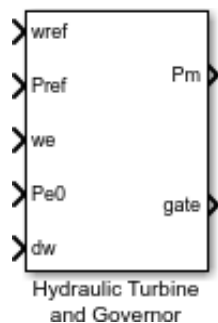


Рисунок 3.6 – Блок *Excitation system* (а) та вікно параметрів (б).

- постійні часу стабілізатора ($T_b(c)$, $T_c(c)$);
- коефіцієнт підсилення (K_f) та постійна часу ($T_f(c)$) ланки диференціювання;
- значення вихідної напруги регулятора (v_o): максимальне – ($E_{f \max}$) та мінімальне – ($E_{f \min}$), і його коефіцієнт підсилення (K_p). Так як $K_p = 0$, то верхню межу задаємо постійною та рівною $E_{f \max}$.

– початкові значення напруги ($v.o$): на генераторі (V_{i0}), на обмотці збудження (V_{f0}), за якими моделювання розпочинається при усталеному режимі.

Блок *Hydraulic Turbine and Governor* (рис.3.7, а) формує модель гідротурбіни з системою регулювання на базі ПІД-регулятора та керованим серводвигуном.



а)

б)

Рисунок 3.7 – Блок *Hydraulic Turbine and Governor* (а) та вікно параметрів (б).

Параметри блоку *Hydraulic Turbine and Governor* (рис.3.7, б):

- коефіцієнт підсилення (K_a) та постійна часу ($T_a(c)$) для моделі серводвигуна;
- параметри діапазону регулювання затвору в $v.o$ – $((g_{\min}), (g_{\max}))$, у $v.o/c$ – $((vg_{\min}), (vg_{\max}))$;

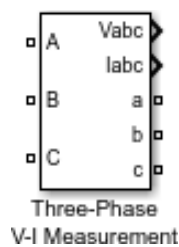
– значення коефіцієнтів ПД-регулятора: R_p (коефіцієнт передачі), K_p (коефіцієнт підсилення пропорційної складової), K_i (коефіцієнт підсилення інтегральної складової), K_d (коефіцієнт підсилення реальної диференціальної складової) та його постійна часу – $(T_d(c))$;

– параметри гідравлічної турбіни: коефіцієнт відхилення швидкості ($beta$) та постійна часу моделі $(T_w(c))$;

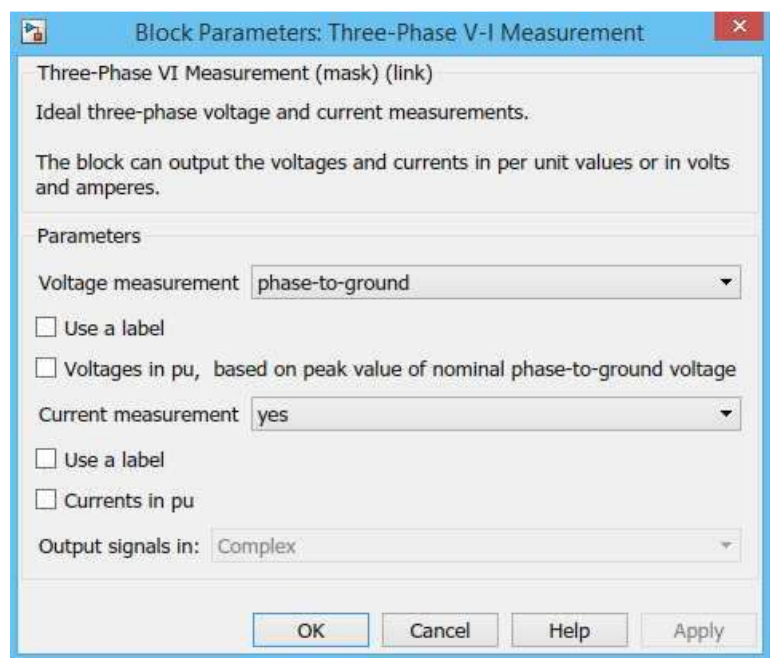
– початкове значення механічної потужності (6.0) турбіни.

Блок *Three Phase V1 Measurement* (рис.3.8, а) виконує вимірювання в трифазних колах струмів та напруг.

Параметри блоку *Three Phase V1 Measurement* (рис.3.8, б) задають вибір напруги вимірювання: вимір фазної напруги (*phase – to – ground*).



а)



б)

Рисунок 3.8 – Блок *Three Phase V1 Measurement* (а) та вікно параметрів (б).

Вимірювання миттєвого значення напруги між двома вузлами схеми здійснюється блоком *Voltage Measurement*, де вихідним сигналом є комплексний сигнал заданий блоком *Powergui* при розрахунках в режимі на

змінному струмі.

Блок *Three – Phase Series RLC Load* (рис.3.9, а) моделює трифазну ланку на основі трьох *RLC* – ланок за схемою «зірка з заземленою нейтраллю».

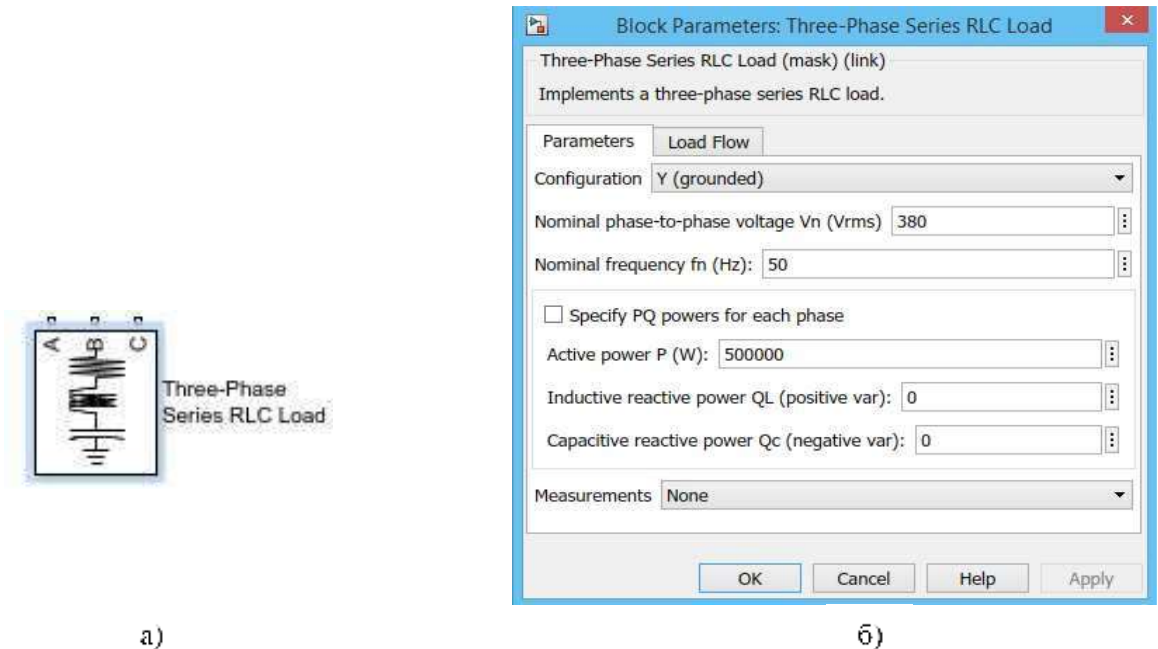


Рисунок 3.9 – Блок *Three – Phase Series RLC Load* (а) та вікно параметрів (б).

Параметри блоку *Three – Phase Series RLC Load* (рис.3.9, б):

– значення номінальної лінійної напруги ($V_n(B)$), номінальної частоти ($f_n(Гц)$);

– параметри трифазної мережі (абсолютні значення): активна потужність ($P(Bm)$), споживана індуктивністю реактивна потужність ($Q_L(BAp)$), реактивна потужність, яка віддається конденсатором ($Q_C(BAp)$).

Блок *Bus Selector* формує шини вхідних *Signals in the bus* та вихідних (виділених) сигналів *Selected signals* (рис. 3.10).

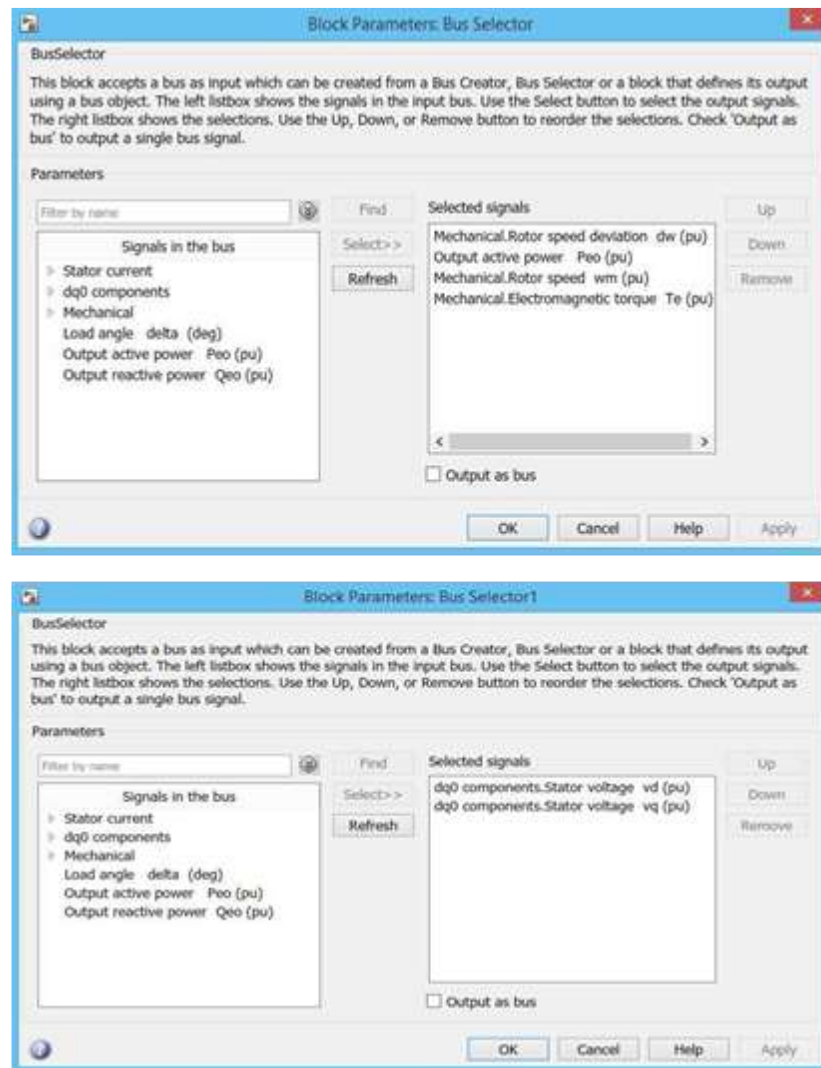


Рисунок 3.10 – Вікна параметрів блоку *Bus Selector*.

3.1.2 Дослідження роботи міні-ГЕС

При моделюванні отримано графічне представлення зміни: фазної та лінійної напруги, струму за номінального навантаження, вихідної активної потужності, електромагнітного моменту, частоти обертання ротора, отримані при моделюванні.

На рис. 3.11 та 3.12 подані графіки фазної та лінійної напруги. В початковий момент часу, частота обертання ротора рівна номінальній, при чому, в цей момент відбувається підключення навантаження. Фазна й лінійна напруга в період з 0 до 0,04 с набувають пікових значень, з моменту часу 0,04 до

0,127 с формуються мінімальні значення, а в подальшому – значення напруги рівні номінальним.

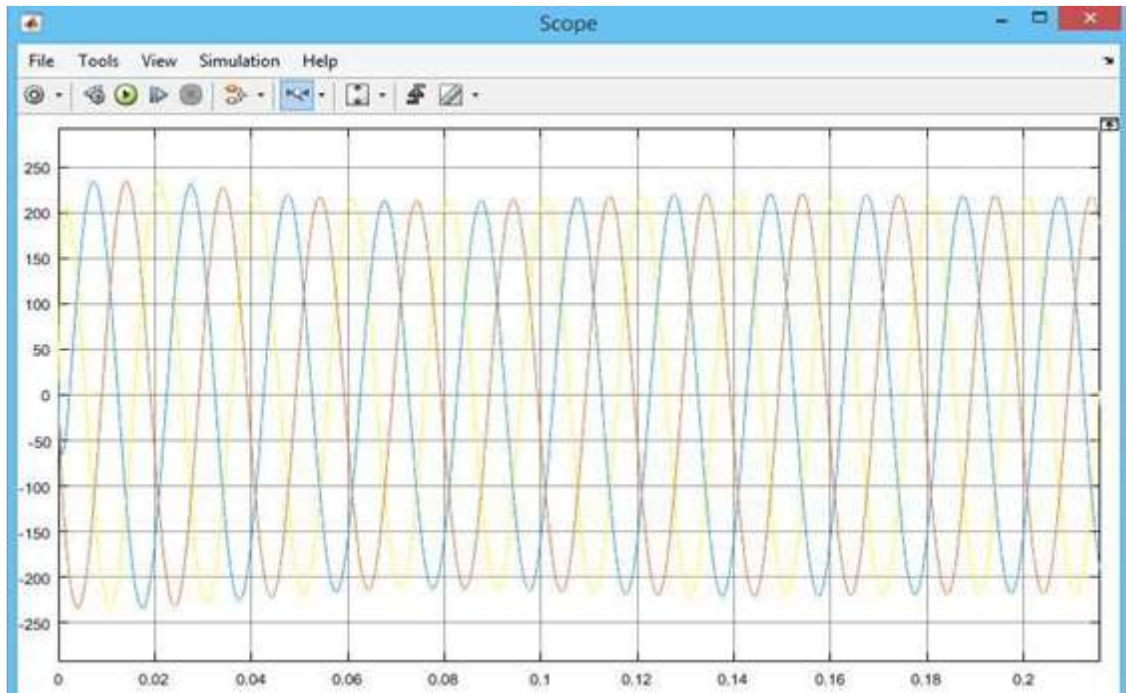


Рисунок 3.11 – Графік фазної напруги при номінальному навантаженні.

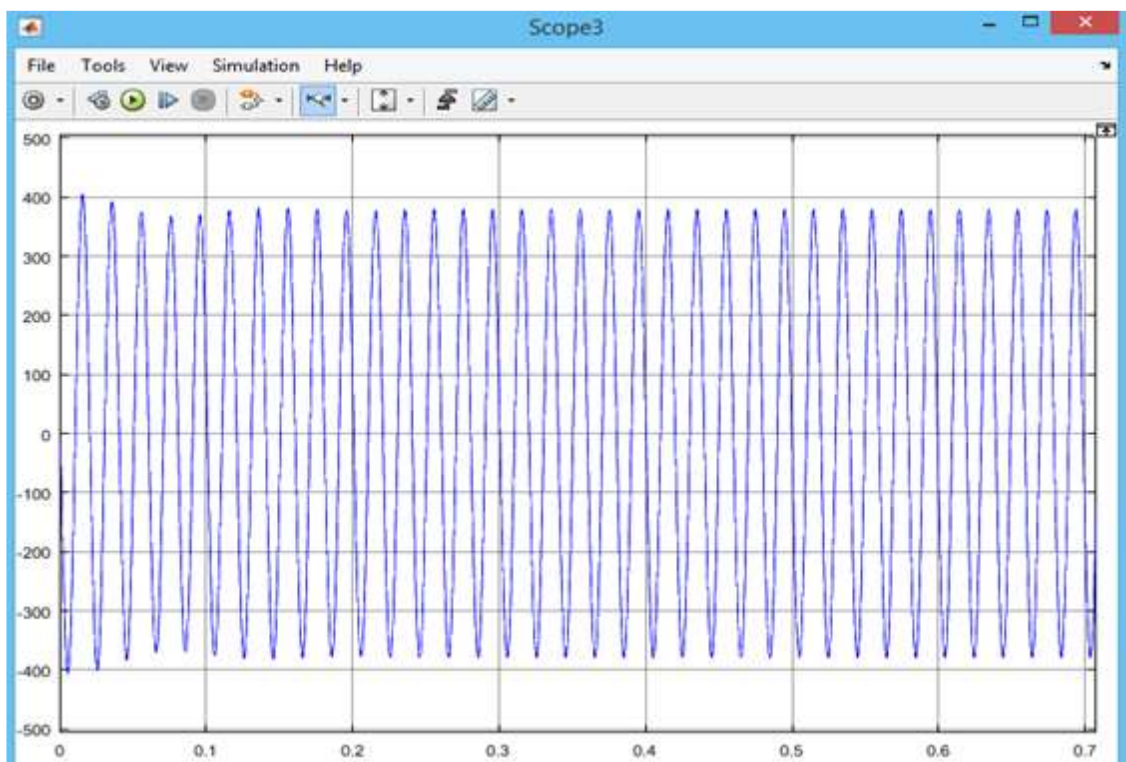


Рисунок 3.12 – Графік лінійної напруги на номінальному навантаженні.

Графік струму (рис. 3.13), отриманого під час моделювання, відрізняється

від розрахункового. Пікові значення струму при номінальному навантаженні отримані в період з 0 до 0,04 с, з моменту часу 0,04 до 0,127 с формуються мінімальні значення струму, а в подальшому значення струму рівні номінальним.

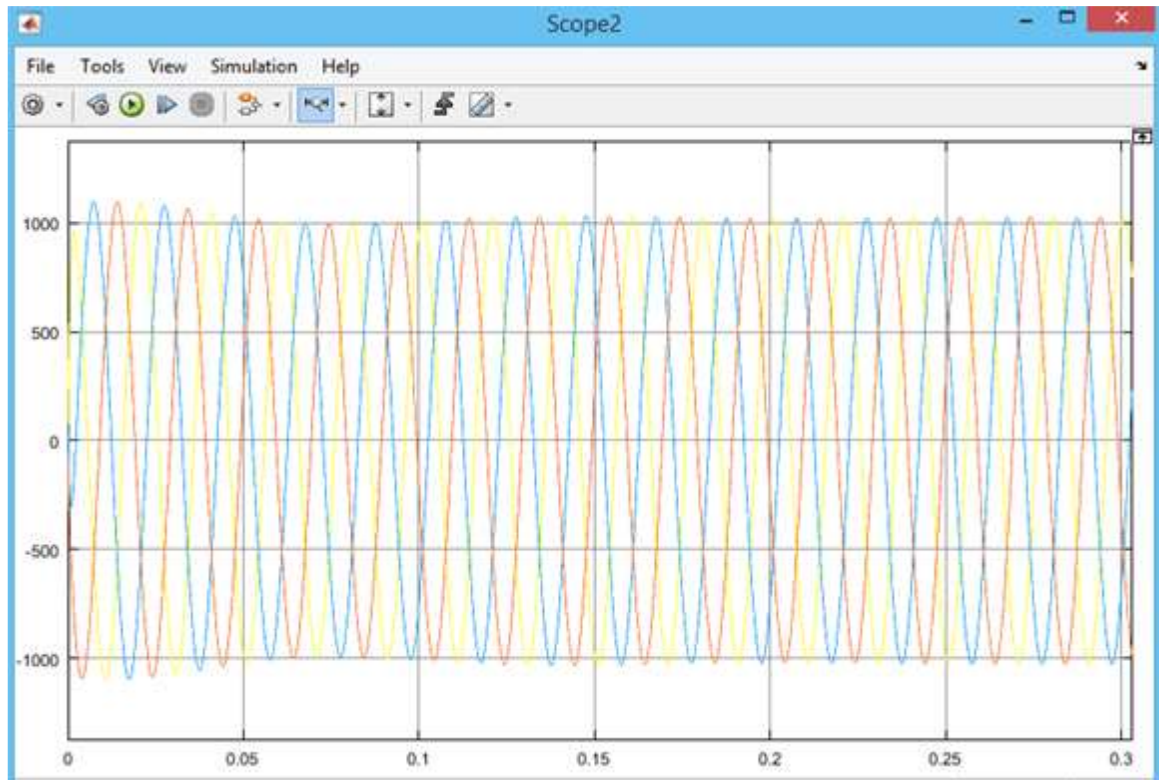


Рисунок 3.13 – Графік зміни струму при номінальному навантаженні (1023 А).

Однак, на практиці, генератор розраховується на лінійну напругу 400–410 В через просідання напруги на лініях, а фазну напругу розраховують на 230 В.

Отримані при моделюванні, як видно з рисунків 3.14, 3.15, значення фазної напруги на номінальному навантаженні відрізняються на 5 В від теоретичних значень, а лінійна напруга відповідає теоретичному. З моменту часу 0 до 0,037 с фазна та лінійна напруга встановлюють пікові значення, у період часу з 0,037 с до 0,138 с встановлюють мінімальні значення, далі значення фазної та лінійної напруги стають рівними номінальному.

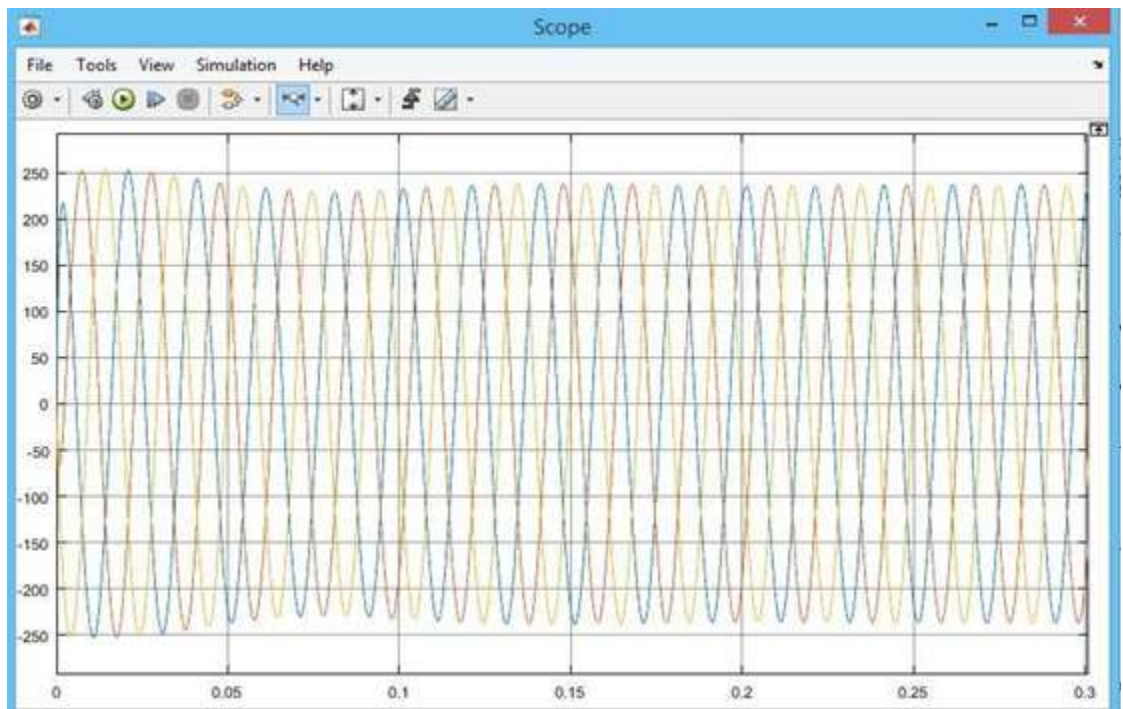


Рисунок 3.14 – Графік фазної напруги при номінальному навантаженні (235 В).

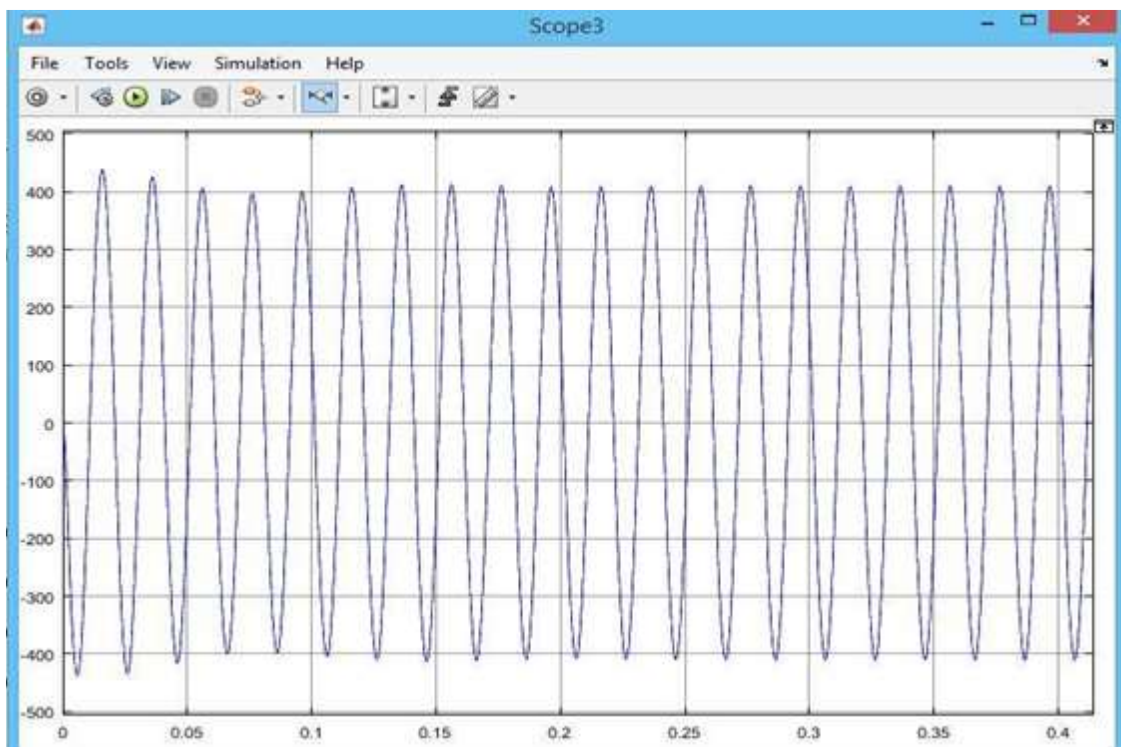


Рисунок 3.15 – Графік лінійної напруги при номінальному навантаженні (410 В).

При підключенні навантаження в момент часу 0 с , електромагнітний момент біля першої секунди характеризується коливним процесом (рис. 3.16).

Далі, відповідно до зміни частоти обертання ротора, електромагнітний момент зростає в період часу від 1 с до 7,1 с та спадає в період часу від 7,1 с до 26,9 с, після чого переходить в усталений режим.

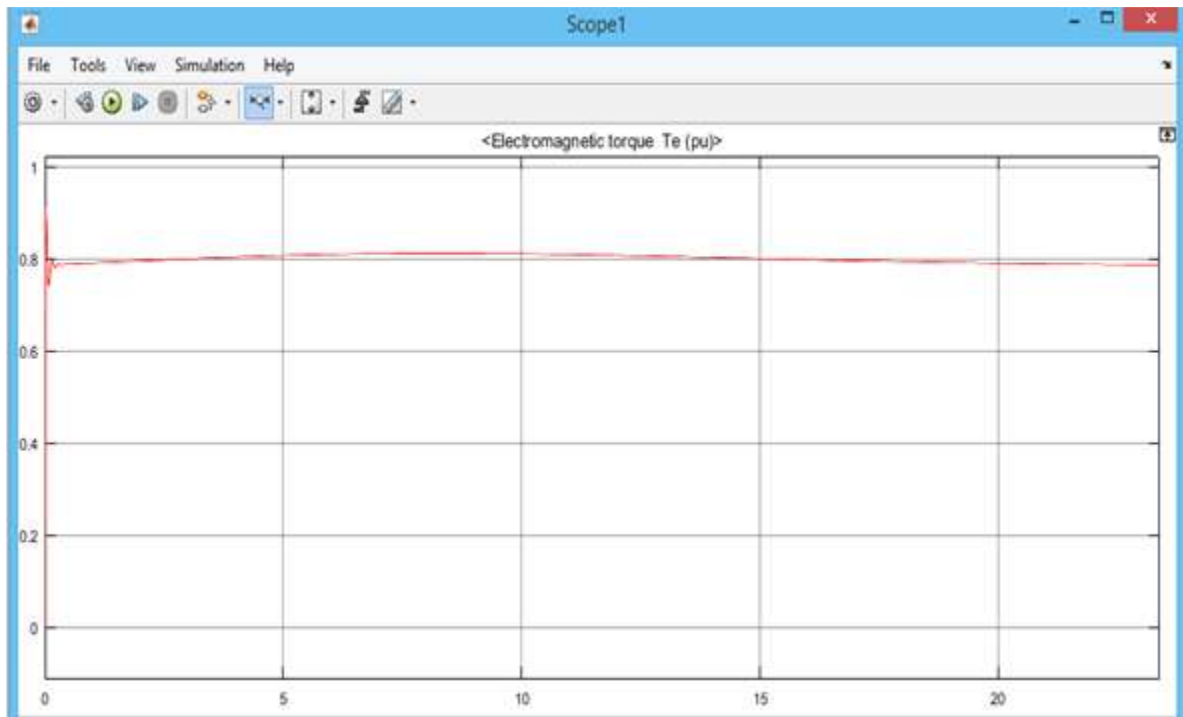


Рисунок 3.16 – Графік зміни електромагнітного моменту.

Стосовно зміни частоти обертання ротора (рис. 3.17) в момент часу 0 с швидкість обертання ротора генератора дорівнює номінальній. Швидкість обертання ротора спадає в період з 0 с до 7,1 с при підключенні навантаження. В період часу з 7,1 с до 26,9 с генератор відновлює швидкість обертання ротора та утворює пік, надалі, в момент часу 42 с переходить у режим роботи на номінальне навантаження.

Вихідна активна потужність (рис. 3.18) на першій секунді носить коливний характер. Після згасання коливань графік вихідної активної потужності набуває постійного значення.

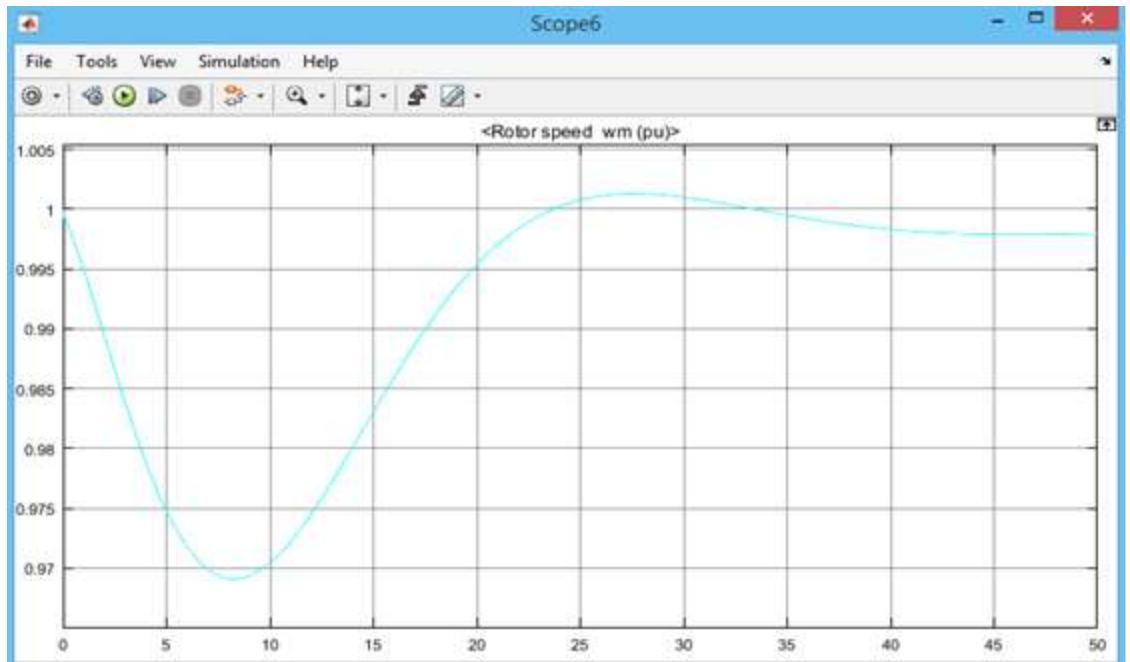


Рисунок 3.17 – Графік зміни частоти обертання ротора.

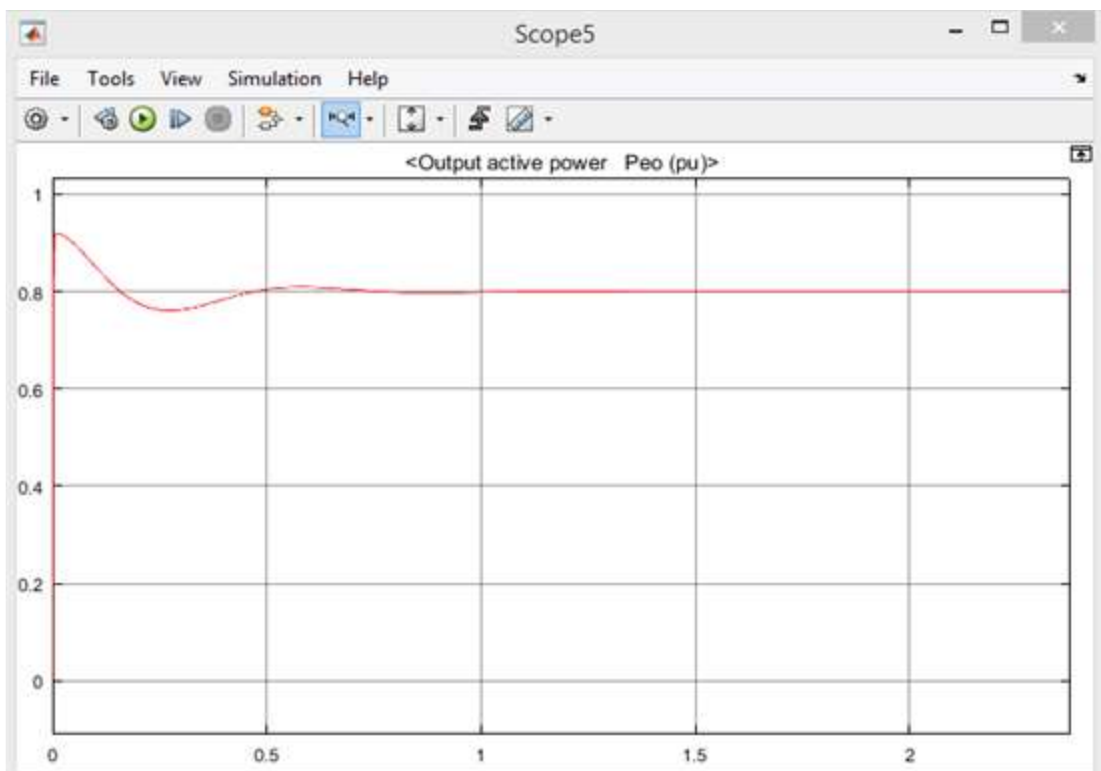


Рисунок 3.18 – Графік зміни вихідної активної потужності

3.3 Висновки до третього розділу

У ході виконання проектно-конструкторського розділу було розроблено комплексну імітаційну модель міні-ГЕС у середовищі динамічного моделювання.

Використання стандартних блоків електротехнічних бібліотек дозволило врахувати широке коло параметрів: від активних опорів та індуктивностей обмоток до механічної інерції ротора та коефіцієнтів ПДД-регулятора серводвигуна затвору.

Результати проведених досліджень підтвердили адекватність побудованої моделі та її здатність відтворювати перехідні процеси в системі. Аналіз отриманих осцилограм показав, що при підключенні номінального навантаження в системі виникають короткочасні коливні процеси (тривалістю до 2–2,5 секунд), після чого параметри напруги, струму та активної потужності стабілізуються на номінальних значеннях.

Зафіксовано, що система регулювання ефективно компенсує відхилення частоти обертання ротора, відновлюючи її до заданого рівня після просідання в момент накиду навантаження.

Проведене порівняння результатів моделювання з теоретичними розрахунками виявило високу точність роботи моделі. Зокрема, лінійна напруга повністю відповідає розрахованим показникам, тоді як фазна напруга має допустиме відхилення у 2 % через особливості врахування лінійних втрат.

Отримані дані свідчать про те, що розроблена структурна схема та обрані параметри регуляторів забезпечують стійку роботу міні-ГЕС в усталених та перехідних режимах, що дозволяє використовувати дану модель для подальшого проектування реальних енергетичних об'єктів.

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Вимоги до безпечного використання гідротехнічних об'єктів ГЕС

У процесі експлуатації гідроспоруд необхідно гарантувати їхню захищеність і стабільність, а також ефективну та постійну роботу агрегатів із дотриманням екологічних стандартів [13].

Пріоритетним є контроль за функціонуванням дренажів та протифільтраційних систем.

Гідротехнічні об'єкти (греблі, канали, водоводи тощо) мають відповідати проектним показникам міцності, стійкості та екологічності. Конструкції під тиском води, їхні основи та з'єднання повинні бути водонепроникними та морозостійкими згідно з нормами. Споруди слід оберігати від деструктивних фізичних, біохімічних чинників та водяного навантаження. Будь-які дефекти мають оперативно ліквідуватися [13].

Напірні споруди, що працюють понад чверть століття, підлягають комплексному дослідженню фахівцями для оцінки зношення та надійності. За результатами таких перевірок впроваджуються заходи з відновлення працездатності. У бетонних частинах споруд технічний керівник затверджує графік перевірок міцності бетону в зонах вібрацій, промерзання та змінного рівня води [13].

Пошкодження від води чи тиску мають вчасно усуватися; при втраті міцності понад 30 % від проекту конструкції підсилюють. Насипні греблі та дамби захищають від розмивання та переливу через верх. Укоси, дренажі та водовідведення повинні бути справними. Земляні споруди й канали слід оберігати від пошкодження тваринами. Берми й канали треба очищати, не допускаючи непередбаченого проектом заростання кущами чи деревами. Канали обладнують сходами, огорожами та містками у визначених місцях. Слід гарантувати щільність деформаційних швів. Заборонено розміщувати вантажі чи

будувати об'єкти (дороги, причали) на відкосах і в межах зони потенційного обвалення, які маркують знаками. На ділянках з високими ґрунтовими водами облаштовують дренаж або утеплення для захисту від морозів. Дренажні мережі мають бути справними, з приладами обліку води, що виводиться безперервно. При виявленні вимивання ґрунту фільтрацією вживають термінових заходів. Екрани та ядра гребель, а також фільтри захищають від промерзання. Матеріал упорних призм кожні 10-15 років перевіряють на міцність і зсув. У підземних залах ГЕС забезпечують готовність насосів для відкачування води, справність вентиляції, освітлення та аварійних виходів [13].

4.2 Правила та заходи безперебійної роботи гідротурбінного обладнання

Під час експлуатації гідротурбінного устаткування повинна бути забезпечена безперебійна робота з максимально можливим для заданого навантаження і діючого напору коефіцієнтом корисної дії [13].

Гідроагрегати повинні працювати з повністю відкритими затворами, які встановлені на турбінних водоводах. Граничне відкриття направляючого апарату гідротурбіни повинне відповідати максимально допустимому навантаженню гідроагрегату (генератор, генератора–двигуна) при даному напорі. Перепад рівнів на сміттєзбиральних ґратах не повинен перевищувати граничного значення. Умови, які дозволяють запуск гідроагрегату, його нормальну та аварійну зупинку та незаплановану зміну навантаження повинні бути викладені в інструкціях з експлуатації, затверджених технічним керівником ГЕС, які знаходяться на робочих місцях оперативного персоналу. Значення всіх параметрів, які визначають умови запуску гідроагрегату та режим його роботи, повинні бути встановлені на підставі рекомендацій виробника та спеціальних випробувань. запуск гідроагрегату забороняється у таких випадках [13]:

– при напорі, що виходить за межі допустимих значень, встановлених заводом-виробником гідротурбін;

- при несправності будь-якого із захистів, що діють на зупинку устаткування;
- при дефектах системи регулювання гідроагрегату, що можуть призвести до перешкод при регулюванні та нормальному керуванні гідроагрегатом;
- при несправності пристроїв дистанційного керування, клапанів зриву вакууму, клапанів впуску повітря та системи гальмування гідроагрегату;
- при якості оливи, що не задовольняє нормам експлуатації оливи та температурі нижчій від встановленої інструкціями заводу-виробника;
- при рівні оливи у підшипниках, зливному баці та повітряному котлі оливо-напірної установки, нижчому від встановленого інструкціями заводу-виробника.

Під час експлуатації гідроагрегату шляхом огляду та систематичних вимірювань за допомогою стаціонарних і переносних приладів повинен бути організований контроль за роботою устаткування з періодичністю, вказаною в інструкціях з експлуатації.

Система технічного водопостачання гідроагрегату повинна забезпечувати охолодження опорних вузлів, статора і ротора генератора, змащення гумового турбінного підшипника та інших споживачів у всіх режимах роботи гідроагрегату.

Капітальний ремонт гідротурбін повинен проводитися один раз на 5–7 років. В окремих випадках за узгодженим дозволом допускається відхилення від встановлених термінів.

Експлуатація обладнання неминуче пов'язана з використанням електричної енергії. Електробезпека – це система організаційних, технічних заходів і засобів, які забезпечують захист людей від шкідливого і небезпечного впливу електричного струму [13].

Електричний струм, проходячи через тіло людини, спричиняє термічну, електролітичну та біологічну дію, викликає місцеві та загальні електротравми. Дія електричного струму на організм людини супроводжується зовнішнім ураженням тканин та органів у вигляді механічних ушкоджень, електричних

знаків електрометалізації шкіри, опіків. Термічна дія струму виявляється в опіках окремих ділянок тіла, ураженні внаслідок високої температури кровоносних судин, нервових клітин, серця, мозку, що призводить до серйозних функціональних розладів. Для забезпечення роботи електрообладнання використовується напруга 380 В та 220 В , яка є небезпечна для людини. Вражаюча дія електричного струму при цій напрузі залежить від наступних факторів: величини та тривалості протікання струму через тіло людини, роду та частоти струму, індивідуальних властивостей людини [13].

Людина починає відчувати струм величиною $0,6 - 1,5\text{ мА}$. Струм $10 - 15\text{ мА}$ (при $f = 50\text{ Гц}$) викликає судомні м'язів, які людина не може подолати сама. Цей струм називається пороговим невідпускаючим. При 100 мА та тривалості дії більше $0,5\text{ мс}$ струм може спричинити зупинку або фібриляцію серця. Опір тіла людини різко падає в залежності від часу дії струму. Найбільш небезпечним є змінний струм з частотою $20 - 100\text{ Гц}$. Постійний струм людина відчуває при $6 - 7\text{ мА}$, пороговий струм складає $50 - 70\text{ мА}$, а фібриляційний – 300 мА . Заходи по захисту, поділяють на такі, що забезпечують безпеку при номінальному режимі роботи електроустановок, і заходи, що забезпечують безпеку при аварійних режимах. При нормальному режимі роботи безпека на електроустановках забезпечується наступними заходами [13]:

- ізоляцією струмоведучих частин;
- виконання електричних мереж, ізольованих від землі;
- компенсацією ємнісної складової струму замикання на землю;
- недоступністю струмоведучих частин.

Захисне заземлення – це спеціальне електричне з'єднання з землею металічних, не струмопровідних частин обладнання, які можуть опинитися під напругою. Заземлюючий пристрій складається з заземлювача та провідника заземлення, який з'єднує частини заземлювання з заземлювачем. В якості заземлювачів використовують металічні конструкції та арматуру залізобетонних конструкцій, які мають сполучення з землею [13].

Захисне відключення – це швидкодіючий захист, який забезпечує автоматичне відключення електроустановки при виникненні в ній небезпеки ураження людини електричним струмом. Установа автоматичного відключення, яка застосовується на повинна відповідати наступним вимогам: висока чутливість, малий час відключення, селективність роботи, самоконтроль і надійність [13].

4.3 Шляхи запобігання виникнення пожежі на ГЕС

Вибухопожежна безпека об'єкта забезпечується системами [13]:

- попередження вибухів і пожеж;
- протипожежного та противибухового захисту;
- організаційно-технічних заходів.

Система попередження вибухів і пожеж має за мету не допустити виникнення вибухів і пожеж. Заходи і засоби попередження утворення горючого середовища в кожному конкретному випадку визначаються реальними умовами, що розглядаються, вибухопожежонебезпечними властивостями речовин і матеріалів, що використовуються у технологічному циклі .

Найбільш радикальним заходом попередження утворення горючого середовища є заміна горючих речовин і матеріалів, що використовуються, на негорючі та важкогорючі. Тому, попередження виникнення в горючому середовищі або внесення до нього джерел запалювання є головним стратегічним пріоритетом у роботі щодо запобігання пожежам [13].

Джерелом запалювання може бути нагріте тіло чи екзотермічний процес, які здатні нагріти деякий об'єм горючої суміші до температури, коли швидкість тепловиділення ініційованого нагрівом процесу окислення перевищує швидкість тепловідводу із зони реакції.

Забезпечення пожежної безпеки на ГЕС є критично важливим аспектом експлуатації, оскільки поєднує в собі управління високою напругою, великими об'ємами пально-мастильних матеріалів та складними гідротехнічними

спорудами. Комплексний підхід до мінімізації ризиків загоряння охоплює технологічні, організаційні та інженерні рішення [13].

1. Технологічна модернізація та моніторинг.

Сучасні *ГЕС* потребують впровадження інтелектуальних систем контролю, які здатні виявляти загрозу ще до появи відкритого вогню [13]:

- діагностика кабельних мереж: кабельне господарство є однією з найбільш вразливих зон. Окрім візуального огляду, необхідно впроваджувати тепловізійний моніторинг для виявлення точок перегріву та деградації ізоляції, що дозволяє попередити коротке замикання;

- контроль господарства оливи: оскільки гідротурбіни та трансформатори використовують значну кількість мастила, ключовим завданням є герметизація систем змащування. Сучасні датчики рівня та тиску в реальному часі сигналізують про найменші витіки, запобігаючи утворенню пожежонебезпечних сумішей.

- автоматизація температурного нагляду: встановлення термодавачів на обмотках статорів генераторів та підшипниках ковзання дозволяє автоматично відключати агрегати при перевищенні критичних температурних показників.

2. Інженерні засоби протипожежного захисту.

Системи активного гасіння на *ГЕС* повинні бути адаптовані до специфіки обладнання [13]:

- автоматичні установки пожежогасіння: для захисту трансформаторів традиційно використовують водяні завіси або дренчерні системи. В машинних залах та кабельних поверххах все частіше застосовують газове або пінне гасіння, яке мінімізує пошкодження електроніки порівняно з водою.

- вогнестійкі бар'єри: використання сучасних негорючих матеріалів для перегородок та спеціальних мастик для заповнення кабельних проходів локалізує осередок займання, не даючи вогню поширюватися між відсіками станції.

3. Організаційна культура та людський фактор .

Навіть найсучасніша техніка не замінить чітких дій персоналу. Організаційні заходи включають [13]:

– регламентація вогневих робіт: будь-які зварювальні або ремонтні роботи мають проводитися за суворим протоколом із попередньою підготовкою робочого місця та наявністю первинних засобів пожежогасіння.

– протипожежна підготовка: Регулярні тренування персоналу з імітацією аварійних ситуацій допомагають відпрацювати навички швидкої евакуації та взаємодії з пожежно-рятувальними підрозділами.

– виробнича санітарія: підтримання чистоти, своєчасне видалення пилу та масляних плям з поверхонь агрегатів суттєво знижує ризик спалаху при випадковій іскрі. Порівняльна таблиця заходів безпеки подана в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Порівняльна таблиця заходів безпеки

Категорія заходу	Основний інструмент	Мета впровадження
Технічний	Тепловізори та датчики вібрації	Раннє виявлення аномального перегріву
Інженерний	Газові та пінні системи гасіння	Швидка локалізація вогню без шкоди обладнанню
Організаційний	Практичні тренінги та інструктажі	Мінімізація помилок через людський фактор

ВИСНОВКИ

В кваліфікаційні роботі проведена оцінка роботи міні-ГЕС на основі моделювання з розрахунком та вибором основного обладнання.

1. Проведений аналіз показав, що сучасна концепція проектування міні-ГЕС базується на децентралізації енергосистем та використанні кінетичної енергії малих водотоків з мінімальним екологічним навантаженням.

2. Встановлено, що для умов малих річок з низьким напором найбільш обґрунтованим є застосування осьових або перехресно-потоккових турбін, які забезпечують стабільну генерацію навіть за мінливих гідрологічних умов.

3. Дослідження електричної складової показало, що вибір типу генератора безпосередньо залежить від режиму експлуатації станції: асинхронні машини є оптимальними для паралельної роботи з загальною мережею завдяки своїй простоті, тоді як синхронні генератори є незамінними для автономного живлення віддалених об'єктів через можливість точного контролю напруги та частоти.

4. Аналіз систем керування підтвердив, що стабільність роботи міні-ГЕС забезпечується інтелектуальними цифровими регуляторами, які функціонують за принципом зворотного зв'язку та дозволяють у реальному часі адаптувати потужність агрегату до зміни навантаження споживача та рівня води.

5. Враховуючи низький напір води та значну витрату, для моделювання прийнято поворотно-лопатову турбіну Каплана, яка забезпечує високу ефективність у широкому діапазоні робочих умов.

6. В якості генератора обрано синхронну машину потужністю 500 кВт із тиристорною системою збудження, що дозволяє використовувати редуктор спрощеної конструкції завдяки низькій швидкості обертання ротора та забезпечує можливість автономної роботи установки.

7. Визначено структуру системи керування на базі цифрового мікропроцесорного контролера, в якому застосування ПД – регулятора в

каскадній схемі (контур швидкості та контур положення лопаток) дозволяє реалізувати подвійне регулювання турбіни Каплана.

8. Математичний опис роботи міні-ГЕС реалізовано через систему рівнянь Парка–Горева, що дозволило перейти від складних часових залежностей трифазної системи до двовимірної системи координат $d - q$. Сформована модель враховує електромагнітні процеси в обмотках статора, ротора та демпферних контурах, а також механічну інерцію агрегату.

9. Результати проведених досліджень підтвердили адекватність побудованої моделі та її здатність відтворювати перехідні процеси в системі.

10. Аналіз отриманих осцилограм показав, що при підключенні номінального навантаження в системі виникають короткочасні коливні процеси (тривалістю до 2–2,5 секунд), після чого параметри напруги, струму та активної потужності стабілізуються на номінальних значеннях.

11. Проведене порівняння результатів моделювання з теоретичними розрахунками виявило високу точність роботи моделі. Зокрема, лінійна напруга повністю відповідає розрахованим показникам, тоді як фазна напруга має допустиме відхилення у 2 % через особливості врахування лінійних втрат.

12. Отримані дані показали, що розроблена структурна схема та обрані параметри регуляторів забезпечують стійку роботу міні-ГЕС в усталених та перехідних режимах, що дозволяє використовувати дану модель для подальшого проектування реальних енергетичних об'єктів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Вовчак, В., Тесленко, О., Самченко, О. (2018). Мала гідроенергетика України. Аналітичний огляд. Том I. URL: <https://energyukraine.org/wp-content/uploads/2018/05/Otchet-MGES1.pdf>.
2. Будько В.І., Васько П.Ф., Пазич С.Т. Гідроенергетика: курс лекцій [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, – 2023. – 205 с.
3. European Small Hydropower Association (2004). Guide on How to Develop a Small Hydropower Plant. Part 2. URL: https://energypedia.info/images/4/4a/Part_2_guide_on_how_to_develop_a_small_hydropower_plant-final-21.pdf. (дата звернення: 21.04.2026).
4. Лежнюк П.Д., Нікіторович О.В., Кулик В.В. Малі гідроелектростанції з асинхронними генераторами. – Вінниця: ВНТУ, 2011. - 142 с
5. БУНЯК, О., СТАСІВ, А., ОРОБЧУК, Б., & СУДОМИР, В. (2025). РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ПОРІВНЯЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСФОРМАТОРІВ З ВРАХУВАННЯМ УМОВИ ЕКОНОМІЧНОСТІ. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences, 357(5.2), 115-122. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-357-73>.
6. Стаднік М. І., Васильківський В. А. Аналіз надійності роботи агрегатів малої ГЕС та розробка рекомендацій до її підвищення. // Техніка, енергетика, транспорт АПК. – 2018. – № 2. – С. 73-80.
7. Електричні машини: навчальний посібник. // О.А. Буняк, І.М. Сисак, С.М. Бабюк, Б.Я. Оробчук, Я.М. Осадца, В.П. Коваль. – Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., – 2023. О – 324 с.
8. Система керування гідротурбіною. URL: Система керування гідротурбіною. URL: https://iitr.ac.in/Departments/Hydro%20and%20Renewable%20Energy%20Department/static/Modern_hydroelectric_engg/vol_1/Chapter-6_HydroTurbine_Governing_System.pdf.

(дата звернення: 22.04.2026).

9. Гурко О.Г., Єрмоєнко І.Ф. Г 95 Аналіз та синтез систем автоматичного керування в MATLAB. Навчальний посібник/ О.Г. Гурко, І.Ф.Єрмоєнко. – Харків: ХНАДУ, 2011. – 286 с.

10. Романчук А.О., Терєбійчук С., д.т.н., проф. Толочко О.І., «Особливості віртуального фізичного моделювання механічних об'єктів з використанням блоків бібліотеки SimMechanics». Міжнародний науково- 2 технічний журнал "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики"- НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». – 2016.

11. Технічний каталог. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.zzem.com.ua/img/UserFiles/generator.pdf>.

12. Моделювання та аналіз електромеханічних систем в MATLAB. Методичні вказівки до лабораторних робіт для студентів спеціальності 141 – "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка" спеціалізації "Електромеханічні системи автоматизації і електропривод") / Укл.: О.І.Толочко – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 235 с.

13. MATLAB, Simulink, Simpowersystem. Основи програмування: лабораторний практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» з дисципліни «Пакети прикладних програм», ч. I, спеціалізація "Системи управління виробництвом і розподілом електроенергії" / О. І. Толочко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 8241 кБ). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 226 с.

14. Навчально-методичний посібник до практичних заняття з дисципліни «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» для студентів освітнього ступеня „бакалавр" усіх спеціальностей та форм навчання / Укладачі : О. Я. Гурик, І. Б. Окіпний, В. С. Сенчишин, С. Ю. Мариненко, О. І. Король. Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2025. 123 с. <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/48496>.

15. Коваль В.П., Тарасенко М.Г., Буняк О.А., Мовчан Л.Т. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів першого рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та

електромеханіка/ В.П. Коваль, М.Г. Тарасенко, О.А. Буняк, Л.Т. Мовчан –
Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 50 с. <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/45300>.