

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

Електричної інженерії та кіберфізичних систем

(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

другий (магістерський) рівень

(рівень вищої освіти)

на тему Розробка та дослідження автоматизованої системи регулювання вихідних параметрів мікро-ГЕС в умовах вторинних водотоків промислових підприємств

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1512
спеціальності 151 Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології

(код і назва спеціальності)

спеціалізації

(код і назва спеціалізації)

освітньої програми Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

Коваленко Ю.Л.

(ініціали та прізвище)

Керівник д.т.н., проф. Пазюк М.Ю.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент Курілець І.А.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2023

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні _____
 Кафедра Електричної інженерії та кіберфізичних систем _____
 Рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень _____
 Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології _____
(код та назва)
 Спеціалізація _____
(код та назва)
 Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

д.т.н., доц.

В.Л. Коваленко

« 07 » _____ 12 _____ 2023 року

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

Коваленку Юрію Леонідовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи Розробка та дослідження автоматизованої системи регулювання вихідних параметрів мікро-ГЕС в умовах вторинних водотоків промислових підприємств

керівник роботи Пазюк Михайло Юрійович, д.т.н., професор

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від « 01 » травня 2023 року № 639 - с

2 Строк подання студентом роботи 01 грудня 2023 р.



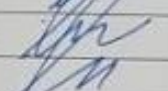
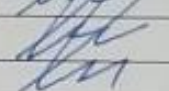


3 Вихідні дані до роботи Водотоки металургійних підприємств Запорізького регіону, основні технічні характеристики мікро ГЕС, діапазон витрат від 0,7 до 12 м³/с в межах напорів від 2,5 до 20 м, нестационарні потоки вторинної води.

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1) Аналіз стану та ефективності використання вторинних гідроенергетичних ресурсів підприємств 2) Розробка автоматизованої системи регулювання вихідних параметрів мікро-гес в умовах вторинних водотоків промислових підприємств 3) Техніко-економічні розрахунки ефективності впровадження модульних мікро - ГЕС із запропонованою системою керування на прикладі ПрАТ «Запоріжсталь»

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) 1) основні технічні характеристики мікро-ГЕС 2) оцінка потенціалу утилізації гідроенергетичних ресурсів основних промислових підприємств м. Запоріжжя

3) характерні графіки водоспоживання промислового обладнання 4) розробка стохастичного генератора витрат вторинної води 5) результати спостережень за витратою вторинної води 6) модель статистичного генератора витрати вторинної води 7) автоматизована система регулювання вихідних параметрів мікро-ГЕС 8) динаміка електричних величин на виході асинхронного генератора при його роботі на мережу 9) дослідження ефективності роботи мікро-ГЕС 10) розробка автоматичного регулятора на основі конформних перетворень

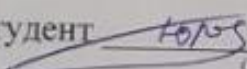
6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Пазюк М.Ю., д.т.н., професор		
Розділ 2	Пазюк М.Ю., д.т.н., професор		
Розділ 3	Пазюк М.Ю., д.т.н., професор		

7 Дата видачі завдання 01.09.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Призначення наукових керівників. Затвердження тем дипломних робіт	30.09.2023	<i>виконано</i>
2	Напрацювання теоретичного матеріалу: дослідження сутності об'єкту та предмету дослідження, критичний аналіз існуючих методологічних засад, вибір та обґрунтування напрямку проведення дослідження	30.10.2023	<i>виконано</i>
3	Апробація результатів на Міжнародних та Всеукраїнських конференціях	10.11.2023	<i>виконано</i>
4	Розробка економіко-математичного забезпечення основних елементів концептуального підходу.	15.11.2023	<i>виконано</i>
5	Збір та систематизація статистичного та нормативного матеріалу дослідження.	20.11.2023	<i>виконано</i>
6	Узагальнення отриманих результатів. Оформлення роботи	25.11.2023	<i>виконано</i>
7	Надання роботи до рецензії. Нормоконтроль	30.11.2023	<i>виконано</i>
8	Прилюдний захист дипломної роботи на засіданні ЕК	12.12.2023	<i>виконано</i>

Студент 
(підпис)

Ю.Л. Коваленко
(ініціали та прізвище)

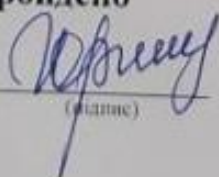
Керівник роботи


(підпис)

М.Ю. Пазюк
(ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер


(підпис)

І.А. Овчинникова
(ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Коваленко Ю.Л. Розробка та дослідження автоматизованої системи регулювання вихідних параметрів мікро-ГЕС в умовах вторинних водотоків промислових підприємств.

Кваліфікаційна випускна робота на здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, науковий керівник М.Ю. Пазюк. Запорізький національний університет. Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні. Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем, 2023.

Досліджено систему утилізації вторинних гідроенергоресурсів промислового підприємства, розроблено кілька проектів гідроутилізації в залежності від топології системи. Вибрано варіант з найменшою собівартістю і максимальним виробленням електроенергії. Розроблено та досліджено автоматизовану систему регулювання вихідних параметрів мікро-ГЕС в умовах вторинних водотоків промислових підприємств. Застосовано комформні відображення для виключення похибки системи управління гідроагрегатом мікро - ГЕС, що дозволило більш точно визначати її енергетичні характеристики за змінних обертів турбіни.

Ключові слова: автоматизована система регулювання, вторинні енергоресурси, гідроенергетична утилізація, мікро-гес, комформні відображення, змінна частота обертання.

ABSTRACT

Kovalenko Yu.L. Development and research of an automated system for regulating the output parameters of a micro-hydroelectric power station in the conditions of secondary watercourses of industrial enterprises.

Qualification final work for obtaining a master's degree in specialty 151 Automation and computer-integrated technologies, scientific supervisor

M.Yu. Pazyuk. Zaporizhzhia National University. Engineering Educational and Scientific Institute named after Yu.M. Potebni, Department of Electrical Engineering and Energy Efficiency, 2023.

The system of utilization of secondary hydropower resources of an industrial enterprise was studied, several projects of hydroutilization were developed depending on the topology of the system. The option with the lowest cost and maximum electricity generation was selected. An automated system for regulating the output parameters of a micro-hydroelectric power plant in the conditions of secondary watercourses of industrial enterprises has been developed and researched. Conformal mapping was used to eliminate the error of the control system of the micro hydropower unit, which made it possible to more accurately determine its energy characteristics under variable turbine revolutions.

Keywords: automated control system, secondary energy resources, hydro-energy utilization, micro-hesp, conformal mapping, variable rotation frequency.

ЗМІСТ

Вступ.....	8
1 Аналіз стану та ефективності використання вторинних гідроенергетичних ресурсів підприємств	11
1.1 Аналіз перспектив використання вторинних гідроенергетичних ресурсів	11
1.2 Загальні принципи побудови систем гідроенергетичної утилізації промислових підприємств	14
1.3 Оцінка потенціалу утилізації вторинних гідроенергетичних ресурсів основних промислових підприємств регіону	16
1.4 Аналіз існуючих технічних засобів утилізації гідроенергетичних ресурсів	21
2 Розробка автоматизованої системи регулювання вихідних параметрів мікро-ГЕС в умовах вторинних водотоків промислових підприємств	29
2.1 Визначення енергетичних параметрів вторинних водотоків промислових підприємств	29
2.2 Дослідження ефективності систем на базі модульних мікро-ГЕС.....	34
2.3 Вплив динаміки вторинного водотоку на енергетичні показники систем гідроенергоутилізації	36
2.4 Постановка задачі щодо розробки системи керування	40
2.5 Розробка стохастичного генератора витрат вторинних водотоків промислових підприємств	44
2.6 Модель автоматизованої системи регулювання вихідних параметрів мікро-ГЕС	50
2.7 Застосування конформних відображень для управління системою збудження мікро - ГЕС в умовах нестационарних водотоків.....	54
3 Техніко-економічні розрахунки ефективності впровадження модульних мікро - ГЕС із запропонованою системою керування.....	62

3.1 Аналіз водоспоживання ПАТ «Запоріжсталь».....	62
3.2 Розрахунок ефективності системи регулювання вихідних параметрів мікро-ГЕС в умовах киснево-компресорного цеху ПАТ «Запоріжсталь».....	67
3.3 Визначення складових собівартості електричної енергії.....	74
3.4 Розрахунок капітальних вкладень в систему гідроенергетичної утилізації.....	77
3.5 Визначення техніко-економічних показників впровадження системи гідроенергетичної утилізації.....	80
Висновки.....	87
Перелік джерел посилань.....	89

ВСТУП

Один із важливих вторинних енергоресурсів - це технічна вода, яку використовують у промисловості, в основному, для охолодження обладнання та інших цілей. Відпрацьована вода несе у собі не лише теплову енергію, але й механічну (кінетичну та потенціальну), яку можна утилізувати та перетворити, наприклад, в електричну енергію. Проте для розв'язання різних питань, пов'язаних із гідроутилізацією, необхідно розробити методики для оцінки гідроресурсів, раціонального вибору та розміщення обладнання для таких систем, і впровадити технічні рішення для максимального виробництва електроенергії з урахуванням економічної доцільності такого підходу.

Актуальність теми. Використання технічної води, яку великі промислові підприємства витрачають у великих обсягах, може бути значним джерелом гідроенергії. Ці водотоки можуть бути порівняні за своєю потужністю з малими річками, і вода в них містить значну кількість механічної енергії, яку можна перетворити в електричну енергію. Використання цього гідроенергетичного ресурсу вимагає створення систем для збору та оптимізації розміщення обладнання для електрогенерування, що може бути розташоване на великій території і обслуговувати складну інфраструктуру.

Для максимальної ефективності таких систем потрібно розробити методологію та технічні рішення для оптимізації їх параметрів з економічною доцільністю, враховуючи вартість енергоресурсів та обладнання. Це може допомогти підвищити конкурентоспроможність та зменшити витрати підприємства на електричну енергію.

Втілення енергозберігаючих технологій може сприяти зниженню витрат енергоресурсів у виробництві і зменшенню собівартості продукції. Для цього може бути важливим створення фондів енергозбереження на підприємствах, які фінансуються з податків на прибуток, отриманий в результаті впровадження енергозберігаючих заходів.

Об'єкт дослідження – процес регулювання вихідних параметрів мікро-ГЕС в умовах вторинних водотоків промислових підприємств.

Предмет дослідження – автоматизована система регулювання вихідних параметрів мікро-ГЕС в умовах нестационарних водотоків підприємств металургійної галузі.

Мета роботи – розробити автоматизовану систему регулювання вихідних параметрів мікро-ГЕС та дослідити її ефективність в умовах вторинних водотоків промислових підприємств.

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

- провести дослідження водотоків металургійних підприємств Запорізького регіону з метою визначення їх гідроенергетичного потенціалу, проаналізувати обсяги та потужності придатних для гідроенергетичної утилізації водних потоків;

- дослідити вплив кутової частоти обертання мікро-ГЕС в умовах нестационарних потоків вторинної води на роботу генератора;

- розробити математичний апарат, який дозволить коригувати енергетичні характеристики генераторів мікро - ГЕС залежно від кутової частоти обертання за рахунок створення алгоритмів керування та регулювання;

- провести оцінку енергетичної та економічної ефективності гідроутилізації на базі новоствореної автоматизованої системи регулювання вихідних параметрів мікро-ГЕС.

Методи та засоби дослідження. Задачі дослідження вирішувались шляхом математичного моделювання та зі застосуванням розрахункового методу.

Наукова новизна. У результаті теоретичних досліджень були знайдені нові наукові рішення. Розрахунковим експериментом визначено залежність енергетичних показників роботи мікро - ГЕС в умовах нестационарних потоків вторинної води. Встановлено, що ККД енергомодуля мікро - ГЕС значно зменшується при відхиленні параметрів водотоку від номінальних.

Практична цінність роботи полягає в розробці математичного апарату і регулятора на його основі, який дозволяє коригувати енергетичні характеристики генераторів мікро - ГЕС, що працюють на автономне навантаження і, таким чином, збільшити кількість виробленої електроенергії із вторинних водотоків ПАТ «Запоріжсталь». Регулятор дозволяє забезпечити необхідну якість сталих і перехідних режимів роботи генератора мікро - ГЕС при різних збуреннях з боку навантаження, а також збільшити кількість електричної енергії, придатної для більшості споживачів якості в середньому на 12 - 26%.

Апробація результатів дослідження. Результати магістерської роботи відображено у тезах доповідей XVI університетської науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Молода наука - 2023», ЗНУ; III Всеукраїнської науково-практичної конференції за участю молодих науковців «Актуальні питання сталого науково-технічного та соціально-економічного розвитку регіонів України», 2023 р.; участі в НДДКР (Державний реєстраційний номер: 0123U100404) «Теоретичні та практичні аспекти підвищення енергетичної ефективності та керованості технологічних процесів».

Структура та обсяг роботи. Магістерська робота включає вступ, три розділи, висновки та список використаної літератури з 45 позицій. Загальний обсяг 93 сторінки.

1 АНАЛІЗ СТАНУ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ВТОРИННИХ ГІДРОЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ ПІДПРИЄМСТВ

1.1 Аналіз перспектив використання вторинних гідроенергетичних ресурсів

Актуальність енергозбереження стає більш очевидною через зростання витрат на енергоресурси, зокрема електроенергію, і обмежені можливості задоволення попиту на органічне паливо. Промисловість великий споживач енергії, і відносно невелика частина використовуваної енергії використовується корисно. Більшість енергії витрачається безповоротно.

У промисловості, понад 55% теплової енергії, яка виробляється, та близько 50% загального видобутого палива використовується. Однак лише 30-35% цієї енергії використовується корисно. Велика кількість енергії виноситься з технологічних агрегатів з димовими газами, гарячими продуктами, водою та відходами. Частину цих енергетичних втрат можна утилізувати.

Вторинні енергетичні ресурси (ВЕР) включають в себе теплові, горючі і надлишковий тиск (напір) та є енергетичним потенціалом, який може бути використаний для подальшого енергозабезпечення. Вони зазвичай є значущими в енергетичному балансі багатьох галузей промисловості. Наприклад, у чорній металургії, промислова теплопотреба забезпечується ВЕР на 34%, а на окремих заводах навіть на 48%. У газовій промислості ця частка складає 35%, у мінеральних добрив - понад 27%, в нафтопереробній і нафтохімічній промислості - близько 14%, у кольоровій металургії - 8%, і загалом у промисловому теплоспоживанні - близько 7%. У сумарному тепловому балансі країни ВЕР надходження становить близько 5,5%.

Питомі капіталовкладення в заходи з використання ВЕР, віднесені на 1 т зекономленого палива, в (2...3) рази менше, ніж на видобуток і транспортування останнього. Поточні витрати при виробництві одиниці енергії в утилізаційних установках також значно нижче, ніж у генеруючих. Заходи

щодо використання ВЕР окупаються за рахунок економії палива, як правило, протягом декількох років. [8] При цьому вони ще й значно зменшують екологічний збиток, що наноситься навколишньому середовищу, через скорочення шкідливих викидів.

Лідером серед вторинних енергоресурсів є на сьогоднішній день теплові викиди, найбільша кількість яких утворюється на підприємствах енергетики і металургії, наприклад, у таких металургійних циклах як: доменний, сталеплавильний, прокатний та ін. Зазначені викиди являють собою потоки гарячої води систем охолодження, вологої пари, гарячих газів, які істотно збільшують енергоємність кінцевої продукції та погіршують екологічні показники підприємств. Рівень використання таких ВЕР в галузі щорічно підвищується, але його не можна визнати задовільним.

У доменному виробництві в даний час частково використовується теплота випарного охолодження печей і клапанів повітрянагрівачів, ведуться розробки з утилізації теплоти відхідних газів повітрянагрівачів. Так, наприклад, навіть часткове використання тепла від охолодження доменної печі об'ємом 2000 м^3 дозволяє зекономити (10...12) тис. т. умовного палива на рік [9]. У коксохімічному виробництві окрім фізичного тепла коксу можна використовувати ще вказане тепло коксового газу і вихідних газів печей спалювання сірководню в цехах сіркоочистки. У кольоровій металургії ж основними джерелами теплових ВЕР є: теплота охолодження шахтних печей, газів, що відходять від сіркоспалювальних установок, печей киплячого шару і відбивних печей мідно-нікелевого виробництва [10-14].

У нафтопереробній та нафтохімічній промисловості значна кількість теплоти (40%) утворюється при виробництві синтетичних каучуків. У хімічній промисловості використання теплових вторинних енергоресурсів включає фізичну теплоту відхідних газів технологічних печей та теплоту охолодження продуктових потоків, що утворюються при виробництві різних хімічних сполук, таких як аміак, азотна та сірчана кислоти, кальцинована сода.

У промисловості будівельних матеріалів теплові вторинні енергоресурси, що утворюються при роботі печей, на жаль, зазвичай не утилізуються. Проте ці вторинні енергоресурси можуть бути використані для покриття потреби підприємства в енергії та зменшення витрат на паливо, якщо розробити та впровадити відповідні технології та системи утилізації тепла. [16-18].

Отже, наявність вторинної теплоти, яка має потенціал бути використаною на підприємствах у багатьох галузях промисловості, є правильною. Воду, що використовується для охолодження технологічних агрегатів, дійсно можна розглядати як носія не лише теплової, але і механічної енергії. Однак, ефективна утилізація цієї теплоти може бути важкою через ряд технічних і економічних обмежень.

Основні труднощі у використанні вторинної теплоти, яка утворюється при охолодженні, полягають у створенні систем відбору і транспортування. Великі потоки води і високий напір можуть вимагати значних інвестицій у відповідне обладнання. Однак, в деяких випадках, такі інвестиції можуть бути оправданими з точки зору економічної вигоди та сталого розвитку підприємства. Усунення обмежень і вдосконалення технологій можуть сприяти більш ефективному використанню вторинної теплоти.

Зокрема, розглядається можливість використання теплообмінників і теплових насосів для вилучення теплоти з води, яка використовується для охолодження, і подальшої перетворення її на корисну енергію. Такі рішення можуть зменшити втрати теплоти і покращити енергоефективність підприємства. [19].

З огляду на великі обсяги води, слід зауважити, що кількість наявної в ній механічної енергії може бути більше теплової. Якщо відбір вторинної теплоти здійснюється на комунальні та виробничі потреби хоча б частково, то потенційна енергія та енергія руху води поки що безповоротно втрачаються. Очевидно, що перетворення останніх в електричну енергію, що є по суті утилізацією надлишкового гідроресурсу (гідроенергоутілізацією), могло б істотно знизити споживання електроенергії на транспортування води.

1.2 Загальні принципи побудови систем гідроенергетичної утилізації промислових підприємств

На промислових підприємствах іноді виникає проблема невикористання великих обсягів гарячої виробничої води для теплопостачання через обмежену потребу в теплі та сезонний характер теплоспоживання. У деяких випадках ця ситуація не дозволяє використовувати цей потенціал як джерело відновлювальної енергії (ВЕР). Однак для підвищення енергоефективності промислових підприємств можна розглядати системи, які використовують гідроенергетичний потенціал вторинних водотоків для вироблення власної електроенергії.

Узагальнено, такі системи включають у себе обладнання для збору вторинних водотоків та пристрої для перетворення потоку води в електричну енергію. Хоча на перший погляд проектування цих систем може здаватися нескладним, для досягнення максимальної ефективності необхідно враховувати різні фактори, такі як розташування обладнання, об'єднання джерел технічної води, характер потоку на кожному джерелі та якість отриманої електроенергії.

Системи водопостачання промислових підприємств розглядаються як сукупність елементів водопроводу та водовідведення, і можуть бути розділені за їхніми технологічними особливостями на прямоточні, системи з повторним використанням води, оборотні схеми з охолодженням води і оборотні схеми з очищенням води. Важливо зберігати технологічний процес підприємства під час розробки та впровадження систем утилізації гідроенергетичного потенціалу, заснованих на існуючих системах водопостачання та водовідведення.

Зазвичай агрегати, які є джерелами відновлювальної енергії (ВЕР), розташовані на різних територіях, і вироблені ними вторинні ресурси є нерівномірними як за часом їхнього виходу, так і за значеннями параметрів, які їх характеризують. Наприклад, у багатьох технологічних процесах, таких як металургія, хімічне виробництво, коксохімія та інші, системи подачі води

розроблені так, що вода подається на різні висоти, і після використання вона викидається за межі цеху або перекачується назад в оборотний цикл. У цьому процесі велика кількість теплової та механічної енергії рідини втрачається. На одному підприємстві може бути сотні таких вторинних потоків з різних рівнів висоти. Ці потоки не є постійними і, як правило, мали за обсягом, щоб використовувати стандартне обладнання для гідроенергоутилізації.

Однак, якщо об'єднати ці вторинні потоки, то можна створити потенційне джерело відновлювальної енергії (ВЕР), використання якого стане доцільним. Цю відходову енергію можна утилізувати за допомогою існуючого обладнання, але для правильного вибору такого обладнання необхідно знати обсяг і параметри гідроресурсу та аналізувати їх розподіл на підприємстві. Вибір потужності обладнання та розробка загальної топології системи залежать від обмежень, пов'язаних з розташуванням генеруючих пристроїв.

Використання вторинних енергетичних ресурсів для вироблення електроенергії, як правило, не потребує значних змін у загальній схемі енергопостачання підприємства. Проте це може значно зменшити споживання електроенергії, зокрема, на транспортування води, і підвищити економічну доцільність утилізації. На жаль, наразі ця проблема не отримує достатньо уваги, і питання, пов'язані з її вирішенням, залишаються недостатньо дослідженими, що вимагає подальших досліджень та розв'язання.

Для підвищення ефективності утилізації теплових вторинних енергетичних ресурсів на підприємстві, наряд з вдосконаленням системи обліку та планування їх використання, необхідно розв'язати кілька технічних і організаційних завдань. Серед них, перш за все, важливо провести оцінку наявного потенціалу гідроресурсів та їх параметрів, а також проаналізувати розташування джерел води на підприємстві. Це визначить проектну потужність обладнання для вищезгаданої утилізації. Також потрібно розробити топологію системи збору води та розташування електрогенеруючого обладнання.

Для вирішення всієї цієї комплексної проблематики, пов'язаної з гідроутилізацією як одним із засобів підвищення ефективності використання

вторинної теплоти, необхідно розробити відповідні методики для оцінки потенціалу гідроресурсу та обсягів можливої утилізації механічної енергії потоків технічної води. Також потрібно розробити методику для вибору відповідного обладнання для утилізації, з урахуванням реального розміщення джерел води. Важливим завданням є визначення оптимальних місць розміщення мікрогідроелектростанцій (мікро-ГЕС), які будуть використовувати цю енергію. Усе це повинно підтверджувати економічну доцільність генерації такої електроенергії.

Звісно, поставлене завдання, є дуже актуальним, особливо в умовах стрімкого зростання цін на енергоресурси, включаючи електричну енергію. Використання утилізації механічної енергії через охолоджуючу воду та перетворення її в електричну енергію є ефективним способом підвищення енергоефективності підприємства. Системи гідроутилізації створюються в першу чергу в інтересах самого підприємства. Вироблена електрична енергія за допомогою гідроутилізації може бути використана для живлення внутрішніх споживачів, але лише за умови, що вона має задовільну якість.

1.3 Оцінка потенціалу утилізації вторинних гідроенергетичних ресурсів основних промислових підприємств регіону

Витрати води, що споживається промисловими підприємствами, дуже значні. Вона використовується для охолодження обладнання безпосередньо в технологічному процесі або забезпечення стійкості агрегатів, що працюють у зонах високих температур. Вода також входить до складу продукції, що випускається як елемент, включаючи одержання пари для вироблення електроенергії (15...20) %, а також витрачається на підсобні потреби (полив, промивку, миття тощо). На долю цього споживання припадає (5...10) %. Таким чином, основним споживачем води в промисловості є охолодження [1,15].

Систему водяного охолодження застосовують там, де температура води визначає характер технологічного процесу. Суть її полягає в тому, що холодна

вода надходить у охолоджуваний елемент і відбирає з його поверхні тепло без зміни агрегатного стану. Охолодження здійснюється тільки за рахунок конвективного теплообміну, тобто. руху потоку води. Остання входить у систему і відводиться з неї вже з температурою (35...60) °С. Незначний ступінь нагрівання води при такому охолодженні робить практично неможливою або малоефективною утилізацію тепла, що уноситься з нею.

Вказана особливість систем промислового охолодження обумовлює величезну витрату технічної води для підтримки заданого температурного режиму. Як правило, потреба підприємства в останній розраховується за загальноприйнятими методиками. Вони дозволяють визначати її кількість, необхідну для охолодження, наприклад, конструкцій металургійних і нагрівальних печей, елементів технологічного обладнання (валків, прокатних станів, корпусів машин, підшипників тощо), готової продукції, на газоочистку і приготування технологічних розчинів.

Як було сказано, основними характеристиками систем технічного водопостачання підприємства є температура і хімічний склад води, що використовується для охолодження технологічного обладнання, а також її напір і витрата. Дві останні з них визначають потенціал вторинного гідроенергоресурсу підприємства, який практично у всіх галузях промисловості залишається незадіяним через відсутність кількісної оцінки та економічного обґрунтування доцільності його використання [8,18].

Так, наприклад, на підприємстві металургійного комплексу ПрАТ «Український графіт», який спеціалізується на випуску графітових і футеровочних блоків для мартенівських та інших типів печей, основними джерелами теплоти є дугові і обпалювальні печі [24]. Згідно паспорту системи оборотного водопостачання цього підприємства допустимі параметри технічної води такі: жорсткість - 5 мг/л, вміст зважених часток - 100 мг/л, температура води – (30...40) °С (вище 60 °С не допускається). Зазначене досить жорстке обмеження по температурі призводить до того, що сумарне споживання заводом технічної води є значним і добігає до 3000 м³/г.

Основними цехами даного підприємства, що споживають воду для промислових цілей, є:

- змішувально-пресові - № 1 і 2: на охолодження головок прокалочних печей, маси заготовок у пресовому відділенні, маси у відділенні формування, маси при навантаженні її у вагони, для роботи гідросистеми і насосних станцій пресового відділення, на холодильники прокалочного відділення;

- обпалювальний: на охолодження вузлів підсіпки корпусів, димососів печей, компресорів просочення, а також просоченої продукції;

- графітації: на охолодження струмопроводів печей графітації (електрокальцінаторів), димососів печей, продукції і підсіпки, підшипників димососів;

- енергосилових: на охолодження трансформаторних установок і компресорів центральної компресорної станції.

Дані, представлені в таблиці 1.1, отримані шляхом вимірювань і розрахунків на основі паспортів систем водопостачання та технічної документації устаткування. Втрати води складаються з суми втрат на випаровування та краплевинесення в системах охолодження бризкальних басейнів.

Також, уявлення про обсяги можливої гідроенергоутилізації можна одержати, наприклад, з даних, наведених у таблиці 1.2, які отримані з кадастру технологічних водотоків Запорізької області, перспективних для використання в якості об'єктів зазначеної утилізації шляхом установки відповідних міні - і мікро-ГЕС. Кадастр розроблений на основі «Регіональної програми енергозбереження». У таблиці розглянуті найбільші водотоки зазначених підприємств, де великі об'єми технічної води після використання вже самопливом попадають на більш низькі обрії. Перепади між останніми можуть становити кілька десятків (до сотні) метрів, і, навіть, при невеликих витратах води розрахункові потужності водотоків виявляються значними [33-36].

Таблиця 1.1 - Потреба в технічній воді основних металургійних підприємств м. Запоріжжя

Підприємство	Потреба в технічній воді, м ³ /Г	Втрати, м ³ /рік	Річна витрата, м ³ /рік
ПАТ «Запоріжсталь»	81610	24688600	714907471
ПрАТ «Дніпроспецсталь»	18310	17645195	160394241
ПрАТ «Український графіт»	2629	4051800	16992800
ПрАТ «Запорізький феросплавний завод»	2806	3302765	24578654
Всього	105355	49688360	916873166

Найбільшу кількість технічної води на ПрАТ «Український графіт» споживає цех графітації. Її сумарна витрата становить 644 м³/Г, в тому числі 300 м³/Г - на охолодження електрокальцінаторів, 180 м³/Г – барабанів-охолоджувачів, 144 м³/Г – підшипників димососів і 20 м³/Г – формовочних машин. Підведення води на охолодження обладнання цеху здійснюється двома шляхами: на електрокальцінатори, як найбільш чутливе до безперервності охолодження обладнання, її подачу виконують від окремого насоса, на інше обладнання - від центральної насосної станції.

Існує кілька методик, що дозволяють оцінити потребу підприємства в технічній воді. Розрахунок індивідуальних норм водоспоживання та водовідведення у відповідності з методикою [25,26] зводиться до визначення необхідної витрати води за операціями і агрегатами як основного, так і допоміжного виробництва. Така витрата визначається:

- для обладнання заводського виготовлення приймається за паспортними даними заводу-виготовлювача;

- для прокатного обладнання (охолодження валків, гідрозбивання окалини і т.п.), у зв'язку з відсутністю методики розрахунку, приймається за досягнутого рівня експлуатації;

- на охолодження елементів обладнання, що не має паспортних даних, визначається за формулами методики [27].

Таблиця 1.2 - Обсяги можливої гідроутилізації на деяких підприємствах Запорізької області

Підприємство	Джерело води	Витрата, м ³ /с	Напір, м	Об'єм води, млн.м ³	Розрахункова потужність водотоку, кВт
ПАТ «Запорізький залізорудний комбінат»	Трубопровід скидання шахтних вод у ставок-випаровувач на Утлюкському лимані	0,57	12,40	-	58,84
	Ставок-накопичувач шахтних вод	-	1,80	1,80	1100,72 при використанні 40% об'єму на протязі 10 год
Запорізька ТЕС	Канал скидання	140,00	5,00	-	6867
КП «Водоканал»	Центральні очисні споруди	2,54	2,00	-	42,35
	Водопровідна станція №1	1,83	5,00	-	42,62
	Водопровідна станція №2	1,16	5,00	-	42,62

1.4 Аналіз існуючих технічних засобів утилізації гідроенергетичних ресурсів

Як було визначено, об'єми вторинної води можна порівняти зі стоком малих річок. Тому, для даного виду утилізації як найбільш доцільне генеруюче обладнання можуть розглядатися стандартні мікро - (до 100 кВт) і міні - (від 100 до 1000 кВт) ГЕС. Вони є надійним і екологічно чистим джерелом електричної енергії [37-39]. Можуть працювати як автономно в місцях, віддалених від ліній електропередач, так і паралельно з іншими мікро-ГЕС в локальну або промислову мережу. Вони мають такі переваги: придатні для тривалої експлуатації без ремонтів; як правило, поставляються одним або кількома скомпонованими блоками, що спрощує монтаж на місці установки; мають максимально спрощену конструкцію з мінімальною кількістю регулюючих органів; потребують незначних витрат на установку і обслуговування в процесі експлуатації.

В даний час ряд вітчизняних та закордонних виробників випускають придатні для зазначених цілей мікро- і міні-ГЕС, а також пропонують широкий модельний ряд такого енергетичного устаткування. Їх номінальні параметри дозволяють утилізувати потік води практично будь-якого напору й витрати. Виходячи з особливостей конструкції і способу установки розрізняють вільнопоточні (застосовуються в основному в руслах річок) і заглибні мікро-ГЕС. Для реалізації проектів гідроутілізації в рамках підприємства краще використовувати останні, оскільки вони є більш маневреними з точки зору монтажу та підключення до мережі.

Проектуванням і розробкою устаткування для таких ГЕС займаються багато російських науково-виробничих організацій і фірм. Одна з найбільших - міжгалузеве науково-технічне об'єднання "ІНСЕТ", що спеціалізується на розробці, серійному виготовленні і монтажі енергомодулів для малих і мікро-ГЕС. На теперішній час зазначеним підприємством створено широкий модельний ряд в кількості 34 гідроагрегата на напори від 3 до 450 м одиничною

потужністю від 3 до 5000 кВт. Використання таких систем не вимагає постійної присутності на об'єкті обслуговуючого персоналу - гідроагрегат надійно працює в автоматичному режимі. Система керування виконана на базі контролера, що програмується. Це дозволяє візуально контролювати параметри гідроагрегата на екрані комп'ютера.

Гідроагрегати для малих і мікро-ГЕС, що випускають МНТО «ІНСЕТ», характеризуються високими енергетичними показниками й випускаються із пропелерними, радіально-осьовими й ковшовими турбінами (Рисунок 1.2). У комплект поставки входять, як правило, турбіна, генератор і система автоматичного керування гідроагрегатом. Проточні частини всіх турбін розроблені з використанням методу математичного моделювання. Мікро-ГЕС відповідного типу представлені на рисунку 1.1 (а, б).

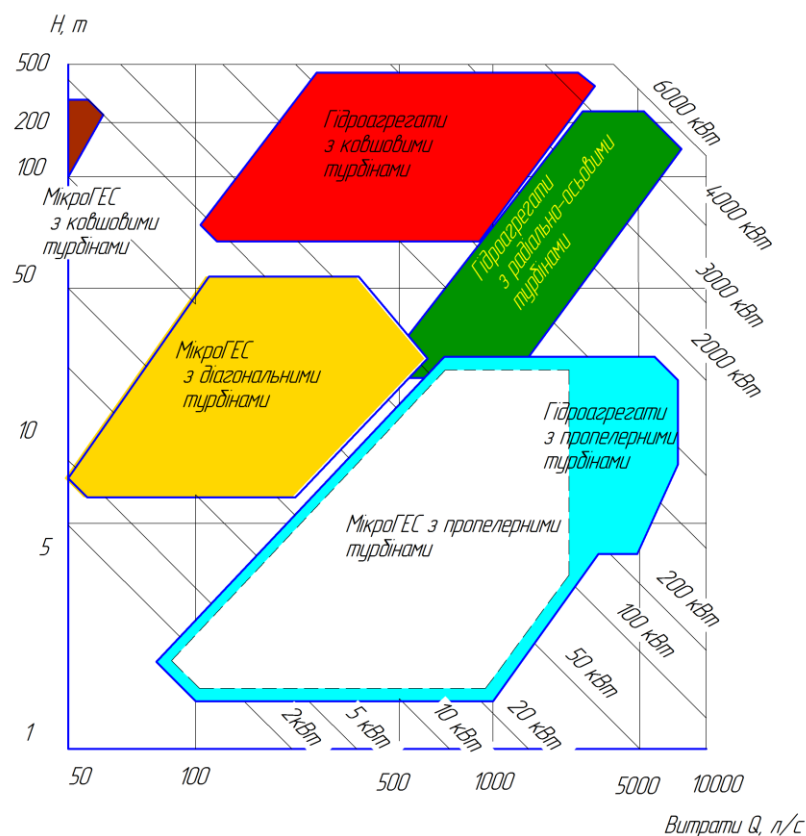
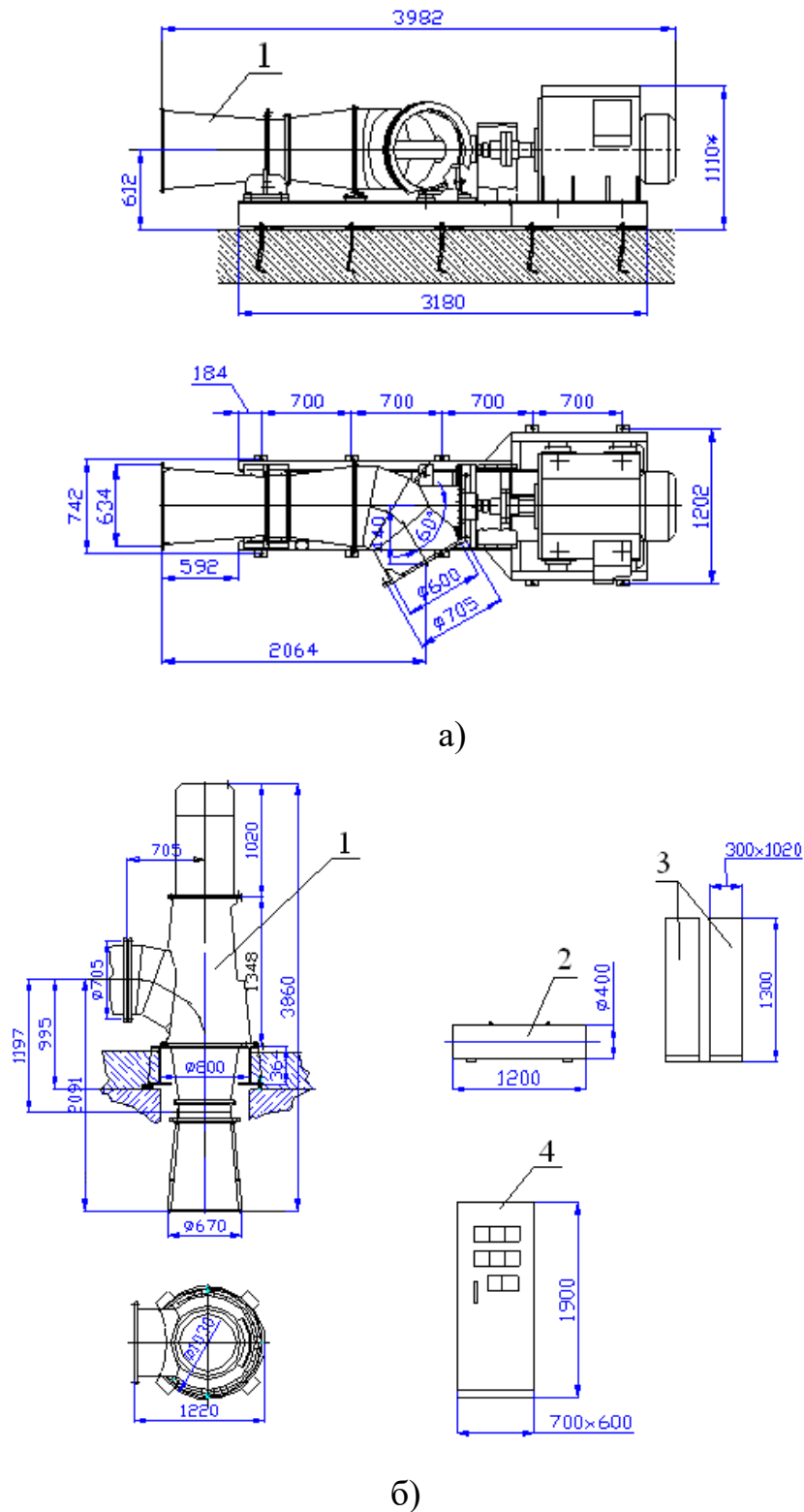


Рисунок 1.1 - Енергетичні характеристики гідроагрегатів МНТО «ІНСЕТ»



a, б - горизонтальна і вертикальна компоновка енергоблоку:

1 - енергоблок, *2* – блок баластного навантаження з водяним охолодженням, *3* – блок баластного навантаження з повітряним охолодженням, *4* – пристрій автоматичного регулювання (більш докладно зображений на рисунку 1.3)

Рисунок 1.2 - Габаритні пропелерної мікро-ГЕС 50 Пр

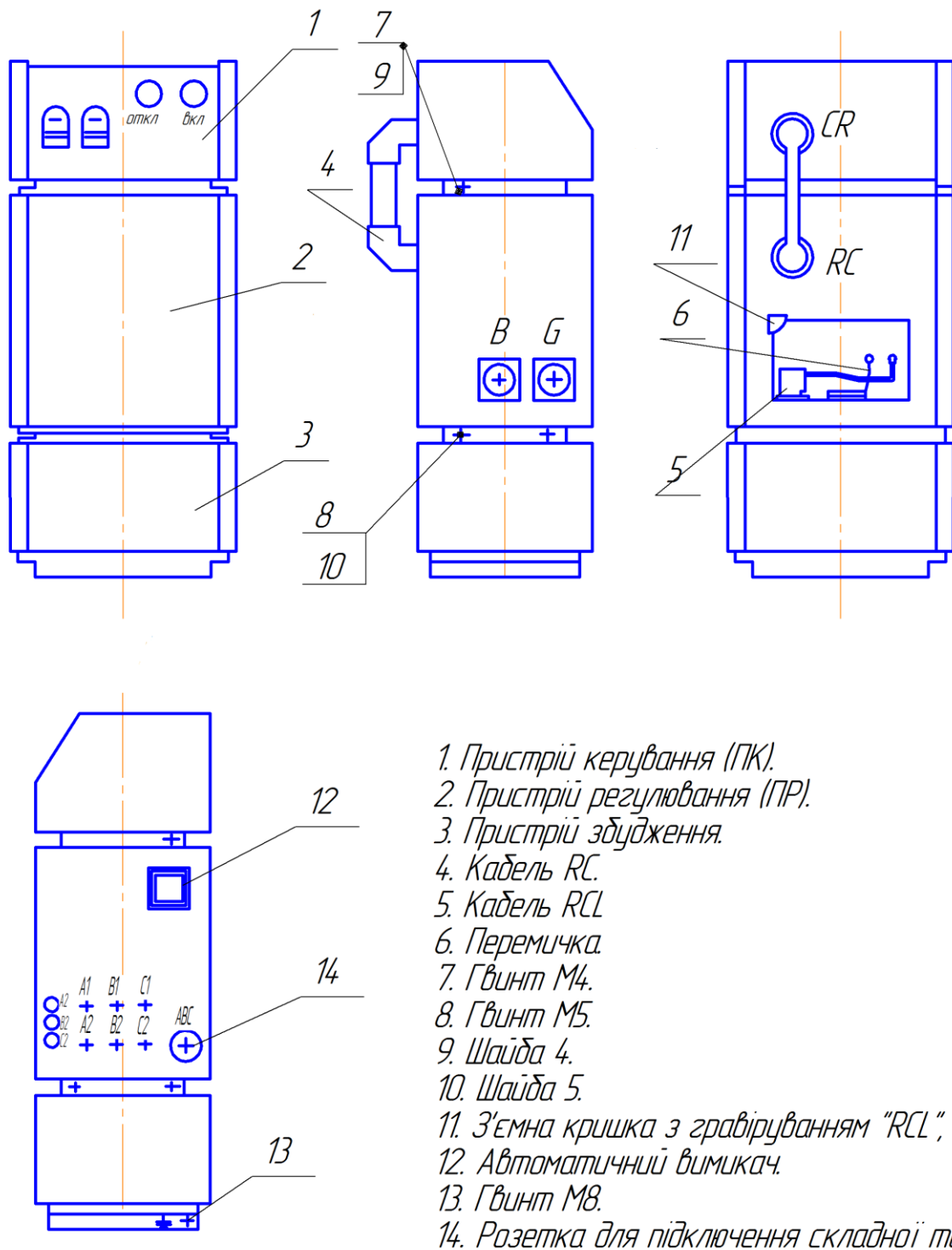


Рисунок 1.3 - Пристрій регулювання напруги і частоти

Основні характеристики мікро-ГЕС представлені в таблиці 1.3 та 1.4.

Таблиця 1.3 - Основні технічні характеристики мікро-ГЕС із пропелерними турбінами

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					

Таблиця 1.4 - Основні технічні характеристики мікро-ГЕС із діагональною й ковшовою турбінами

Параметри	Тип мікро-ГЕС		
	20ПрД	100ДО	200ДО
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	

До головних недоліків серійних мікро-ГЕС комплектного виконання можна віднести спрощену систему регулювання швидкості. За підвищених

обертів (частоти) зайва потужність автоматично гаситься на баластному навантаженні. Широкому використанню таких агрегатів на водотоках систем технічного водопостачання перешкоджає відсутність гідравлічних турбін для малих напорів – 1,5-3 м за досить великих витрат води – 2-10 м³/с. Потоки із зазначеними характеристиками досить часто зустрічаються в багатьох галузях промисловості. Лише останніми роками на ці потенційні енергоресурси звернули увагу в гідромашинобудуванні. Але переважно за кордоном. Наприклад, в Фінляндії розпочато виробництво таких гідротурбін з напорами 1,5-3,5 м, які застосовуються в технічно-транспортних системах [33].

В Україні (ПАТ «Турбоатом») сертифіковане обладнання мікро-ГЕС створюється здебільшого на напори, що перевищують 5 м. При роботі з меншими напорами різко знижується ККД турбін, погіршуються можливості регулювання швидкості обертання. Отже, вибирати таке обладнання для роботи в умовах низьких напорів недоцільно.

Екологічність і економічність міні-енергетики вже давно привернули увагу іноземців. Мікро-ГЕС працюють у Японії, Південній Кореї, Бразилії, Гватемалі, Швеції, Польщі [37-39]. Так, енергоефективне, високоякісне, але набагато дорожче вітчизняного обладнання комплектних (вертикальних) мікро-ГЕС виготовляє шведська фірма Flugt. Воно має ряд переваг і характеризується, в першу чергу, економічністю, достатньою керованістю, маневреністю, спроможністю працювати в паралель з мережею. Гідрогенератори цієї фірми є стандартними виробами модульної конструкції, що дозволяє пристосувати їх практично до всіх експлуатаційних умов у діапазоні витрат від 0,7 до 12 м³/с і в межах напорів від 2,5 до 20 м. При цьому їх номінальна потужність складає від 40 до 710 кВт (рисунки 1.4). Заглибні гідротурбогенератори Flugt є агрегатами, що складаються з напівповоротно-лопастної турбіни, трифазного асинхронного генератора й, при необхідності, планетарного редуктора з великим терміном експлуатації. Цим компактним закритим турбоагрегатам не потрібні довгі вали і звичайні силові передачі. Такий гідротурбогенератор працює в повністю зануреному стані в простій вертикальній колоні й утримується на місці своєю

власною масою. Він охолоджується проточною водою й може бути легко занурений і піднятий для технічного обслуговування.

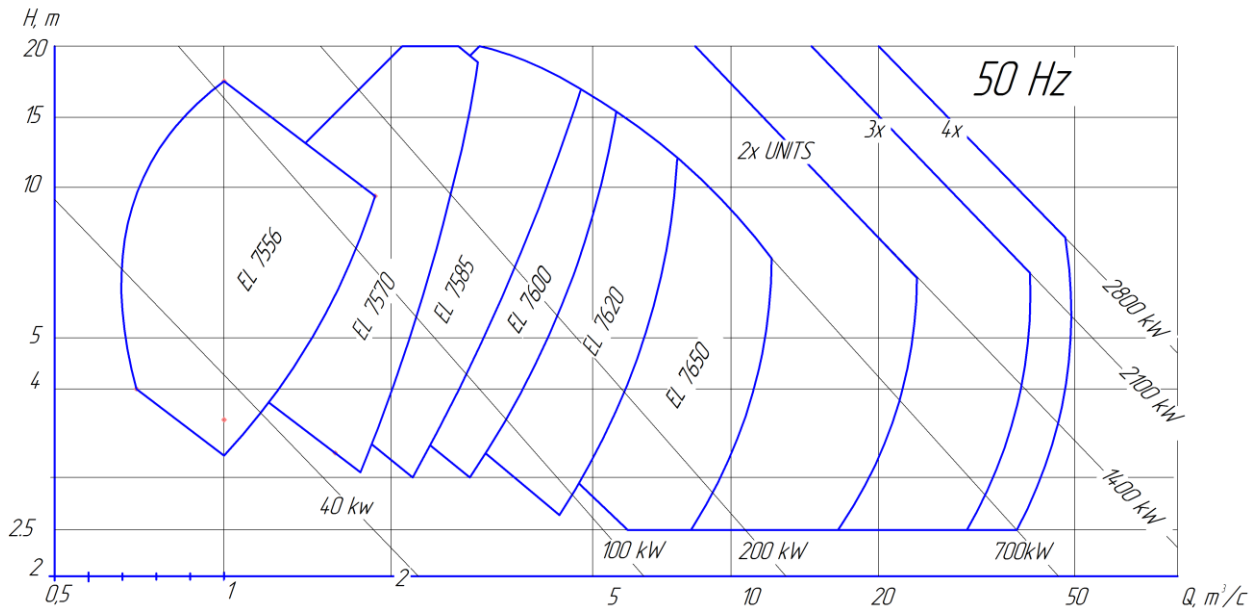


Рисунок 1.4 - Енергетичні характеристики гідроагрегатів Flugt

За принципом установки заглибні гідротурбогенератори призначені для розміщення у вертикальному положенні. Найменші моделі (EL 7556 і EL7570), а також типи EL7585 і EL7600 із прямим приводом, можуть бути також установлені і горизонтально або під нахилом.

Більш дешеве аналогічне обладнання виробляється фірмою Waterpumps Wp Oy (Фінляндія). Мікро-ГЕС потужністю 10-100 кВт з турбінами, розробленими на основі лопатевих насосів, виробляє чеський завод "Долні Бенешов". Їх основним недоліком є необхідність великих напорів (8-20 м), спричинена використанням у зворотних режимах насосних технологій [33].

Унікальні комплектні модулі ГЕС на напори від 1,3 м виробляються серійно фірмою SINK (Чехія). Вони найбільш придатні для утилізації енергії в системах водопостачання, навіть питної води. Комплекти оснащуються досконалою мікропроцесорною системою автоматичного регулювання вихідних параметрів генератора і забезпечують максимальний ККД гідромашин. В основному, останні працюють паралельно з електромережею. Гідротурбіни безкавітаційні і водночас є аераторами води. Поперечноструйні

турбіни даного виробника найбільш конкурентоздатні і виготовляються на основі п'яти базових (за діаметром) робочих колес, що дозволило майже без додаткових технологічних витрат виробляти понад 110 модифікацій гідромашин для застосування в конкретних умовах, але з високими значеннями ККД і необхідної зони регулювання режиму.

На жаль, поки що немає вітчизняних аналогів зазначених агрегатів, очевидно, у зв'язку з відсутністю їх розглянутого застосування. Якщо ж імпортувати більш придатне для даного виду гідроутілізації устаткування, то, з врахуванням високої вартості останнього і діючої ставки митного збору, використання його стає економічно недоцільним.

Однак, за відповідного корегування законодавчої бази щодо товарів, які імпортуються, і звільнення від мита тих з них, до яких належить і енергозберігаюче утилізаційне обладнання, впровадження останнього може стати рентабельним. Так, наприклад, в Україні діє Закон № 760-V (стаття 19) від 16.03.2007 р., згідно з яким «устаткування, яке працює на нетрадиційних та поновлюваних джерелах енергії, енергозберігаюче обладнання і матеріали, засоби вимірювання, контролю та управління витратами паливно-енергетичних ресурсів, обладнання та матеріали для вироблення альтернативних видів палива, які ввозяться на митну територію України вітчизняними підприємствами, за умови, що ці товари використовуються ними для власних потреб і якщо ідентичні товари з аналогічними якісними показниками не виробляються в Україні» звільняється від ввізного мита.

У законі, на жаль, не враховується, що виготовлені на вітчизняних підприємствах мікро-ГЕС хоча і мають практично однакові технічні параметри з імпортованими, однак ККД останніх значно вище, а при обмеженій витраті технічної води в плані підприємства (цеху) саме він є визначальним.

2 РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ВИХІДНИХ ПАРАМЕТРІВ МІКРО-ГЕС В УМОВАХ ВТОРИННИХ ВОДОТОКІВ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

2.1 Визначення енергетичних параметрів вторинних водотоків промислових підприємств

Розрахунок необхідної кількості води для охолодження металургійних агрегатів [20] полягає у визначенні її витрати при заданому тепловому потоці, тепловому навантаженні і якості [21,22, 23-27]. Необхідна кількість рідини на охолодження елементів технологічного обладнання, що не мають паспортних даних, визначається як найбільша з таких, що:

забезпечує відведення теплоти від i -го елемента, який охолоджується, $\text{м}^3/\text{год}$

$$Q_{mexi} \geq \frac{Q_{mi}}{1000 \cdot (t_{вих} - t_{ex}) \cdot C}, \quad (2.1)$$

де $Q_{mi} = q \cdot F$ – теплове навантаження на i -й елемент, що охолоджується, приймається за матеріалами інструментальних замірів, ккал/г,

q – теплова напруга, ккал/г · м²,

F – площа поверхні, що нагрівається, м²,

$t_{вих}$ – гранична температура води, °С,

t_{ex} – температура води, що поступає на охолодження, °С,

C – питома теплоємність води, ккал/кг · °С., визначається в залежності від наявності в воді механічних домішок, і розраховується виходячи з необхідної швидкості потоку, м³/год

$$Q_{cmi} \geq 3600 \cdot v_{cmi} \cdot F, \quad (2.2)$$

де v_{cmi} - швидкість в i – му елементі, що охолоджується [28], м/с;

F - площа живого перетину проточної частини i – го елемента, що охолоджується, м², виключає місцеве плівкове кипіння, тобто забезпечує теплообмін тільки за рахунок конвективного режиму, який також залежить від швидкості потоку [28], м³/г

$$Q_{mki} \geq \frac{1,32 \cdot 10^{-5}}{p^{0,2}} \cdot F^{1,2} \cdot q, \quad (2.3)$$

де p - змочений периметр елемента, що охолоджується, м.

Нормована величина необхідної кількості води на охолодження визначається за її сумарною витратою на відведення тепла від всіх нагрівальних елементів. Така норма водоспоживання і водовідведення визначається шляхом ділення річних об'ємів технічної води на річний обсяг основної номенклатури виробництва. У результаті цього в довідковій літературі і наводиться інформація за питомими нормами витрати води на одиницю продукції (на одиницю ваги готового продукту) [28]. Але вона не в повній мірі враховує специфіку конкретного підприємства (тип устаткування, що використовується і прийняту схему технологічного процесу) і може бути використана лише для приблизних розрахунків. Загальна витрата визначається за формулою [28], м³

$$Q = N \cdot q_m, \quad (2.4)$$

де N – кількість продукції, що випускається за рік, шт.,

q_m – питомі витрати води на одиницю продукції, що випускається, м³/т.

Слід мати на увазі, що в одних випадках (зокрема, для охолодження) споживання води йде майже рівномірно протягом доби, а в інших - відбувається періодично для наповнення в заданий час різних баків, ванн і т. ін. Однією зі специфічних особливостей виробничого водоспоживання є залежність у ряді випадків кількості спожитої води від її якості, зокрема (і найбільш часто) від її температури. Чим остання менше, тим, очевидно, менший і обсяг води потрібний для того ж охолоджувального ефекту. Ця обставина обумовлює зміну витрати за сезонами року: взимку він значно нижче, ніж улітку, що серйозно позначається на результатах розрахунків.

Об'єм води, який може бути використаний для вироблення електричної енергії (гідроенергетичний ресурс) у загальному обсязі її споживання підприємством значно коливається залежно від параметрів та хімічного складу води, а також виду виробництва. Так, наприклад, рідина, яка використовується на зволоження шихти і генерацію електроенергії в парогенераторах, повністю випаровується або стає частиною продукції та, відповідно, як гідроенергетичний ресурс використана бути вже не може.

Очевидно, також, що для вироблення електричної енергії придатна тільки та вторинна вода, яка відповідає вимогам, що пред'являються заводами-виробниками мікро - ГЕС. Нормативні показники систем водяного охолодження промислових підприємств [29]: температура відпрацьованої води оборотних циклів не перевищує (45...60) °С, карбонатна жорсткість (2...3) мг·екв/л, вміст суспензії (50...100) мг/л. Така вода вважається умовно чистою і може бути використана в гідротурбінах.

З вищевикладеного випливає, що обсяг спожитої підприємством технічної води не дорівнює тому, який теоретично можна використати як гідроенергетичний ресурс. Отримана цифра, як правило, не відображає реальний обсяг останнього, оскільки не враховується територіальне розташування обладнання - джерел вторинної води. Утилізація ж механічної енергії водотоку передбачає створення відповідних систем збору. На основі проведеного аналізу ряду підприємств було зроблено висновок про те, що обсяг

води, який відповідає вищевикладеним вимогам може бути розрахований таким чином:

$$Q_3 = Q_{об} - Q_е - Q_{уз}, \quad (2.5)$$

де Q_3 - об'єм загального водоспоживання, м³/рік,

$Q_е$ - споживання, яке обумовлене винесенням води продукцією, що випускається, і охолодженням останньої, м³/рік,

$Q_{уз}$ - об'єм умовно забрудненої води, що потребує очищення, м³/рік.

Якщо висота, з якої відпрацьована вода відводиться з технологічного циклу, відповідає нульовій позначці, то потенційна енергія такого потоку наближається до нуля, навіть якщо витрата її величезна. Такий водотік в даному випадку інтересу не представляє і виключається із загального обсягу споживання.

При цьому, $W_{можл}$ визначалися як [30], кВт·год

$$W_{можл} = N_{вод} \cdot t \quad (2.6)$$

де $N_{вод}$ - потужність водотоку, кВт; $N_{вод} = 9,81 \sum Q \cdot H$;

$\sum Q$ - сумарна витрата води, м³/год;

H - напір, м;

t - тривалість роботи підприємства на рік (при тризмінному графіку роботи - $t = 8760$ годин).

Зрозуміло, що частка витрат підприємств на електроенергію з часом буде зростати. Утилізація ж гідроенергетичного ресурсу може внести вагомий внесок у зменшення споживання електроенергії з електромережі.

Отриманий таким чином потенціал гідроенергетичної утилізації основних металургійних підприємств м. Запоріжжя наведено в таблиці 2.1. Загальні дані щодо обсягів водоспоживання і водовідведення кожного з об'єктів гідроенергетичної утилізації були отримані на основі офіційних нормативних документів, а об'єми вторинної води, придатної для гідроенергоутилізації і можлива вироблення електричної енергії визначені шляхом ретельного обстеження обладнання вищезгаданих підприємств.

Таблиця 2.1 - Оцінка потенціалу утилізації гідроенергетичного ресурсу підприємств

Підприємство	Об'єм води оборотного циклу		Об'єм води, придатної для гідроенергоутилізації		Можливе вироблення електроенергії за рік W_m , кВт·г
	тис.м ³ /рік	% від загального споживання	тис.м ³ /рік	%	
ПАТ «Запоріжсталь»	574554,3	80,4	458889,6	64	7502845
ПрАТ «Дніпроспецсталь»	137992,7	86,1	116903,3	72	1911369
ПрАТ «Український графіт»	12941,0	76,2	10851,4	63	211585
ПрАТ «Запорізький феросплавний завод»	19365,2	78,8	15786,0	64	258100
Всього	744853,1	81,2	602430,2	66	9883899

З таблиці випливає, що обсяг води, який можна використовувати як гідроенергетичний ресурс становить близько 66 % від загального водоспоживання. При цьому сумарна потужність водотоку перевищує 1 МВт, що цілком порівняно з потужністю гідрогенераторів, які встановлюються в руслах малих річок, а кількість виробленої електричної енергії в даному випадку досягає 9,88 млн. кВт·год на рік, вартість якої близько 7,5 млн. грн. при діючому тарифі на електроенергію для промислових підприємств.

В таблиці 2.1 наведено досить приблизні дані щодо потенціалу гідроенергетичних ресурсів різних галузей виробництва Запорізького регіону. Для більш точних розрахунків за об'єкт дослідження слід приймати не підприємство в цілому, а складові його цехів окремо. Потім, на основі зведених даних робиться висновок про обсяг гідроенергетичного потенціалу всього підприємства. Запропонований підхід дозволяє з достатньою точністю оцінити обсяги придатною для цих цілей води. Утилізація ж останнього може розглядатися як джерело додаткового електропостачання промислового підприємства.

2.2 Дослідження ефективності систем на базі модульних мікро - ГЕС

Проектування систем утилізації вторинних гідроенергетичних ресурсів промислових підприємств пов'язане з проведенням комплексу складних техніко-економічних розрахунків. Залежність вищезазначених систем від технологічного процесу підприємств призводить до нестаціонарності режимів роботи обладнання для гідроенергоутилізації, наслідком чого є недостатня визначеність його розрахункових параметрів, що використовуються при проектуванні.

Як відомо, основними складовими СИСТЕМИ ГІДРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УТИЛІЗАЦІЇ є: елементи збору води у вигляді трубопроводів і саме генеруюче обладнання - турбіна та генератор, що обертається нею. Оскільки дане устаткування, зокрема, енергомодуль мікро - ГЕС, є досить дорогим, його слід вибирати таким чином, щоб уникнути недовантаженості електрогенератора. Не менш важливим є питання енергоефективності таких систем, які окрім того повинні забезпечувати економічно доцільне вироблення електричної енергії.

Кількість потенційної енергії водотоку, яку можна утилізувати, безпосередньо залежить від розосередження джерел вторинної води, що відводиться від технологічного обладнання, та конфігурації системи збору. Для створення оптимальної топології останньої необхідно синтезувати її

математичну модель. Очевидно, що для цього, насамперед, необхідно визначити прогнозовані параметри результуючого потоку води, який буде поступати на гідротурбіну.

Як правило, режими споживання технічної води різні і визначаються видом технологічного процесу та самого устаткування, від якого вона відводиться. При цьому витрата рідини - процес нестационарний, оскільки параметри водотоку змінюються в залежності від ряду факторів, таких як: час доби та пори року, початкова температура рідини, послідовність в часі складових техпроцесу. Так, існують споживачі, добовий графік витрати води яких постійний і не залежить від динаміки техпроцесу, або змінюється у відповідності з жорсткою послідовністю, продиктованою виробничим циклом. Інші ж - мають випадковий (стохастичний) характер споживання. У результаті, однаковим циклом виробництва, одному і тому ж найменуванню обладнання відповідають різні величини витрат вторинної води.

Перелік обладнання цехів основного виробництва доцільно класифікувати по тому, як вони впливають на енергетичні параметри результуючого потоку вторинної води. Умовно їх можна розділити на три згадані вище типи: із незмінними в часі, стохастичними і жорстко прив'язаними до технологічного циклу витратами. Очевидно, що у випадку постійної витрати вторинної води і коли вона циклічно змінюється у часі, прогнозування параметрів водотоку не є складним завданням. Однак, при стохастичному характері водоспоживання і водовідведення, необхідна розробка більш складного математичного інструмента визначення зазначених параметрів за відомими статистичними даними, одержаними на об'єкті гідроенергетичної утилізації.

Крім того, з урахуванням конфігурації систем гідроенергетичної утилізації, що створюються, важливу роль будуть мати параметри потоку, що безпосередньо поступає на гідротурбіну. Тобто, наприклад, на вхід останньої, при єдиному центрі збору для кількох джерел вторинної води буде подаватися вже сумарний потік невизначеної витрати і напору. До того ж, необхідно

враховувати, що технологічні агрегати, які, відповідно, і є джерелами води, як правило, розосереджені нерівномірно по території підприємства (цеху), по різному віддаленні від центру збору і мають відмінні один від одного габаритні розміри. Все вищеперелічене призведе до невизначеності енергетичних характеристик реального сумарного водотоку, який для більш точного визначення енергоефективності системи гідроенергетичної утилізації потребує окремого моделювання.

Отже, звідси очевидно, що питання створення енергоефективних систем утилізації гідроенергетичних потенціалів промислових підприємств є досить складним, а вибір їх структури, визначення технічних характеристик елементів системи гідроенергетичної утилізації пов'язаний з проведенням великого обсягу взаємозалежних розрахунків. Для комплексного підходу до синтезу таких систем, необхідно, в першу чергу, розробити відповідні стохастичні генератори витрат вторинної води, що враховують специфіку і режими водоспоживання технологічних агрегатів, а також змоделювати реальний сумарний потік від кількох джерел вторинної води, що надходить на гідротурбіну мікро - ГЕС.

2.3 Вплив динаміки вторинного водотоку на енергетичні показники систем гідроенергоутилізації

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 [38-39]. ККД в даному випадку є функцією, аргументом якої виступає величина швидкохідності турбіни $\eta_T = f(\lambda)$. Остання визначається за відомим виразом [38]:

$$\lambda = \frac{D}{2 \cdot v} \cdot \omega, \quad (2.7)$$

де ω - частота обертання турбіни;

D - діаметр робочого колеса;

v - швидкість потоку води.

Звідси отримаємо:

$$\omega = \frac{2 \cdot \lambda \cdot v}{D}. \quad (2.8)$$

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

$$J \frac{d\omega}{dt} + f\omega = M_p - M_n, \quad (2.9)$$

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

M_p - момент тертя у підшипникових опорах турбіни і генератора,

M_n - момент навантаження, що створюється електричним генератором.

Інтегрування (2.9) дозволяє отримати вираз для визначення кутової швидкості:

$$\omega = \frac{1}{J} \int (M_m - M_c) dt, \quad (2.10)$$

де M_m - момент на валу турбіни;

$M_c = M_p + M_n$ - 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 системи гідроенергетичної утилізації розраховується сумарна потужність водотоку, що дорівнює сумі потужностей $N_{p\gamma}$ в окремих центрах збору:

$$N_{\gamma} = \sum_{p=1}^q N_{p\gamma} \cdot \quad (2.11)$$

Енергія, що виробляється генераторами, визначається згідно з виразом:

$$W_{\gamma} = \sum_{p=1}^q W_{p\gamma}, \quad (2.12)$$

а для кожного з центрів збору вона дорівнює:

$$W_{p\gamma} = N_{p\gamma} \cdot T \cdot \mu_{tp} \cdot \mu_{gp}, \quad (2.13)$$

де T – проміжок часу,

μ_{tp} і μ_{gp} - ККД турбіни і генератора, відповідно.

Так, наприклад, як було встановлено і підтверджено в [28-30], водоспоживання доменних печей № 4, 5 ПАТ «Запоріжсталь» має випадковий (стохастичний) характер, величини витрат коливаються в межах від 1550 до

2400 м³/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 підпорядковується встановленому закону розподілення ймовірностей [27]. 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 $\gamma = \overline{1 \dots L}$ - 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.

Отже, вищезазначене доводить, що нестабільність потоку негативно впливає на роботу обладнання для гідроенергоутилізації і призводить до завищення потужності обраних генераторів і діаметрів трубопроводів, що, в свою чергу, спричиняє збільшення вартості системи гідроенергетичної

утилізації взагалі. Тому для уникнення вищезгаданих наслідків необхідно впроваджувати додаткові технічні заходи, які дадуть змогу застабілізувати потік води і, відповідно, вирішити проблему не повної завантаженості обладнання, тобто вийти на максимально можливу виробничу потужність.

Отже, при визначенні енергетичних показників системи гідроенергетичної утилізації, що проектуються, нестабільність вторинного водотоку повинна обов'язково враховуватися. Останнє дозволить більш точно визначити параметри таких систем шляхом застосування стохастичних генераторів, що моделюють реальний потік, який надходить на гідротурбіну. Очевидно, що розрахунок необхідно починати з аналізу характеру водоспоживання кожного з джерел об'єкта гідроенергетичної утилізації. Динамічний характер сумарного потоку води негативно впливає на ефективність системи гідроенергетичної утилізації, а також призводить до зменшення кількості згенерованої електричної енергії і може викликати погіршення показників її якості.

2.4 Постановка задачі щодо розробки системи керування

Проектування систем утилізації вторинних гідроенергетичних ресурсів промислових підприємств пов'язане з проведенням комплексу складних техніко-економічних розрахунків. Залежність вищезазначених систем від технологічного процесу підприємств призводить до нестаціонарності режимів роботи обладнання для гідроенергоутилізації, наслідком чого є недостатня визначеність його розрахункових параметрів, що використовуються при проектуванні.

Як відомо, основними складовими системи гідроенергетичної утилізації є: елементи збору води у вигляді трубопроводів і саме генеруюче обладнання - турбіна та генератор, що обертається нею. Оскільки дане устаткування, зокрема, енергомодуль мікро-ГЕС, є досить дорогим, його слід вибирати таким чином, щоб уникнути недовантаженості електрогенератора. Не менш важливим

є питання енергоефективності таких систем, які окрім того повинні забезпечувати економічно доцільне вироблення електричної енергії.

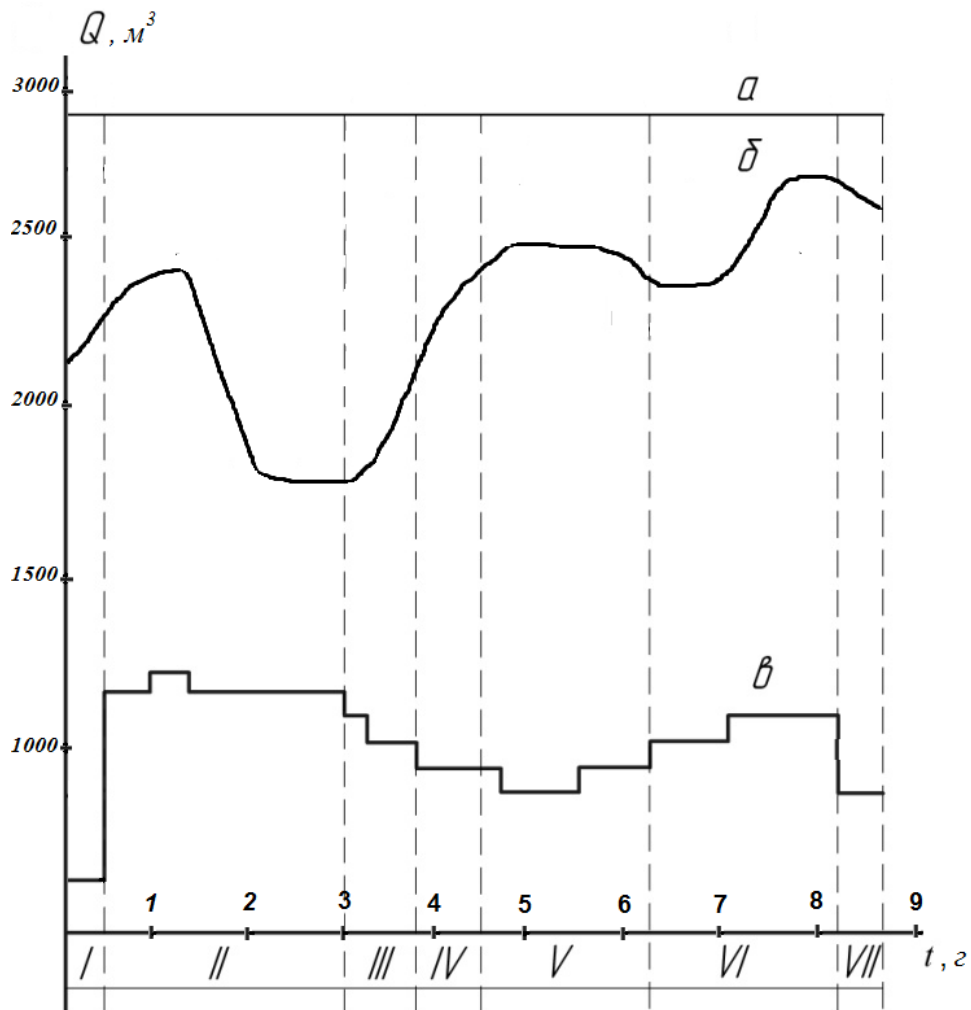
Кількість потенційної енергії водотоку, яку можна утилізувати, безпосередньо залежить від розосередження джерел вторинної води, що відводиться від технологічного обладнання, та конфігурації системи збору (підрозділ 1.2). Для створення оптимальної топології останньої необхідно синтезувати її математичну модель. Очевидно, що для цього, насамперед, необхідно визначити прогнозовані параметри результуючого потоку води, який буде поступати на гідротурбіну.

Як правило, режими споживання технічної води різні і визначаються видом технологічного процесу та самого устаткування, від якого вона відводиться. При цьому витрата рідини - процес нестационарний, оскільки параметри водотоку змінюються в залежності від ряду факторів, таких як: час доби та пори року, початкова температура рідини, послідовність в часі складових техпроцесу. Так, існують споживачі, добовий графік витрати води яких постійний і не залежить від динаміки техпроцесу, або змінюється у відповідності з жорсткою послідовністю, продиктованою виробничим циклом. Інші ж - мають випадковий (стохастичний) характер споживання. У результаті, однаковим циклам виробництва, одному і тому ж найменуванню обладнання відповідають різні величини витрат вторинної води.

Перелік обладнання цехів основного виробництва доцільно класифікувати по тому, як вони впливають на енергетичні параметри результуючого потоку вторинної води. Умовно їх можна розділити на три згадані вище типи: із незмінними в часі, стохастичними і жорстко прив'язаними до технологічного циклу витратами. Відповідні їм графіки представлені на рисунку 2.1.

Очевидно, що у випадку постійної витрати вторинної води і коли вона циклічно змінюється у часі, прогнозування параметрів водотоку не є складним завданням. Однак, при стохастичному характері водоспоживання і водовідведення, необхідна розробка більш складного математичного

інструмента визначення зазначених параметрів за відомими статистичними даними, одержаними на об'єкті гідроенергетичної утилізації.



$a - Q = \text{const}$; b - стохастичний процес водоспоживання; v - витрата охолоджуючої води, що відповідає режимам плавки в мартенівській печі (I - заправка печі; II - завалка сипучих матеріалів; III - прогрів завалених матеріалів; IV - заливка рідкого чавуну; V - плавлення; VI - доведення металу до заданого складу; VII - випуск сталі)

Рисунок 2.1 - Види графіків водоспоживання промислового обладнання

Крім того, з урахуванням конфігурації систем гідроенергетичної утилізації, що створюються, важливу роль будуть мати параметри потоку, що безпосередньо поступає на гідротурбину. Тобто, наприклад, на вхід останньої, при єдиному центрі збору для кількох джерел вторинної води буде подаватися вже сумарний потік невизначеної витрати і напору.

Крім того, з урахуванням конфігурації систем гідроенергетичної утилізації, що створюються, важливу роль будуть мати параметри потоку, що безпосередньо поступає на гідротурбіну. Тобто, наприклад, на вхід останньої, при єдиному центрі збору для кількох джерел вторинної води буде подаватися вже сумарний потік невизначеної витрати і напору. До того ж, необхідно враховувати, що технологічні агрегати, які, відповідно, і є джерелами води, як правило, розосереджені нерівномірно по території підприємства (цеху), по різному віддаленні від центру збору і мають відмінні один від одного габаритні розміри. Все вищеперелічене призведе до невизначеності енергетичних характеристик реального сумарного водотоку, який для більш точного визначення енергоефективності системи гідроенергетичної утилізації потребує окремого моделювання.

Отже, звідси очевидно, що питання створення енергоефективних систем утилізації гідроенергетичних потенціалів промислових підприємств є досить складним, а вибір їх структури, визначення технічних характеристик елементів системи гідроенергетичної утилізації пов'язаний з проведенням великого обсягу взаємозалежних розрахунків. Для комплексного підходу до синтезу таких систем, необхідно, в першу чергу, розробити відповідні стохастичні генератори витрат вторинної води, що враховують специфіку і режими водоспоживання технологічних агрегатів, а також змоделювати реальний сумарний потік від кількох джерел вторинної води, що надходить на гідротурбіну мікро-ГЕС. Вищеперелічене й повинно стати основою імітаційного математичного аналогу системи гідроенергетичної утилізації, що дозволить проводити відповідні обчислювальні дослідження та розрахунки.

2.5 Розробка стохастичного генератора витрат вторинних водотоків промислових підприємств

В роботі розроблено математичну модель (стохастичний генератор) вторинних водотоків з метою більш точного розрахунку параметрів систем

утилізації гідроенергетичного потенціалу промислових підприємств. Моделювання потоку відпрацьованої технічної води з урахуванням динаміки водоспоживання конкретного устаткування може бути здійснено на основі статистичних даних, отриманих шляхом відповідних вимірювань. Періодичність останніх має бути достатньою для визначення законів розподілу розглядуваних випадкових величин і забезпечення достатньої точності подальшого прогнозування.

Для більш точного прогнозування величини витрати технічної води розроблений стохастичний генератор повинен враховувати коливання цієї витрати відповідно до закону її розподілу. Враховуючи наведену вище класифікацію джерел технічної води, таких генераторів може бути декілька. Однак, якщо у випадку сталості витрати і її жорсткій залежності від технологічного циклу створення вищезазначених генераторів не є складним, то в третьому випадку (при стохастичному характері споживання) синтез останнього вимагає додаткових розрахунків на основі вихідних статистичних даних. Алгоритм таких розрахунків можна реалізувати за відомою схемою [41] у послідовності, наведеній на рисунку 2.2.

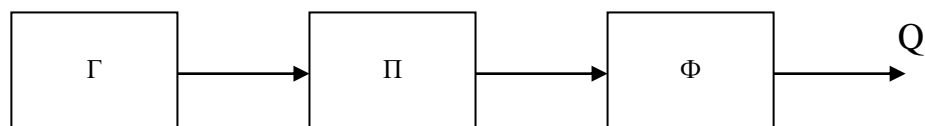


Рисунок 2.2 - Стохастичний генератор величини витрати технічної води

У блоці Г виробляється рівномірно розподілена некорельована випадкова величина в інтервалі (0,1). П - перетворювач закону розподілу (з рівномірного в заданий). Ф - фільтр, який перетворює некорельованої випадкову послідовність у корельовану із заданою автокореляційною функцією.

Як приклад наявності джерел вторинної води був розглянутий доменний цех ПАТ «Запоріжсталь», основним обладнанням якого є безперервно діючі доменні печі об'ємом 1513 м³, в яких проводиться виплавка чавуну з шихти.

Вода в даному цеху витрачається на зволоження шихти, охолодження доменних печей і арматури повітрянагрівачів, а також на інші більш дрібні потреби. Зазначені заходи необхідні для збереження кладки печі і деталей, що працюють в зоні високих температур. Кількість води, необхідної для відведення теплоти в даному випадку може бути розраховано за загальновідомими методиками [25, 26, 42].

Водопостачання зазначеного цеху може бути однозонним або двозонним. При однозонному вся охолоджуюча вода подається в холодильники доменної печі під одним загальним напором, достатнім для того, щоб вона піднялася до найвищої із потрібних точок. При двозонному - вода для нижньої частини печі (розпар, заплечики, фурмена зона, горн і лещадь) подається під зниженим, а для верхньої - під підвищеним тиском. Останнім часом водопостачання великих доменних печей влаштовують за першою схемою.

Охолодження клапанів повітрянагрівачів (циліндричної споруди у вигляді металевого кожуха, заповненого спеціальної кладкою з вогнетривкої цегли) має на меті уберегти їх від руйнування відхідними газами і повітрям, нагрітими до температури 800 ° С і більше.

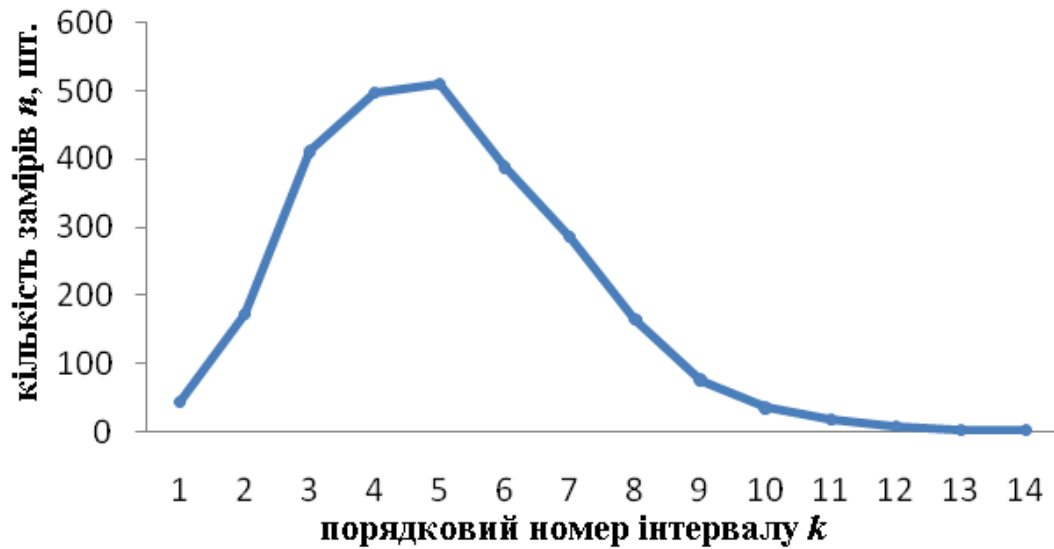
У табл. 2.1 наведені оброблені дані вимірів витрати технічної води на охолодження доменної печі № 5 вищевказаного підприємства за зимово-весняний період 2009 року, за якими побудований відповідний графік розподілу (рисунок 2.3, *a*). Сезонними коливаннями витрати в даному випадку можна знехтувати з огляду на їх незначність, оскільки температура охолоджуючої води в даному проміжку часу практично незмінна. Загальна кількість замірів із періодичністю 1 година склало $i = 2616$. Згідно [43-49], експериментальні спостереження за витратою води найбільш точно описуються законом розподілу Пуассона з відповідними параметрами λ і k :

$$P(k) = \frac{\lambda^k}{k!} \cdot e^{-\lambda}. \quad (2.14)$$

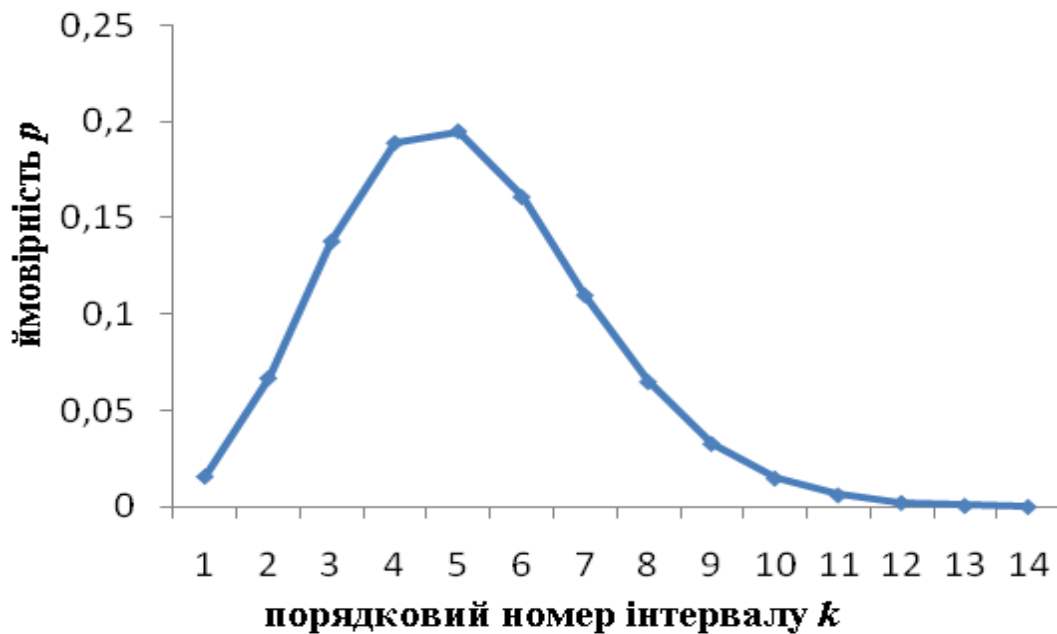
В результаті перевірки вказаної гіпотези за критерієм χ^2 було підтверджено відповідність отриманих значень цьому закону [30-32]. Параметри розподілу Пуассона у розглянутому випадку виявилися рівними: $\lambda = 4,12$ і $k = 1 \dots 14$ (рисунок 2.3, б).

Таблиця 2.2 - Дані вимірів витрати технічної води на охолодження доменної печі

№ інтервалу	Витрата, $\text{м}^3/\text{с}$	Кількість замірів
1	1550:1600	43
2	1601:1650	173
3	1651:1700	411
4	1701:1750	498
5	1751:1800	511
6	1801:1850	388
7	1851:1900	266
8	1901:1950	165
9	1951:2000	76
10	2001:2050	35
11	2051:2100	18
12	2101:2150	7
13	2151:2200	3
14	2201:2250	2



а)



б)

а) - експериментальні дані; б) - щільність ймовірності розподілу Пуассона витрат води з параметрами $\lambda = 4,12$ і $k = 1 \dots 14$.

Рисунок 2.3 - Розподіл витрат води на охолодження печі

Автокореляційна функція, що реалізується у блоці Ф, визначається за виразом [53]:

$$X(t) = \sum_{k=0}^m b_k E(t-k), j = 0; \pm 1; \pm 2; \dots, \quad (2.15)$$

де m – число інтервалів, що покривають час спаду автокореляційної функції випадкового процесу;

b_k – коефіцієнти;

$E(j-k)$ – стаціонарна одинична некорельована випадкова послідовність.

Для реалізації даного методу попередньо побудована автокореляційна функція витрати технічної води (рисунок 2.4) і розраховані значення коефіцієнтів b_k шляхом розв'язання системи рівнянь:

$$R(0) = \sum_{k=0}^m b_k^2;$$

$$R(1) = \sum_{k=0}^m b_k b_{k+1}; \quad (2.16)$$

.....

$$R(m) = b_1 b_0,$$

де R_k – значення центрованої автокореляційної функції для відповідних $k = \overline{1, m}$.

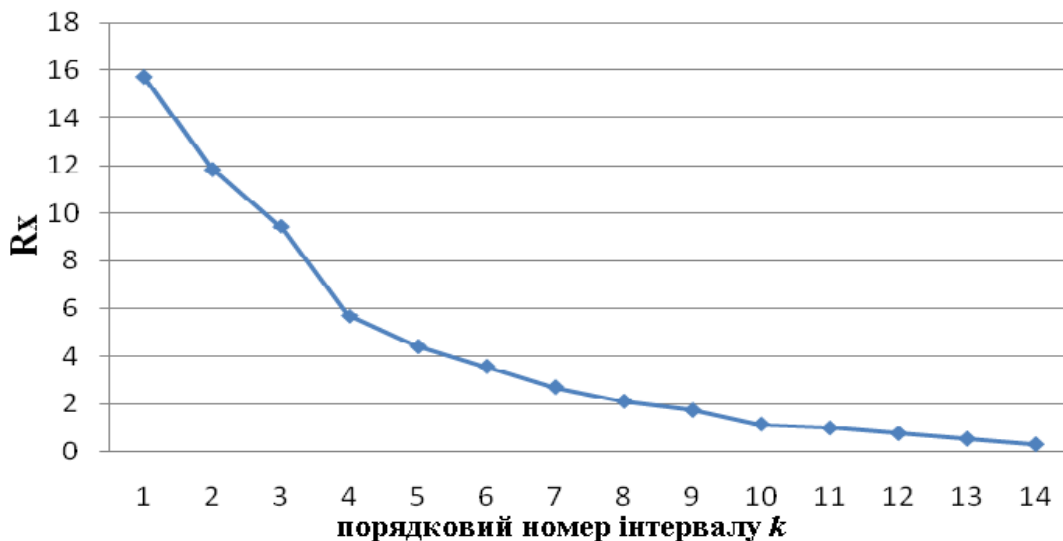


Рисунок 2.4 - Автокореляційна функція витрати

Визначимо коефіцієнти b_k при автокореляціях $R_X(k)$.

$$R_X(k=0) = b_1^2 + b_2^2 + b_3^2 + b_4^2 + b_5^2 + b_6^2 + b_7^2 + b_8^2 + b_9^2 + b_{10}^2 + b_{11}^2 + b_{12}^2 + b_{13}^2 + b_{14}^2,$$

$$R_X(k=1) = b_1b_2 + b_2b_3 + b_3b_4 + b_4b_5 + b_5b_6 + b_6b_7 + b_7b_8 + b_8b_9 + b_9b_{10} + b_{10}b_{11} + b_{11}b_{12} + b_{12}b_{13} + b_{13}b_{14}$$

$$R_X(k=2) = b_1b_3 + b_2b_4 + b_3b_5 + b_4b_6 + b_5b_7 + b_6b_8 + b_7b_9 + b_8b_{10} + b_9b_{11} + b_{10}b_{12} + b_{11}b_{13} + b_{12}b_{14},$$

$$R_X(k=3) = b_1b_4 + b_2b_5 + b_3b_6 + b_4b_7 + b_5b_8 + b_6b_9 + b_7b_{10} + b_8b_{11} + b_9b_{12} + b_{10}b_{13} + b_{11}b_{14},$$

$$R_X(k=4) = b_1b_5 + b_2b_6 + b_3b_7 + b_4b_8 + b_5b_9 + b_6b_{10} + b_7b_{11} + b_8b_{12} + b_9b_{13} + b_{10}b_{14},$$

$$R_X(k=5) = b_1b_6 + b_2b_7 + b_3b_8 + b_4b_9 + b_5b_{10} + b_6b_{11} + b_7b_{12} + b_8b_{13} + b_9b_{14},$$

$$R_X(k=6) = b_1b_7 + b_2b_8 + b_3b_9 + b_4b_{10} + b_5b_{11} + b_6b_{12} + b_7b_{13} + b_9b_{14},$$

$$R_X(k=7) = b_1b_8 + b_2b_9 + b_3b_{10} + b_4b_{11} + b_5b_{12} + b_6b_{13} + b_7b_{14},$$

$$R_X(k=8) = b_1b_9 + b_2b_{10} + b_3b_{11} + b_4b_{12} + b_5b_{13} + b_6b_{14},$$

$$R_X(k=9) = b_1b_{10} + b_2b_{11} + b_3b_{12} + b_4b_{13} + b_5b_{14},$$

$$R_X(k=10) = b_1b_{11} + b_2b_{12} + b_3b_{13} + b_4b_{14},$$

$$R_X(k=11) = b_1b_{12} + b_2b_{13} + b_3b_{14},$$

$$R_X(k=12) = b_1b_{13} + b_2b_{14},$$

$$R_X(k=13) = b_1b_{14}.$$

У табл. 2.3 наведені значення коефіцієнтів b_k при $k = \overline{0,13}$, які були отримані шляхом розв'язання системи рівнянь у середовищі Mathcad.

Таблиця 2.3 - Коефіцієнти b_k автокореляційної функції

k	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
b_k	0,241	0,031	0,128	0,154	0,38	0,11	0,52	0,33	1,03	0,01	1,89	2,17	2,04	1,29

Таким чином можна синтезувати стохастичні генератори витрат за всіма джерелами вторинної води цеху на основі їх прогнозованих величин, попередньо оцінити потужність сумарного водотоку і зробити вибір необхідного гідроенергетичного обладнання [34]. Проведені дослідження є

черговим етапом зі створення методики синтезу систем утилізації гідроенергетичного потенціалу промислових підприємств.

2.6 Модель автоматизованої системи регулювання вихідних параметрів мікро-ГЕС

Як було визначено, сумарний потік вторинної води, що поступає на гідротурбіну, зазвичай має нестационарний характер, його параметри змінюються в часі з певним інтервалом. Очевидно, що така нестабільність може впливати на показники якості електричної енергії, що виробляється електричним генератором, і можливість її подальшого використання в електромережі підприємств для живлення основної маси споживачів ставиться під сумнів.

Для аналізу впливу нестабільності потоку вторинної води на енергетичні характеристики систем гідроенергетичної утилізації [21-23], було створено математичну модель такої системи і реалізовано в середовищі Simulink [24]. Вона складається з енергетичного модуля, який представлено асинхронним двигуном 1, що працює в генераторному режимі, і стохастичного генератора витрати води 2. За наявності декількох джерел останньої, витрата з окремих джерел підсумовується за допомогою суматора 6 і таким чином на вході в гідротурбіну маємо реальний сумарний потік вторинної води. Також в моделі застосовується допоміжне обладнання: вимірювальні прилади 4 і конденсаторна система збудження 5. Електрична мережа промислового підприємства моделюється блоком 3.

Дослідження проводилися на прикладі реального промислового підприємства ПАТ «Запоріжсталь», а саме доменного цеху, де для гідроенергетичної утилізації потоку вторинної води від двох доменних печей була розрахована оптимальна система збору і підібране відповідне обладнання згідно з алгоритмом [26]. Також, в системі, що моделюється, передбачена

робота АГ як в автономному режимі, так і паралельно з мережею. Для цього використовуються відповідні перемикачі 7.

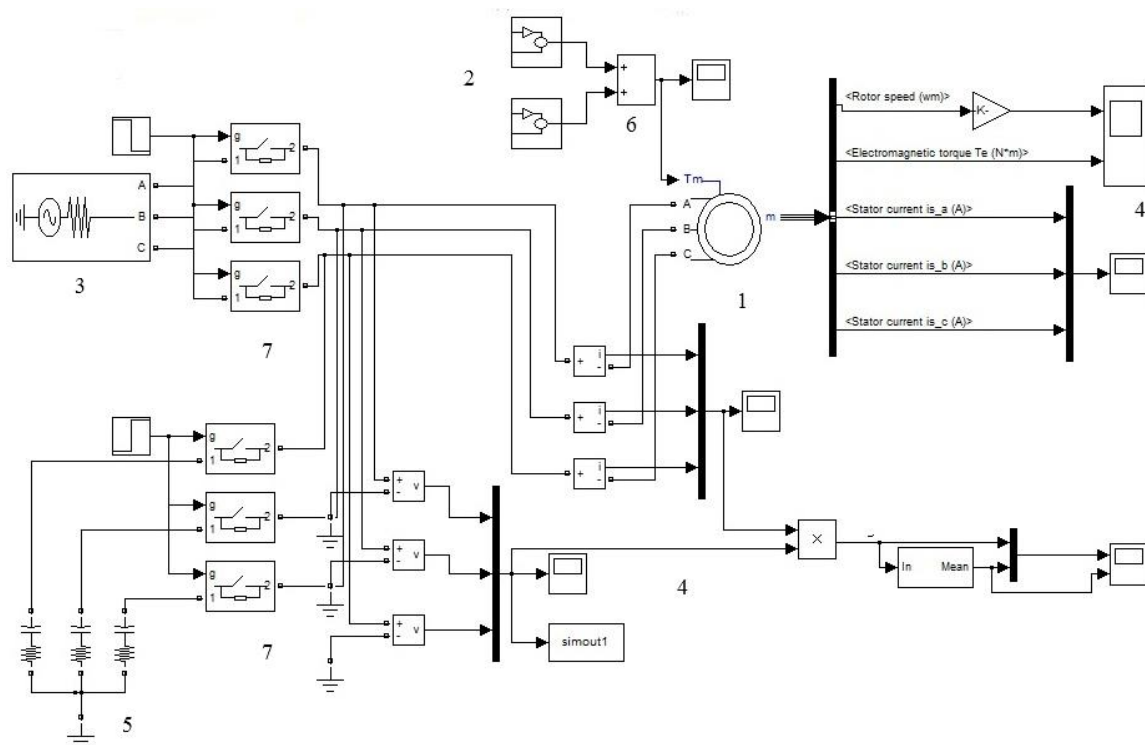


Рисунок 2.5 – Модель автоматизованої системи регулювання вихідних параметрів мікро-ГЕС в умовах вторинних водотоків підприємств

У якості генератора був використаний двигун потужністю 110 кВт. Останній використовується в мікро-ГЕС типу 100 Пр, яка, як правило, застосовується як автономне джерело електричної енергії і не потребує підживлення від мережі, але, в такому випадку, роботу асинхронної машини у якості генератора можливо забезпечити, якщо подавати в обмотку статора необхідну реактивну потужність від батареї конденсаторів. В загальному випадку, ємність, що необхідна для отримання номінальної напруги асинхронного генератора може бути визначена за виразом [17]:

$$C = P_{ном} \cdot (tg\varphi_2 + tg\varphi_n) / (2 \cdot \pi \cdot f \cdot m \cdot U_c^2), \quad (2.17)$$

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

U_c - напруга на конденсаторах,

f - частота струму,

m - кількість фаз,

φ_2, φ_n - максимальні кути зсуву фаз між напругою і струмами генератора та навантаження. Для двигуна вищезазначеної потужності, у випадку автономної роботи мікро-ГЕС, згідно формули (2.17), достатньо ємності 1065 мкФ на кожен фазу.

Сумарний потік від двох вищезазначених незалежних джерел, який поступає на гідротурбінну, моделюється статистичними генераторами (рисунок 2.6), які складаються з блоку 8, що видає некорельовані послідовності витрати вторинної води, блоку автокореляції 9, і блоку 10, який моделює запізнення $\tau_{кр}$ витрати одного джерела відносно іншого на певний час.

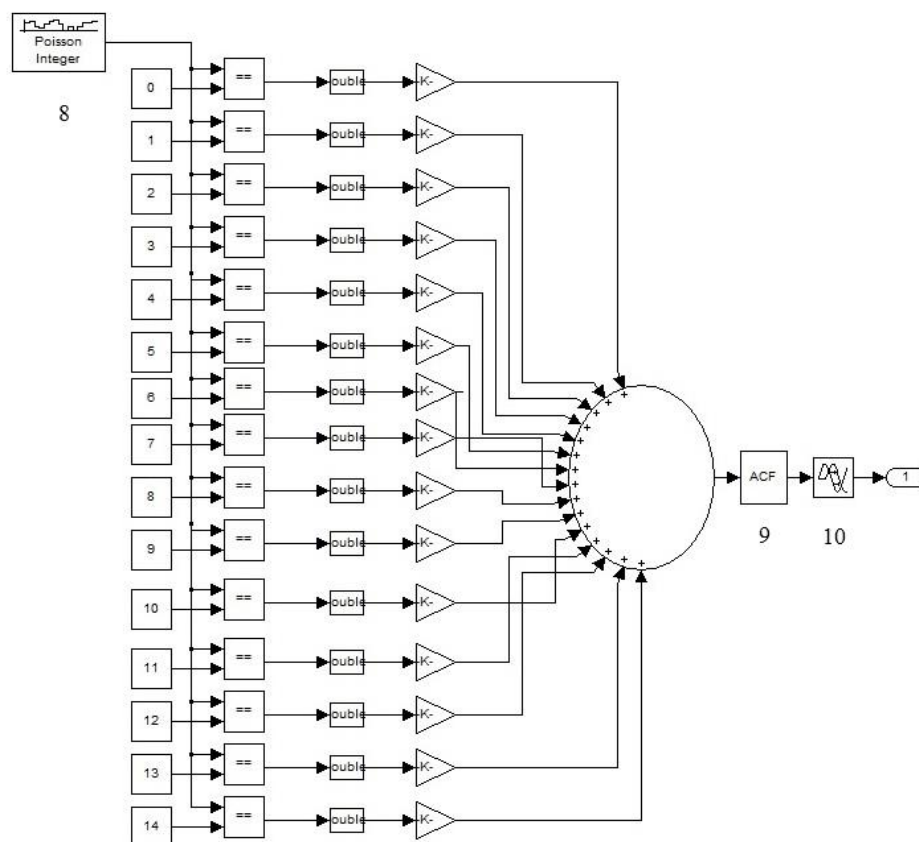
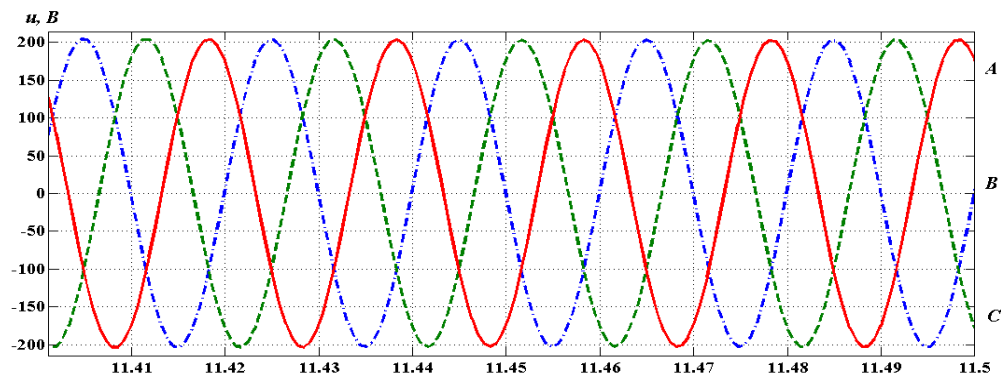
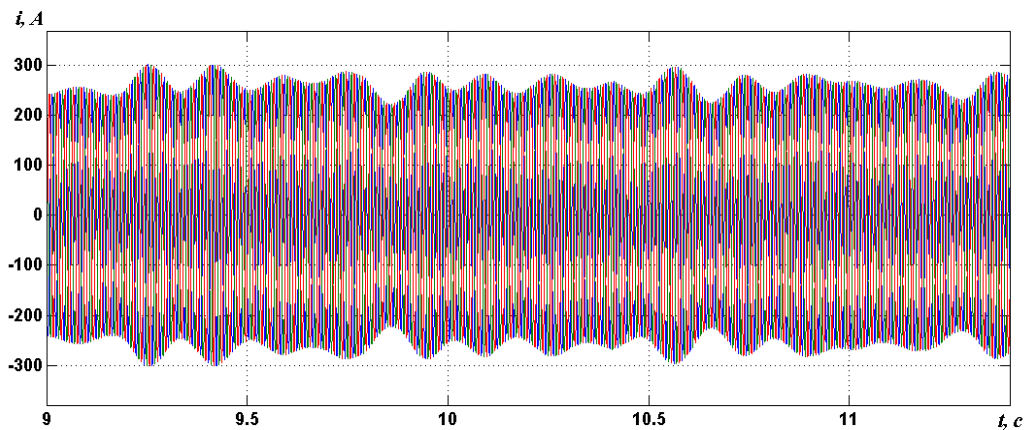


Рисунок 2.6 - Модель статистичного генератора витрати вторинної води, реалізований в середовищі Simulink

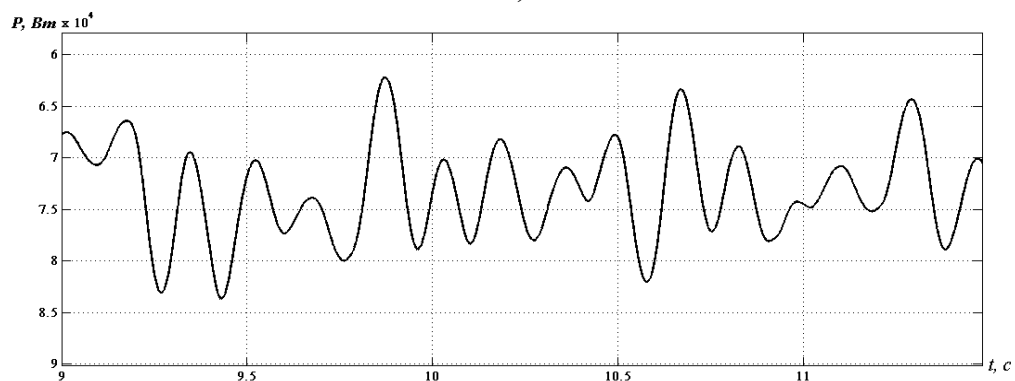
Наведена модель системи гідроенергетичної утилізації дозволяє з достатньою точністю відстежувати динаміку величин, що отримуємо на виході електрогенератора. Основні діаграми, що відображають вищезгадані параметри, при роботі генератора на мережу, приведені на рисунку 2.7.



а)



б)



в)

а - статорні напруги; б - статорні струми; в – активна потужність

Рисунок 2.7 - Динаміка електричних величин на виході АГ при його роботі на мережу

Оскільки робота указаної системи здійснюється паралельно з симетричною мережею, то, як видно із діаграм, нестаціонарність потоку призводить лише до коливань величини статорних струмів і активної потужності, що генерується. Загальна несинусоїдальність за гармоніками склала лише 0,03 % при допустимій 8%. Середня величина активної потужності, що виробляється, склала близько 82 кВт. Очевидно, що при переході в автономний режим і безпосередньому підключенні до затискачів генератора навантаження, дані параметри можуть суттєво змінитися. Наприклад, при активно-індуктивному навантаженні 15 кВт та без системи стабілізації вихідних параметрів електричного генератора, отримуємо наступні результати: відхилення за частотою $+1,2$ Гц (встановлена гранична норма $\pm 0,4$ Гц), коефіцієнт несинусоїдальності – 13 %.

Відповідно, електричну енергію зазначеної вище якості використовувати для живлення більшості споживачів неприпустимо. Отже, нестаціонарність сумарного вторинного водотоку призводить до зменшення кількості виробленої електричної енергії в середньому на 18% - 32%, а також до необхідності завищення потужності електрогенераторів і діаметрів трубопроводів, спричиняє збільшення вартості системи утилізації. Тому для уникнення вищезгаданих наслідків необхідне впровадження додаткових технічних заходів, які дадуть змогу вирішити проблему, тобто вийти на максимально можливу виробничу потужність.

2.7 Застосування конформних відображень для управління системою збудження мікро - ГЕС в умовах нестаціонарних водотоків

Розвиток систем автоматичного управління (САУ) спрямовано на розробку регуляторів, що дозволяють забезпечити необхідну якість сталих і перехідних режимів роботи для нелінійних об'єктів при різних початкових

умовах і обмеженнях [40]. При цьому, для нелінійних об'єктів необхідно враховувати:

- не виконується принцип суперпозиції, тому дослідження нелінійної системи при декількох впливах не можна зводити до дослідження їх суми при одному впливі;

- стійкість і характер перехідного процесу залежать від величини початкового відхилення від положення рівноваги;

- при фіксованих зовнішніх впливах можливі кілька положень рівноваги.

Рішення даної наукової проблеми може бути досягнуто, якщо при формуванні закону управління помилку САУ уявити не в матеріальному, а в комплексному вигляді. Для цього вводиться визначення комплексної площини помилок САУ, дійсна вісь R якої збігається з вектором входів (заданої уставки) r , а уявна вісь I зміщена на кут $\pi/2$ в декартовій системі координат і фізично визначає запізнювання в об'єкті управління. Тоді комплексна помилка САУ відповідає точці на комплексній площині S , яка визначається векторною різницею значень вектора виходу об'єкта управління і вектора входу (уставки) $E = y - r$, що дозволить врахувати запізнювання і можливо невідомий порядок об'єкта управління, впливу перешкод n і збурень d .

У роботі пропонується застосування перетворення Гільберта аналітичних сигналів для вимірювання комплексної помилки САУ, її дійсної і уявної складових в декартовій системі координат, а також модуля і аргументу в полярній системі координат. Використовуючи теорію функції комплексного змінного, розглянуто підхід до розробки САУ на основі комплексної помилки, що пропонує формування закону керування як конформного перетворення траєкторії комплексної помилки у вихідній комплексній площині S в початок координат перетвореної комплексної площини S^{\wedge} , де її значення дорівнює 0.

Приклад застосування такого підходу наведено застосовано в автоматичному регуляторі збудження (АРЗ) асинхронного генератора, що включає в себе автоматичний регулятор напруги (АРН) і стабілізатор коливань

потужності (PSS - power system stabilizer). Реалізовано підхід з використанням системи обчислень MATLAB.

Сучасні САУ на основі алгоритмів, які не потребують докладної інформації про об'єкт управління, але здатних виконати ідентифікацію, структурну та параметричну оптимізацію регулятора, базуючись на вимірюванні входів і виходів. Структура регулятора САУ визначається взаємодією установки датчиків, що дозволяють організувати необхідні зворотні зв'язки (33). Так як 33 визначається циклічно взаємодією окремих частин САУ, то, як відомо, існує фазове запізнювання в контурі 33 між сигналами виходу і входу об'єкта управління.

Фазове запізнення $\Delta\varphi$ об'єкта управління, дійсна E_R і уявна E_I складові комплексної помилки E в декартовій системі координат, модуль E і аргумент δ комплексної помилки в полярній системі координат будуть визначатися із відповідних геометричних співвідношень (рисунок 2.8).

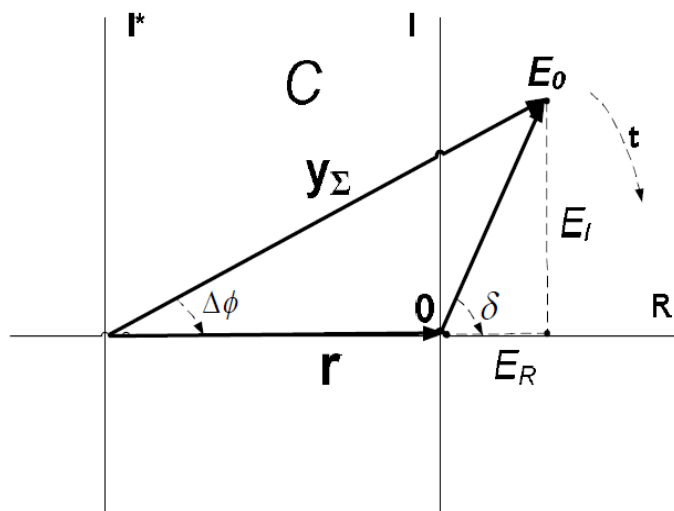


Рисунок 2.8 - Графічна інтерпретація комплексної помилки

Для використання інформації про динаміку взаємодії сигналів входів і виходів об'єкта управління використовується поняття комплексної помилки САУ. Тобто, комплексною помилкою САУ E називається різниця між вектором виходу об'єкта управління u_{Σ} і вектором входу r , представлена на

комплексній площині $R - I$, де вісь R визначена напрямком вектора входу r , а вісь I зміщена на кут $\pi/2$ в декартовій системі координат: $E = y_{\Sigma} r = E_R + j E_I$, де $j = \sqrt{-1}$, E_R і E_I - дійсна і уявна складові комплексної помилки.

$$\Delta\varphi = \operatorname{arctg}\left(\frac{E_I}{r + E_R}\right) = \operatorname{arcsin}\left(\frac{E_I}{y_{\Sigma}}\right);$$

$$\delta = \operatorname{arcsin}\left[\frac{y_{\Sigma} \cdot \sin(\Delta\varphi)}{r^2 + y_{\Sigma}^2 - 2r \cdot y_{\Sigma} \cdot \cos(\Delta\varphi)}\right]$$

$$E^2 = r^2 + y_{\Sigma}^2 - 2 \cdot r \cdot y_{\Sigma} \cdot \cos(\Delta\varphi); \quad (2.18)$$

$$E_R = y_{\Sigma} \cdot \cos(\Delta\varphi) - r = E \cdot \cos\delta;$$

$$E_I = y_{\Sigma} \cdot \sin(\Delta\varphi) = E \cdot \sin\delta$$

де C - позначення на комплексній площині помилки САУ,

r - модуль вектора уставки,

y_{Σ} - модуль виходу об'єкта,

$\Delta\varphi$ - фазове запізнення САУ, яке визначається в декартовій системі координат RI^* ;

δ - аргумент комплексної помилки в декартовій системі координат $R - I$, який визначає показову форму комплексної помилки САУ $E = Ee^{j\delta}$.

Фазове запізнення $\Delta\varphi$ може бути визначене з використанням перетворення Гільберта аналітичних сигналів входів і виходів об'єкта

управління. Аналітичний сигнал являє собою суму двох ортогональних сигналів, всі гармонійні складові яких зміщені по фазі на $\pi/2$ для якого можуть бути визначені поняття згинаючої, миттєвої фази та миттєвої частоти [40, 41]. Уявна частина аналітичного сигналу $Z_S(t)$ є комплексно поєднаною з його дійсною частиною $\text{Re } Z_S(t) = s(t)$ і визначається через перетворення Гільберта (НТ):

$$\text{Im } Z_S(t) = \tilde{s}(t) = \text{HT}[s(t)]. \quad (2.19)$$

Важливо відзначити, що структура комплексної помилки управління, тобто її дійсна і уявна складові в декартовій системі координат або модуль і аргумент у полярній системі координат, дозволяють визначати запізнювання в об'єкті управління і, виходячи з виміряного значення, формувати закон управління САУ.

Визначення помилки управління САУ у вигляді комплексного числа дозволяє використовувати для розробки регулятора математичний апарат теорії функції комплексного змінного. Фізично можлива область аргументу комплексної помилки САУ в декартовій системі координат R-I визначається принципом причинності і обмежена верхньою півплощиною.

Регулятор з використанням конформного відображення застосований для моделі «асинхронний генератор-шини нескінченної потужності» (АГ-ШНП), як автоматичний регулятор напруги (АРН) і стабілізатор коливань потужності (PSS - power system stabilizer) асинхронного генератора у відповідності зі структурою САУ, визначаються два квадратурних входу об'єкта управління.

Використовуючи властивість трьох точок [42] дрібно - лінійного перетворення (9), розглянемо точки $E_1 = -r$, $E_2 = 0$, $E_3 = r$, що лежать на осі R площині C комплексної помилки, які повинні відобразитися у відповідні точки $E_1^{\wedge} = -r$, $E_2^{\wedge} = -jr$, $E_3^{\wedge} = r$ окружності, розташованої в комплексній площині C^{\wedge} , рисунок 2.9:

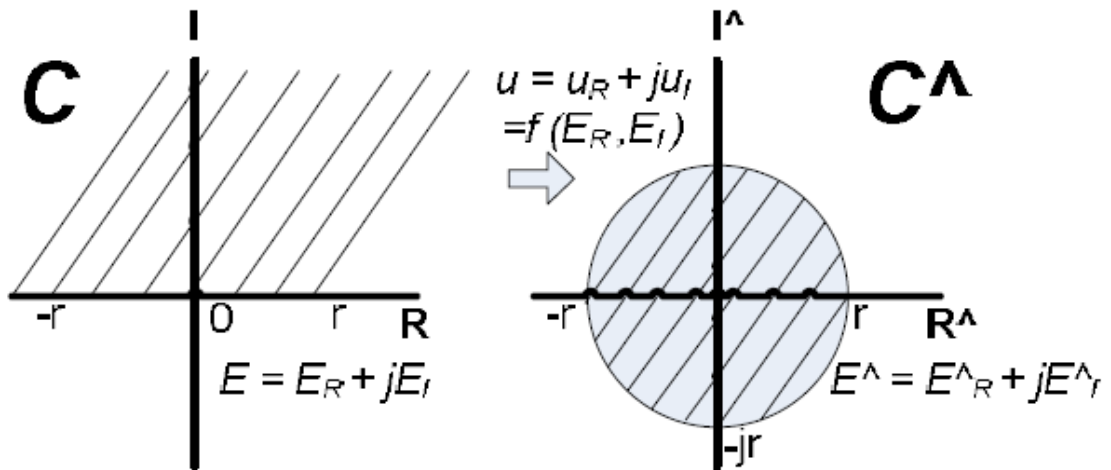


Рисунок 2.9 - Закон управління САУ як конформне перетворення верхньої півплощини у нутро окружності одиничного радіуса при $r \rightarrow 0$.

Отримана САУ інтегрована в структуру системи збудження, яку наведено на рисунку 2.10, 2.11. Дані експерименту наведено на рисунку 2.12, 2.13.

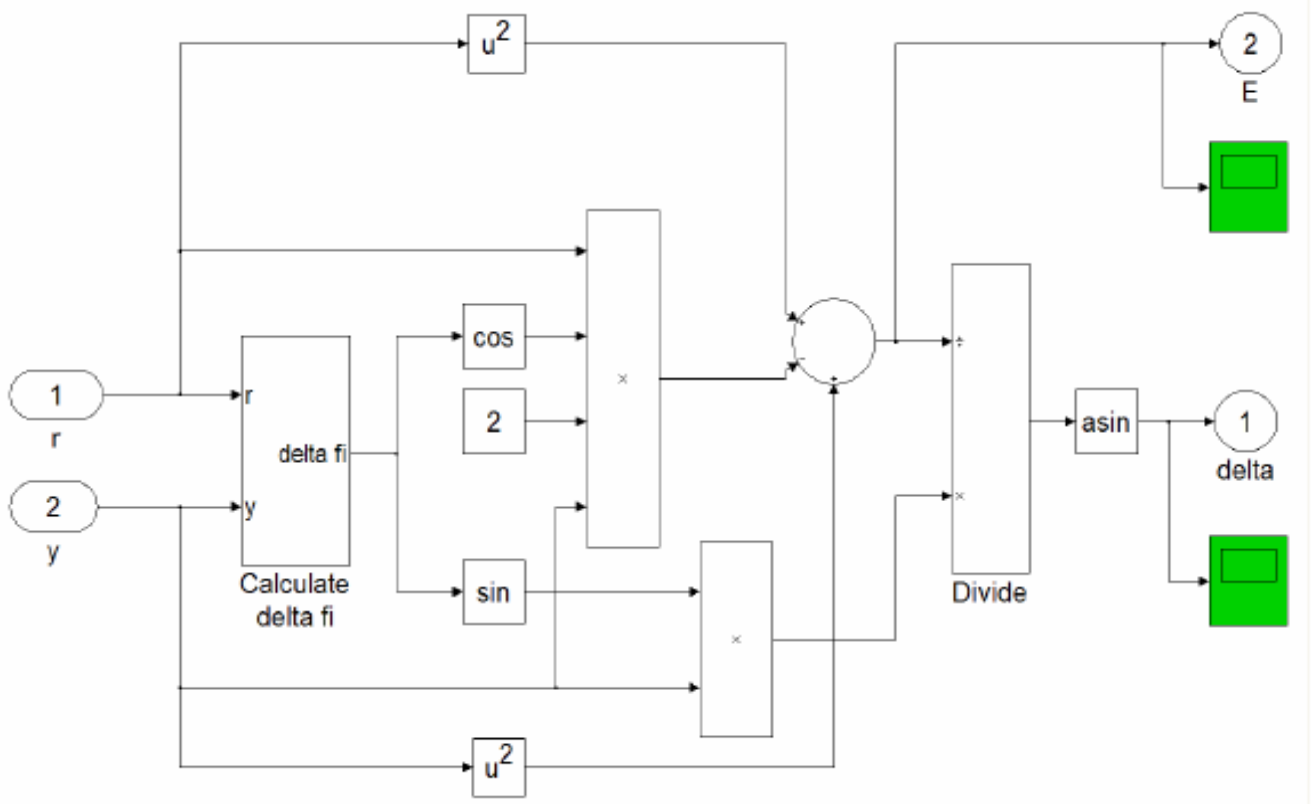


Рисунок 2.10 - Блок «COMPLEX ERROR»

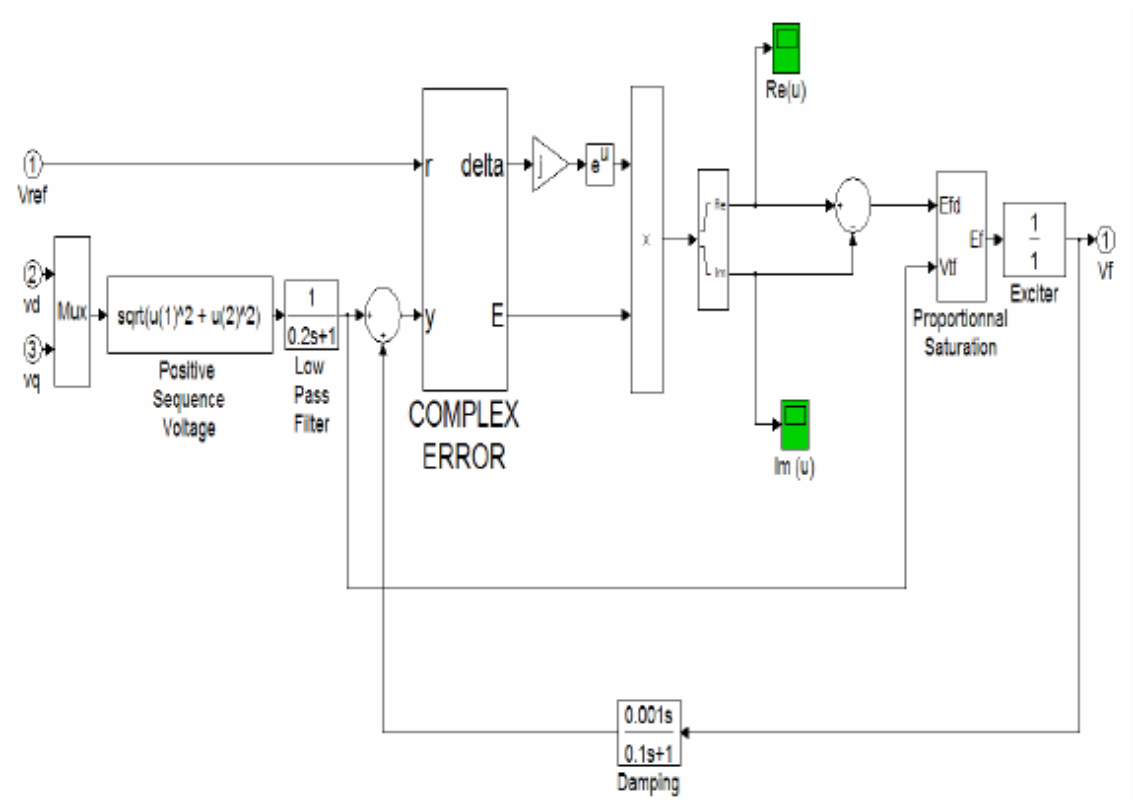


Рисунок 2.11 - Система збудження з використанням закону керування

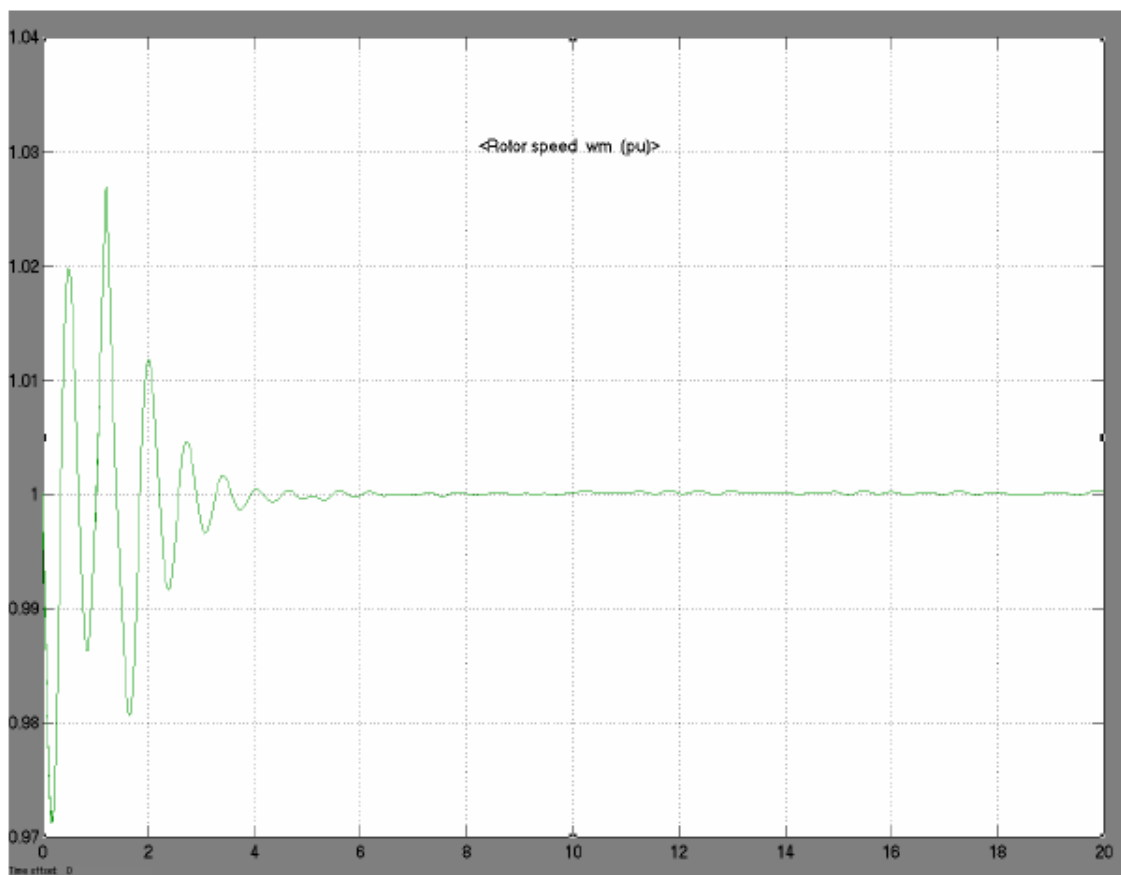


Рисунок 2.12 - Зміна частоти обертання генератора ω

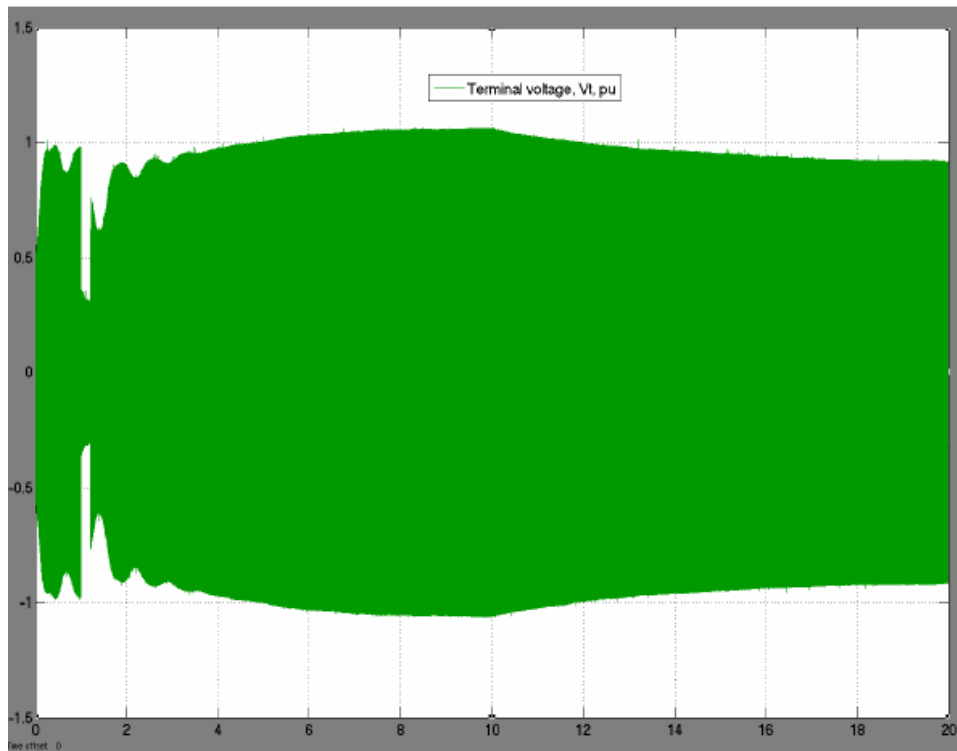


Рисунок 2.13 - Зміна напруги статора генератора

Отже, в якості закону управління САУ розглянуто використання конформного відображення верхньої півплощини площини комплексної помилки, дійсна вісь якої збігається з напрямком вектора входів САУ, в центр одиничного кола перетвореної комплексній площині, де помилка управління дорівнює нулю. Визначено умови, при яких САУ об'єктом управління може бути представлена у вигляді конформного відображення.

3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ РОЗРАХУНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ
ВПРОВАДЖЕННЯ МОДУЛЬНИХ МІКРО - ГЕС
ІЗ ЗАПРОПОНОВАНОЮ СИСТЕМОЮ КЕРУВАННЯ

3.1 Аналіз водоспоживання ПАТ «Запоріжсталь»

До складу доменного цеху входять 5 доменних печей, 20 кауперів, 4 машини розливання чавуну, рудний двір з вагонами-перекидачами, шлакові відвали.

Всі печі працюють із тиском під колошником (0,8...12) атм, температура дугтя (1100...1200) °С. Дугтя збагачене киснем до (22...23) %.

Доменні печі №1,2, пущені відповідно, в 1933, 1934 р. мали корисний об'єм по 930 м³, а в 1959 р. доменна піч №2 була доведена до корисного об'єму 1513 м³. Через низьку продуктивність доменної печі №1. морального й фізичного старіння, ухвалено рішення її зупинити й у 2006 році демонтувати.

Доменна піч №3, пущена в 1938 р. мала корисний об'єм 1300 м³, в 1971 році корисний об'єм доведений до 1513 м³. Доменна піч №4 1940-1948 р. мала корисний об'єм 1239 м³. В 1961 році корисний об'єм доведений до 1513 м³. Розташування доменних печей після демонтування ДП-1 на сьогодні острівне. Фонд терміну їх роботи й продуктивність представлено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Фонд терміну роботи й продуктивність доменних печей

Доменні печі	Чавун, т/рік	Фонд терміну роботи, год	Середньорічна продуктивність, т/год
ДП-2	588197,80	6122,60	96,07
ДП-3	989617,20	8760,00	112,97
ДП-4	955983,10	8705,00	109,89
ДП-5	970201,95	8499,36	114,15

Доменна піч №5 пущена в експлуатацію в 1952 році з корисним об'ємом 1386 м³. В результаті капітальних ремонтів був знижений рівень чавунної льотки, у зв'язку із чим корисний об'єм збільшений до 1410 м³. В 1967 році корисний об'єм збільшений до 1513 м³.

Водопостачання доменних печей здійснюється за оборотною схемою. Це дозволяє повернути у систему їх охолодження до 90-95 % використаної на такі цілі води.

В якості охолоджувача оборотної води застосовується бризкальний басейн, що складається з п'яти секцій. Охолодження нагрітої води здійснюється за допомогою тангенціальних сопел. Діаметр вхідного отвору сопла 50 мм, вихідного – 25 мм.

Нагріта вода від охолоджуваних елементів доменних печей самопливом надходить у 2 колектори діаметром 700 мм і по 6 трубопроводам транспортується на бризкальний басейн і циркуляційні насоси для подачі води на бризкалка.

Розміри секцій бризкального басейну:

«Д» - 40 x 28 x 2,5 (2800) м;

№1 - 40 x 28 x 2,5 (2800) м;

№2 - 40 x 28 x 2,5 (2800) м;

№3 - 50 x 50 x 2,0 (5000) м;

№4 - 50 x 44 x 2,0 (4400) м.

Охолоджена в басейні вода подається по 4 водоводам (3 водовода діаметром 1000 мм і один – 700 мм) на 2 колектори з перемичками (діаметром 800 мм і 700 мм) з подачею з них води двома трубопроводами на охолоджувані елементи доменної печі (для надійності з різних колекторів).

Оборотною водою забезпечуються холодильники поду, горна, фурмена зона, заплечики всіх доменних печей, а також шахти ДП-3,5 і шибери повітрянагрівачів ДП-5.

Холодильники шахти ДП-2,4 і шибери повітрянагрівачів ДП-2,3,4 працюють на випарному охолодженні. Підживлення системи випарного

охолодження (СВО) здійснюються знесолею водою, вироблюваною хімводоочищенням ТЕЦ.

Пара від ДП-2 подається в паропровід низького тиску ТЕЦ, від ДП-3,4 – випускається в атмосферу.

Для зовнішнього охолодження кожуха по периметрі печі укладають три кільцеві перфоровані труби діаметром 80 мм. Всі кільцеві трубопроводи збирають із чотирьох відсіків. Для зручності ремонту й очищення відсіки збирають на болтових фланцевих з'єднаннях.

Структуру водоспоживання і водовідведення ПАТ «Запоріжсталь» наведено в таблиці 3.2, а відповідну діаграму на рисунку 3.1.

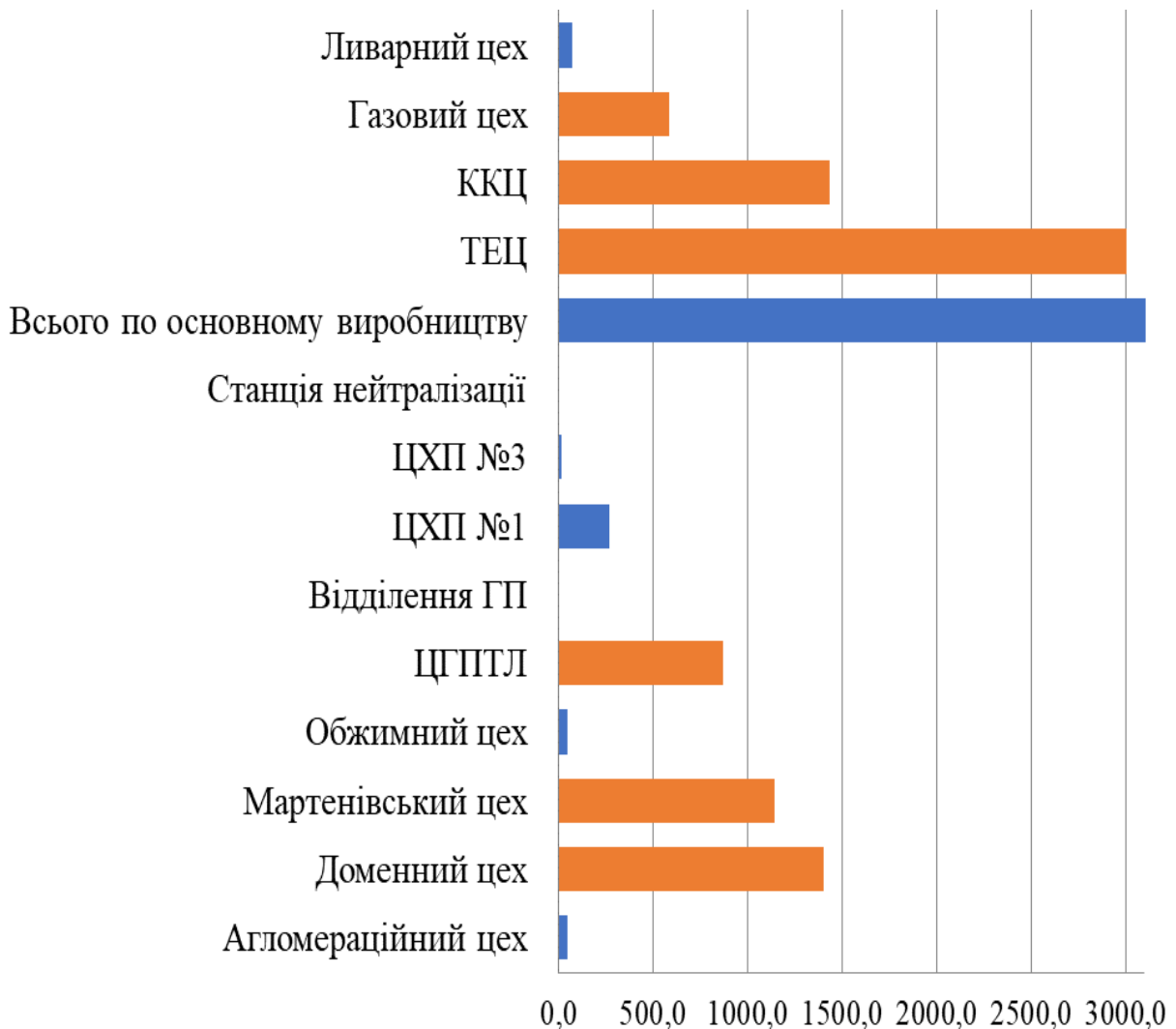


Рисунок 3.1 – Діаграма водоспоживання ПАТ «Запоріжсталь»

Таблиця 3.2 – Водоспоживання ПАТ «Запоріжсталь»

Назва структурної одиниці	Річне водоспоживання				
	Загальне	Оборотний цикл		Охолодження обладнання	
		м ³	м ³	%	м ³
Агломераційний цех	5679651	-	-	1292473	23
Доменний цех	71648748	58819873	82	65562259	92
Мартенівський цех	52547860	39015505	74	41722771	79
Обжимний цех	6009720	182364	3	206071	3
ЦГПТЛ	106964734	74634277	70	34931822	33
Відділення ГП	1196353	1045973	87	1182600	99
ЦХП №1	32784832	11482196	35	24457078	75
ЦХП №3	846893	-	-	426149	50
Станція нейтралізації	195761	-	-	-	-
Всього по основному виробництву	277874552	185180188	67	169781223	61
ТЕЦ	275856880	252762414	92	269950258	98
ККЦ	105326411	98428546	93	105121687	100
Газовий цех	42992615	34748011	81	708503	2
Ливарний цех	4681666	2863679	61	919638	20
Копровий цех	964740	472344	49	472344	49
Упр. з\д транспортом	375031	8957	2	10122	3
Автотранспортний цех	56556	-	-	-	-
Цех товарів н\с	102170	90090	88	101622	99
Цех водопостачання	1523465	-	-	379109	25
Механічний цех	248377	-	-	9535	4
Всього по ПрАТ "Запоріжсталь"	714907466	574554229	80	547454041	77

Відвод води: вся вода від охолодних пристроїв надходить у прийомні резервуари, звідки по стояках відводиться в зливальне кільце діаметром 900 мм, покладене по периметрі доменної печі під робочою площадкою. Відвод повітря від збирного кільцевого трубопроводу здійснюється по повітряних трубах діаметром 100 мм, концентрично встановленим усередині зливальних стояків, і по спеціальних трубах, врізаних у місцях спусків.

З діаграми видно, що найбільша кількість води споживається на виробничі цілі такими структурними одиницями комбінату як ТЕЦ, ККЦ, ЦГПТЛ, доменний цех, мартенівський цех., а загальне водоспоживання близько 715 млн. м³.

Отже, для вирішення комплексу питань, пов'язаних з гідроутилізацією, як засобом підвищення ефективності використання вторинної енергоресурсів, необхідно: розробити відповідні методики оцінки потенціалу теплових викидів і обсягів можливої гідроутилізації механічної енергії потоків охолодної води, а також застосувати для розрахунків методику вибору утилізуючого устаткування, виходячи з топології розміщення джерел теплових ВЕР; визначити місця раціонального розміщення використовуваних мікро - ГЕС. І все це повинне підтверджувати економічну доцільність генерації такої електроенергії.

Однак зараз, на жаль, поки що немає вітчизняних аналогів зазначених агрегатів, очевидно, у зв'язку з відсутністю їх розглянутого застосування. Якщо ж імпортувати більш придатне для даного виду гідроутилізації устаткування, то, якщо враховувати високу вартість останнього і діючу ставку митного збору, використання його стає економічно недоцільним.

Тому, в роботі необхідно дослідити водотоки зазначеного металургійного підприємства і визначити точну цифру гідроенергетичного потенціалу заводу в цілому; визначити залежність енергетичних показників роботи мікро - ГЕС в умовах нестаціонарних потоків вторинної води; розробити математичний апарат, що дозволить коригувати енергетичні характеристики генераторів мікро - ГЕС шляхом виключення похибки системи управління і дозволить збільшити кількість виробленої електроенергії із вторинних водотоків ПАТ

«Запоріжсталь»; визначити економічні показники новоствореної системи гідроутилізації.

3.2 Розрахунок ефективності системи регулювання вихідних параметрів мікро-ГЕС в умовах киснево-компресорного цеху ПАТ «Запоріжсталь»

Як приклад, в якості об'єкта гідроенергетичної утилізації, був розглянутий киснево-компресорний цех, який входить в склад підприємства ПАТ «Запоріжсталь». На його території розміщується наступне обладнання: турбокомпресори, турбоконденсатори, підшипники димососів, колонки водоохолодження, системи охолодження яких і є, в даному випадку, джерелами вторинної води з витратами від 20 до 50 м³/год. Відмітка висоти, з якої відбувається водовідведення коливається в межах (4,8...17,1) м. Основні характеристики об'єкта, що є вихідними для визначення ефективності системи регулювання вихідних параметрів мікро-ГЕС, зведено до таблиці 3.3.

Технічно, є можливість, зважаючи на наявність на площі цеху іншого технологічного обладнання та допоміжних споруд, розміщення центрів збору гідроресурсу лише в трьох точках. До того ж, вищезазначене устаткування відноситься, в даному випадку, до так званих «заборонених зон», тобто місць неприпустимого розташування елементів системи гідроенергетичної утилізації. Як було визначено, останнє прийнятно задавати у вигляді паралелепіпедів, найбільш простий аналітичний опис яких являє собою сигнатурна функція. На плані цеху місця неприпустимого розміщення елементів системи, що проектується, задаються наступним чином: $x_{\gamma} (x_{\gamma \min} \dots x_{\gamma \max})$; $y_{\gamma} (y_{\gamma \min} \dots y_{\gamma \max})$; $z_{\gamma} (z_{\gamma \min} \dots z_{\gamma \max})$.

При цьому, характеристики оптимальної системи гідроенергетичної утилізації на першому етапі розраховувалися на умовно постійне максимальне значення витрати, тобто без врахування динаміки потоку, що значно спрощує алгоритм. Так, згідно з останнім, для об'єкта, що розглядається, визначаються

всі можливі комбінації об'єднання джерел вторинної води з центрами збору. В даному випадку, загальна їх кількість буде дорівнювати, шт

$$r = 3^{18} = 387420489 .$$

Таблиця 3.3 - Характеристики джерел вторинної води

Джерело води	Координати джерел вторинної води, $(x, y, z)_k$, М	Гранична витрата, Q_{kmax} , $м^3/г$	Напір, м	Координати центрів збору, $(x, y)_p$, М
Турбо - компресори	23,5;55;19 36,5;55; 19 49,5;55; 19 62,5;55; 19 75,5;55; 19 88,5;55; 19	1350	7,1	105;55
Турбо-конденсатори	21,75;41,5;6 34,75;41,5;6 47,75;41,5;6 60,75;41,5;6 73,75;41,5;6 86,75;41,5;6	1230	5	95;32
Колонки водоохолодження	65;28;11	200	10	
Підшипники димососів	108;26;6 108;23;6 108;20,5;6 108;17,5;6 108;14; 6	28,8	4,8	25;10

Після відсіювання варіантів, які не відповідають вимогам щодо їх довжини $p = \overline{1, q}$ кількість останніх зменшилася.

Для першої комбінації $c_k = 1$ розподілення джерел по центрах збору відбулося наступним чином:

ЦЗ №1 – турбокомпресори;

ЦЗ №2 – турбоконденсатори, колонки водоохолодження, підшипники димососів;

ЦЗ №3 – джерела відсутні.

Розрахунок необхідного діаметра трубопроводу від турбокомпресора №1-6 до ЦЗ №1 для забезпечення необхідної пропускної спроможності проводиться так, м

$$d_{11} = 2 \cdot \sqrt{\frac{1350}{3600 \cdot \pi \cdot 1,25}} = 0,812 \text{ м.}$$

Виходячи із величини d_{11} з номенклатури стандартних діаметрів трубопроводів вибирається найближчий більший, тобто $d_{11cm} = 0,82 \text{ м.}$

Наступним кроком є визначення відстані l_{kp} між джерелами і центрами збору за їх заданими координатами. Для цього, згідно з розробленим в [33] алгоритмом простір цеху розбивається на куби із загальною кількістю вузлів в їх вершинах (точки пролягання траси), шт

$$n = \left(\frac{115}{\Delta} + 1 \right) \cdot \left(\frac{60}{\Delta} + 1 \right) \cdot \left(\frac{22}{\Delta} + 1 \right) = 162748 ,$$

де Δ - крок зміни координат (вибирається довільно в залежності від прийнятої точності розрахунків).

Для задачі, що розглядається, приймаємо $\Delta = 1 \text{ м.}$ Множина шляхів можливого пролягання трас трубопроводів, що проходять через отримані таким

чином вузли, генерується на наступному кроці. В результаті відсіювання маршрутів, точки яких належать забороненим зонам розташування j -го обладнання системи гідроенергетичної утилізації із застосуванням сигнатурної функції, визначено, що найкоротшим з них є шлях довжиною 83,7 м.

Ухил водовідвідної мережі обчислюється за формулою, м

$$i_{II} = 1/325 = 0,0031 .$$

Потім визначаються характеристики потоку рідини в трубопроводі.
Швидкість руху води, м/с

$$v_k = 52,26 \cdot \sqrt{\left(\frac{0,325}{4}\right)} \cdot 0,0031 = 0,83 .$$

При $0,1 < R < 3$ м

$$C = \frac{1}{0,013} \cdot \left(\frac{0,325}{4}\right)^{0,154} = 52,26 ,$$

$$y = 2,5 \cdot \sqrt{0,013} - 0,13 - 0,75 \cdot \frac{0,325}{4} \cdot (\sqrt{0,013} - 0,1) = 0,154 .$$

Загальні втрати напору в трубопроводі складаються з місцевих та лінійних втрат, м

$$H_{втр} = 0,26 + 6 \cdot 0,018 = 0,37 .$$

Де втрати напору по довжині трубопроводу визначаються за формулою, м

$$H_{лн} = \frac{0,83^2}{52,26^2 \cdot (0,325/4)} \cdot 83,7 = 0,26.$$

При гідравлічному розрахунку як напірних, так і самопливних мереж слід враховувати місцеві втрати напору в колінах, відводах засувках і т.д., які визначаються за формулою Дарсі-Вейсбаха [34,35], м

$$h_m = 0,5 \cdot \frac{0,83^2}{2 \cdot g} = 0,018.$$

Результуючий напір в центрі збору з урахуванням втрат дорівнює, м

$$H_{впр} = 17,1 - 0,37 = 16,73.$$

Потужність водотоку джерела вторинної води $N_{кв}$, з урахуванням втрат енергії в елементах системи збору визначається за виразом, Вт

$$N_l = \frac{9,81 \cdot 1000 \cdot 1350 \cdot 16,73}{3600} = 92676,8.$$

Потім, після визначених параметрів сумарного вторинного водотоку, що надходить в ЦЗ №1 від турбокомпресорів підбирається обладнання для гідроенергоутилізації, а саме мікро - ГЕС модульного типу. Для вищезазначених характеристик потоку вибираємо агрегат типу 100 Пр з турбіною діагонального типу. Номінальні витрати коливаються в межах (0,58...0,8) м³/с, напори (5,0...7,0) м, потужність 100 кВт. Енергія, що виробляється генератором останньої, визначається згідно з виразом [36-38], кВт · год

$$W_p = N_p \cdot T \cdot \mu_{рл} \cdot \mu_{рл}, \quad (3.1)$$

де T – фонд робочого часу підприємства (для трьохзмінного графіку дорівнює 8760 годин),

$\mu_{рт}$ і $\mu_{рг}$ - ККД турбіни і генератора, відповідно.

Для центру збору №1, кВт·год

$$W_1 = 92676,8 \cdot 8760 \cdot 0,86 \cdot 0,95 = 813564,6.$$

Для ЦЗ №2 отримуємо наступні техніко-економічні показники: вартість мікро - ГЕС типу 100 Пр, що застосовується для утилізації енергії сумарного водотоку з параметрами $Q_{\Sigma} = 960$ л/с і $H_{\Sigma} = 5,2$ м складає 1024000 грн. При цьому капітальні $K_{C1} = 159746,15$ грн, і, відповідно, поточні витрати $K_{n2} = 37150,99$ грн, а річна кількість електроенергії, що виробляється дорівнює $W_2 = 834256$ кВт·год.

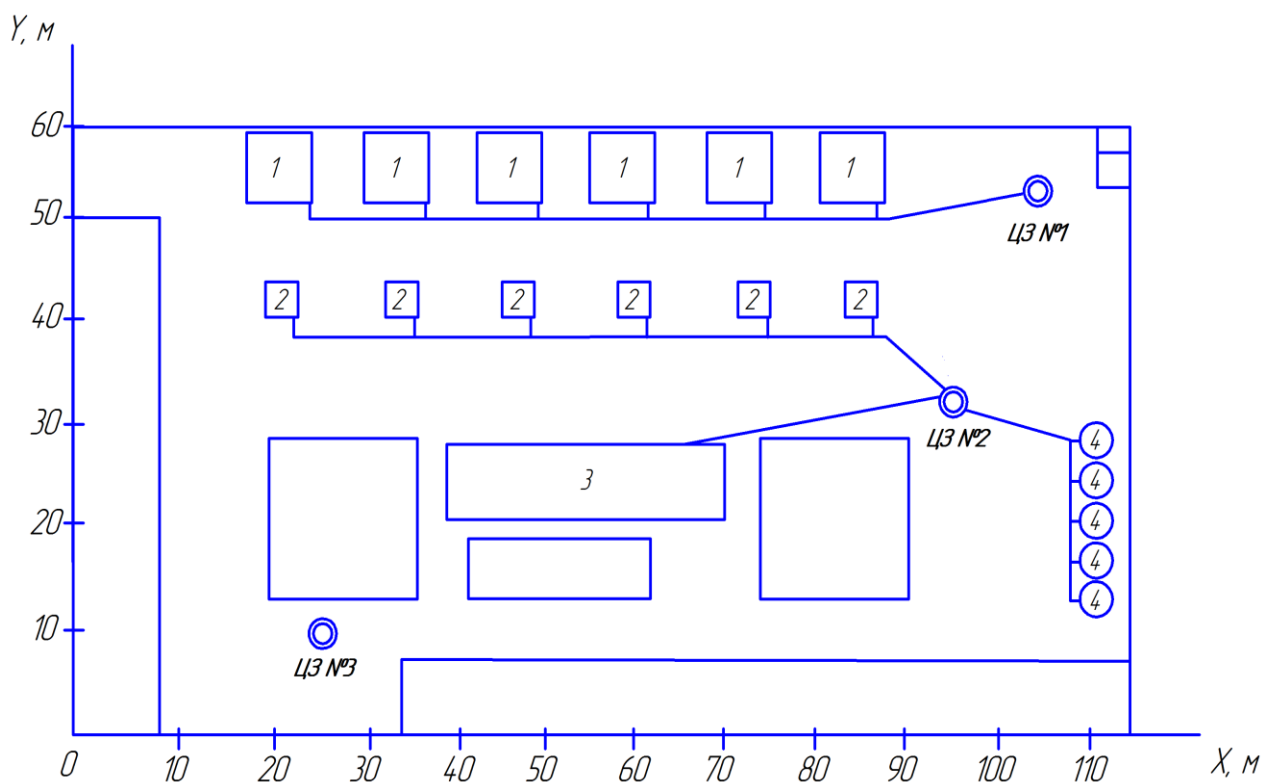


Рисунок 3.2 - План розташування обладнання цеху із зображенням оптимальної за економічним критерієм системи гідроенергетичної утилізації

Собівартість електричної енергії C_{EE} , що виробляється всією системою гідроенергетичної утилізації комбінації C_K , визначається за виразом, грн/(кВт·год)

$$C_{EE} = K_{ncK} / W_{cK}, \quad (3.2)$$

де $K_{ncK} = \sum_{p=1}^q K_{np}$ - поточні витрати,

$W = \sum_{p=1}^q W_p$ - кількість електроенергії, що виробляється за час T .

В результаті обчислювальних операцій за вищевказаним алгоритмом, були визначені характеристики всіх можливих варіантів топології системи гідроенергетичної утилізації для об'єкту, що розглядається. Деякі з варіантів, для яких собівартість вироблення електроенергії не перевищує встановлений тариф з мережі $C_{cK} \leq C_m$ (для промислових підприємств станом на 01.12.2023 р. – 2,74322 грн./кВт·год зведено до таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 - Параметри оптимальної системи гідроенергетичної утилізації киснево-конверторного цеху ПАТ «Запоріжсталь»

Центр збору / Джерело		Діаметр трубопроводу d , м	Довжина l , м	Тип мікро - ГЕС
№ 1	турбокомпресори	0,820	42,06	100Пр
№ 2	турбоконденсатори	0,78	33,84	100Пр
	колонки водоохолодження	0,473	76,12	
	підшипники димососів	0,219	36,29	
№ 3	незадіяний			

Передбачувані сумарні капіталовкладення в реалізацію проекту складають 2 147 312 грн. згідно з діючою на 1.11.2023 р. вартістю обладнання, робіт з монтажу і обслуговування. При цьому собівартість електроенергії 0,40 грн./кВт·год.

3.3 Визначення складових собівартості електричної енергії

Основними і головними економічними показниками системи утилізації гідроенергетичного ресурсу, що визначають рентабельність останньої, є собівартість електричної енергії, яка виробляється нею і термін окупності. В загальному випадку, перша величина розраховується методом визначення відношення річних затрат на виробництво електроенергії до обсягів її споживання за аналогічний період, а друга – сумарних річних витрат на прибуток від генерації електричної енергії за рік, грн/(кВт·год):

$$C_{EE} = \frac{B_{зв}}{W_{EE}} \quad (3.3)$$

$$T_{ок} = \frac{B_{зв}}{W_{EE} \cdot (C_m - C_{EE})} \quad (3.4)$$

де C_{EE} - собівартість електричної енергії, що виробляється,

$B_{зв}$ - затрати виробництва за відповідний період,

W_{EE} - кількість відпущеної електроенергії,

C_m - діючий тариф на покупку електроенергії з мережі.

В свою чергу, чисельник у вищезазначених формулах може змінюватися від багатьох факторів, таких як: вартість обладнання, придатного для даного виду утилізації, вартість монтажних і пусконаладжувальних робіт; заробітна платня найманим працівникам та обслуговуючому персоналу; геометричні

розміри об'єкту, для якого створюється системи гідроенергетичної утилізації, вартість проекту, тощо. Ці показники можуть коливатися з часом і, як правило, у бік їх збільшення.

Як було сказано, вітчизняних аналогів мікро - ГЕС, які б за своїми характеристиками задовольняли умовам експлуатації на території промислових підприємств, поки що не існує, а імпорتنі модулі, окрім того, що є досить дорогими, обкладаються державним ввізним митом, що робить їх використання нерентабельним. За корегування законодавства і стимулювання виробників енергетичного обладнання, ситуація, що склалася, з часом зміниться. Вже зараз декілька вищезазначених підприємств накопичили достатній науково-технічний рівень в цій галузі і, навіть, мають дослідні зразки енергоефективних агрегатів для гідроенергоутилізації. Але їх впровадження стримується саме через відсутність відповідної сфери застосування, ринків збуту і методик їх раціонального використання. Очевидно, що при наявності останніх, стане можливим масове серійне виробництво, що призведе до суттєвого здешевлення даного виду обладнання і економічної доцільності зазначеної утилізації.

Визначення оптимальної чисельності персоналу для обслуговування вищезгаданих систем також є важливим і суттєво впливає на економічні показники системи гідроенергетичної утилізації. В економічній практиці існує значна кількість методів визначення кількості працюючих, але найбільш поширеними з них є [43]:

- за трудомісткістю робіт;
- за нормами виробітку;
- за кількістю робочих місць з урахуванням норм їх обслуговування і контролю.

Обладнання для систем гідроенергетичної утилізації є досить дорогим. Значну частину вартості останнього складають засоби перетворення механічної енергії в електричну, тобто турбіни і електрогенератори із системою регулювання їх вихідних параметрів. Також, до капітальних витрат

слід віднести вартість з'єднувальних трубопроводів. Дані, представлені в таблицях 3.5 і 3.6 складені за діючими на 2022 рік цінами виробників відповідного обладнання і можуть бути прийняті для подальших розрахунків.

Таблиця 3.5 - Номенклатура, питома вартість трубопроводу з урахуванням вартості виробу і монтажних робіт

№ п/п	Діаметр трубопроводу, мм	Загальна вартість, грн./км
1	32	28309
2	38	32968
3	42	35135
4	45	39493
5	48	43582
6	51	45876
7	57	47305
8	76	51310
9	89	57743
10	108	75465
11	159	159009
12	219	311608
13	273	401543
14	325	661992
15	425	774856
16	530	929162
17	630	1049307
18	720	1139357
19	800	1152564
20	820	1176278
21	920	1221516

Таблиця 3.6 - Номенклатура і одинична вартість енергетичного модуля виробництва МНТО «ІНСЕТ»

	Тип мікро - ГЕС			
	10Пр	15Пр	50Пр	100Пр
Вартість, тис. грн.	114,576	127,596	546,84	941,6

Останнім часом, тарифи на електричну енергію стрімко зростають, особливо для промислового сектору. Так, наприклад, в 1999 році середній роздрібний тариф для промисловості за даними НКРЕ України складав 0,1268 грн/кВт·год, тоді як на грудень 2022 року – 2,74322 грн/кВт·год, тобто збільшився майже у шість разів і продовжує підвищуватися щомісячно. Така тенденція, скоріш за все, продовжиться і надалі. Очевидно, що собівартість електричної енергії, що виробляється системи гідроенергетичної утилізації, повинна бути нижчою, ніж вартість покупної з мережі. Тому, навіть, якщо на момент проектування системи утилізації гідроенергетичного ресурсу спостерігається зворотна ситуація, то через кілька місяців вона може змінитися, тобто стати сприятливою.

3.4 Розрахунок капітальних вкладень в систему гідроенергетичної утилізації

Капіталовкладення на отримання електричної енергії з наведеного водотоку ЦЗ №1 будуть складатися з витрат на енергомодуль мікро - ГЕС, з'єднуючі трубопроводи, вартість робіт з монтажу. Відповідні коефіцієнти амортизації енергетичного обладнання – 24 %, трубних конструкцій – 8 %. Вартість монтажних і пуско-налагоджувальних робіт, в даному випадку, складе 7,5 %, а на поточний ремонт і обслуговування основних фондів – 5 % від капітальних витрат. Мікро - ГЕС типу 100Пр виробництва МНТО «ІНСЕТ» коштує 941,6 тис.грн., питома вартість трубопроводу діаметром 820 мм за даними БМУ

«Запоріжстальбуд – 1» - 1176278 грн/км. Річна кількість електроенергії, що виробляється дорівнює $W_2 = 0,687$ млн. кВт·год.

Тоді, з урахуванням вищезазначеного, отримаємо, грн

$$K_{C_1} = 1176278 \cdot 83,7 \cdot 10^{-3} + 941600 = 1040054,46 .$$

Вартість робіт з монтажу і пуско-наладки, грн

$$K_m = 1040054,46 \cdot 0,075 = 78004,08 .$$

Тоді, загальні капітальні витрати становлять, грн

$$K_{C_1} = 1040054,46 + 78004,08 = 1118058,12 .$$

Амортизаційні відрахування, грн

$$C_a = 98454,47 \cdot 0,08 + 941600 \cdot 0,24 = 232224,64 .$$

Поточні витрати з урахуванням амортизації, грн

$$Z_n = 232224,64 + 1118058,12 \cdot 0,05 = 288126,44 .$$

Для ЦЗ №2 отримуємо наступні техніко-економічні показники: вартість мікро - ГЕС типу 100 Пр, що застосовується для утилізації енергії сумарного водотоку з параметрами $Q_{\Sigma} = 1096$ л/с і $H_{\Sigma} = 10,78$ м складає 941600 грн. При цьому капітальні $K_{C_1} = 1029042,5$ грн, і, відповідно, поточні витрати $Z_{n2} = 279873,1$ грн, а річна кількість електроенергії, що виробляється дорівнює $W_2 = 0,688$ млн. кВт·год.

Собівартість електричної енергії C_{EE} , що виробляється всією системою гідроенергетичної утилізації, визначається за виразом, грн/(кВт·год)

$$C_{EE} = K_{nc\kappa} / W_{c\kappa}, \quad (3.5)$$

де $K_{nc\kappa} = \sum_{p=1}^q K_{nq}$ - поточні витрати,

$W = \sum_{p=1}^q W_p$ - кількість електроенергії, що виробляється за час T .

Тобто, можна записати, грн/(кВт·год)

$$C_{ci} = \frac{288126,44 + 279873,1}{733000 + 688000} = 0,4 < C_m$$

За економічними і енергетичними показниками для об'єкта гідроенергетичної утилізації, що розглядається, визначено величину, яка відображає економічну доцільність капіталовкладень в проект. Остання, а саме вигода, розраховується за виразом: $B_i = W_i \cdot (C_m - C_i)$, де W_i - кількість електричної енергії, що виробляється генераторами i - го варіанта системи гідроенергетичної утилізації, кВт·год./рік; C_m , C_i - вартість електроенергії з мережі (для промислових підприємств станом на 1.12.2019р. – 1,74322 грн./кВт·год. [39] і її собівартість, відповідно.

В результаті обчислювальних операцій, були визначені характеристики всіх можливих варіантів топології системи гідроенергетичної утилізації для об'єкту, що розглядається. Останні визначаються комбінаціями об'єднання джерел вторинної води з центрами збору гідроресурсу. Деякі з варіантів, для яких собівартість вироблення електроенергії не перевищує встановлений тариф з мережі $C_{c\kappa} \leq C_m$ (для промислових підприємств станом на 01.12.2019р. – 1,74322 грн./кВт·год.).

Визначено, що оптимальна системи гідроенергетичної утилізації для об'єкту, що розглядається, технічно складається із джерел вторинної води 2 - 3 і 4 - 5, з'єднаних трубопроводами з центрами збору 1 і 3, відповідно (рисунок 3.1) і відповідає варіанту 4.

Основні з визначених параметрів елементів такої системи гідроенергетичної утилізації занесені до таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 - Параметри обладнання системи гідроенергетичної утилізації киснево-компресорного цеху ПАТ «Запоріжсталь»

Центр збору / Джерело		Діаметр трубопроводу d , м	Довжина l , м	Тип мікро - ГЕС
№ 1	турбокомпресори	0,820	42,06	100Пр
№ 2	турбоконденсатори	0,78	33,84	100Пр
	колонки водоохолодження	0,473	76,12	
	підшипники димососів	0,219	36,29	
№ 3	незадіяний			

Передбачувані сумарні капіталовкладення в реалізацію проекту складають 2 147 312 грн. згідно з діючою на 1.12.2019 р. вартістю обладнання, робіт з монтажу і обслуговування. При цьому, чиста вигода складе близько 487,7 тис. грн. на рік при собівартості електроенергії 1,40 грн./кВт·год.

3.5 Визначення техніко-економічних показників впровадження системи гідроенергетичної утилізації

Оскільки, вищезазначені системи утилізації на основі модульних мікро - ГЕС не потребують суттєвих витрат часу і робочої сили на їх поточне обслуговування, то при встановленні останніх на території промислових підприємств, їх надійна експлуатація може забезпечуватися внутрішнім

персоналом без залучення додаткової штатної одиниці цієї ж організації. При цьому, всередині останньої відбувається лише перерозподіл обов'язків між співробітниками без збільшення витрат на заробітну платню.

Остаточний висновок щодо доцільності впровадження таких систем слід робити на основі основних показників ефективності останніх, таких як: собівартість електричної енергії, що вироблятиметься, термін окупності і економія коштів внаслідок реалізації проекту. Параметри систем, що порівнюватимуться будуть суттєво відрізнятися і їх необхідно визначати окремо, шляхом постановки і вирішення оптимізаційних задач.

Кількість електричної енергії W_p , що виробляється мікро - ГЕС в p - му центрі збору впродовж часу T , очевидно, буде визначатися як сума відповідних енергій $W_{p\gamma}$ за проміжки t_γ , тобто, кВт·год

$$W_p = \sum_{\gamma=1}^L W_{p\gamma} \quad (3.6)$$

Загальне вироблення електричної енергії для об'єкта гідроенергетичної утилізації визначається за виразом, кВт·год

$$W = \sum_{p=1}^q W_p \quad (3.7)$$

де q - кількість центрів збору гідроресурсів.

Тоді, виходячи з вищезазначеного, собівартість електроенергії дорівнює, грн/кВт·год

$$C_{EE} = \frac{K_{нск}}{W} \quad (3.8)$$

Розрахунок ефективності вкладень в реалізацію системи гідроенергетичної утилізації і терміну її окупності виконуємо наступним чином:

економія за рахунок вироблення власної електроенергії, тобто річна вигода, буде визначатися як, млн.грн/рік

$$B_E = W_p \cdot (C_M - C_{EE}) \quad (3.9)$$

- розрахунковий коефіцієнт ефективності капіталовкладень [13-15]

$$E_p = \frac{B_E}{K_{C_k}} \quad (3.10)$$

а термін їх окупності, років

$$T_{ок} = \frac{K_{C_k}}{B_E} \quad (3.11)$$

Визначаємо кількість електричної енергії, що генерується за прийнятий термін експлуатації обладнання n років), млн.кВт·год

$$W_{20} = W_p \cdot n \quad (3.12)$$

Економія ж за рахунок вироблення такої кількості власної електроенергії за весь термін експлуатації, млн.грн

$$B_{E_{20}} = n \cdot B_E \quad (3.13)$$

Проведемо розрахунок техніко-економічних показників системи гідроенергетичної утилізації вторинних водотоків для доменного цеху ПАТ «Запоріжсталь». Вихідні дані для відповідних обчислень наведені раніше.

Було визначено, що для об'єкта, який розглядається, річна величина $W = 2,134$ млн. кВт·год. При цьому капітальні вкладення в систему складають $K_{cк} = 2,126$ млн. грн., поточні на обслуговування і амортизаційні відрахування основних фондів - $z_{ncк} = 0,568$ млн. грн. Отже, собівартість електроенергії в такому разі дорівнює, грн/(кВт·год)

$$C_{EE} = 3,568 \cdot 10^6 / 2,134 \cdot 10^6 = 1,39 .$$

Для того, щоб зробити висновок щодо доцільності впровадження оптимальної системи гідроенергетичної утилізації, необхідно визначити ряд техніко-економічних показників, а саме: річну вигоду від реалізації проекту, ефективність вкладень і термін її окупності. Перший з останніх, для об'єкта, що розглядається, буд дорівнювати, млн.грн/рік

$$B_E = 2,134 \cdot (1,74322 - 1,39) = 0,963 .$$

- коефіцієнт ефективності капіталовкладень

$$E_p = \frac{0,963}{2,134} = 0,451 .$$

термін окупності капітальних вкладень, років

$$T_{ок} = \frac{2,134}{0,451} = 4,73 .$$

Кількість електричної енергії, що генерується за прийнятий термін експлуатації обладнання, наприклад $n = 20$ років), млн.кВт·год

$$W_{20} = 2,134 \cdot 20 = 43,46.$$

Економія, тобто вигода від вироблення такої кількості власної електроенергії за весь прийнятий термін, млн.грн

$$B_{E_{20}} = 20 \cdot 0,615 = 12,34.$$

Техніко-економічні показники системи гідроенергетичної утилізації зводяться в таблицю 3.8.

Таблиця 3.8 - Показники ефективності впровадження системи гідроенергетичної утилізації

Економічні показники	Значення
Капітальні витрати, <i>млн.грн</i>	2,126
Кількість виробленої ЕЕ за весь термін експлуатації, <i>млн.кВт·год</i>	43,46
Сумарна вигода, <i>млн.грн</i>	12,34
Собівартість ЕЕ, <i>грн</i>	1,39
Ефективність капіталовкладень	0,615
Термін окупності, <i>років</i>	3,47

Економічні розрахунки системи утилізації гідроенергетичних ресурсів промислових підприємств показало, що системи гідроенергетичної утилізації сумарна вигода за весь період експлуатації (20 років) склала у найбільш

вигідному варіанті майже 10 млн. грн. Строк окупності системи гідроенергетичної утилізації, розрахований за цінами на обладнання 2011 року коливається в межах від 3 до 5 років, що не перевищує нормативний.

Техніко-економічні показники впровадження модульних мікро - ГЕС різних заводів-виробників зведено до таблиці 3.9. Відповідне графічне представлення табличних даних наведено на рисунках 3.3, 3.4.

Таблиця 3.9 - Техніко-економічні показники впровадження модульних мікро - ГЕС в умовах ПАТ «Запоріжсталь»

Економічні показники	Значення		
	МНТО "ІНСЕТ"	ПАТ "ТУРБОАТОМ"	Flugt
Капітальні витрати, млн. грн.	2,126	1,945	3,811
Кількість виробленої ЕЕ за весь термін експлуатації, млн.кВт год.	43,46	22,13	30,16
Сумарна економія, млн. грн.	12,34	7,82	1,00
Собівартість ЕЕ, грн./кВт год.	1,39	0,39	0,71
Ефективність капіталовкладень	0,615	0,20	0,01
Термін окупності, років	3,47	4,98	76,12

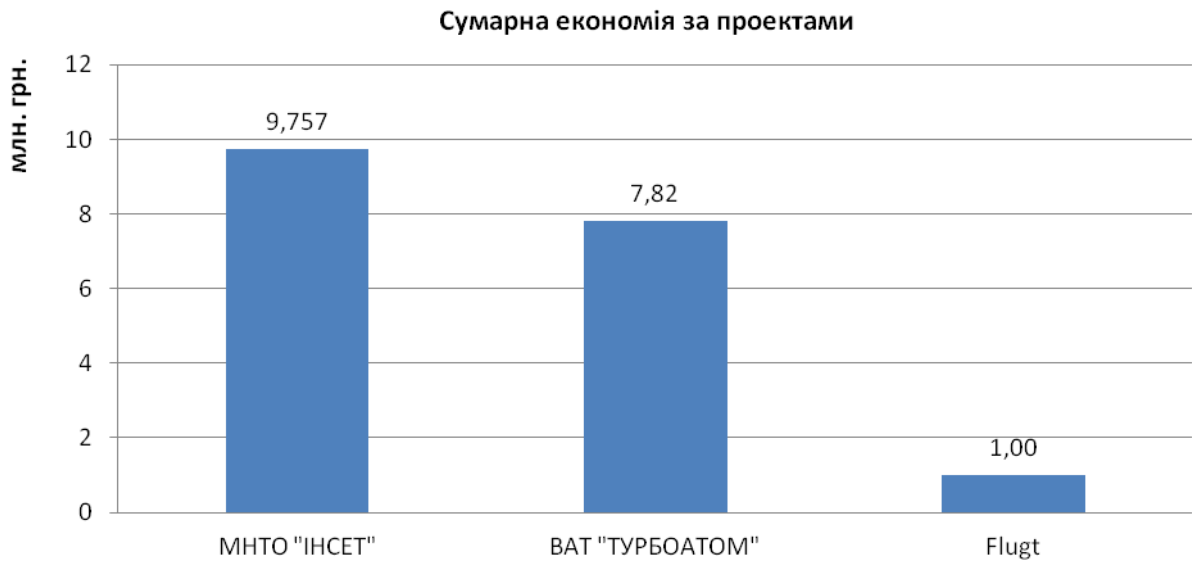


Рисунок 3.3 – Сумарна економія за проектами

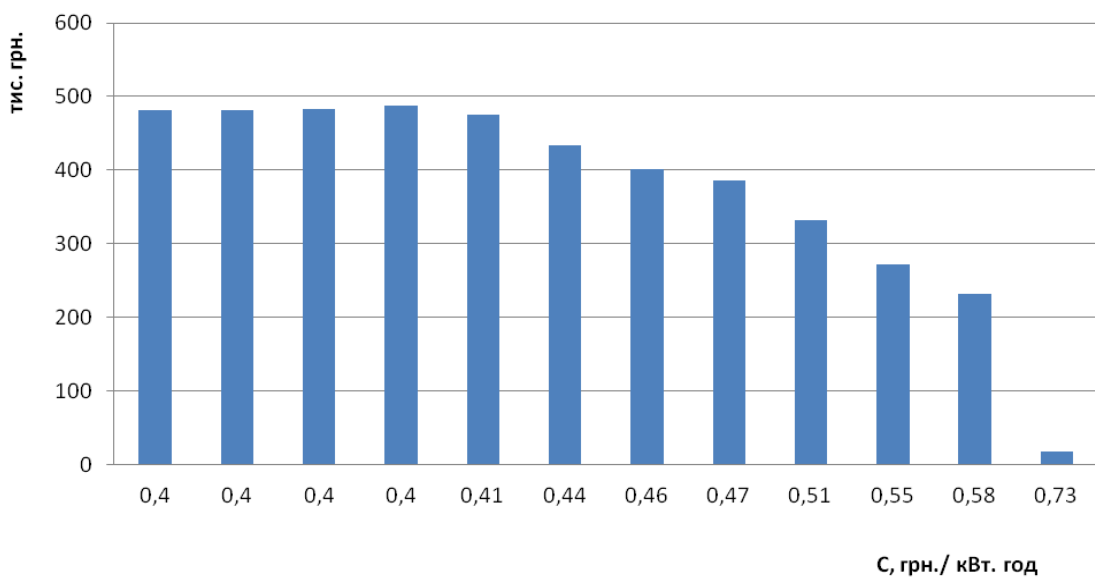


Рисунок 3.4 – Собівартість вироблення електричної енергії за варіантами

Зважаючи на те, що вартість електроенергії для промислових підприємств постійно збільшується, вигода від реалізації проекту гідроенергоутилізації також, відповідно, зростатиме. До того ж, прийнята для розрахунку вартість обладнання може бути змінена в сторону зменшення шляхом використання вітчизняних аналогів мікро - ГЕС, що значно скоротить шуканий термін. Отже, економічні характеристики системи гідроенергетичної утилізації можуть

коливатися в значних межах в залежності від виду устаткування, що застосовується і ситуації на ринку електроенергетики.

Отримані в результаті розрахунків техніко-економічні показники засвідчують, що виробництво власної електричної енергії дає значну економію коштів на придбання енергоресурсів промисловими підприємствами і електроенергії зокрема. Всі запропоновані проекти виявилися економічно вигідними, бо строк окупності та коефіцієнт капітальних вкладень ледь перевищує 6 років та більше 0,15 від нормативних, відповідно. Приймавши до уваги дотримання умови $C_{EE} \leq C_m$, останнє підтверджує економічну доцільність впровадження таких систем.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі магістра визначені техніко-економічні показники впровадження модульних мікро - ГЕС в умовах ПАТ «Запоріжсталь» на основі аналізу його водотоків і уточнено величину гідроенергетичного потенціалу заводу, який складає близько 9 млн. кВт·год на рік;

Розрахунковим експериментом визначено залежність енергетичних показників роботи мікро - ГЕС в умовах нестаціонарних потоків вторинної води. Встановлено, що ККД енергомодуля мікро - ГЕС значно зменшується при відхиленні параметрів водотоку від номінальних;

Розроблено втоматизовану систему регулювання вихідних параметрів мікро-ГЕС в умовах вторинних водотоків промислових підприємств, а також математичний апарат, який дозволяє коригувати енергетичні характеристики генераторів мікро - ГЕС залежно від кутової частоти обертання за рахунок створення алгоритмів керування та регулювання;

Проведено оцінку енергетичної та економічної ефективності гідроутилізації на базі новоствореної автоматизованої системи регулювання вихідних параметрів мікро-ГЕС.

Розроблено математичний апарат і регулятор на його основі, який дозволяє коригувати енергетичні характеристики генераторів мікро - ГЕС, що працюють на автономне навантаження і, таким чином, збільшити кількість виробленої електроенергії із вторинних водотоків ПАТ «Запоріжсталь». Регулятор дозволяє забезпечити необхідну якість сталих і перехідних режимів роботи генератора мікро - ГЕС при різних збуреннях з боку навантаження, а також збільшити кількість електричної енергії, придатної для більшості споживачів якості в середньому на (12...26) %.

Визначено економічні показники системи гідроенергоутилізації для обраного об'єкта дослідження. Встановлено, що капітальні витрати в залежності від застосованого обладнання і вартості робіт з монтажу і пуско-

налагодження окупаються в середньому за 4 роки, що не перевищує гранично допустиму нормативну величину, що свідчить про доцільність впровадження таких системи гідроенергетичної утилізації.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Вторинні енергетичні ресурси. Енциклопедія народного господарства Української РСР: в 4-х томах. Т. 1 А-Е / С. М. Ямпольський. Академія наук УРСР. Київ : Головна редакція Української радянської енциклопедії, 1969. С. 299.
2. Бердишев М. Ю., Чейлитко А. О., Назаренко О. М. Низькопотенційні та альтернативні джерела енергії. Навчально-методичний посібник для студентів ЗДІА Енергетичного напрямку всіх форм навчання. Запоріжжя : ЗДІА, 2015. 270 с.
3. Гічов Ю. О. Вторинні енергоресурси промислових підприємств. Частина II: конспект лекцій. Дніпропетровськ : НМетАУ, 2012. С. 6.
4. Малимон С. С. Основи екології. Вінниця : Нова Книга, 2009. С. 227.
5. Енергетична стратегія України на період до 2030 р. Затверджена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 24.07.2013. № 1071. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/n0002120-13#Text_____ (дата звернення 01.12.2023)
6. Закон про засади функціонування ринку електричної енергії України № 663-VII від 24.10.2013 № 663-VII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/663-18#Text> (дата звернення 01.12.2023)
7. Відновлювальні джерела енергії у локальних об'єктах / Ю .І. Якименко, Є. І. Сокол, В. Я. Жуйков, Ю. С. Петергеря, О. Л. Іванін. Київ : ІВЦ «Політехніка», 2001. 114 с.
8. Бекіров Е. А. Автономні джерела живлення на базі сонячних батарей. Сімферополь : ВД «Аріал», 2011. 484 с.
9. Кривцов В. С., Олейников О. М., Яковлев О. І. Невичерпна енергія: Книга 3. Альтернативна енергетика. Харьков : НАУ "ХАІ", Севастополь : СНТУ, 2006. 643 с.
10. Стратегія енергозбереження в Україні: аналітично-довідкові матеріали. Аналітично-довідкові матеріали в 2-х т.. Механізм реалізації

політики енергозбереження / за ред. В. А. Жовтнянського, М. М. Кулика, Б. С. Стогнія. Київ: Академперіодика, 2006. Т. 2. 600 с.

11. Варламов Г. Б., Любчик Г. М., Маляренко В. А. Теплоенергетичні установки та екологічні аспекти виробництва енергії. Київ: ІВЦ Видавництво «Політехніка», 2003. 232 с.

12. Нетрадиційні та поновлювані джерела енергії: навчальний посібник / О. І. Соловей, Ю. А. Лега, В. П. Розен, О. О. Ситник, А. В. Чернявський, Г. В. Курбаса. Черкаси : ЧДТУ, 2007. 483 с.

13. Інтелектуальні системи керування потоками електроенергії у локальних об'єктах / О. В. Кириленко, Ю. С. Петергеря, Т. О. Терещенко, В. Я. Жуйков. Київ : Медіа ПРЕС, 2005. 212 с.

14. Енергетичний аудит: навчальний посібник / О. І. Соловей, В. П. Розен, Ю. Г. Лега, О. О. Ситник, А. В. Чернявський, Г. В. Курбаса. Черкаси, 2005. 299 с.

15. Закон України „Про альтернативні види палива” від 14 січня 2000 р. № 1391-XIV. *Відомості Верховної Ради України*. 2000. № 12. С. 94.

16. Є. В. Кузьмінський, Н. Б. Голуб, К. О. Щурська Стан, проблеми та перспективи біоенергетики в Україні. *Відновлювана енергетика*, 2009, № 4. С.70

17. Джигирей В. С. Екологія та охорона навколишнього природного середовища: навчальний посібник. 2-е вид. Київ : Знання, 2002. 203 с.

18. ДСТУ 2420-94. Енергоощадність. Терміни та визначення. [Чинний від 01.01.95]. Вид. офіц. Київ, 1994. (Інформація та документація).

19. Тугай А. М. Водопостачання: підручник / А. М. Тугай, В. О. Орлов – Київ : Знання, 2009. 735 с.

20. M. Matsumoto, T. Nishimura. Mersenne twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator (англ.) // *ACM Trans. on Modeling and Computer Simulations* : journal. 2017. Айрапетян Т. С. Водне господарство промислових підприємств: навчальний посібник. Харків : ХНАМГ, 2010. 280 с.

21. Запольский А. К. Водопостачання, водовідведення та якість води: підручник. Київ : Вища школа, 2005. 671 с.
22. Племянников М. М., Крупа А. А. Хімія та теплофізика скла. Навчальний посібник. Київ : НТУУ «КПІ», 2000. 560 с.
23. Корн М., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). Москва : Наука, 1974. 832 с.
24. Вступ до планування оптимального експерименту: навчальний посібник для студ. спец. 092502. Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва / уклад. Г. О. Статюха, Д. М. Складанний, О. С. Бонаренко. Київ : ІВЦ «Політехніка», 2011. 117 с.
25. Теорія планування експериментів: Виконання розрахунково-графічної роботи: навчальний посібник для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка», спеціалізації «Технологія машинобудування» / С. М. Лапач. КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 86 с.
26. Бідюк П. І., Терентьев О. М., Просьянкіна-Жарова Т. І. Прикладна статистика. Київ : НТУУ «КПІ», 2012. 510 с.
27. Бобик О. І., Берегова Г. І., Копитко Б. І. Теорія ймовірностей і математична статистика. Київ : Професіонал, 2007. 560 с.
28. Коваленко І. П. Математична статистика. Київ: Видавничий Дім «Слово», 2012. 496 с.
29. Бідюк П. І., Половцев О. В. Аналіз та математичне моделювання економічних процесів перехідного періоду. Київ : НТУУ «КПІ», 1999. 230с.
30. Певзнер М. Ш. Основи теорії відносності : навчальний посібник. Донецьк : ДВНЗ «Національний гірничий університет», 2013. 134 с.
31. Руденко В. М. Математична статистика: навчальний посібник. Київ : Центр учбової літератури, 2012. 304 с.
32. Анісімов В. В., Черняк О. І. Математична статистика. Київ : МП "Леся", 1995. 105 с.
33. Utkin V. I., Sliding Modes in Optimisation and Control, SPRINGER-VERLAG, 1992. 623 pp.

34. 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.
35. Draunov, S. V. and Utkin, V. I., (1989), “On discrete time sliding modes”, *IFAC Nonlinear Control Systems Design*, pp. 273-278.
36. Gao, W. and Hung, J. C., (1993), “Variable structure control of nonlinear systems: a new approach”, *IEEE Transaction IE-40* pp. 43-55.
37. J. C. Lo and Y. H. Kuo, Decoupled fuzzy slidingmode control, *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, 6 (1998), pp. 426-435.
38. Ioannon P. and J. Sun. *Robust Adaptive Control*. Prentice-Hall, 1995. 825 pp.
39. Rabiner R, Gold B. *Theory and Application of Digital Signal Processing*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1975. 762 pp.
40. Hahn Stefan L., *Hilbert transforms in signal processing*, Artech House, Inc., Boston, 1996. 442 pp.
41. Michael Rosenblum, Jurgen Kurths. *Analyzing Synchronization Phenomena from Bivariate Data by Means of the Hilbert Transform*, in: *Nonlinear Analysis of Physiological Data*, Edited by H. Kantz, J. Kurths, and G. Mayer-Kress (Springler, Berlin, 1998), pp. 91-99.
42. ДСТУ 2155-93 Держстандарт України. Енергозбереження. Методи визначення економічної ефективності заходів по енергозбереженню. [Чинний від 01.01.95]. Вид. офіц. Київ, 1994. 20 с. (Інформація та документація).
43. ДБН В.1.1-7-2002 Пожежна безпека об'єктів будівництва. [Чинний від 01.05.2003]. Вид. офіц. Київ, 2002. 20 с. (Інформація та документація).
44. ДБН Д.2.6-1-2000 (П 1) Електротехнічні пристрої. [Чинний від 01.01.2001]. Вид. офіц. Київ, 2000. 20 с. (Інформація та документація).
45. ДСТУ 2339-94 Енергозбереження. Основні положення. [Чинний від 01.01.1995]. Вид. офіц. Київ, 1994. 20 с. (Інформація та документація).