МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Електричної інженерії та кіберфізичних систем
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

другий (магістерський) рівень
(рівень вищої освіти)

на тему Дослідження показників якості електричної енергії генератора мікро-ГЕС в автономному режимі

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1453
спеціальності 145 Відновлювані джерела енергії та гідроенергетика
(код і назва спеціальності)
спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)
освітньої програми Гідроенергетика
(назва освітньої програми)
Мороз В. О.
(ініціали та прізвище)

Керівник к.т.н., доц., Радченко В.В.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)
Рецензент Коломієць Д.М.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерний навчально-науковий інститут_____
Кафедра____Електричної інженерії та кіберфізичних систем _____
Рівень вищої освіти____другий (магістерський) рівень_____
Спеціальність __145 Відновлювані джерела енергії та гідроенергетика
(код та назва)
Спеціалізація _____
(код та назва)
Освітня програма Гідроенергетика

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
д.т.н., проф._____В.Л. Коваленко
«_____»_____2024__року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

_____Морозу Власу Олексійовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи __Дослідження показників якості електричної енергії генератора мікро-ГЕС в автономному режимі_____
керівник роботи ___Радченко Віталій Васильович, к.т.н., доцент_____
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від «_28_»_лютого__2024__року №_361 - с_____
2 Строк подання студентом роботи _____01 грудня 2024 р._____
3 Вихідні дані до роботи Теоретичні основи якості електроенергії генераторів мікро-ГЕС, нормативні вимоги до якості електроенергії, основні характеристики мікро-ГЕС.
4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) _1) Теоретичні основи якості електроенергії генераторів мікро-ГЕС 2) Методика дослідження показників якості електроенергії 3) Розробка засобів підвищення якості електричної енергії 4) Охорона праці та техногенна безпека.
5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) 1) Енергетичні характеристики гідроагрегатів 2) Блокова і модульна схема складу вимірювального пристрою. 3) Отримані параметри показників якості електричної енергії. 4) Розробка регулятора 5) Техніко - економічні показники впровадження мікро ГЕС 6) Охорона праці та техногенна безпека.

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Радченко В.В. к.т.н. доцент		
Розділ 2	Радченко В.В. к.т.н. доцент		
Розділ 3	Радченко В.В. к.т.н. доцент		
Розділ 4	Радченко В.В. к.т.н. доцент		

7 Дата видачі завдання 01.09.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Теоретичні основи якості електроенергії генераторів мікро-ГЕС	30.09.2024	
2	Методика дослідження показників якості електроенергії	30.10.2024	
3	Розробка засобів підвищення якості електричної енергії	19.11.2024	
4	Охорона праці та техногенна безпека	30.11.2024	

Студент _____ В. О. Мороз
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____ В.В. Радченко
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ І.І. Коваленко
(підпис) (ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Мороз В. О. Дослідження показників якості електричної енергії генератора мікро-ГЕС в автономному режимі. Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 145 – Відновлювані джерела енергії та гідроенергетика, науковий керівник В.В. Радченко. Запорізький національний університет. Інженерний навчально-науковий інститут, кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем, 2024.

У цьому дослідженні аналізуються показники якості електричної енергії, що виробляється генератором мікро-ГЕС (гідроелектростанцій малих потужностей), в умовах автономної роботи. Вивчаються ключові параметри, такі як напруга, частота, коливання та гармоніки, які можуть впливати на стабільність і ефективність енергозабезпечення. Розроблено засоби покращення якості електричної енергії автономного генератора мікро ГЕС.

Ключові слова: МІКРО-ГЕС, АВТОНОМНИЙ РЕЖИМ, ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ, ГЕНЕРАТОР, НАПРУГА, ЧАСТОТА, ГАРМОНІКИ, КОЛИВАННЯ, СТАБІЛЬНІСТЬ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

ABSTRACT

Moroz V. O. Research on the quality of electric energy of a micro-hydroelectric power plant generator in autonomous mode. Qualification final work for obtaining a master's degree in specialty 145 - Renewable energy sources and hydropower, scientific supervisor V.V. Radchenko. Zaporizhia National University. Engineering Educational and Scientific Institute, Department of Electrical Engineering and Cyber-Physical Systems, 2024.

This study analyzes the quality of electricity generated by a micro-hydroelectric power plant (small hydroelectric power plant) generator in stand-alone operation. Key parameters such as voltage, frequency, oscillations and harmonics are studied, which can affect the stability and efficiency of energy supply. Means of improving the quality

of electricity of an autonomous micro-hydroelectric power plant generator are developed.

Keywords: MICRO-HYDROPOWER PLANT, STAND-ALONE MODE, ELECTRICITY QUALITY, GENERATOR, VOLTAGE, FREQUENCY, HARMONIC, OSCILLATIONS, STABILITY OF ENERGY SUPPLY

ЗМІСТ

Вступ……8
1. Теоретичні основи якості електроенергії генераторів мікро-ГЕС…….10
1.1. Основні характеристики мікро-ГЕС……...10
1.2. Генератори для автономних гідроелектростанцій…….13
1.3. Визначення показників якості електроенергії……15
1.4. Нормативні вимоги до якості електроенергії…….21
2. Методика дослідження показників якості електроенергії……....23
2.1. Вибір об'єкта дослідження……...…23
2.2. Методи вимірювання параметрів електроенергії……...25
2.3. Енергетичні особливості роботи генератора мікро- ГЕС в автономному режимі……..…33
2.4. Аналіз похибок та точність вимірювань…….34
2.5 Дослідження ефективності автономних мікро-ГЕС шляхом математичного моделювання……...…36
2.5.1. Визначення характеристик водотоків підприємства…….36
2.5.2 Визначення залежності енергетичних характеристик мікро-ГЕС від динаміки вторинних водотоків…….….38
2.6 Вплив динаміки вторинного водотоку на енергетичні показники……...41
2.7 Розробка математичної моделі генератора мікро-ГЕС в автономному режимі…….……45
2.8 Оцінка показників якості генерованої електричної енергії……47
3. Розробка засобів підвищення якості електричної енергії…….52
3.1. Розробка схеми регулятора напруги……52
3.2. Отримані параметри показників якості електричної енергії…….53
4 Охорона праці та техногенна безпека……..……..….59
4.1 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів виробничого середовища…….59

4.2 Заходи щодо захисту від впливу шкідливих факторів виробничого середовища горнового……62
4.3 Технічні рішення по гігієні праці і виробничій санітарії…….63
4.3.1 Мікроклімат……...63
4.3.2 Вентиляція й кондиціювання……...63
4.3.3 Освітлення……..70
4.4 Захисні заходи з електробезпеки……..73
4.5 Пожежна безпека……...75
4.6 Засоби індивідуального захисту……...77
4.7 Розробка заходів захисту від тепловиділень……77
Висновки…….83
Перелік джерел посилань……....84

ВСТУП

Актуальність теми. Актуальність проблеми обумовлена зростаючою потребою в ефективних та стабільних джерелах енергозабезпечення для віддалених та важкодоступних регіонів. Мікро-ГЕС, що працюють в автономному режимі, є важливим елементом для забезпечення енергетичної незалежності таких територій. Однак, для забезпечення стабільності та надійності енергопостачання важливою є якість електричної енергії, що виробляється цими генераторами.

Проблеми, пов'язані з коливаннями напруги, частоти та наявністю гармонік, можуть негативно вплинути на ефективність роботи електричних пристроїв та обладнання, а також скоротити їхній ресурс. Тому дослідження показників якості електричної енергії мікро-ГЕС є надзвичайно актуальним для розвитку малих гідроелектростанцій, підвищення їхньої ефективності та надійності, а також для забезпечення сталого розвитку енергетики в умовах змін клімату та обмеженості ресурсів.

Об'єкт дослідження - генератор мікро-ГЕС, що працює в автономному режимі.

Предмет дослідження - показники якості електричної енергії, що виробляється генератором мікро-ГЕС в автономному режимі.

Мета роботи – дослідити та оцінити показники якості електричної енергії, що виробляється генератором мікро-ГЕС в автономному режимі.

Задачі дослідження. Для досягнення поставленої мети в роботі визначені наступні задачі:

Задачі дослідження:

- проаналізувати основні показники якості електричної енергії, що виробляється генератором мікро-ГЕС;
- оцінити стабільність енергопостачання при автономній роботі мікро-ГЕС;

- розробити рекомендації щодо покращення роботи мікро-ГЕС для поліпшення якості виробленої електричної енергії.

Методи та засоби дослідження. Аналіз теоретичних моделей, експериментальні методи, методи обробки даних, комп'ютерне моделювання, моніторинг та вимірювання, статистичні методи.

Наукова новизна. Наукова новизна дослідження полягає в наступному: виявлення впливу різних факторів на показники якості електричної енергії, виробленої генератором мікро-ГЕС в автономному режимі. Це дозволяє уточнити і розширити існуючі знання щодо стабільності енергопостачання в умовах автономної роботи; розробка нових методів оцінки якості електричної енергії для малих гідроелектростанцій, зокрема виявлення механізмів, які призводять до виникнення коливань та гармонік в автономних системах енергозабезпечення; розробка рекомендацій щодо покращення роботи мікро-ГЕС в частині якості електричної енергії в автономному режимі, що має важливе значення для покращення надійності енергозабезпечення віддалених та важкодоступних районів.

Практична цінність роботи полягає в розробці математичного апарату, який дозволяє коригувати енергетичні характеристики генераторів мікро-ГЕС, що працюють на автономне навантаження і, таким чином, збільшити кількість виробленої електроенергії.

Апробація роботи. Положення роботи викладені в збірнику тез:

- XXVIV науково - технічної конференції студентів магістрантів, аспірантів і викладачів ІННІ ЗНУ (м. Запоріжжя, 2024);

- науково-практичної конференції «Молода наука - 2024» ІННІ ЗНУ (м. Запоріжжя, 2024).

Структура та обсяг роботи. Магістерська робота включає вступ, чотири розділи, висновки та список використаної літератури з 42 позицій. Загальний обсяг 84 сторінки.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ГЕНЕРАТОРІВ МІКРО-ГЕС

1.1. Основні характеристики мікро-ГЕС

Јб'єми вторинної води можна порівняти із стоком малих річок. Тому, для цього типу утилізації найбільш доцільним вважається використання стандартних мікро- (до 100 кВт) і міні- (від 100 до 1000 кВт) гідроелектростанцій (ГЕС). Вони представляють собою надійне та екологічно чисте джерело електроенергії [7-9]. Мікро- та міні-ГЕС можуть працювати як автономно в віддалених місцях, так і паралельно з іншими гідроелектростанціями в локальних або промислових мережах. Їх переваги включають високу тривалість служби без необхідності частого ремонту, просту конструкцію з мінімальною кількістю регулюючих органів, а також низькі витрати на установку та обслуговування під час експлуатації.

На сьогоднішній день на ринку існують різні виробники мікро- та міні-ГЕС, які виготовляють обладнання, придатне для таких завдань. Їх параметри дозволяють використовувати потік води практично при будь-якому напорі та витраті. Залежно від конструкції та методу встановлення розрізняють вільнопоточні (використовуються, головним чином, в руслах річок) та заглибні мікро-ГЕС. У контексті реалізації проектів гідроутілізації на підприємстві більш перспективним вибором вважаються заглибні мікро-ГЕС, оскільки вони демонструють більшу гнучкість з точки зору монтажу та підключення до енергетичних мереж.

Гідроагрегати для малих і мікро-ГЕС, що випускають МНТО “ІНСЕТ”, характеризуються високими енергетичними показниками й випускаються із пропелерними, радіально-осьовими й ковшовими турбінами. У комплект поставки входять, як правило, турбіна, генератор і система автоматичного керування гідроагрегатом. Проточні частини всіх турбін розроблені з використанням методу математичного моделювання.

Основні характеристики мікро-ГЕС представлені в таблицях 1.1 та 1.2.

Таблиця 1.1 - Основні технічні характеристики мікро-ГЕС із пропелерними турбінами виробництва МНТО «ІНСЕТ»

Параметри	Тип мікро-ГЕС					
	10Пр		15Пр	50Пр		100Пр
Потужність, кВт	0,6-4	2,2-10	3,5-15	10-30	10-50	40-100,0
Напір, м	2,0-4,5	4,5-10	4,5-12	2,5-6	4-10	6-18
Витрата, $м^3/с$	0,07-0,14	0,1-0,21	0,1-0,3	0,3-0,8	0,4-0,9	0,5-1,2
Частота обертання, $хв^{-1}$	1000	1500	1500	600	750	1000
Номінальна напруга, В	230		400	230, 400		230, 400
Номінальна частота струму, Гц	50					

Серійні мікро-ГЕС комплектного виконання мають деякі недоліки, серед яких слід відзначити спрощену систему регулювання швидкості. При підвищених обертах (частотах) зайва потужність автоматично вимикається на баластному навантаженні. Проблемою також є відсутність гідравлічних турбін для роботи при малих напорах від (1,5 до 3 м) за великих витратах води в межах від (2 до 10 $м^3/с$). Такі потоки із вказаними характеристиками досить поширені в різних галузях промисловості. Зазначено, що в гідромашинобудуванні велика увага до цього потенційного енергоресурсу звертається лише за кордоном. Наприклад, у Фінляндії розпочато виробництво гідротурбін з напорами від (1,5 до 3,5 м), які використовуються в технічно-транспортних системах [33].

Таблиця 1.2 - Основні технічні характеристики мікро-ГЕС із діагональною й ковшовою турбінами МНТО «ІНСЕТ»

Параметри	Тип мікро-ГЕС		
	20 ПрД	100 ДО	200 ДО
Потужність, кВт	10 - 20	до 100	до 200
Напір, м	8 - 18	40 - 250	
Витрата,$м^3/с$	0,080 - 0,170	0,015 - 0,046	0,015 - 0,130
Частота обертання, $хв^{-1}$	1500	600; 750; 1000	
Номінальна напруга, В	230, 400	230 , 400	
Номінальна частота струму, Гц	50	50	

Українське сертифіковане обладнання для мікро-ГЕС переважно призначене для роботи на напорах, що перевищують 5 метрів. Застосування його при менших напорах призводить до різкого зниження коефіцієнта корисної дії турбін та обмежує можливості регулювання обертання. Отже, вибір такого обладнання для роботи в умовах низьких напорів не є доцільним.

Іноземці вже давно проявили зацікавленість у сфері екологічної та економічної міні-енергетики. Мікро-ГЕС успішно функціонують в різних країнах, таких як Японія, Південна Корея, Бразилія, Гватемала, Швеція, Польща [7-9]. Наприклад, шведська компанія Flugt виробляє високоефективне та якісне обладнання для мікро-ГЕС, яке, хоча і дорожче, має переваги у високій економічності, достатній керованості, маневреності та можливості працювати паралельно з електричною мережею. Гідрогенератори цієї фірми є стандартними модульними виробами, які можна адаптувати до різних експлуатаційних умов з витратами від 0,7 до 12 м³/с та напорами від 2,5 до 20 м. Їхні номінальні потужності становлять від 40 до 710 кВт. Гідротурбогенератори Flugt, які працюють в напівзануреному стані в вертикальних колонах, є компактними агрегатами, які складаються з турбіни, генератора та, за потреби, планетарного редуктора. Ці гідротурбогенератори не потребують довгих валів і звичайних

силових передач, легко піднімаються для технічного обслуговування та охолоджуються проточною водою.

З Заглибні гідротурбогенератори призначені для установки у вертикальному положенні, але найменші моделі (EL 7556 і EL7570), а також типи EL7585 і EL7600 із прямим приводом, можуть також бути встановлені горизонтально або під нахилом. Фінська компанія Waterpumps Wp Oy виробляє більш доступне обладнання з аналогічною можливістю. Чеський завод "Долні Бенешов" виробляє мікро-ГЕС потужністю (10…100) кВт з турбінами, що базуються на лопатевих насосах. Однак їхній основний недолік полягає у потребі великих напорів (8…20) м, викликаних використанням технологій насосів у зворотних режимах [23].

Фірма CINK (Чехія) серійно виготовляє унікальні комплектні модулі ГЕС для напорів від 1,3 м. Ці модулі оснащені високоточною мікропроцесорною системою автоматичного регулювання параметрів генератора та забезпечують максимальний коефіцієнт корисної дії. Вони ефективно працюють у системах водопостачання, включаючи питну воду, і зазвичай працюють паралельно з електромережею. Гідротурбіни цих модулів є безкавітаційними і одночасно використовуються як аератори води. Виробництво поперечноструйних турбін цього виробника базується на п'яти основних робочих колесах за діаметром, що дозволяє створювати понад 110 модифікацій гідромашин з високим коефіцієнтом корисної дії і широкою зоною регулювання без значних технологічних витрат.

1.2. Генератори для автономних гідроелектростанцій

Генератори для автономних гідроелектростанцій (мікро-ГЕС) відіграють ключову роль у перетворенні механічної енергії води в електричну. Вибір

генератора залежить від потужності станції, стабільності потоку води та типу навантаження.

Основні типи генераторів для мікро-ГЕС:

1. Синхронні генератори.

- використовуються для стабільного живлення чутливого обладнання;
- забезпечують високу якість електроенергії (низькі гармонічні спотворення, стабільна частота);
- потребують регулювання збудження для підтримки напруги.

2. Асинхронні (індукційні) генератори.

- простішої конструкції, менш чутливі до навантаження;
- використовуються для автономних систем, що живлять менш чутливе обладнання;
- часто працюють із конденсаторними батареями для підтримки самозбудження;

3. Постійного струму (DC-генератори).

- використовуються в системах із акумуляторними накопичувачами енергії;
- дають можливість ефективного зберігання та використання енергії через інвертори.

Основні параметри генераторів для мікро-ГЕС:

- номінальна потужність (від 500 Вт до 100 кВт залежно від масштабу ГЕС);
- частота вихідного струму (50 або 60 Гц для змінного струму);
- ККД (85–95% для синхронних генераторів, 75–85% для асинхронних);
- рівень гармонічних спотворень (THD ≤ 5% для якісного живлення);
- спосіб регулювання напруги (AVR, конденсаторне регулювання, електронні контролери).

Вибір генератора для автономної ГЕС:

При виборі генератора слід враховувати:

- стабільність потоку води (для синхронних генераторів бажаний стабільний дебіт);

- тип навантаження (чутливе обладнання вимагає мінімальних гармонічних спотворень);

- можливість регулювання напруги та частоти;

- потребу в накопиченні енергії (для варіантів з акумуляторами доцільний DC-генератор).

Якщо потрібно більш детально розкрити цей розділ у дипломній роботі, можна додати схеми регулювання, порівняння ефективності різних типів генераторів і вплив якості енергії на споживачів.

1.3. Визначення показників якості електроенергії

Якість електроенергії визначається рядом параметрів, що впливають на стабільність і ефективність роботи електрообладнання. Для генераторів мікро-ГЕС в автономному режимі контроль цих параметрів є критично важливим, оскільки відсутність централізованого регулювання може призводити до значних відхилень.

Основні показники якості електроенергії:

1. Частота змінного струму (Hz)

- номінальне значення: 50 Гц (Європа) або 60 Гц (США);

- допустиме відхилення: ±1-2%;

- залежить від стабільності обертів генератора та навантаження.

2. Рівень напруги (V)

- номінальні значення: 220 В (однофазні системи) або 380 В (трифазні);

- допустиме відхилення: ±5%;

- визначається регулятором напруги (AVR) або конденсаторним самозбудженням (для асинхронних генераторів).

3. Симетрія фаз (для трифазних генераторів)

- відношення напруг між фазами повинно бути рівномірним;
- дисбаланс фаз може спричинити перегрів двигунів та зниження ККД.

4. Коефіцієнт гармонічних спотворень (THD - Total Harmonic Distortion)

- оптимальний рівень: не більше 5%;
- високий рівень гармонік (10-20%) може спричинити перегрів обладнання та завадити нормальній роботі електронних пристроїв.

5. Коливання напруги (фліккер)

- виникає при різких змінах навантаження;
- генератори з ефективним регулюванням напруги (AVR) забезпечують мінімальні флуктуації.

6. Коефіцієнт потужності (cos φ)

- оптимальний: 0,8-1,0;
- зниження нижче 0,8 свідчить про домінування реактивної потужності, що потребує корекції (наприклад, конденсаторними батареями).

7. Стабільність напруги при зміні навантаження

- при різких пусках або відключеннях навантаження генератор не повинен допускати значних просідань напруги;
- якісний регулятор напруги допомагає уникнути таких коливань.

Методи вимірювання якості електроенергії

Для визначення показників якості електроенергії застосовують:

- аналізатори якості електроенергії (вимірюють THD, частоту, асиметрію фаз);
- осцилографи (досліджують форму сигналу, наявність гармонік);
- мультиметри та вольтметри (контроль напруги та струму);
- логери напруги (відстежують тривалість і амплітуду коливань).

Дослідження цих показників дозволяє оптимізувати роботу генератора, зменшити втрати енергії та продовжити термін служби електрообладнання.

Електроприймачі та пристрої різного призначення, що підключаються до електричної мережі, призначені для використання з певними номінальними

параметрами мережі, тобто номінальною напругою, номінальним струмом, номінальною частотою, номінальною потужністю тощо для кожного пристрою, що забезпечує його режим роботи. Було призначено. Тому при забезпеченні електроенергією працівників електроенергією повинна бути дотримана необхідна якість електричної енергії [1- 3]. При цьому електроприймачі та пристрої можуть підключатися до електричних мереж в різних місцях, і з цієї причини якість електричної енергії мереж може бути різним в кожному місці. Таким чином, величина спотворень на кордонах електроприймачів, як правило, не буде однаковою і буде змінюватися у різних електроприймачів в залежності від довжини і характеру мережі [4-6].

Досвід, накопичений у сфері експлуатації електричних мереж, свідчить, що вжиті заходи у сфері зменшення або повного усунення впливу електричних мереж на показники якості енергії є надзвичайно успішними [7,8]. З цієї точки зору вважається більш зручним створення пристроїв, що працюють в невеликих розмірах в порівнянні з номінальними параметрами. При цьому відомо, що техніко-економічні показники електроприймачів і пристроїв будуть дещо відрізнятися, але вони не повинні виходити за допустимі межі [9-12].

Згідно з ГОСТ 13109-67 нормованими показниками якості сучасних електроприймачів, що живляться від мереж трифазного змінного струму, є відхилення від номінального значення напруги, несиметрія, несинусоїдальність різниці напруг, коливання напруги. Слід зазначити, що серед цих показників окремо не розглядається показник частоти змінного струму, тому що цей показник входить в загальні показники системи. Аналізуючи режим порушення електромережі, характерними вважаються ті станції, де значення параметрів збурення більше.

У досить великих випадках порушення порушуються нормальні режими роботи більшості електроприймачів, і в результаті знижується якість продукції, що випускається на промислових об'єктах, або відбувається виробництво відходів або збільшення пошкоджень електроізоляції, скорочення терміну

служби електрообладнання. Ці випадки не трапляються всі відразу, це залежить від тривалості поточного режиму роботи, умов праці попередніх режимів тощо.

Якщо складність залежностей, викликаних впливом цього режиму, і в той же час економічний збиток велика, то значення параметрів відхилення не допускається перевищувати певні межі згідно з ДІСТ. Ці визначені величини називаються технічно допустимими цінностями. Навіть якщо в цих межах не спостерігається аномальних подій, це саме по собі вимагає додаткових перевірок.

Прийнято вважати, що в цих межах електроприймачі повинні володіти необхідними характеристиками і нормально виконувати свої функції.

Згідно з ГОСТ 13109-67, величина відхилення в межах об'єктів теплопостачання не повинна перевищувати 2,5 - 5%. Для того щоб запустити двигуни і пристрої, допускається відхилення в їх межах від -5+10% від номінального значення. Допустиме відхилення напруги на вході інших електроприймачів становить 5%.

В принципі, можна також підготувати електроприймачі з розрахунком на більші значення напруги мережі, але це обумовлює їх складність і наявність більших значень. Таким чином, відступлені ціни втрачених зборів за заколот за Державним стандартом визначаються певними економічними інтересами.

Прийнято характеризувати несиметрію струму зі значеннями струмів зворотної і нульової послідовності. В результаті сумарне значення відхилень від номінального збільшиться, а це погіршить режими відхилення електроприймачів. На роботу обертових електричних машин погано впливають навіть дуже малі змінні струми. У цих двигунах струми першої негативної послідовності в 5-7 разів перевищують струми другої негативної послідовності. В результаті створюється високочастотне обертове магнітне поле, а в циклах двигуна виробляється двошвидкісний електричний струм і генеруються струми, що в свою чергу призводить до пошкодження відповідних рухомих частин машин.

При наявності струмів нульової і нульової послідовності накопичені струми в окремих фазах елементів мережі зростають, що призводить до

збільшення потужності і втрат енергії, а така ситуація неприпустима через відсутність короткого замикання. Струми нульової послідовності закінчуються постійним заземленням. В цьому випадку грунт додатково просушується (за рахунок струму) і збільшується опір заземлювачів. Це неприпустимо з точки зору релейного захисту, а також робить сильний вплив на об'єкти низькошвидкісного зв'язку, а також на блокувальні споруди, що використовуються на залізниці.

З метою попередження естерилізованих випадків допустиме значення однорічних відхилень для всіх приймачів електроенергії з державним стандартом не повинно перевищувати 2% від номінального відхилення. Для асинхронних двигунів допускається незначне збільшення цього значення в залежності від їх схеми обертання. Величина нульового послідовного річного відсотка не є фіксованою. Однак для трифазних розподільних мереж з однофазними електроприймачами показано, що впливає значення напруги на стінках електроприймачів не може перевищувати допустимих меж з урахуванням всіх факторів впливу - напруг нульової і негативної послідовності, парної послідовності коливання напруги і високі гармоніки напруги.

Несинусоїдальна форма кривої збудження характеризується наявністю в спектральному складі цієї кривої інших вищих гармонік U_n, крім гармоніки основної частоти U_1 (тут n – порядковий номер гармоніки).

Оскільки крива висоти звуку має симетричний характер, вона містить подвійні гармоніки, тобто 2, 4, 6, 8 і т. д. Крім того, в трифазних циклах, якщо є хоча б один блок, так як підключений трифазний електроприймач, всі гармошки з 3-м типом мають чорний колір. Однак в складі сигналу впливають так звані канонічні гармоніки 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23 і т.д., які також відображають невідповідності в несиметричних ладах.

Слід також зазначити, що високочастотні несинусоїдальні струми викликають більші додаткові струми в обертових машинах, а також підвищені діелектричні втрати і додаткові струми в конденсаторах.

У той же час можливе виникнення резонансних подій в електричних мережах на високих частотах. При цьому різко зросли ціни на електроенергію та струм на різних ділянках мережі.

Залежно від умов роботи електроприймачів не може бути нормалізований несинусоїдальний характер коливань, тобто гармонійний склад. Перш за все, це обґрунтовано тим, що вплив гармонік відбувається разом з впливом інших факторів (наприклад, асиметрії). Тому необхідно стежити, щоб величина збурень в межах електроприймачів не виходила за допустимі межі і щоб теплоємність двигунів не виходила за нормальну межу. Це означає, що всі фактори впливу повинні розглядатися в комплексі.

Промислове виробництво в нашій республіці органічно пов'язане з ефективною роботою її електроенергетичних об'єктів. Ефективна робота електроенергетичних об'єктів, в свою чергу, значною мірою залежить від відповідності обладнання, що становить основу цих об'єктів, вимогам, що відповідають світовому стандарту, і застосування автоматизованих і автоматичних технічних систем, заснованих на застосуванні сучасних досягнень інформаційних технологій.

Відомо, що в управлінні самим технологічним процесом, а також при реалізації готової продукції оперативне визначення параметрів, що характеризують об'єкт і виріб, і контроль їх контролю є одним з основних факторів загального принципу роботи об'єктів електроенергетики. Застосування систем контролю і діагностики, заснованих на використанні передавачів і перемикачів, що відповідають сучасним вимогам в області електроніки, дозволяє не тільки визначити, чи відповідає готова продукція стандартам, але і виявити небажані тенденції в технологічних процесах на основі показників продукту, що випускається і вчасно їх попередити.

Початкові зміни параметрів є основними елементами систем автоматичного контролю і діагностики, призначених для електроенергетичних об'єктів, і є технічними засобами, які безпосередньо впливають на точність і точність роботи систем, які є важливими показниками.

Внутрішні параметри елементів схеми призводять до похибки електричних і неелектричних величин. Щоб не допустити зміни робочого режиму, внутрішні параметри вимірювальних приладів повинні мити в спеціальних умовах. Змінити параметр неможливо. В останні роки значного розвитку отримали цифрові засоби вимірювання та методи інтегральних параметрів змінних струмових сигналів. Однак досягнення в цій області здаються дуже незначними в порівнянні з досягненнями в області вимірювальних систем і цифрових пристроїв параметрів змінних струмових сигналів. Причиною цього є ряд методологічних і технічних проблем, що виникають при цифровому вимірюванні інтегральних параметрів сигналів змінного струму.

Один з важливих напрямків в напрямку створення передавачів і перетворювачів електроенергії пов'язаний з вимірюванням потужності несинусоїдальних сигналів в умовах аварійної сигналізації. Широке застосування нелінійних елементів в електронному та електротехнічному обладнанні є основною причиною появи гармонійних спотворень в лініях живлення (лініях напруги і струму) відповідних процесорів. У зв'язку з цим було проведено безліч досліджень, а науково-дослідна робота проводилася саме пов'язана з аналізом ефективних методів визначення електричних параметрів в несинусоїдальних періодах. На практиці застосовуються різні методи ураження електричним струмом. Умовно вони прирівнюються до прямих і непрямих котирувань.

1.4. Нормативні вимоги до якості електроенергії

При використанні методу прямої оцінки величина визначається безпосередньо за показаннями приладу. Наприклад, вимірювання струму - амперметри, струму - вольтметр і так далі.

Відомо, що рівні відхилень у різних установках відрізняються певною мірою. Ці відмінності менші для 10-секундного періоду та більші для 60-секундного періоду. Крім того, форма гістограми та характер параметрів відхилення однакові для всіх установок. У випадку 10-секундного періоду математичне відхилення відрізняється на ±0,5%, а для 60-секундного періоду – на ±0,7%. Однак різниця стандартних відхилень не перевищує ±0,1%. Отже, при використанні статистичного аналізатора якості відхилення необхідно враховувати всі отримані характеристики: форму гістограми, ймовірність потрапляння в різні рівні, середнє значення та стандартне відхилення.

Головні результати дослідження: показники якості електроенергії визначаються розподілом напруги, хвиль, симетричністю трифазної періодичності та несинусоїдністю напруги. Запропонована система контролю дозволяє здійснювати моніторинг якості енергії в режимі реального часу.

Електроприймачі та пристрої різного призначення, підключені до електромережі, розраховані на певні номінальні параметри мережі: напругу, струм, частоту, потужність тощо. Тому необхідно забезпечити відповідну якість електроенергії. Однак якість електроенергії може змінюватися залежно від місця підключення споживача до мережі. Вплив на якість електроенергії мають довжина та характер електромережі.

Згідно з державним стандартом 13109-67, нормовані показники якості електроенергії для сучасних електроприймачів, що живляться від трифазних мереж змінного струму, включають відхилення від номінальної напруги, асиметрію, несинусоїдність напруги та її коливання. Частота змінного струму не виділяється окремо, оскільки вона включена до загальних системних показників.

2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

2.1. Вибір об'єкта дослідження

Якість електроенергії визначається величиною відхилень у ключових точках мережі. У межах одного перетворювального кроку відхилення змінюється в певних межах, тому зазвичай використовують не абсолютні значення відхилення U, а їх відносні компоненти B.

Ступінь відхилення виражається у відсотках від номінального відхилення:

$$V_{i\%}=U_i-U_n / U_n \cdot 100 \qquad (2.1)$$

де U_i – значення відхилення у і-му вузлі мережі,

U_n – номінальний струм мережі.

При значних відхиленнях від номінальних значень порушується нормальний режим роботи електроприймачів, що може призвести до зниження якості продукції на промислових підприємствах, зростання витрат електроізоляції та зменшення строку служби електрообладнання.

Якщо відхилення параметрів перевищують допустимі межі, це може спричинити економічні збитки. Технічно допустимі значення параметрів визначаються відповідно до державного стандарту.

Згідно з державним стандартом 13109-67, величина відхилення в межах нагрівальних об'єктів не повинна перевищувати 2,5–5%. Для запуску двигунів і пристроїв допустиме відхилення складає -5%...+10% від номінального значення.

Використання статистичного аналізатора якості електроенергії дозволяє визначити форму гістограми, ймовірність потрапляння в різні рівні, середнє значення та стандартне відхилення.

Основні висновки:

- показники якості електроенергії визначаються розподілом напруги, хвиль, симетричністю трифазної періодичності та несинусоїдністю напруги;

- необхідно використовувати систему контролю, що дозволить здійснювати моніторинг якості енергії в режимі реального часу.

2.2. Методи вимірювання параметрів електроенергії

Вимірювання параметрів електроенергії є важливим етапом контролю якості генераторів мікро-ГЕС в автономному режимі. Для цього використовують різні прилади та методи аналізу.

Методи вимірювання параметрів електроенергії.

Вимірювання параметрів електроенергії є важливим етапом контролю якості генераторів мікро-ГЕС в автономному режимі, оскільки дозволяє оцінити стабільність та ефективність роботи системи, виявити можливі відхилення від нормативних значень і розробити шляхи їх усунення. Комплексний підхід до вимірювання параметрів електроенергії дозволяє отримати повну картину роботи мікро-ГЕС, що працює в автономному режимі, та своєчасно вживати заходів для підвищення ефективності й стабільності її функціонування.

Вимірювання частоти змінного струму:

Прилади:

Частотоміри - це вимірювальні прилади, призначені для визначення частот періодичних сигналів. Вони використовуються в різних галузях, включаючи електроніку, телекомунікації та наукові дослідження. Основні характеристики включають діапазон вимірювань, точність, роздільну здатність та час вимірювання. Частотоміри можуть бути аналоговими або цифровими, високочастотними або низькочастотними, стаціонарними або портативними в залежності від їхнього призначення та застосування. На рисунку 2.1 наведено цифровий частотомір.



Рисунок 2.1 - Цифровий частотомір

Аналізатори якості електроенергії - це комплексний пристрій, який застосовується для вимірювання, контролю та аналізу всіх ключових параметрів електропостачання. Такий прилад дозволяє виявити дефекти (саги, сплески, імпульси, гармонічні спотворення), які можуть впливати на роботу обладнання, а також допомагає оптимізувати споживання енергії і підтримувати стабільність мережі.

Аналізатори якості електроенергії зазвичай вимірюють кілька параметрів, до яких належать:

- напруга (U) (за законом Ома):

$$U=I\cdot R, \tag{2.2}$$

де I— струм (А), R — опір (Ом).

- струм (I):

$$I=U/R, \tag{2.3}$$

- активна потужність (P), що перетворюється на корисну робочу енергію:

$$P=U\cdot I\cdot\cos(\varphi), \tag{2.4}$$

де φ- кут зсуву фаз між струмом та напругою.

- реактивна потужність (Q), що «оперується» між елементами мережі, але не виконує корисної роботи:

$$Q=U\cdot I\cdot\sin(\varphi), \tag{2.5}$$

- повна потужність (S):

$$S=U\cdot I, \tag{2.6}$$

- частота (f):

$$f=1/T, \tag{2.7}$$

де T — період одного циклу.

Гармонічні спотворення: Визначають внесок частот, відмінних від основної, що впливають на якість електроенергії.

- показник THD (Total Harmonic Distortion):

Аналізатори якості електроенергії використовують поєднання апаратних засобів та програмних алгоритмів для збору та аналізу даних. Основні компоненти включають:

- сенсори та трансформатори: Для вимірювання напруги та струму використовуються точні датчики, вольтметри, амперметри, токові та напругові трансформатори;

- аналого-цифрові перетворювачі (ADC): Забезпечують дискретизацію сигналів для подальшого аналізу;

- обчислювальні блоки (DSP або мікроконтролери): Виконують обчислення параметрів у режимі реального часу, застосовуючи алгоритми, такі як швидке перетворення Фур'є (FFT) для аналізу гармонік.

Ілюстративна ASCII-схема типового аналізатора зображена на рисунку 2.2.



Рисунок 2.2 - Ілюстративна ASCII-схема типового аналізатора

Застосування аналізаторів якості електроенергії.

Промислові мережі: Забезпечення стабільності електропостачання на великих підприємствах. Аналізатори допомагають виявити короткі перебої, скачки напруги чи високий рівень гармонік, що можуть пошкодити обладнання.

Енергоуправління: Моніторинг споживання енергії у реальному часі дозволяє оптимізувати використання ресурсів та знизити витрати.

Інтеграція відновлюваних джерел: Завдяки аналізу якості електроенергії можливе виявлення змінних режимів генерації від Сонця та Вітру, що сприяє ефективному керуванню мікромережами.

SCADA-системи: У сучасних системах керування електроенергією аналізатори інтегруються у SCADA для віддаленого моніторингу, аналізу тенденцій та автоматизації керування мережею. На рисунку 2.3 наведено зображення типового аналізатора якості електричної енергії.



Рисунок 2.3 - Зображення типового аналізатора якості електричної енергії

Додаткові можливості та приклади аналізу.

Аналізатори якості електроенергії часто включають наступні додаткові функції:

- реєстрація даних: збереження історичних даних для аналізу довготермінових тенденцій та виявлення повторюваних несправностей;

- аналіз імпульсних перешкод: Виявлення короткочасних імпульсних подій, які можуть бути критичними для високоточних пристроїв;

- візуалізація даних, побудова графіків і діаграм, що ілюструють параметри мережі у реальному часі, а також параметри гармонік та спектральний аналіз сигналів.

Наприклад, для визначення рівня гармонічних спотворень можна застосувати алгоритм FFT, що дозволяє розкласти сигнал за частотними компонентами. Результати аналізу зазвичай показують графік амплітуд для кожного гармоніка, і, на основі цього, обчислюють THD за наведеною вище формулою.

Осцилографи - це прилад для візуалізації електричних сигналів у часі. Він дозволяє спостерігати форму хвилі, вимірювати параметри сигналу та аналізувати такі характеристики, як амплітуда, частота, період і стаціонарність сигналу. Сучасні осцилографи в основному цифрові (Digital Storage Oscilloscopes, DSO), які виконують перетворення аналогового сигналу за допомогою аналого-цифрових перетворювачів (ADC) та забезпечують гнучкий аналіз.

Основні функції та застосування:

- візуалізація сигналу. Осцилограф відображає сигнал на екрані у вигляді графіка, де по горизонтальній осі (X) відкладається час, а по вертикальній (Y) — напруга;
- тригерування. Функція тригера дозволяє стабілізувати відображення періодичних сигналів, забезпечуючи повторення хвиль для зручного аналізу;
- вимірювання параметрів. Відображення та використання курсорів для точного вимірювання амплітуди, періоду, часу затухання, часу переходу сигналу;
- аналіз спектрального складу. Багато цифрових осцилографів підтримують FFT (швидке перетворення Фур’є) для аналізу гармонічного вмісту сигналу.

Ключові параметри осцилографа:

Смуга пропускання (Bandwidth, BW):

- визначає максимальну частоту сигналу, яку осцилограф може точно виміряти;
- вимірюється в герцах (Гц, MHz, GHz);
- має бути щонайменше в 5 разів більшою за частоту сигналу, що досліджується.

Частота дискретизації (Sampling Rate, SR):

- визначає, скільки точок зчитує осцилограф за секунду;
- одиниці виміру: Samples per Second (S/s, MS/s, GS/s);
- мінімум в 10 разів більше за смугу пропускання.

Роздільна здатність аналого-цифрового перетворювача (ADC Resolution):

- визначає точність оцифрування сигналу;
- виражається в бітах: 8-біт, 10-біт, 12-біт, 16-біт;
- вищий біт означає кращу точність вимірювань.

Глибина пам’яті (Memory Depth):

- кількість вибірок, яку може зберегти осцилограф;
- одиниці виміру: КБ, МБ, ГБ;
- важливо для аналізу тривалих сигналів.

Вхідні параметри.

Вхідний опір (Input Impedance):

- типове значення: 1 МОм, 20 пФ;
- для високочастотних сигналів – 50 Ом.

Діапазон вхідної напруги (Vertical Sensitivity):

- визначає мінімальну та максимальну напругу, яку може виміряти осцилограф;
- типові значення: від мкВ до сотень В/поділ.

Кількість каналів (Number of Channels):

- 2, 4 або більше;
- визначає, скільки сигналів можна аналізувати одночасно.

Параметри розгортки (горизонтальна характеристика).

Часова база (Time Base):

- діапазон часу, що відображається на екрані;
- типові значення: нс/поділ – с/поділ.

Мінімальний час розгортки (Minimum Time Per Division):

- визначає найменший інтервал часу, який можна аналізувати.

Додаткові параметри.

Тригерування (Triggering):

- дозволяє фіксувати сигнали за певними умовами (рівень, фронт, імпульс тощо).

Режими роботи:

- реальний час (Real-time sampling);
- повторне накопичення (Equivalent-time sampling).

Інтерфейси:

- USB, LAN, Wi-Fi – для передачі даних.

Для вибору осцилографа важливо враховувати смугу пропускання, частоту дискретизації, роздільну здатність, глибину пам'яті та тригерні можливості. Для високочастотних вимірювань ключову роль відіграє вхідний опір і якість зонда. На рисунку 2.4 зображено типовий осцилограф.

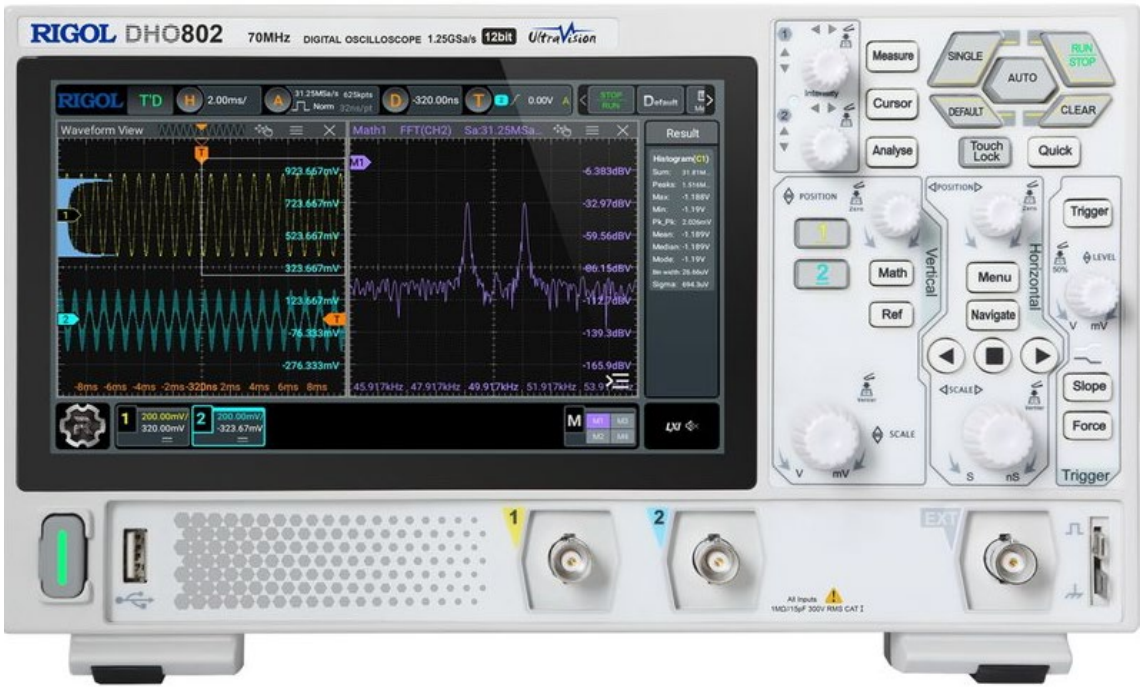


Рисунок2.4 - Типовий осцилограф.

Для довготривалого моніторингу використовують цифрові логери.

Вимірювання напруги.

Прилади:

- вольтметри (аналогові та цифрові);
- мультиметри;
- осцилографи.

Метод:

- миттєва напруга визначається за графіком осцилографа;
- для оцінки середнього значення використовується середньоквадратичне значення (RMS).

Визначення коефіцієнта гармонічних спотворень (THD).

Прилади:

- аналізатори якості електроенергії;
- осцилографи.

Метод:

- гармонічні складові аналізують за допомогою швидкого перетворення Фур'є (FFT);
- коефіцієнт THD.

Визначення симетрії фаз.

Прилади:

- аналізатори мережі;
- осцилографи.

Метод:

- вимірюється напруга між фазами та їх балансність.

Визначення коефіцієнта потужності (cos φ).

Прилади:

- ватметри;
- аналізатори енергоспоживання.

Методи довготривалого моніторингу параметрів:

- реєстратори напруги – записують зміну напруги протягом тривалого часу;
- осцилографи з цифровою пам’яттю – аналізують миттєві зміни сигналів;
- комп’ютеризовані системи моніторингу – підключаються до генератора через датчики.

Ці методи дозволяють контролювати якість електроенергії та вчасно виявляти відхилення від нормативних значень.

2.3 Енергетичні особливості роботи генератора мікро- ГЕС в автономному режимі

У автономному режимі генератор працює без підключення до загальної електромережі, тому якість електроенергії залежить від його характеристик та навантаження. Основні показники якості електроенергії генератора в автономному режимі включають:

1. Частота змінного струму (Hz)

- нормальне значення: 50 Гц (або 60 Гц у деяких системах);
- допустимі відхилення: ±1–2%;
- при змінному навантаженні генератор може давати короткочасні коливання частоти.

2. Рівень напруги (V)

- номінальні значення: 220 В (однофазні системи) або 380 В (трифазні);
- відхилення: не більше ±5% від номінального значення;
- залежить від якості регулятора напруги AVR (Automatic Voltage Regulator).

3. Симетрія фаз (для трифазних генераторів)

- співвідношення напруг між фазами повинно бути рівномірним;
- несиметрія фаз може призвести до перегріву двигунів.

4. Коефіцієнт гармонік (THD - Total Harmonic Distortion)

- для якісної електроенергії THD має бути менше 5%;
- в автономних генераторах без фільтрів може перевищувати 10%, що впливає на роботу чутливого обладнання.

5. Коливання напруги (фліккер)

- виникають при різких змінах навантаження;
- у якісних генераторів з регулятором напруги ці коливання мінімальні.

6. Ступінь стабільності при навантаженні

- різкі зміни навантаження можуть спричинити просідання напруги або частоти;
- генератори з гарною стабілізацією швидко відновлюють параметри.

Якщо генератор має погані показники якості електроенергії (велике відхилення частоти, високий рівень гармонік, просідання напруги), це може негативно впливати на роботу електронного обладнання та двигунів.

2.4. Аналіз похибок та точність вимірювань

Систематичні похибки.

Це похибки, що мають сталий характер і спричинені особливостями вимірювального приладу або методики вимірювань. Основні причини:

- неточність калібрування приладів;
- вплив зовнішніх факторів (температури, вологості, електромагнітних завад);
- похибка внутрішніх електронних схем вимірювального обладнання.

Метод усунення: калібрування приладів, використання стабілізованих джерел живлення.

Випадкові похибки.

Ці похибки мають нерегулярний характер і виникають через:

- коливання напруги в мережі;
- нестабільність сигналу генератора;
- вплив шумів та флуктуацій в електронних схемах.

Метод усунення: статистична обробка даних, фільтрація шумів.

Інструментальні похибки зумовлені точністю самого вимірювального приладу. Наприклад:

- клас точності вольтметра 0,5% означає максимальну похибку ±0,5% від вимірюваного значення;
- похибки осцилографів залежать від частотної характеристики.

Метод усунення: використання приладів з високою точністю (клас точності 0,1% і вище).

Методичні похибки.

Виникають через неправильний вибір методики вимірювання.

Наприклад, вимірювання напруги осцилографом без урахування форми сигналу може дати невірне середньоквадратичне значення (RMS).

Метод усунення: правильний вибір методу вимірювань, урахування характеристик сигналу.

Оцінка точності вимірювань

Визначення середньої квадратичної похибки. Якщо є серія вимірювань $X_1, X_2, \dots X_n$, то середнє значення:

$$X_{avg} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} X_i, \tag{2.8}$$

.

Середньоквадратичне відхилення:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(X_i - X_{avg}\right)^2}, \tag{2.9}$$

Визначення відносної похибки, яка обчислюється як:

$$\delta = \frac{\sigma}{X_{avg}} \cdot 100\%, \quad (2.10)$$

Цей показник дозволяє оцінити якість вимірювань у відсотковому відношенні.

3. Методи зниження похибок:

- використання каліброваних приладів з високим класом точності;
- усереднення результатів вимірювань для мінімізації випадкових похибок;
- використання цифрової фільтрації для усунення шумів;
- проведення вимірювань в стабільних умовах (температура, вологість, електромагнітна обстановка).

Таким чином, аналіз похибок та оцінка точності вимірювань дозволяють підвищити достовірність досліджень параметрів електроенергії в автономному режимі мікро-ГЕС.

2.5 Дослідження ефективності автономних мікро-ГЕС шляхом математичного моделювання

2.5.1. Визначення характеристик водотоків підприємства

Проектування систем утилізації вторинних гідроенергетичних ресурсів промислових підприємств пов'язане з проведенням складних техніко-економічних розрахунків. Залежність цих систем від технологічного процесу призводить до нестаціонарності режимів роботи обладнання для гідроенергоутилізації, що призводить до недостатньої визначеності його розрахункових параметрів під час проектування.

Основними складовими системи гідроенергетичного устаткування (СГЕУ) є елементи збору води у вигляді трубопроводів та генеруюче обладнання - турбіна та генератор. Вибір такого устаткування, зокрема, енергомодулів мікро-

ГЕС, потребує уникнення недовантаженості електрогенератора через його високу вартість. Важливим є також питання енергоефективності таких систем для економічно доцільного вироблення електроенергії.

Кількість потенційної енергії водотоку, яку можна утилізувати, залежить від розсіювання джерел вторинної води та конфігурації системи збору. Синтез математичної моделі для створення оптимальної топології вимагає визначення прогнозованих параметрів результуючого потоку води, який потрапляє на гідротурбіну.

Режими споживання технічної води різняться і визначаються видом технологічного процесу та самого обладнання, з якого вода відводиться. Враховуючи невизначеність динаміки потоку, витрата рідини є нестаціонарним процесом, залежним від різних факторів, таких як час доби, пора року, температура рідини, і послідовність складових техпроцесу. Таким чином, існують споживачі, чиї добові графіки витрати води постійні, інші мають випадковий характер, що ускладнює процес визначення обсягів витрат вторинної води.

Для більш ефективного проектування систем утилізації гідроенергетичних ресурсів промислових підприємств розумно класифікувати обладнання цехів основного виробництва за впливом на енергетичні параметри вторинного водостоку. Це може бути зроблено шляхом поділу на три основні типи: з постійними, стохастичними та жорстко прив'язаними до технологічного циклу витратами води.

У випадках постійних або циклічно змінюваних витрат вторинної води прогнозування параметрів водостоку нескладне. Однак у випадках стохастичного споживання та відведення води необхідно розробити складні математичні інструменти для визначення цих параметрів на основі статистичних даних.

Додатково, конфігурація системи гідроенергетичної утилізації та її параметри будуть визначальними для вирішення завдань. Наприклад, при одному центрі збору для декількох джерел вторинної води на вході гідротурбіни

подається сумарний потік невизначеної витрати і напору. Крім того, розподіл технологічних агрегатів по території підприємства і їх різні габарити ускладнюють визначення енергетичних характеристик реального водостоку.

Отже, створення енергоефективних систем утилізації гідроенергетичних потенціалів вимагає складного підходу, а вибір структури та технічних характеристик елементів системи пов'язаний з великим обсягом взаємозалежних розрахунків. Створення відповідних стохастичних генераторів витрат вторинної води та моделювання реального водостоку є ключовим для імітаційного математичного аналогу системи, що дозволить проводити обчислювальні дослідження та розрахунки.

2.5.2 Визначення залежності енергетичних характеристик мікро-ГЕС від динаміки вторинних водотоків

Розглядаючи характеристики вторинного водостоку, такі як витрата і напір, які є динамічними, важливо враховувати їхні коливання при проектуванні систем утилізації гідроенергії на промислових підприємствах. Ці коливання можуть впливати на енергетичні характеристики обладнання, використовуваного для утилізації гідроенергії.

У випадку мікрогідроелектростанцій (мікро-ГЕС), характерного для них є те, що зміни в потоці впливають на параметри процесу перетворення енергії води. Це може призводити до змін в коефіцієнті корисної дії (ККД), частоті струму та якості виробленої електроенергії. ККД в даному випадку може бути функцією швидкості обертання турбіни (частоти), яка визначається за певним виразом.

Такі коливання важливо враховувати при розробці системи, оскільки вони можуть впливати на ефективність та якість виробленої електроенергії мікро-ГЕС.

$$\lambda = \frac{D}{2 \cdot \upsilon} \cdot \omega \ , \tag{2.11}$$

де ω - частота обертання турбіни;

D - діаметр робочого колеса; υ - швидкість потоку води.

Звідси отримаємо, рад/с

$$\omega = \frac{2 \cdot \lambda \cdot \upsilon}{D} \ . \tag{2.12}$$

Рівняння руху турбіни з урахуванням моменту інерції мас, що обертаються, і тертя у підшипникових опорах [39]

$$J \frac{d\omega}{dt} + f\omega = M_p - M_н \, , \tag{2.13}$$

де J - сумарний момент інерції турбіни і ділянки валу, що до неї відноситься,

M_p - момент тертя у підшипникових опорах турбіни і генератора,

$M_н$ - момент навантаження, що створюється електричним генератором.

Інтегрування дозволяє отримати вираз для визначення кутової швидкості, рад/с

$$\omega = \frac{1}{J} \int (M_m - M_c) dt \, , \tag{2.14}$$

де M_m - момент на валу турбіни;

$M_c = M_p + M_н$ - сумарний момент опору обертанню.

Так, визначальним параметром для впливу на енергетичні характеристики електрогенератора в енергомодулі мікро-ГЕС є кутова частота обертання валу

турбіни. Ця частота прямо залежить від швидкості руху потоку вторинної води в трубопроводах.

Для оцінки потенціалу утилізації проводяться відповідні математичні операції для визначення потужності водотоку при відомій величині сумарної витрати . Розраховується сумарна потужність водотоку для всієї системи гідроенергетичної утилізації, яка дорівнює сумі потужностей в окремих центрах збору, вимірюваних у кількості кіловатт (кВт).

$$N_\gamma = \sum_{p=1}^{q} N_{p\gamma}. \tag{2.15}$$

Енергія, що виробляється генераторами, визначається згідно з виразом, кВт·год

$$W_\gamma = \sum_{p=1}^{q} W_{p\gamma}, \tag{2.16}$$

а для кожного з центрів збору вона дорівнює, кВт·год

$$W_{p\gamma} = N_{p\gamma} \cdot T \cdot \mu_{\text{т}p} \cdot \mu_{\text{г}p}, \tag{2.17}$$

де T – проміжок часу, $\mu_{\text{т}p}$ і $\mu_{\text{г}p}$ - ККД турбіни і генератора, відповідно.

Так, нестабільність потоку води може негативно впливати на роботу обладнання для гідроенергетичної утилізації, спричиняючи завищення потужності генераторів і діаметрів трубопроводів. Це, в свою чергу, може призвести до збільшення вартості системи гідроенергетичної утилізації. Для уникнення цих наслідків можуть застосовуватися додаткові технічні заходи, спрямовані на стабілізацію потоку води.

При визначенні енергетичних показників гідроенергетичних систем (СГЕУ) важливо враховувати нестабільність вторинного водотоку. Це дозволяє

більш точно визначити параметри таких систем, використовуючи стохастичні генератори для моделювання реального потоку, який надходить на гідротурбіну.

Необхідно починати розрахунки з аналізу характеру водоспоживання кожного джерела на об'єкті гідроенергетичної утилізації. Динамічний характер сумарного потоку води може впливати на ефективність СГЕУ і призводити до зниження кількості згенерованої електричної енергії, що може вплинути на показники її якості.

Важливо враховувати, що будь-яке відхилення кутової частоти обертання валу гідротурбіни від номінального значення може значно знизити ефективність енергомодуля мікро-ГЕС.

2.6 Вплив динаміки вторинного водотоку на енергетичні показники

Як було визначено, такі характеристики вторинного водотоку, як витрата і напір для більшості з джерел, мають динамічний характер. Тому, очевидно, останнє може вплинути на енергетичні показники обладнання, яке використовується для утилізації гідроенергетичних ресурсів промислових підприємств. До того ж, характерна особливість типової мікро-ГЕС така, що будь-яке коливання потоку впливає на параметри процесу перетворення енергії води, в тому числі змінюється коефіцієнт корисної дії, частота струму, і, відповідно, якість отриманої електроенергії [28-37]. ККД в даному випадку є функцією, аргументом якої виступає величина швидкохідності турбіни $\eta_{\text{т}} = f(\lambda)$. Остання визначається за відомим виразом [28]:

$$\lambda = \frac{D}{2 \cdot \upsilon} \cdot \omega \ , \qquad (2.18)$$

де ω - частота обертання турбіни; D - діаметр робочого колеса; υ - швидкість потоку води.

Звідси отримаємо:

$$\omega = \frac{2 \cdot \lambda \cdot \upsilon}{D} \ . \tag{2.19}$$

Рівняння руху турбіни з урахуванням моменту інерції мас, що обертаються, і тертя у підшипникових опорах [29]:

$$J \frac{d\omega}{dt} + f\omega = M_p - M_н \, , \tag{2.20}$$

де J - сумарний момент інерції турбіни і ділянки валу, що до неї відноситься, M_p - момент тертя у підшипникових опорах турбіни і генератора, $M_н$ - момент навантаження, що створюється електричним генератором.

Інтегрування (4.3) дозволяє отримати вираз для визначення кутової швидкості:

$$\omega = \frac{1}{J} \int (M_m - M_c) dt \, , \tag{2.21}$$

де M_m - момент на валу турбіни; $M_c = M_p + M_н$ - сумарний момент опору обертанню.

Тобто, визначальним параметром, що буде впливати на енергетичні показники електрогенератора, який входить до складу енергомодуля мікро-ГЕС, буде саме кутова частота обертання валу турбіни, яка, в свою чергу, напряму залежить від швидкості руху потоку вторинної води в трубопроводах.

Відповідні математичні операції з визначення потужності водотоку (підрозділ 3.5) при відомій величині сумарної витрати $Q_{p\gamma}$, де $p = \overline{1, q}$ - кількість центрів збору, проводяться для оцінки потенціалу вищезгаданої утилізації. Так,

для всієї СГЕУ розраховується сумарна потужність водотоку, що дорівнює сумі потужностей $N_{p\gamma}$ в окремих центрах збору:

$$N_\gamma = \sum_{p=1}^{q} N_{p\gamma} \cdot \qquad (2.22)$$

Енергія, що виробляється генераторами, визначається згідно з виразом:

$$W_\gamma = \sum_{p=1}^{q} W_{p\gamma}, \qquad (2.23)$$

а для кожного з центрів збору вона дорівнює:

$$W_{p\gamma} = N_{p\gamma} \cdot T \cdot \mu_{\text{т}p} \cdot \mu_{\text{г}p}, \qquad (2.24)$$

де T – проміжок часу, $\mu_{\text{т}p}$ і $\mu_{\text{г}p}$ - ККД турбіни і генератора, відповідно.

Так, наприклад, як було встановлено в підрозділі 2.2 і підтверджено в [98-100], водоспоживання доменних печей № 4, 5 ПАТ «Запоріжсталь» має випадковий (стохастичний) характер, величини витрат коливаються в межах від 1550 до 2400 м^3/год. Розрахунок параметрів запропонованої системи збору і вибір утилізуючого обладнання для неї проведений, відповідно, за максимальним значенням витрати вищезазначених джерел показав, що єдиний для них центр збору знаходиться на відстані 79 і 49 метрів зі стандартними діаметрами з'єднуючих трубопроводів 820 мм. Приблизна кількість виробленої електроенергії генератором обраної мікро - ГЕС типу 100 Пр становить: за добу – 2388 кВт·год., за рік – 871841 кВт·год. (за умови тризмінного графіку роботи підприємства, що розглядається).

Після приведення до реальних водотоків окремих джерел моделюванням їх параметрів за допомогою генератора випадкових величин витрати, був

розрахований сумарний потік, що також підпорядковуються встановленому закону розподілення ймовірностей [47]. Врахувавши запізнення потоків, згідно запропонованому раніше алгоритму, при розрахованій середній потужності водотоку близько 94,08 кВт отримаємо наступні результати: середньодобове вироблення електроенергії обраним електричним генератором – 1886 кВт·год., річне - 688409 кВт·год. Величина використаної статистичної вибірки Q_γ, де $\gamma = \overline{1 \ldots L}$ - кількість значень останньої, з періодичністю 1 година дорівнює 240.

Отже, як видно, енергетичні характеристики максимального і змодельованого сумарного потоку суттєво відрізняються. Розрахункова величина дисперсії σ^2 досить значна і складає за попередніми розрахунками близько 13,08. А це означає, що таке коливання параметрів потоку, що поступає на гідротурбіну, вплине на кількість виробленої електричної енергії, і, відповідно, може спричинити зниження її якості. Показники останньої потребують додаткового аналізу і співставлення із загальнодержавними нормами.

Таким чином, виявлено, що нестабільність потоку має негативний вплив на функціонування гідроенергетичного обладнання, що призводить до переоцінки потужності обраного генератора та діаметрів трубопроводів. Це, в свою чергу, призводить до збільшення вартості всієї системи гідроенергетичної утилізації. Таким чином, для уникнення вказаних проблем необхідно впроваджувати додаткові технічні заходи, які допоможуть стабілізувати потік води та вирішити проблему неповної завантаженості обладнання, забезпечивши максимально можливу виробничу потужність.

З урахуванням визначення енергетичних параметрів СГЕУ, необхідно враховувати нестабільність вторинного водотоку. Це дозволить точніше визначити параметри системи за допомогою стохастичних генераторів, які моделюють реальний потік, що надходить на гідротурбіну. Очевидно, що розрахунок слід почати з аналізу характеру водоспоживання кожного джерела на об'єкті гідроенергетичної утилізації. Динамічний характер сумарного потоку

води негативно впливає на ефективність гідроенергетичної системи і може привести до зменшення кількості згенерованої електричної енергії, а також погіршення її якості.

2.7 Розробка математичної моделі генератора мікро-ГЕС в автономному режимі

Модель має використовуватися для моделювання характеристик генератора в автономному режимі та аналізу показників якості електроенергії, використовуючи рівняння електромеханічної динаміки генератора, електричних кіл та системи керування.

Припустимо, що використовується синхронний генератор із трьома фазами (A, B, C). Рівняння електромагнітного балансу для фазного контуру генератора:

$$V_s = R_s I_s + L_s \frac{dI_s}{dt} + e_s \tag{2.25}$$

де: $V_s = [V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}]$ – фазні напруги статора,

$I_s = [I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}]$ – фазні струми статора,

R_s – активний опір обмотки статора,

L_s – індуктивність обмотки статора,

e_s – ЕРС, що генерується ротором.

ЕРС залежить від швидкості ротора та потоку збудження:

$$e_s = \omega_r \cdot \lambda, \tag{2.26}$$

де: ω_r – швидкість ротора (рад/с),

λ – магнітний потік.

Рух ротора описується рівнянням динаміки:

$$J\frac{d\omega_r}{dt} = T_m - T_e - D\omega_r, \quad (2.27)$$

де: J – момент інерції ротора,

T_m – механічний момент, що створюється турбіною,

T_e – електромагнітний момент генератора,

D – коефіцієнт в'язкого тертя.

Момент T_e визначається як:

$$T_e = k_e I_s, \quad (2.28)$$

де k_e – коефіцієнт пропорційності.

Модель керування та перетворення енергії.

Інвертор (перетворювач DC/AC) використовується для регулювання частоти та амплітуди напруги:

$$V_{inv} = mV_{dc}, \quad (2.29)$$

де: m – коефіцієнт модуляції,

V_{dc} – постійна напруга на шині постійного струму.

Регулятор швидкості ротора

Регулятор виконує задачу підтримки необхідної швидкості обертання:

$$T_m = K_p(\omega^* - \omega_r) + K_i\int(\omega^* - \omega_r)dt, \quad (2.30)$$

де: ω^* – задана швидкість,

K_p, K_i – коефіцієнти ПІ-регулятора.

Фільтрація та згладжування напруги

На виході інвертора використовується LC-фільтр, який згладжує пульсації:

$$L_f \frac{dI_f}{dt} + R_f I_f + \frac{1}{C_f} \int I_f dt = V_{load}. \quad (2.31)$$

де: L_f, C_f – параметри фільтра,

R_f – паразитний опір.

Визначення показників якості електроенергії.

Коефіцієнт гармонік (THD).

Оцінюється рівень спотворень вихідної напруги:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \cdot 100\%, \quad (2.32)$$

де V_n – амплітуди гармонік напруги.

Коефіцієнт потужності (PF), визначає ефективність використання енергії:

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{VI\cos\phi}{VI}, \quad (2.33)$$

де ϕ – зсув фаз між напругою і струмом.

2.8 Оцінка показників якості генерованої електричної енергії

Таким чином, для вивчення впливу нестабільності потоку вторинної води на енергетичні характеристики систем гідроенергетичної утилізації була розроблена математична модель.

Ця модель реалізована в середовищі Simulink і включає енергетичний модуль з асинхронним двигуном у генераторному режимі та стохастичний генератор витрати води. У випадку кількох джерел витрата з них сумується, що моделює реальний сумарний потік вторинної води на вході гідротурбіни. Також

у моделі використовуються вимірювальні прилади і конденсаторна система збудження, а електрична мережа промислового підприємства враховується окремим блоком.

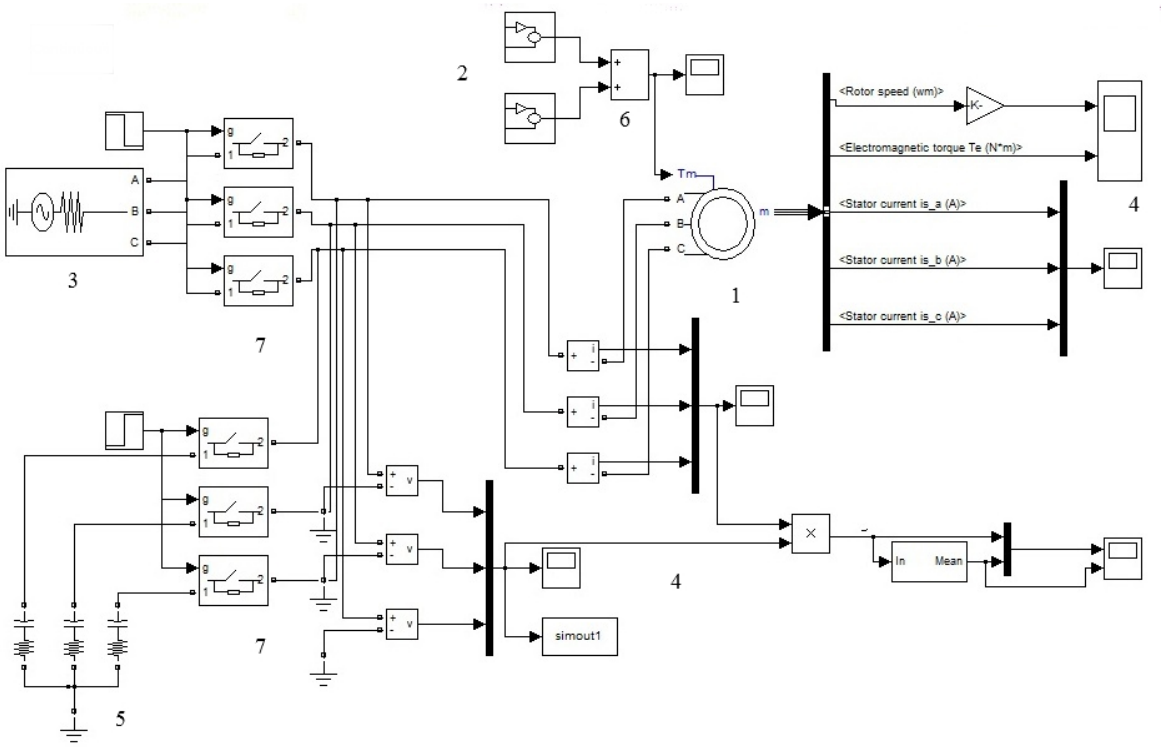


Рисунок 2.5 - Модель дослідження роботи системи генерування електроенергії за рахунок вторинних водотоків підприємств

Дослідження проводилися на прикладі доменного цеху ПАТ "Запоріжсталь", де була розрахована оптимальна система збору та підібране відповідне обладнання для гідроенергетичної утилізації потоку вторинної води від доменних печей. Система також передбачає можливість роботи автономно та паралельно з електричною мережею за допомогою відповідних перемикачів.

Використовувався двигун з потужністю 110 кВт як генератор у мікро-ГЕС типу 100 Пр. Такі мікро-ГЕС, як правило, використовуються як автономні джерела електроенергії і не потребують живлення від мережі. У випадку, коли така система працює автономно, асинхронний генератор може бути використаний як генератор, якщо реактивну потужність подають у обмотку статора з батареї конденсаторів. Загальний вираз для визначення необхідної

ємності для отримання номінальної напруги асинхронного генератора може бути визначений за формулою [27]:

$$C = P_{ном} \cdot (tg\varphi_г + tg\varphi_н) / (2 \cdot \pi \cdot f \cdot m \cdot U_c^2), \quad (2.34)$$

де $P_{ном}$ - номінальна потужність генератора,

U_c - напруга на конденсаторах,

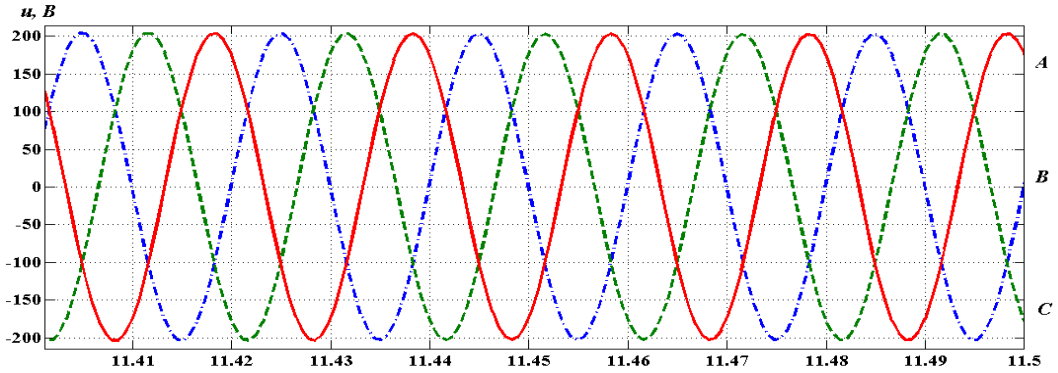
f - частота струму,

m - кількість фаз,

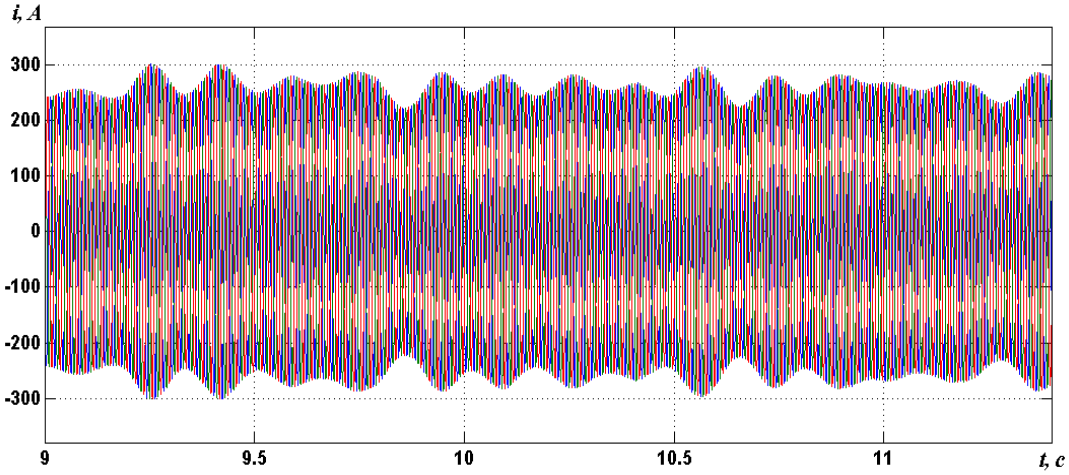
$\varphi_г, \varphi_н$ - максимальні кути зсуву фаз між напругою і струмами генератора та навантаження.

Для двигуна вищезазначеної потужності, у випадку автономної роботи мікро-ГЕС, згідно формули (2.23), достатньо ємності 1065 мкФ на кожну фазу.

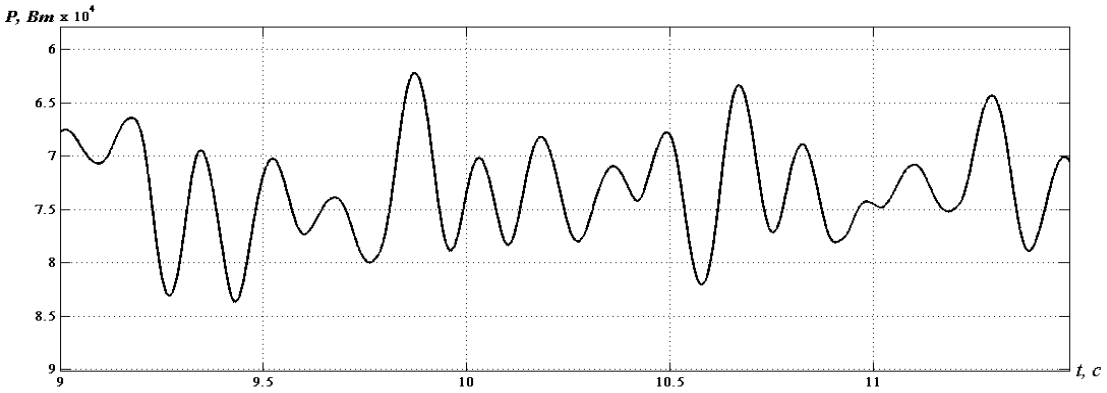
Наведена модель системи гідроенергетичної утилізації дозволяє достатньо точно відстежувати динаміку величин, які виходять на електрогенераторі, такі як активна потужність та статорні напруги і струми. Однак робота мікро-ГЕС в автономному режимі у даному випадку не є доцільною. По-перше, на промислових підприємствах споживачі мають достатньо велику потужність порівняно з потужністю електрогенератора, і можливе їх підключення до електричної мережі. По-друге, відсутність конденсаторної системи збудження зменшує вартість системи утилізації вторинних гідроенергетичних ресурсів взагалі. Основні діаграми, що відображають вищезгадані параметри при роботі генератора в мережі, представлені на рисунку 2.6.



а)



б)



в)

Рисунок 2.6 - Динаміка електричних величин на виході АГ при його роботі на мережу:

а - статорні напруги;

б - статорні струми;

в – активна потужність.

Оскільки система працює паралельно з симетричною мережею, видно з діаграм, що нестаціонарність потоку викликає лише коливання статорних струмів і активної потужності, зберігаючи частоту і синусоїдальність в межах норм. Загальна несинусоїдальність (за гармоніками) складає лише 0,03%, що відповідає допустимим 8%. Середня активна потужність становить близько 82 кВт. Однак при переході до автономного режиму і підключенні до затискачів генератора навантаження, такі параметри можуть значно змінитися. Наприклад, при активно-індуктивному навантаженні 15 кВт без системи стабілізації вихідних параметрів електричного генератора, отримуємо відхилення частоти +1,2 Гц (встановлена гранична норма 0,4 Гц), коефіцієнт несинусоїдальності – 13%.

Отже, електрична енергія такої якості не придатна для живлення більшості споживачів. Нестаціонарність сумарного вторинного водотоку викликає зменшення кількості виробленої електричної енергії на 18-32% і вимагає збільшення потужності електрогенераторів і діаметрів трубопроводів, що збільшує вартість системи утилізації. Тому для уникнення цих проблем необхідно впроваджувати додаткові технічні заходи для стабілізації потоку води і досягнення повної завантаженості обладнання, тобто максимальної виробничої потужності.

3 РОЗРОБКА ЗАСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

3.1 Розробка схеми регулятора напруги

Датчик наявності напруги був розроблений для генерації логічних станів на його виході, пов'язаних з напругою мережі вводу, як це зображено на структурній схемі на рисунку 3.1, виходячи з двох істотних вимог: короткого часу спрацьовування на виході при зміні входу і низького споживання енергії в датчику напруги.

Живлення датчика напруги здійснюється від джерела постійного струму напругою 5 В, який відповідає за формування логічних станів на виходах з нього, і джерела змінного струму, що надходить від червоного сигналу вторинної частини трансформатора.

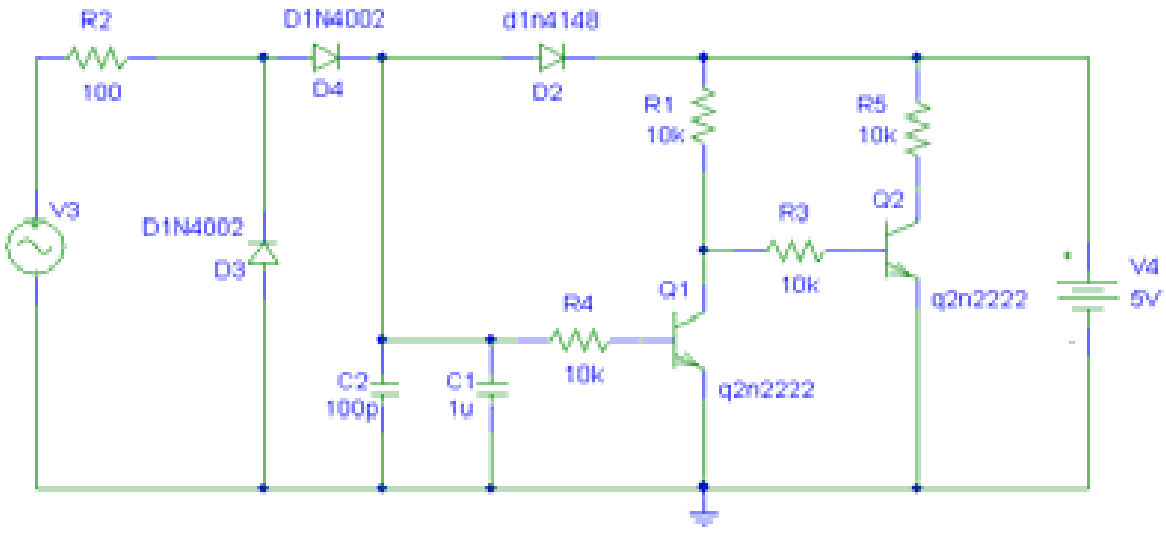


Рисунок 3.1 - Схема датчика напруги

Датчик, показаний на рисунку 3.1, виконаний в основному за допомогою: кріплення для підйому сигналу змінного струму, ступеня ректифікації і ступеня фільтрації для зменшення його завитків [10]. Ці каскади дозволяють генерувати безперервну напругу, яке підтримує в постійному насиченні транзистор. Коли

відбувається переривання служби (вхідна напруга змінного струму датчика дорівнює 0В), транзистор переходить від насичення до одного відрізаного стану, що дозволяє комутувати 5 В постійного струму в 0 В постійного струму, мікроконтролер приймає за логічні стани досліджуваної змінної.

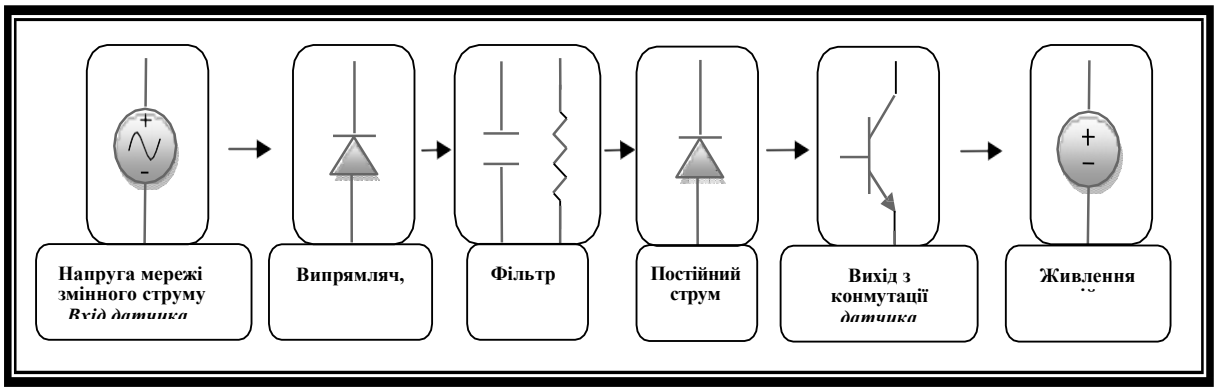


Рисунок 3.2 - Структурна схема датчика напруги

3.2 Отримані параметри показників якості електричної енергії

Вісь X (часова вісь), на якій подано значення часу в секундах, що коливаються від приблизно -0.02 до 0.18 с. Цей невеликий часовий інтервал свідчить про вимірювання з високою часовою роздільною здатністю, що дозволяє розглядати деталі швидких коливань сигналу.

Вісь Y (напруга у вольтах), значення амплітуди напруги розташовано в діапазоні від -30 до 30 В. Це дозволяє спостерігати як позитивні, так і негативні відхилення сигналу від нульового рівня.

На графіку зображено дві криві:

Синій сигнал: представляє напругу, яка характеризується високою частотою коливань та змінною амплітудою.

Інтерпретація - швидка флуктуація синього сигналу вказує на активний режим роботи генератора, де частотний склад сигналу є багатокомпонентним. Висока частота виражається через швидкий темп змін (багато циклів за короткий

проміжок часу), а змінна амплітуда відображає різницю між піковими значеннями – що може бути пов’язано з впливом зовнішніх умов, переходними процесами або особливостями регулювання напруги.

Червоний сигнал - друга крива, зображена червоним кольором, є більш стабільною та нагадує «ступеневий» сигнал із менш вираженими коливаннями.

Інтерпретація: стабільність червоного сигналу вказує на режими роботи генератора, при яких напруга регулюється таким чином, що значні піки або падіння відсутні. Це може свідчити про роботу систем стабілізації або вимірювальні особливості потокових змін.

Частота напруги, як правило, визначається кількістю циклів, що відбуваються за одиницю часу. В даному графіку синій сигнал, завдяки своїм швидким коливанням, вказує на високий частотний склад. Формально, якщо T – період одного повного циклу, то частота f задається як:

$$f = \frac{1}{T}, \tag{3.1}$$

Швидкі зміни синього сигналу свідчать про короткі періоди та, відповідно, про високі значення частоти. Це може бути характерно для генератора, який працює в умовах змінного навантаження або нестабільності водного потоку.

Відносна амплітуда – це співвідношення його миттєвих значень напруги до деякого контрольного (референсного) або максимального значення. Вона дає можливість оцінити масштаб коливань сигналу.

Для синього сигналу, де амплітуда значно змінюється, можна спостерігати як різкі піки та спади – це може вказувати на реакцію системи на змінне навантаження або вплив зовнішніх чинників.

Червоною кривою представлений сигнал із меншою амплітудною варіацією, що може свідчити про впровадження алгоритмів стабілізації/регулювання, які зі зниженням відхилення напруги досягають контрольованого режиму роботи.

Практичне значення графіка: Графік дозволяє одночасно оцінити як частотну стабільність (за рахунок швидкості коливань синьої кривої), так і регулювання напруги (через відносну амплітуду обох сигналів).

Виявлення аномалій: Наявність значних розбіжностей між синім та червоним сигналами може свідчити про короткочасні відхилення або переходи між режимами роботи, які потребують технічного аналізу чи корекції.

Оцінка ефективності систем стабілізації: Якщо система стабілізації працює ефективно, графік має демонструвати рівномірну амплітуду блоку червоного сигналу. Різке коливання синьої кривої може бути пов’язане з експериментальними режимами або перехідними процесами, що природно відображають динаміку роботи автономного генератора.

Графік автономного генератора мікро ГЕС демонструє:

- динамічність сигналу: синій сигнал показує високочастотні коливання з великою варіацією амплітуди, що вказує на активний режим роботи;

- стабільність режиму: червоний сигнал, завдяки своїй більш рівній формі, демонструє стійкий режим, який може бути пов’язаний із застосуванням систем регулювання або стабілізації.

На рисунку 3.3 наведено частоту та відносну амплітуду напруги.

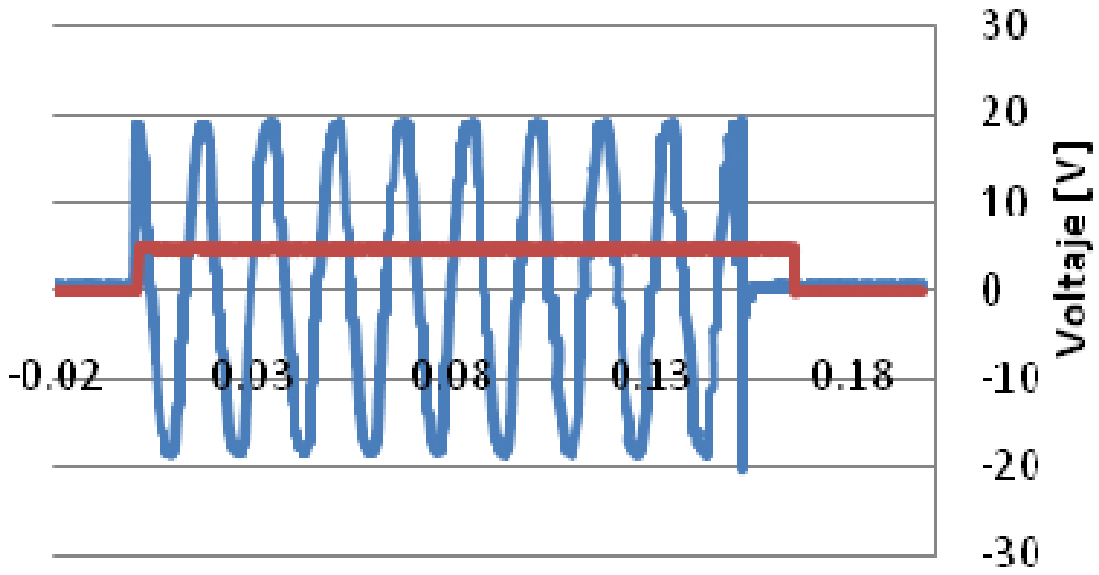


Рисунок 3.3 - Частота та відносна амплітуда напруги

Автономні генератори в мікро ГЕС працюють в умовах, де:

- основна частота (зазвичай 50 Гц, але може мати невеликі відхилення через умови експлуатації) є домінуючою компонентою;

- гармонічні складові: Через особливості завантаження та конструкції генератора можуть виникати гармоніки (наприклад, 2-й гармонік ≈100 Гц, 3-й ≈150 Гц тощо).

Збурення та короткочасні зміни: Коливання водного потоку або змінне навантаження можуть спричиняти короткочасні імпульсні події або ширину спектральної лінії, що свідчить про неідеальну стійкість генератора.

Для побудови спектрограми напруги використовується короткочасне перетворення Фур'є (Short-Time Fourier Transform, STFT). Основна формула STFT:

$$X(t,f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) \cdot w(\tau - t) \cdot e^{-j2\pi f\tau}\, d\tau, \qquad (3.2)$$

де: $x(\tau)$ — функція часу вхідного сигналу (напруга генератора),

$w(\tau - t)$ — віконна функція, яка локалізує розрахунок у часі (наприклад, Хеннігове або Гаусовське вікно),

f — частота,

t — час.

Отриманий спектр (або його модуль) може бути переведений у шкалу децибел (дБ) для відображення інтенсивності кожної частотної складової:

$$Magnitude\ (dB) = 20 \cdot log_{10} \mid X(t,f), \qquad (3.3)$$

Інтерпретація спектрограми автономного генератора мікро ГЕС. На спектрограмі напруги автономного генератора мікро ГЕС можна виділити наступні особливості:

- основна смуга (фундаментальна частота): яскравий горизонтальний смугу або лінію, що відповідає основній частоті (наприклад, 50 Гц). Вона може

бути трохи розширеною, якщо є незначні коливання частоти через змінні умови генерації.

Гармоніки: другий, третій і наступні гармонічні компоненти відображаються як менш яскраві лінії на кратних значеннях основної частоти (наприклад, 100 Гц, 150 Гц і т.д.). Їх інтенсивність дає інформацію про якість синусоїдальної форми напруги та ступінь нелінійних впливів.

Ширина спектральних ліній: Якщо генератор працює стабільно, спектральна лінія основної частоти буде вузькою (має високу концентрацію енергії). Розширення цієї смуги може бути ознакою частотних флуктуацій або модулювання.

Імпульсні події/перехідні процеси: Коли відбуваються короткочасні відхилення (наприклад, через різке змінення навантаження або коливання водного потоку), у спектрограмі можна побачити місцеві сплески енергії чи появу додаткових частотних компонент.

У цій схемі:

- горизонтальна вісь відображає час (в секундах);

- вертикальна вісь — частоту (в Гц);

- яскравість або символи (наприклад, різні види зірочок) відображають потужність або інтенсивність відповідних частотних компонентів, де яскраві смуги вказують на домінуючі частоти. На рисунку 3.4 наведено спектрограму напруги.

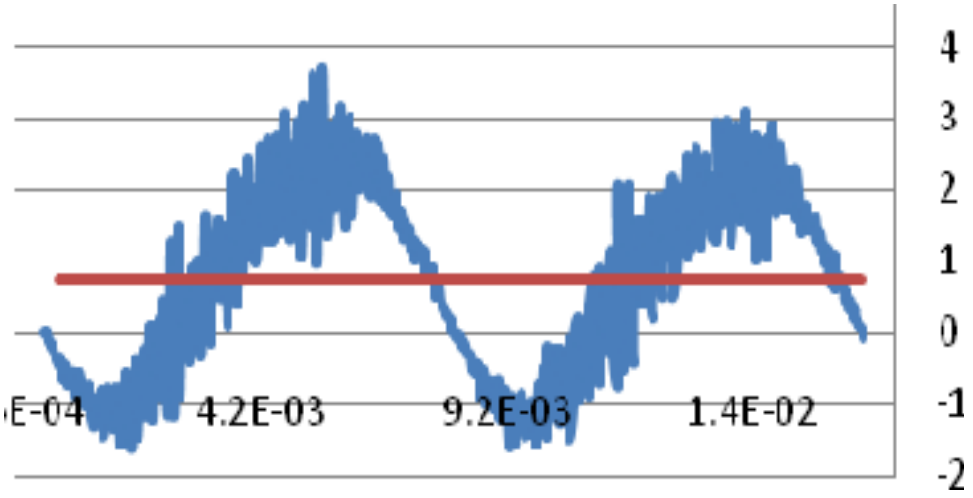


Рисунок 3.4 - Спектрограма напруги

Спектрограма напруги автономного генератора мікро ГЕС є потужним інструментом:

- вона дозволяє візуалізувати як основну частоту (зазвичай 50 Гц) та її гармоніки, так і тимчасові відхилення сигналу.

Інтерпретація спектрограми дає можливість оцінити якість напруги, стабільність роботи генератора та виявити можливі аномалії, зумовлені змінними умовами роботи мікро ГЕС.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

4.1 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів виробничого середовища

До складу доменного цеху комбінату «Запоріжсталь» входить: рудний двір, спільно з аглофабрикою; відділення глином'ялки; відділення розливочних машин; бункерної естакади; доменних печей з ливарними дворами; газоочисток.

Призначення рудного двору: складування й усереднення за складом шихтових матеріалів, що йдуть в агломераційне й доменне виробництво.

Відділення глином'ялки призначене для виготовлення мас для забивання чавунних і шлаковипускних отворів.

Відділення розливочних машин служить для лиття чавуну на товарні чушки (спеціальні злитки чавуну).

Бункерна естакада призначена для складування, нагромадження шихтових матеріалів і подачі їх у скіпи (спеціальні візки) і на колошник печі.

У доменному цеху в результаті особливостей технологічного процесу, що проходе з утворенням великих кількостей надлишкового тепла, інфрачервоної радіації, пилу й газів, питання створення сприятливих санітарно-гігієнічних умов праці здобувають особливе значення.

Доменний цех складається з: рудного двору, ливарного двору, бункерних естакад і підбункерних приміщень.

Рудний двір призначений для створення запасів руди в зимовий час, руда розвантажується вагоноперекидачем у рудну траншею, звідки мостовим грейферним краном укладається в штабель висотою до 17м. По довжині рудний двір займає весь фронт довгих печей.

Розвантаження й транспортування сирих матеріалів (коксу, руди, агломерату й т.п.) супроводжуються виділенням значних кількостей пилу в повітряний басейн рудного двору. Основними джерелами виділення пилу є розвантаження вагонів, перевантаження руди грейферними кранами, навантаження й розвантаження трансферкара. Концентрації пилу на рудному

дворі коливаються від 10 до 120 мг/м^3 , на бункерній естакаді - від 16 до 1000 мг/м^3. Максимальних значень концентрація пилу досягає під час навантаження й вивантаження матеріалів, що порошать. Виробничий шум на рудному дворі й бункерній естакаді, як правило, не перевищує припустимих рівнів, установлених СН – 245 - 71. Вплив шуму сприймають машиністи рудного крана, вагоноперекидача, вагонотовкача, трансферкара.

Бункерні естакади - металевий, залізобетонні або змішаний тип спорудження, що складаються з ряду бункерів для зберігання оперативного запасу шихтових матеріалів. Зверху бункери перекриваються ґратами з отворами 200х200мм, через які виконується завантаження, а знизу вони обладнані затворами для вивантаження матеріалів. Споруджуються естакади уздовж фронту доменних печей із дворядним розташуванням бункерів.

Доменне виробництво нерозривно пов'язане з високими температурами, тисками з утворенням великих кількостей вибухонебезпечних і токсичних газів, рідких продуктів плавки, з пересуванням великої кількості газів і насиченістю механічним і електричним устаткуванням. По характеру робіт доменне виробництво відноситься до категорії важких робіт, більшість технологічних операцій виконуються в несприятливих кліматичних умовах виробничого середовища (висока температура, теплове випромінювання, запорошеність, загазованість, шум і вібрація).

При випуску чавуну й шлаків спостерігається підвищення змісту пилу в повітрі робочої зони. Найбільші пиловиділення відбуваються при випуску чавуну й досягають 270 мг/м^3 у головної ринви. Значні концентрації пилу (до 1500 мг/м^3) у зоні чугуновозного ковша, що заповнюється чавуном. Ця операція супроводжується утворенням хмари пилу, що складає в основному із часточок графіту. Поширення пилу в процесі випуску чавуну обмежується чавунною стороною ливарного двору й майже не впливає на шлакову сторону. У свою чергу випуск шлаків приводить до збільшення концентрації пилу переважно на шлаковій стороні двору.

У таблиці 4.1 представлена оцінка факторів виробничого й трудового процесу горнового.

Таблиця 4.1 – Оцінка факторів виробничого та трудового процесу горнового

№ п/п	Чинники виробничого середовища та трудового процесу	Нормативне значення	Фактичне значення	III клас: шкідливі та небезпечні умови, характер праці.			Тривалість дії фактору за зміну %
				1 ступ.	2 ступ.	3 ступ.	
1	Шкідливі хімічні речовини, мг/м^3						
	1 кл. небезпеки ангідрид хромовий бенз-(α)-пирен	 0,01 0,0002	 0,059 0,0002	-	-	 5,9р	85
	2 кл. небезпеки аерозоль оксиду марганця	 0,3	 0, 27	-	-		85
	3-4 кл. небезпеки сірководень діоксид азоту азоту оксиди сірчистий ангідрид	 10 5 5 10	 13,4 7,4 35,5 21,5	 1,34р 1,48р 2,1р	-	 7,1р	85
4	Шум, дБА	80	96	-	-	16	85
6	Тяжкість та напруженість праці	Тяжка (категорія 3) праця напружена					

4.2 Заходи щодо захисту від впливу шкідливих факторів виробничого середовища горнового

Проаналізувавши карту умов праці видно, що головними факторами, що впливають на здоров'я горнового, який працює в доменному цеху ПрАТ «Запоріжсталь» є фактори, що виникають у ході технологічних процесів виробництва, а саме це тепло від агрегатів.

Джерелами інтенсивних теплових випромінювань є: розплавлений чавун і шлаки, нагріта до високої температури вогнетривка футеровка внутрішнього простору печі й поверхня розплавлених шлаків, вплив яких проявляється при відкритих вікнах печі.

Робітники ливарного двору періодично піддаються впливу інфрачервоного випромінювання. Інтенсивність опромінення на робочих місцях залежно від розмірів і температури джерел випромінювання й відстані становить (0,01...3) м, (6...7) кВт/м^2.

Випуск чавуну й шлаків з печі супроводжується також виділенням значних кількостей шкідливих для організму газів і з'єднань: оксиду вуглецю, сірчистого газу, різних вуглеводнів і ціаністих з'єднань.

Джерелом виділення газів можуть бути також тріщини в кладці й кожусі доменної печі, нещільності з'єднань окремих елементів конструкцій.

У доменних цехах утворюється й виділяється у виробниче приміщення велика кількість пилу при випуску чавуну й шлаків.

Максимальне пиловиділення спостерігається у головної ринви при випуску чавуну.

При виплавці передільного чавуну й роботі з підвищеним тиском під колошником пил має наступний хімічний склад в %: 6,02 Fe; 12,9 Fe_2O_3; 13,8 $Fe_{об щ}$; 14,6 Si_2; 4,35 AL_2O_3; 4,35 Mg; 11,85 Ca; 0,74 S; 3,75 Mn.

Кількість пилу в повітрі робочої зони горнового становить 180 мг/м^3, при нормі 4 мг/м^3.

В умовах доменного виробництва шкідливим фактором є шум. При виконанні деяких операцій виникає шум різного походження:

- механічного (рух електромостових кранів, завалочних машин) – 95 дБА;
- термічного (згоряння палив у форсуночних пристроях) – 90 дБА.

4.3 Технічні рішення по гігієні праці і виробничій санітарії

4.3.1 Мікроклімат

На умови праці горнового виявляють велику увагу характеристики мікроклімату: температура, вологість, швидкість руху повітря, теплове випромінювання. Температура повітря робочої зони становить 42°С, що перевищує норму. Температура повітря залежить від кількості явного (надлишкового) тепла.

У результаті періодичності проведення гарячих операцій мікроклімат цехів нестійкий, з параметрами що часто змінюються.

Різкі коливання температури повітря впливають на теплорегуляцію організму, знижується імунітет працюючих, порушується обмін речовин. Вологість повітря в доменних цехах низька 10 г/м у літку й 8 г/м взимку.

Фактичне значення, швидкості руху повітря в доменних цехах становить (0,2....0,3) м/с, при нормативному значенні 0,3 м/с.

4.3.2 Вентиляція й кондиціювання

Внаслідок виділення великої кількості тепла надлишкового в доменному цеху (ливарний двір) потрібен значний повітрообмін, особливо в літню пору.

Вентиляція є ефективним засобом забезпечення потрібних гігієнічних якостей повітря, що відповідають вимогам Санітарних норм проектування промислових підприємств СН- 245-71.

Вентиляція досягається переміщенням повітря: забрудненого - із приміщення й свіжого - у приміщення.

По застосовуваному способу переміщення повітря розрізняють природну й механічну (штучну) вентиляцію. При змішаній вентиляції сполучається природна й механічна вентиляція в різних варіантах.

Природна загальнообмінна вентиляція проектується для: ливарного двору, доменних печей будинку повітронагрівачів і розливної машини. При механічній вентиляції повітрообмін досягає за рахунок різниці тиску, що створюється вентилятором.

Механічна вентиляція застосовується коли тепловиділення в цеху недостатні для використання аерації на протязі року, а також якщо кількість або токсичність шкідливих речовин приміщення, що виділяється в повітря, вимагає підтримки постійного повітрообміну незалежно від зовнішніх метеорологічних умов.

Механічна вентиляція ділиться на робочу й аварійну. Робоча - на загальнообмінну й місцеву. Опалення в приміщенні відпочинку місцеве, а також є центральне опалення допоміжних приміщень. Для опалення доменного цеху й нагрівання приточного повітря використовують тепловиділення від устаткування. Основним методом боротьби з тепловиділеними на ливарному дворі є система загальобмінної й місцевої приточної вентиляції, а також кондиціювання повітря.

Місцева витяжна вентиляція застосовується від укриттів головної ринви, чавунних і шлакових льоток.

У доменному цеху використовується душируюча вентиляція кондиціонованим повітрям у льоток для випуску чавуну й шлаків (5 патрубків продуктивністю по 17000 $м^3$/рік) (див. таблицю 4.2).

На ливарному дворі використовують накатні витяжні пристрої під ковшами для чавуну й шлаків.

Приточна вентиляція кондиціонованим повітрям на постах керування (за 3000 м^3/г).

Таблиця 4.2 – Значення прийнятих параметрів повітряного середовища в робочій зоні виробничих приміщень

Період року	Характеристика виробничих приміщень за надлишковим тепловиділенням (більш-менш 23 Вт/м^2)	Категорія робіт	Період року (теплий)			Температура повітря поза пост. робочих місць
			на постійних робочих місцях			
			t°$_п$, ^{0}C	Відн. вологість %	Швидкість руху повітря, м/з	
Теплий період	5520	Важка III	26	70	0, 2-0,6	13-20

Опалення виробничих приміщень варто приймати повітряне, сполучене із приточною вентиляцією. Використовується природна загально-обмінна вентиляція (аерація). Визначення загального повітрообміну по тепловиділенням.

Кількість необхідного приточного повітря (без обліку місцевих відсосів) визначається по формулі

Тепловиділення від доменної печі визначаються по формулі, кДж/м^2

$$L_{пр} = \frac{Q_я - C_п(t_{р.з} - t_н)}{C_в(t_{у.х} - t_{пр})}, \quad (4.1)$$

де $Q_я$ – надлишок явної теплоти в приміщенні, $Q_я$ =7969358,8;

$C_п$ - теплоємність повітря, $C_в$ = 1,005 кДж/(м^3·К);

$t_{р.з}$ – температура робочої зони, $t_{р.з}$ = 42 °С;

$t_{пр}$ – температура приточного повітря, $t_{пр} = t_н = 27$ °С;

$t_{ух}$ – температура повітря, що видаляється з верхньої зони приміщення, °С.

$$L_{пр} = \frac{7969358,8 - 1,0005(42 - 27)}{1,005(36,9 - 27)} = 881077,2 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Температура повітря, що видаляється $t_{ух}$ визначають за формулою, °С

$$t_{ух} \frac{t_{р.з} - (1 - m) \cdot t_{пр}}{m}, \quad (4.2)$$

$$t_{ух} \frac{42 - (1 - 0,7) \cdot 27}{0,7} = 36,6\ ^0\text{С}.$$

Таким чином, необхідна кількість приточного повітря, що поступає до цеху – 881077,2 м^3/год.

Тепловиділення від доменної печі визначаються за формулою, Вт

$$Q = a \cdot F_п (t_п - t_в), \quad (4.3)$$

де $t_в$, $t_п$ - температура в цеху й поверхні печі, °С;

$F_п$ - площа бічної поверхні печі, м^2;

a - коефіцієнт теплообміну, 18 Вт/(м^2 К);

$$Q = 18 \cdot 70(140 - 42) = 125244.$$

У цеху чотири доменні печі, Вт

$$\sum Q_п = 4 \cdot 125244 = 500976.$$

Тепло що поступає від відкритих робочих вікон, Вт

$$Q_и = 3 \cdot k \cdot c_0 \left[\left(\frac{T_и}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_о}{100} \right)^4 \right] F \frac{\tau}{60} \quad , \qquad (4.4)$$

де k - коефіцієнт діафрагмування, дорівнює 0,65;

$c_о$ - коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, дорівнює 5,67 Вт/м^2;

$T_и$, $T_о$ - температура робочого простору й навколишнього середовища, К;

F - площа випромінюючої поверхні;

τ - час на який відкривається вікно протягом години, 20 хв.

$$Q_и = 3 \cdot 0{,}65 \cdot 5{,}67 \left[\left(\frac{1473}{100} \right)^4 - \left(\frac{315}{100} \right)^4 \right] 1{,}16 \frac{20}{60} = 200842{,}8$$

Тепло що поступає від металу, що остиває

$$Q_м = 0{,}28 \left[c_ж (t_{поч} - t_ф) + l_ф + c_{тв} (t_ф - t_{кін}) \right] \cdot G / \tau \quad , \qquad (4.5)$$

де $c_ж$ і $c_{тв}$ - питома теплоємність матеріалу в рідкому й твердому стані, 1,17 і 0,73 кДж/(кг·К);

$t_{поч}$, $t_ф$, $t_{кін}$ - температура відповідно початкова, фазового перетворення й кінцева, °С;

$l_ф$ - теплота фазового перетворення, 96 кДж/кг;

G - маса матеріалу, 60000 кг;

τ - час знаходження металу в цеху, 0,5 години.

$$Q_м = 0{,}28 \left[1{,}17(1600 - 1400) + 96 + 0{,}73(1400 - 700) \right] \cdot 60000 / 0{,}5 = 7131348 .$$

Надлишкові тепловиділення визначаються як сума всіх складових, Вт

$$\sum Q_{над} = 500976 + 200842{,}8 + 136192 + 7131348 = 7969358{,}8 .$$

Висота розташування температурного перекриття визначається з номограми, z = 18,5 м.

Різниця тисків, що викликає переміщення аераційного повітря через приточні й витяжні прорізи, кгс/м^2

$$\Delta p = (z - z_1)(\gamma_н - \gamma_{р.з}) + (z_2 - z)(\gamma_н - \gamma_у) \qquad (4.6)$$

де $\gamma_н$, $\gamma_{р.з}$ - питома вага відповідно навколишнього й видаляємого повітря, визначається, кг/м^3:

$$\gamma = 353/T$$

$$\gamma_н = 353/293=1{,}2 \qquad \gamma_{р.з} = 353/315=1{,}12 \qquad \gamma_в = 353/320=1{,}1$$

$$\Delta p = (18{,}5 - 1{,}5)(1{,}2 - 1{,}12) + (30 - 18{,}5)(1{,}2 - 1{,}1) = 2{,}51 .$$

Втрати тиску на прохід повітря через приточні прорізи, кПа

$$\Delta p_1 = \beta \cdot \Delta p , \qquad (4.7)$$

де β - частка різниці тисків, що витрачається на прохід повітря через приточні прорізи, кгс/м^2

$$\Delta p_1 = 0{,}2 \cdot 2{,}51 = 0{,}502 .$$

Втрати тиску на прохід повітря через витяжні прорізи ліхтаря, кПа

$$\Delta p_2 = \Delta p - \Delta p_1 \qquad (4.8)$$

$$\Delta p_2 = 2{,}51 - 0{,}502 = 2{,}008 \text{ кгс/м}^2.$$

Площа приточних прорізів, м^2

$$F_{пр} = \frac{G}{3600\sqrt{\frac{2g \cdot \gamma_н}{\zeta_1}\Delta p_1}},$$

(4.9)

де ζ_1 – коефіцієнт місцевого опору приточних прорізів, дорівнює 3,5 для одинарної підвісної стулки при куті відкриття 60 °С.

$$F_{пр} = \frac{881077{,}2}{3600\sqrt{\frac{2 \cdot 9{,}81 \cdot 1{,}2}{3{,}5}0{,}502}} = 448{,}9 \text{ м}^2.$$

Площа витяжних прорізів, м^2

$$F_{вит} = \frac{G}{3600\sqrt{\frac{2g \cdot \gamma_у}{\zeta_2}\Delta p_2}}, \qquad (4.10)$$

де ζ_2 – коефіцієнт місцевого опору ліхтаря, для п-образного Рюкіна й Ільінского при куті відкриття стулок 55 °С дорівнює 7,1 (див. рис. 4.1).

$$F_{вит} = \frac{881077{,}2}{3600\sqrt{\frac{2 \cdot 9{,}81 \cdot 5}{7{,}1}2{,}008}} = 412{,}3 \text{ м}^2.$$

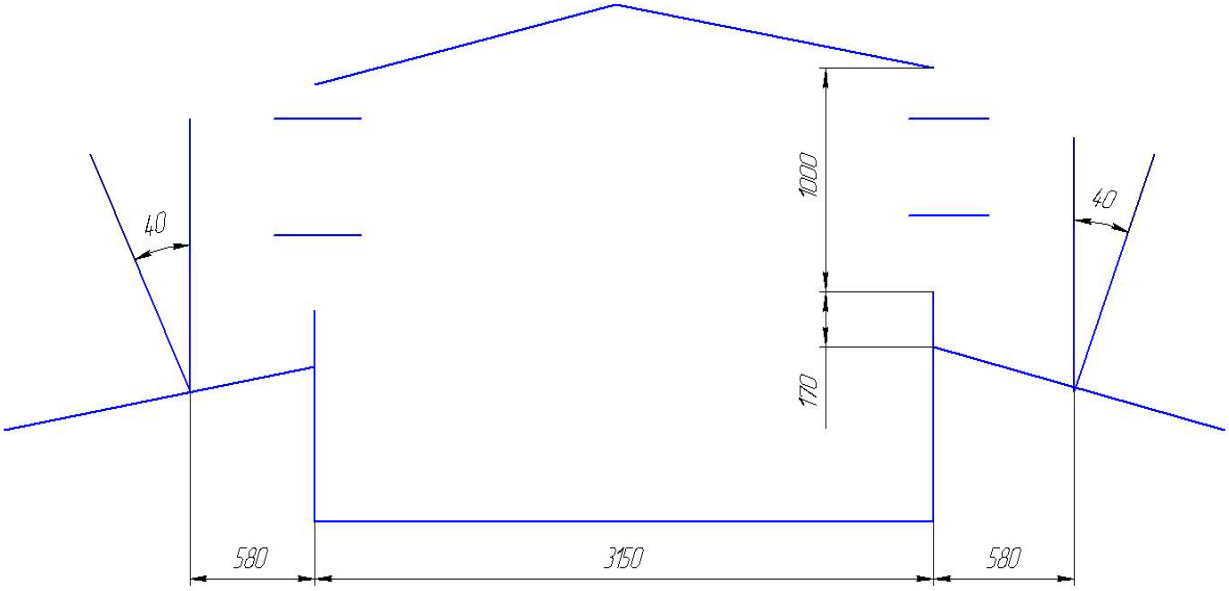


Рисунок 4.1 - Аераційний ліхтар

4.3.3 Освітлення

Природне освітлення поверхні на відкритому місці створюється прямим сонячним світлом і дифузійним світлом небозводу. Співвідношення між освітленням прямим і дифузійним світлом небозводу.

Основний показник - коефіцієнт природної освітленості (КПО) відношення природної освітленості, створюваної в деякій точці заданої площини усередині приміщення світлом неба безпосередньо або після відбиття $E_в$, до одночасного значення зовнішньої горизонтальної освітленості створюваної світлом повністю відкритого небозводу $E_н$, м

$$l = E_в / E_н \cdot 100\% \ . \qquad (4.11)$$

l=3%, розряд зорової роботи VII. Нормоване значення КПО $E_н$ з урахуванням характеру зорової роботи й світлового клімату в районі розташування будинку, м

$$l_н = l \cdot m \cdot c \ , \qquad (4.12)$$

де l - значення КПО;

m - 1,9 - коефіцієнт світлового клімату;

c - коефіцієнт сонячного клімату.

Спрощений метод розрахунку площі світлових прорізів складається у визначенні відносини площі світлових прорізів S_o до площі підлоги приміщення S_n, в *%* при якому забезпечується нормоване значення $l_п$. При верхнім освітленні приміщень розрахунок виконується за формулою

$$100 \cdot S_0 / S_n = l_n \cdot \eta_ф / \tau_0 \cdot r_2 \ , \qquad (4.13)$$

де r_2- коефіцієнт, що враховує підвищення к.п.о. при верхнім висвітленні завдяки світлу, що відбивається від поверхні приміщення r_2 = 1,45;

$\eta_ф$ - світлова характеристика світлових прорізів, $\eta_ф$ = 2,62;

τ_0 - загальний коефіцієнт пропущення прорізу.

$$100 \ S_o / \ S_n = 0{,}23 \ 2{,}62/1{,}5 \ 1{,}45 = 0{,}028.$$

Для створення сприятливих умов праці важливе значення має раціональне освітлення. Незадовільне освітлення ускладнює проведення робіт, веде до зниження продуктивності праці й захворюванню очей, а також може бути причиною нещасних випадків.

Штучне освітлення.

Електричне освітлення необхідно для проведення робіт у темний час доби або в місцях без достатнього природного освітлення:

- довжина приміщення - 90 м;

- ширина приміщення -50м;

- висота приміщення -7м.

Норма освітленості 75 лК - для лампи накалювання.

Рівень у горизонтальній площині на який найменша освітленість становить 75 лК: $h_0 = 0,8$ м.

Коефіцієнт запасу, $K = 1,3$.

Розрахункова висота: $h = 7 - 0,8 = 6,2$ м.

Площа: $S = 90\ 50 = 4500$ м^2.

Індекс приміщення. в.о.

$$i = \frac{A \cdot B}{h(A + B)} = \frac{4500}{6,2(50 + 90)} = 5,18.$$

Коефіцієнт відбиття підлог і стін $P_n = 50\%$, $P_c = 30\%$.

Використовуються лампи накалювання НГД 127-100 (напруга на лампі 127 В, потужність 100 Вт, світловий потік 1260 мм, D = 81 мм, L = 125 мм), світильник «Універсаль». УПМ: пит. потужність «Універсаль»:16 Вт/м^2 ; η=0,386 - коефіцієнт використання, тобто відносна частка потоку лампи, що падає на поверхню S.

Необхідний світловий потік лампи кожного світильника розраховується за формулою, лм

$$F_{пр} = \frac{E \cdot K \cdot \rho \cdot Z}{N}, \qquad (4.14)$$

де Z - коефіцієнт переходу від найменшої освітленості до середньої, Z=(1,1...1,2), лм

$$F_{пр} = \frac{75 \cdot 1{,}3 \cdot 4500 \cdot 1{,}1}{0{,}386} = 1250323{,}8$$

Необхідне число ламп, шт

$$N = \frac{1250323{,}8}{4500} = 276.$$

Відстань між центрами світильників, м

$$l = \text{h} \cdot \text{m} = 6{,}2 \cdot 0{,}5 = 3{,}1.$$

Відстань від стіни по першому ряді світильників при наявності робочих місць у стіни $b' = 1/3\ 1 = 1/3\ \ 3{,}1 = 1{,}03$ м.

Відстань між крайніми рядами світильників, розташованих у протилежних стін (по ширині цеху): $C = h\text{-}2b' = 6{,}2\ \text{-}2\text{x}1{,}03 = 4{,}14$.

Кількість рядів світильників 12 шт, по 23 світильника в ряді.

4.4 Захисні заходи з електробезпеки

Для забезпечення електробезпеки обслуговуючого персоналу і нормальної роботи систем РЗА, ПА і АСУ ТП виконується захисне і робоче заземлення пристроїв цих систем згідно з вимогами ПУЕ.

Рекомендується кабельні лінії різного призначення прокладати по різних трасах, виконуючи з’єднання кабелів горизонтальними заземлювачами. Металеві оболонки і броня кабелів повинні заземлюватись в місці вводу в будівлю релейного щита ,а також в місцях кінцевого розділення кабелів.

Металеві короби, по яких прокладаються кабелі слід заземлювати через (5…10) метрів.

Для кіл міжмашинного обміну повинні застосовуватись тільки екрановані симетричні кабелі. Ці кабелі повинні прокладатись на якомога більшій відстані від силових кіл.

Взагалі, в залежності, від характеру діяння ЕМВ на лінії зв’язку і підімкнену до них релейну апаратуру можуть бути рекомендовані наступні способи захисту:

- застосування дводротових симетричних ліній зв’язку, добре ізольованих між собою та від землі;

- виключення застосування однодротових зовнішніх ліній зв’язку;

- екранування підземних кабелів з мідною, алюмінієвою, свинцевою оболонкою або прокладання їх в сталевих конструкціях, трубах;

- електромагнітне екранування блоків та вузлів апаратури;

- використання різного роду захисних вхідних пристроїв і грозозахисних засобів (троси, заземлюючі контури і т. ін.).

Як заходи захисту від прямого дотику застосовані: ізоляція струмоведучих частин; огородження і оболонки; бар'єри; розміщення поза зоною досяжності. Як заходи захисту у разі непрямого дотику застосовані: Автоматичне відключення живлення; ізолювальні зони; система зрівнювання потенціалів; електричне відокремлення кіл.

Існуючі та проектовані заходи захисту від ураження електричним струмом-відповідають вимогам ДСН 3.3.6.037, ДСНіП 239-96, ГОСТ 12.1.002-84, Д СанПіН 3.3.6-2002.

Струмоведучі частини повністю покриті ізоляцією, яка може бути усунена тільки шляхом руйнування. Ізоляція струмоведучих частин електрообладнання повинна відповідати стандартам або технічним умовам на це електрообладнання. Струмопровідні частини електрообладнання і ошиновка 1 кВ знаходяться поза зоною досяжності на висоті не менше 3,2 м від рівня землі.

Для електрообладнання, яке може зберігати електричний заряд після відключення (наприклад, конденсатори), для запобігання дотику до нього повинен бути виконаний попереджувальний напис. Перед дотиком до струмоведучих частин відключених конденсаторних батарей необхідно провести додатковий розряд замиканням висновків накоротко і на корпус металевою шиною з заземлювальним провідником, укріпленої на ізолюючої штанги.

Для забезпечення автоматичного відключення живлення необхідно виконати систему заземлення і основну систему зрівнювання потенціалів, а також забезпечити координацію характеристик захисних пристроїв, які здійснюють це відключення.

4.5 Пожежна безпека

Проект розроблений у суворій відповідності з ДБН В.1.1-7-2002 «Пожежна безпека об'єктів будівництва». Несучі та огороджувальні конструкції виконані з негорючих матеріалів. Приміщення належать до II ступеня вогнестійкості і мають евакуаційні виходи безпосередньо назовні або через тамбури згідно з п.5.13 та п.5.12 ДБН В.1.1.7-2002.

Ширина евакуаційних шляхів виконана відповідно до п.5.28 ДБН В.1.1-7-2006. Евакуаційні виходи з будівель виконані у відповідності до вимог п.5.9 та п.5.18 ДБН В.1.1.7-2006. Для запобігання розтікання масла з маслоеаповненого обладнання та розповсюдження пожежі при їх пошкодженні проектом передбачені маслоприймач, маслоовідводи і маслозбірник заглибленого типу об'ємом 2,5м³. В якості протипожежних заходів на території цеху передбачені наступні заходи: застосування кабелів з ізоляцією, що не підтримують горіння; підключення швидкодіючими релейними захистами кабелів; установка пожежних щитів з вуглекислотними вогнегасниками, совковими лопатами і ящиками з піском для гасіння пожежі.

Ступінь вогнестійкості усіх будівель згідно СНиП2.01.02-85 “Противопожарные нормы проектирования зданий и сооружений” приймається II. До будівель і споруд забезпечуються під’їзди пожежних машин. Гасіння пожеж на підстанції передбачається міською пожежною командою, а також первинними засобами гасіння пожежі, які встановлені на протипожежних щитах згідно таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Первинні засоби вогнегасіння в доменному цеху

Найменування Споруди	Найменування та тип засобів вогнегасіння	Кіл-сть шт.
РУ – 6 кВ	Ящик з піском	2
	Щит с первинними засобами вогнегасіння	2
	Вогнегасник ОУ 8	2
Щит управління	Вогнегасник ОУ 8	4
	Пересувний вогнегасник ОУ 80	1
ЗПК	Вогнегасник ОУ 2	4

Металеві конструкції запроектовані відповідно до вимог СНиП II-23-81, СНиП 2.01.07-85. Марки сталі, прийняті в залежності від групи конструкцій. Всі заводські з'єднання металоконструкцій прийняті зварні, монтажні - зварні та на болтах нормальної та грубої точності. Для забезпечення необхідної вогнестійкості всі металоконструкції покриваються емалевими складами по грунтованої поверхні. Таким чином, вимоги щодо пожежної безпеки відповідають нормам.

Прийнятий обсяг протипожежних заходів забезпечує вимоги ГОСТ12.1.004 – 91 «Пожарная безопасность. Общие требования».

4.6 Засоби індивідуального захисту

Для захисту органів слуху застосовують зовнішні і внутрішні противошуми (антифони). Як зовнішні противошуми рекомендують використовувать шумозахисні навушники, які покривають вушну раковину, як внутрішні противошуми – заглушки, вкладиші, які вставляють в зовнішній слуховий прохід.

Ступінь ослаблення шуму залежить від конструкції противошуму і частоти. Заглушки послаблюють шум на (5…7) дБ при частотах до 500 Гц і на 15 дБ при частотах понад 3000 Гц. Протишуми конструкції МІОТ послаблюють шум до 8 дБ при частотах до 500 Гц і до 55 дБ при частотах (5000…7000) Гц.

Для захисту від низькочастотних шумів придатні заглушки – кліпси, які представляють собою гумові пробочки з плоскою торцевою поверхнею, які закріплені на обідку з сталевого дроту, що пружинить, діаметром (1,5…2) мм. Для захисту від тепловиділень на об’єкті застосовують щільні матеріали з тканини, а також захисні рукавички.

Для захисту органів дихання використовують фільтр типу «тюльпан». Інших засобів індивідуального захисту не передбачається.

4.7 Розробка заходів захисту від тепловиділень

Розрахунок аерації пічного прольоту.

Оскільки в цеху температура повітря досягає 40 °С і запиленість повітря перевищує нормативне значення у $G_ф$ \ $G_н$ = 23\6 = 3,75 рази, необхідно застосовувати загальнообмінну вентиляцію. Для цього в цеху влаштовують аераційні ліхтарі.

Кількість теплоти, що виділяється в цеху від печі, Вт

$$Q_1 = \left\{2.2\cdot(\frac{T_в}{10}+32)^{5/4} + \left[(\frac{T_в}{1000}+3{,}23)^4 - 2{,}91\right]\right\}\cdot 1{,}163\cdot F_п, \qquad (4.15)$$

де $T_в$ – температура печі, К;

$F_п$ – площадь печи, м^2.

$$Q_1 = \left\{2.2\cdot(\frac{973}{10}+32)^{5/4} + \left[(\frac{973}{1000}+3.23)^4 - 2.91\right]\right\}\cdot 1.163\cdot 32{,}8 = 48384.$$

Тепловиділення від сонячної радіації через світлові прорізи, Вт/м^2

$$Q_2 = 9653\cdot F_c, \qquad (4.16)$$

де F_c – площадь світових прорізів, м^2.

$$Q_2 = 9653\cdot 10\cdot 4 = 386120.$$

Втрати теплоти через зовнішні огради у межах робочої зони, Вт

$$Q_р = 6978\cdot F_{б.с.}, \qquad (4.17)$$

де $F_{б.с.}$ – площа бокових стін цеху, м^2.

$$Q_р = 6978\cdot 7\cdot 4 = 195384.$$

Кількість теплоти, яке виділяється у цеху від різних джерел, Вт

$$Q = \sum Q_i = Q_1 + Q_2. \qquad (4.18)$$

$$Q = 48384 + 386120 = 434504.$$

Кількість повітря, необхідного для асиміляції надлишкових тепловиділень, м^3/год

$$G = \frac{4.15 \cdot \alpha \cdot (m \cdot Q - Q_p)}{t_{р.з.} - t_н}, \quad (4.19)$$

де α – коефіцієнт, що враховує висоту розташування припливних отворів;

m – коефіцієнт, що враховує вплив площі, займаної тепловиділяючим обладнанням.

$$G = \frac{4.15 \cdot 1.04 \cdot (0.62 \cdot 434504 - 195384)}{40 - 25} = 213174 .$$

Визначивши кількість повітря G, необхідного для асиміляції надлишкових теплових виділень в цеху, можна розрахувати площі припливних $F_{пр}$ і витяжних $F_{вит}$ прорізів цеху, м^2

- щільність зовнішнього повітря, кг/м^3:

$$\rho_y = 1{,}293 + 3{,}7 \cdot 10^{-3} \cdot a_y . \quad (4.20)$$

$$p_y = 1{,}293 + 3{,}7\ 10^{-3} \cdot 10 = 1{,}33.$$

$$\rho_н = 1{,}293 + 3{,}7 \cdot 10^{-3} \cdot a_н . \quad (4.21)$$

$$\rho_н = 1{,}293 + 3{,}7 \cdot 10^{-3} \cdot 13 = 1{,}341.$$

- відстань від нейтральної зони до центрів припливних та витяжних прорізів, м:

$$h_в = \frac{H_1}{0.64\frac{\rho_у}{\rho_н}+1}. \quad (4.22)$$

$$h_е = \frac{2}{0.64\cdot\frac{1.33}{1.341}+1} = 1.22 \text{ м.}$$

$$h_п = H_1 + h_в. \quad (4.23)$$

$$h_п = 2 + 1{,}22 = 3{,}22 \text{ м.}$$

- площі припливних та витяжних прорізів, м^2:

$$F_{пр} = \frac{213174}{3600\cdot 0{,}56\cdot\sqrt{2\cdot 9{,}8\cdot 3{,}22\cdot 1{,}341\cdot(1{,}341-1{,}33)}} = 109{,}6 \text{ м}^2;$$

$$F_{вит} = \frac{213174}{3600\cdot 0{,}57\cdot\sqrt{2\cdot 9{,}8\cdot 1{,}22\cdot 1{,}33\cdot(1{,}341-1{,}33)}} = 175{,}6 \text{ м}^2.$$

У цеху для загальнообмінної вентиляції застосуємо П-образні аераційні ліхтарі з вітробойними щитками [44].

Розрахунок теплоізоляції поста управління. Необхідно вибрати і визначити кількість екранів, які будуть захищати пульт управління від тепла в цеху з відкритою феросплавної піччю.

Температура стінки t_1 = 40 °С, температура повітря t_2 = 23 °С. Пост керування викладений цеглою. Ступінь чорноти $E_н$ = 0,85. Потрібно забрати всередині поста температуру не більше 26 °С.

$$T_и = 273 + 40 = 313 \text{ К};$$
$$T_в = 273 + 23 = 296 \text{ К};$$
$$T_э = 273 + 26 = 299 \text{ К}.$$

Визначаємо ступінь екранізації, в.о.

$$\mu = \frac{T_и}{T_э} \quad . \tag{4.24}$$

$$\mu = \frac{313}{299} = 1{,}05 .$$

Вибираємо екран з альфоля, ступінь чорноти якого $E_а$ = 0,37. Тоді наведені ступені чорноти будуть, в.о.

1) між альфолем і цегляною стіною [35], в.о

$$E_{иэ} = \frac{1}{\frac{1}{E_и} + \frac{1}{E_э} - 1} \quad . \tag{4.25}$$

$$E_{иэ} = \frac{1}{\frac{1}{0{,}85} + \frac{1}{0{,}37} - 1} = 0{,}35$$

2) між альфолем і повітрям, для якого можна прийняти $E_в$ = 0,82.

$$E_{ив} = \frac{1}{\frac{1}{0{,}85} + \frac{1}{0{,}82} - 1} = 0{,}714 . \tag{4.26}$$

Визначаємо число екранів [46], шт

$$n = \frac{1 - (\frac{T_в}{T_и})^4}{\frac{1}{\mu^4} - (\frac{T_в}{T_и})^4} \cdot \frac{E_{иэ}}{E_{ив}} - 1 . \tag{4.27}$$

$$n = \frac{1-(\frac{296}{313})^4}{\frac{1}{1{,}05^4}-(\frac{296}{313})^4}\cdot\frac{0{,}35}{0{,}714}-1 = \frac{1-0{,}8}{0{,}82-0{,}8}\cdot 0{,}49-1 = 3{,}9 \approx 4\,.$$

Отже, необхідно використовувати чотири шари з альфоля, щоб забезпечити температуру всередині поста управління в межах 26 °С. Пульт управління також має кондиціонер для створення мікроклімату з оптимальними умовами праці всередині нього.

ВИСНОВКИ

1. В ході дослідження були розглянуті основні параметри якості електричної енергії генератора мікро-ГЕС, що працює в автономному режимі. Виявлено, що стабільність напруги та частоти залежить від навантаження та режиму роботи генератора. Основними проблемами є коливання напруги, спотворення синусоїдальної форми сигналу та гармонічні складові.

2. Проведений аналіз стабільності показав, що автономна робота мікро-ГЕС є ефективною за умови оптимального навантаження та належного регулювання параметрів системи. Виявлено, що коливання частоти та напруги можуть виникати при зміні навантаження, що вимагає використання додаткових стабілізуючих пристроїв або систем автоматичного регулювання.

3. Для підвищення якості виробленої електроенергії запропоновано методику дослідження показників якості електроенергії:та розроблено математичну модель генератора мікро-ГЕС в автономному режимі, а також схему регулятора напруги.

4. Результати дослідження показали, що мікро-ГЕС має потенціал для ефективної автономної роботи, але потребує додаткових заходів щодо стабілізації параметрів електроенергії для забезпечення відповідності стандартам якості.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Самохвалов В. С. Вторинні енергетичні ресурси та енергозбереження : навч. посіб. – Вінниця : ВНТУ, 2008. – 224 с.

2. Гічов Ю. О. Вторинні енергоресурси промислових підприємств. Ч. 1 : конспект лекцій. – Дніпро : НМетАУ, 2012. – 72 с.

3. Варламов Г. Б., Любчик Г. М., Маляренко В. А. Теплоенергетичні установки та екологічні аспекти виробництва енергії : підручник. – Київ : КНУ, 2003. – 317 с.

4. Вторинні енергетичні ресурси // Вікіпедія : вільна енциклопедія. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Вторинні_енергетичні_ресурси (дата звернення: 18.03.2025).

5. Відновлювані джерела енергії : монографія. – Київ : ІВЕ, 2020. – 412 с.

6. Державна політика енергозбереження країн Європейського Союзу : аналіт. звіт. – Київ : СіверТренінг, 2016. – 69 с.

7. Енергоефективність: наука, технології, застосування : зб. наук. пр. – Київ : НПУ, 2017. – 195 с.

8. Методичне забезпечення лекційного курсу з дисципліни «Енергозбереження» : навч. матеріали. – Черкаси : ЧПЕК, 2017. – 88 с.

9. Алімпієв О. М., Ковальчук В. В. Енергетичний менеджмент : підручник. – Київ : НТУУ «КПІ», 2015. – 280 с.

10. Мартинюк І. В. Енергозбереження в промисловості : навч. посіб. – Львів : ЛП, 2013. – 312 с.

11. Білоконь В. С., Ковальова О. В. Енергоефективність та енергозбереження : підручник. – Харків : ХНУМГ, 2014. – 245 с.

12. Куликов М. М. Основи енергозбереження : навч. посіб. – Київ : КНТЕУ, 2012. – 198 с.

13. Руденко Ю. М., Сидоренко О. В. Енергозбереження та енергоефективність : підручник. – Полтава : ПУЕТ, 2016. – 274 с.

14. Шульга В. В. Енергетичний аудит : навч. посіб. – Київ : НУХТ, 2011. – 184 с.

15. Підгорний О. М., Сидоренко І. В. Технології енергозбереження в промисловості : навч. посіб. – Дніпро : ДНУ, 2010. – 301 с.

16. Коваленко С. В. Енергозберігаючі технології : підручник. – Київ : НАУ, 2013. – 270 с.

17. Гончаренко Л. М., Ткаченко О. В. Енергоефективність у промисловості : навч. посіб. – Запоріжжя : ЗНУ, 2015. – 310 с.

18. Лисенко П. М. Енергозбереження та відновлювані джерела енергії : навч. посіб. – Одеса : ОНУ, 2014. – 285 с.

19. Кравець В. О., Сидорчук І. М. Енергетичний менеджмент та аудит : підручник. – Київ : НТУУ «КПІ», 2012. – 260 с.

20. Мельник О. Г. Енергозбереження в системах теплопостачання : навч. посіб. – Львів : ЛНУ, 2011. – 275 с.

21. Це коректне оформлення відповідно до ДСТУ 8302:2015. Якщо потрібно щось уточнити або доповнити – повідомте.

22. Utkin V. I., Sliding Modes in Optimisation and Control, SPRINGER-VERLAG, 1992.

23. Chang, W., Park, J. B. Joo, Y. H. and Chen, G.,(2002), “Design of robust fuzzy model based controller with sliding mode control for SISO nonlinear systems”, Fuzzy Sets and Systems, 125, pp.1-22.

24. Horacio Torres, Gloria Acero, Jairo Flechas, Juan Saucedo, Carlos Quintana. Electric Energy, a Product with Quality –CEL-. 1 ed. Bogotá. ICONTEC, 2002, 332 p, ISBN 958-9383-866.

25. Samuel Ramírez, Eduardo Cano. Quality of the Electric Energy Service: Reliability of Distributions Systems. 1ª ed. Universidad Nacional de Colombia – Manizales, 2003, 364 p.

26. Resolution Energy and Gas Regulation Commission (CREG) 070/98,

Distribution Code

27. Catalog, Quality Registry DFMC-05, EDEC

28. Datasheet, PIC 16F877A, MICROCHIP microcontroller.

29. Nigel Gardner, An Introduction to Programming the Microchip PIC in C, Bluebird Electronics, PIC C.

30. Gilberto Enriquez Harper, ABC of Electric Energy Quality, 1ª ed. Bogotá, Limusa Editors, 2006, 265 p. ISBN 9681857798.

31. Alfonso Peñuela, Jenny Pacheco, Jairo Hernán, Gabriel Ordóñez, Member, IEEE, y Juan Benjamín. Methodological proposal for cost valuation due to an inadequate continuity in the electric energy supply. Bogotá, III International Symposium on Electric Energy Quality SICEL, 2005.

32. Víctor Barrera, Jorge Cormane, Juan Rodríguez, Gustavo Santos, Gilberto Carrillo, Gabriel Ordóñez, Hermann Vargas, Juan Mora. Methodology for improving the indexes of continuity in the electric energy supply. Bogotá, III International Symposium on Electric Energy Quality SICEL, 2005.

33. Robert l. Boylestad, Luis Nashelsky, Electronic: Circuit and electronic devices theory.

34. RETIE, Technical regulations for electric installations, August 06, 2008. Resolution CREG 103 of 2004, Quality indicators year 2009.