

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет

Пояснювальна записка
до випускної роботи магістра
за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

ТЕМА ВИПУСКНОЇ РОБОТИ

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ШАХТНОЇ ВОДОВІДЛИВНОЇ
УСТАНОВКИ ПРИ ПАРАЛЕЛЬНІЙ РОБОТІ НАСОСІВ В УМОВАХ
ЗАЛІЗОРУДНИХ ШАХТ

Виконав: студент групи ЕМО-23м

Керівник випускної роботи

Нормоконтролер

Декан ЕТФ

Гарант освітньої програми

Ігор ЧІЧКАНЕНКО

д.т.н., проф. Валерій ТИТЮК

д.т.н., проф. Валерій ТИТЮК

к.т.н., доц. Владислав ФЕДОТОВ

д.т.н., проф. Станіслав ТОЛМАЧОВ

Кривий Ріг 2024 р.

**ЗАВДАННЯ НА
ВИПУСКНУ РОБОТУ
ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Чічканенку Ігорю Григоровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Дослідження енергоспоживання шахтної водовідливної установки при паралельній роботі насосів в умовах залізрудних шахт»

2. Строк подання здобувачем роботи : 5 грудня 2024 р.

3. Мета та завдання випускної роботи

Мета та завдання випускної роботи – обґрунтування можливості діагностування несправностей роторного кола асинхронного короткозамкненого двигуна при вимірюванні статорних величин; удосконалення математичної моделі асинхронного двигуна для вивчення параметричної асиметрії роторного кола на показники роботи АД, визначення діагностичних ознак аварійного стану білячої клітки асинхронного двигуна.

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

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Слайди презентації у кількості _____ штук _____

6. Консультанти розділів роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали консультанта | Дата, підпис | |
|--------|---------------------------------|----------------|------------------|
| | | Завдання видав | Завдання прийняв |
| I | Титюк В.К. | 05.09.2024 | 10.10.2024 |
| II | Титюк В.К. | 05.09.2024 | 3.11.2024 |
| III | Титюк В.К. | 05.09.2024 | 25.11.2024 |

7. Календарний план виконання роботи та консультацій

| № | Назва етапів роботи | Дата виконання |
|---|--|----------------|
| 1 | Огляд науково-технічної літератури з питань підвищення енергоефективності насосного устаткування з урахуванням особливостей головного водовідливу залізорудних шахт. | 28.09.2024 |
| 2 | Формулювання об'єкта, предмета та мети дослідження | 3.10.2024 |
| 3 | Аналіз експериментальних даних про добовий водоприток залізорудної шахти. | 14.10.2024 |
| 4 | Аналіз відомостей про електромеханічне та насосне обладнання головної водовідливної установки залізорудної шахти | 24.10.2024 |
| 5 | Розробка математичної моделі асинхронного двигуна головної водовідливної установки в MATLAB/Simulink та її верифікація. | 28.10.2024 |
| 6 | Розробка математичної моделі гідротранспортної системи залізорудної шахти | 3.11.2024 |
| 7 | Аналіз варіантів побудови насосної станції системи головної водовідливної установки шахти при різних варіантах обладнання насосної станції | 10.11.2024 |
| 8 | Визначення залежності енергоспоживання водовідливної установки від параметрів насосного обладнання | 17.11.2024 |
| 9 | Оформлення пояснювальної записки та презентації випускної роботи | 05.12.2024 |

Дата видачі завдання 05.09.2024 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Чічканенко І.Г.
(ПІБ)

Керівник роботи _____
(підпис)

Титюк В.К.
(ПІБ)

ЗМІСТ

| | |
|---|--|
| Реферат | |
| Вступ | |
| Розділ 1 Особливості роботи головних водовідливних установок в умовах залізорудних шахт | |
| 1.1 Загальна характеристика електромеханічного обладнання насосних станцій водовідливних установок шахт | |
| 1.2 Структура багатоступінчастої головної водовідливної установки залізорудної шахти | |
| 1.3 Технічні характеристики електромеханічного обладнання ділянки головного водовідливу горизонту 475 м | |
| Висновки по розділу 1 | |
| Розділ 2 Експериментальні дослідження водопритоку залізорудної шахти | |
| 2.1 Вихідні дані експериментального дослідження водопритоку | |
| 2.2 Статистична обробка експериментальних даних водопритоку по ставу №1 | |
| 2.2.1 Описова статистика | |
| 2.2.2 Перевірка вихідних даних на нормальний характер розподілу | |
| 2.2.3 Побудова гістограми емпіричного розподілу даних | |
| 2.2.4 Параметри теоретичних розподілів | |
| 2.2.5 Перевірка теоретичних розподілів за критерієм Колмогорова | |
| 2.2.6 Автокореляційний аналіз | |
| 2.3 Статистична обробка даних по ставу 2 | |
| 2.3.1 Описова статистика | |
| 2.3.2 Перевірка вихідних даних на нормальний характер розподілу | |
| 2.3.3 Побудова гістограми емпіричного розподілу даних | |
| 2.3.4 Параметри теоретичних розподілів | |

| | |
|--|--|
| 2.3.5 Перевірка теоретичних розподілів за критерієм Колмогорова | |
| 2.3.6 Автокореляційний аналіз | |
| Висновки по розділу 2 | |
| Розділ 3 Макроаналіз енергоспоживання головної водовідливної установки залізорудної шахти та визначення напрямків енергозбереження | |
| 3.1 Матеріальні потоки головної водовідливної установки залізорудної шахти | |
| 3.2 Резервуар с однонасосною станцією | |
| 3.3 Резервуар із багатонасосною станцією | |
| 3.4 Енергетичні діаграми шахтної водовідливної установки | |
| Висновки по розділу 3 | |
| Висновки по роботі | |
| Література | |

Реферат

__ сторінок, __ таблиць, __ рисунків, __ джерел літератури.

Тема випускної роботи: «Дослідження енергоспоживання шахтної водовідливної установки при паралельній роботі насосів в умовах залізрудних шахт»

Метою роботи є визначення шляхів підвищення енергетичної ефективності головних водовідливних установок залізрудних шахт.

Об'єктом дослідження магістерської роботи є процеси енергоспоживання насосної станції з відцентровим насосом.

Предметом дослідження магістерської роботи є вплив різних методів регулювання витрату насоса на енергоспоживання електромеханічної системи насосної станції.

Випускна робота присвячена визначенню напрямків підвищення енергетичної ефективності головної водовідливної установки залізрудної шахти.

З використанням Matlab/Simulink створено повну мультифізичну математичну модель насосної станції головної водовідливної установки залізрудної шахти з урахуванням реальних геометричних розмірів та конфігурації гідротранспортної мережі та параметрів електромеханічного обладнання.

Наведено результати аналізу експериментальних даних водопритоку залізрудної шахти.

У значному обсязі використані різноманітні методи дослідження, такі як математичні розрахунки, графічні побудови, математичні залежності та теоретичні положення з курсів «Теорія електропривода», «Електричні машини», «Теоретичні основи електротехніки», «Сучасні методи ідентифікації, моніторингу та діагностики електромеханічного обладнання».

Ключові слова: НАСОС, ГІДРОТРАНСПОРТНА СИСТЕМА, ВОДОПРИТОК, АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, МОДЕЛЮВАННЯ, ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ.

ВСТУП

Шахтні водовідливні установки відносяться до найбільш енергоємних комплексів шахт та рудників. Стаціонарні рудничні водовідливні установки повинні забезпечувати надійну відкачування води з підземних виробок при можливо менших експлуатаційних витратах.

Велику роль в утворенні режиму рівня води відіграють природні фактори - атмосферні опади і водофільтрувальні властивості порід. Водонес-ний горизонт характеризується складною циркуляцією, зумовленою водо-проникністю породи, як окремих структурних горизонтів, так і в самому горизонті, а також різними тисками підземних вод.

На руднику функціонує технічна система для попередження затоплення горизонтальних виробок підземними або поверхневими водами шляхом відкачування шахтних вод, яка називається рудниковим водовідливом.

Стаціонарні рудничні водовідливні установки повинні забезпечувати надійну відкачування води з підземних виробок при можливо менших експлуатаційних витратах.

Водовідливні установки гірничих підприємств, що відпрацьовують обводнені родовища, представляють складний електромеханічний комплекс, що включає: насосні агрегати різної продуктивності, трубні колектори, систему електропостачання і апаратуру автоматизації.

Основне завдання автоматизації цих об'єктів полягає у вивільненні обслуговуючого персоналу і забезпечення надійного і економічного функціонування процесу водовідливу, щоб виключити затоплення гірничих виробок і створити нормальні умови для ведення гірничих робіт.

Тривалий досвід експлуатації автоматизованих водовідливних установок свідчить про значно більшої надійності їх роботи в порівнянні з ручним керуванням. На автоматизованих водовідливних установках ефективніше

використовується обладнання і більш ніж удвічі зберігається чисельність обслуговуючого технічного персоналу.

Серед складного і різноманітного устаткування шахти особливе місце займають гірничошахтні стаціонарні установки, зокрема водовідливні, вентиляційні і підйомні.

Збільшення розмірів гірських підприємств, перехід до розробки більш глибоких горизонтів, розвиток комплексної механізації й автоматизації технологічних процесів гірської справи обумовлюють сталий ріст потужності шахтних насосних, вентиляторних і підйомних машин. Ці стаціонарні установки характеризуються складністю конструкцій і великою енергоємністю (на їх частку доводиться до 90% усієї споживаної на шахтах електроенергії).

В даний час задачами подальшого удосконалення водовідливних установок є збільшення надійності, економічності, підвищення ККД насосів і гарантованого ресурсу роботи, освоєння серійного виробництва насосів з напором до 1600 м і подачею до 1000 м³/год., заглибних насосів з напором до 1000 м і подачею до 500 м³/год, що вимагають менших затрат; більш широкому використанні при виготовленні насосів матеріалів з високою корозійною, абразивною і кавітаційною стійкістю.

Робота насосів повинна бути організована так, щоб усі насоси знаходились в роботі і чергувались у визначеному порядку. Графік роботи насосів будується з умовою дії водовідливу в години найменшого навантаження шахтної підстанції.

Розділ 1 Особливості роботи головних водовідливних установок в умовах залізорудних шахт

1.1 Загальна характеристика електромеханічного обладнання насосних станцій водовідливних установок шахт

Насосні станції (НС) систем головних водовідливних установок залізорудних шахт - одні з найбільш енергоємних споживачів виробничого комплексу підприємств з підземного видобутку мінеральної сировини. Доля енергоспоживання водовідливних установок шахт може досягати до 30% електроенергії від загального енергоспоживання усього підприємства [1-6], а їх робота не може бути зупинена навіть при частковій або повній зупинці підприємства.

Насосні станції утворюють складну систему, що включає елементи електромеханічного та гідравлічного обладнання: електромеханічні перетворювачі, комутаційну та захисну апаратуру, насосні установки з різноманітними варіантами поєднання окремих насосів, а також гідротранспортну систему, що містить трубопроводи різної топології та герметичних розмірів, з різним складом запорної арматури. Найважливішою особливістю головних водовідливних установок шахт є наявність значного протитиску, величина якого є співставною з номінальним тиском насоса. Типова схема з'єднань обладнання гідротранспортної системи наведена на рис. 1.1.

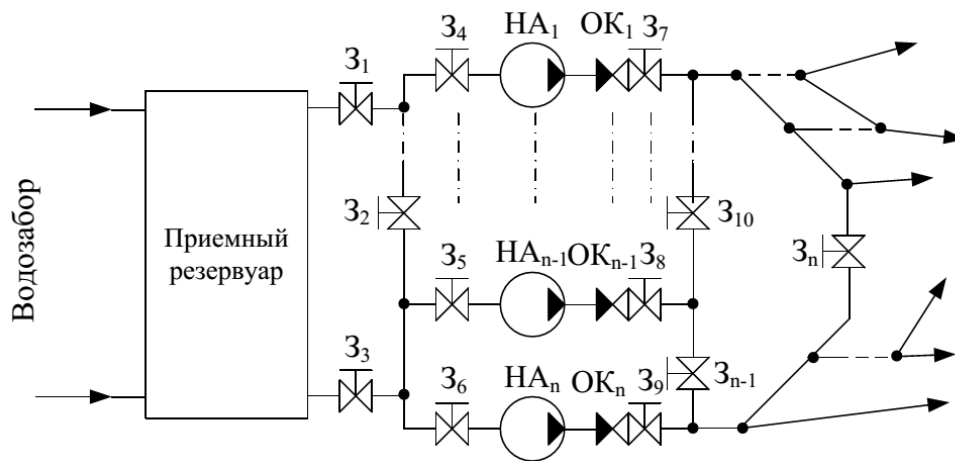


Рисунок 1.1 - Структура з'днаний обладнання гідротранспортної системи : $ЗА_1 - ЗА_n$ - запірно-регулююча арматура; $НУ_1 - НУ_n$ - насосні агрегати; $ЗК_1 - ЗК_n$ - запобіжна арматура (зворотні клапани)

Результуючі режими роботи водовідливних установок залежать від одночасної дії значної кількості чинників: технічних і напірних характеристик задіяного насосного обладнання, схеми з'єднання насосних агрегатів при їх спільній роботі, геометричних розмірів та профілю гідротранспортної системи, параметрів використаної запірно-регулюючої та запобіжної арматури, способів регулювання насосного обладнання та інше [1, 3].

В умовах головних водовідливних установок залізорудних шахт найбільшого розповсюдження набуло використання відцентрових насосів. Основними технічними характеристиками відцентрових насосів є номінальний видаток (Q , m^3/c), номінальний напір (H , m), механічна потужність (N , kBt), коефіцієнт корисної дії (η). Найважливішою технічною характеристикою відцентрових насосів, що відображає залежність основних параметрів насоса від його кутової швидкості та видатку є так звані напірні характеристики $H=f(Q)$, $N=f(Q)$, $\eta=f(Q)$, $\Delta h_{дор}=f(Q)$, які надаються для номінальної частоти обертання робочого колеса насоса.

Аналіз технічної документації напірних характеристик відцентрових насосів дозволяє виділити наступні найбільш розповсюджені види напірних

характеристик : пологі (рис. 1.2, 1), круто спадаючі (рис. 1.2, 2), з явно вираженим максимумом (рис. 1.2, 3).

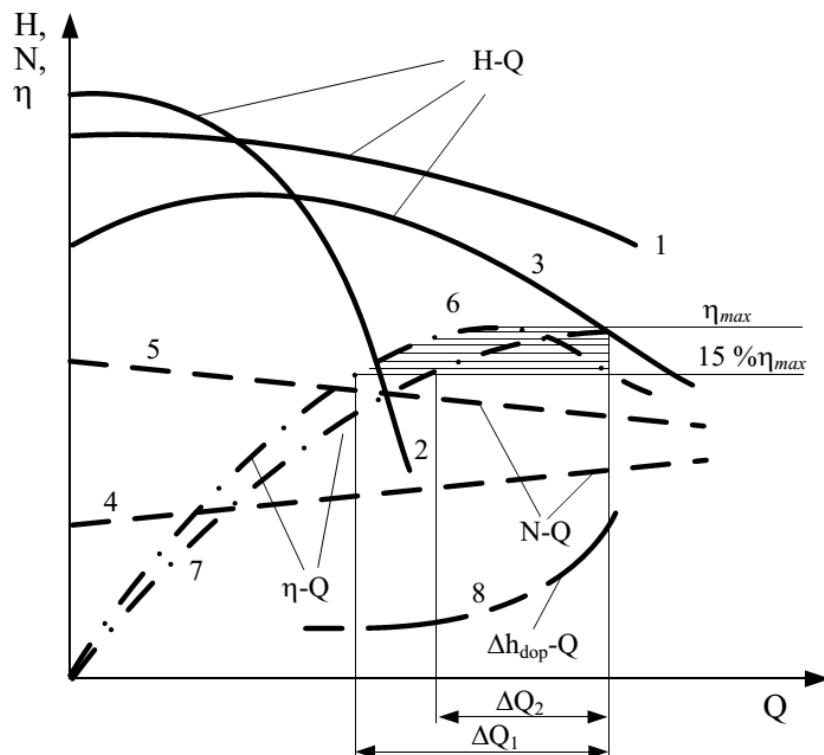


Рисунок 1.2 – Типові різновиди напірних характеристик відцентрових насосів

У системах водопостачання та інших технічних застосуваннях використовуються різні типи насосів з особливими характеристиками залежно від конкретних експлуатаційних вимог. Насоси з пологими характеристиками є оптимальними в умовах, коли потрібне гнучке регулювання продуктивності при відносно стабільному тиску. Робоча зона таких насосів розташована переважно праворуч від точки максимальної ефективності.

На противагу цьому, насоси з круто спадаючими характеристиками знаходять своє застосування в системах, де первинним завданням є широкий діапазон зміни тиску при мінімальних варіаціях подачі рідини. Їхня конструкція дозволяє забезпечувати високу точність тиску в умовах незначних коливань продуктивності.

Таким чином, вибір типу насоса залежить від специфічних вимог конкретної технічної системи та бажаних параметрів роботи обладнання.

Відцентрові насоси залізорудних шахт мають зростаючу енергетичну характеристику (рис. 1.2, 4), а осьові насоси - спадаючу енергетичну характеристику (рис. 1.2, 5).

Енергетична характеристика насоса $\eta = f(Q)$ визначає зону доцільного використання насоса при постійній частоті обертання, яка знаходиться в діапазоні 15% від максимального значення $\eta_{\text{макс}}$ рис. 1.2, 6, 7.

Залежність $\Delta h_{\text{доп}} = f(Q)$ визначає залежність додаткових втрат напору у всмоктуючому патрубку насоса від його видатку за умови безкавітаційного режиму роботи насоса.

У гідравлічних системах досить поширеною практикою є одночасне використання декількох насосів, які підключаються до єдиного магістрального трубопроводу. Залежно від технічних завдань, інженери можуть застосовувати два основних варіанти підключення насосного обладнання: послідовне та паралельне.

При послідовному включенні насосів основною метою є досягнення підвищеного напору. У такій конфігурації сумарний напір розраховується як арифметична сума напорів, створених кожним робочим агрегатом, причому за незмінного значення подачі рідини, (рис. 1.3, а).

Паралельне з'єднання насосів використовується переважно для збільшення загальної продуктивності системи. В цьому випадку сумарна характеристика формується шляхом додавання значень подач окремих агрегатів при незмінному рівні напору (рис. 1.3, б).

Таким чином, вибір схеми підключення насосів безпосередньо залежить від конкретних технологічних вимог та бажаних параметрів гідравлічної системи.

З урахуванням компактності конструкції, простоти механічного з'єднання з насосом, простоти автоматизації та високих енергетичних характеристик, для

електроприводу насосів найбільшого поширення набули асинхронні електродвигуни. На водовідливних установках залізорудних шахт використовують висковольтні асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором та захищеним виконанням [2-5].

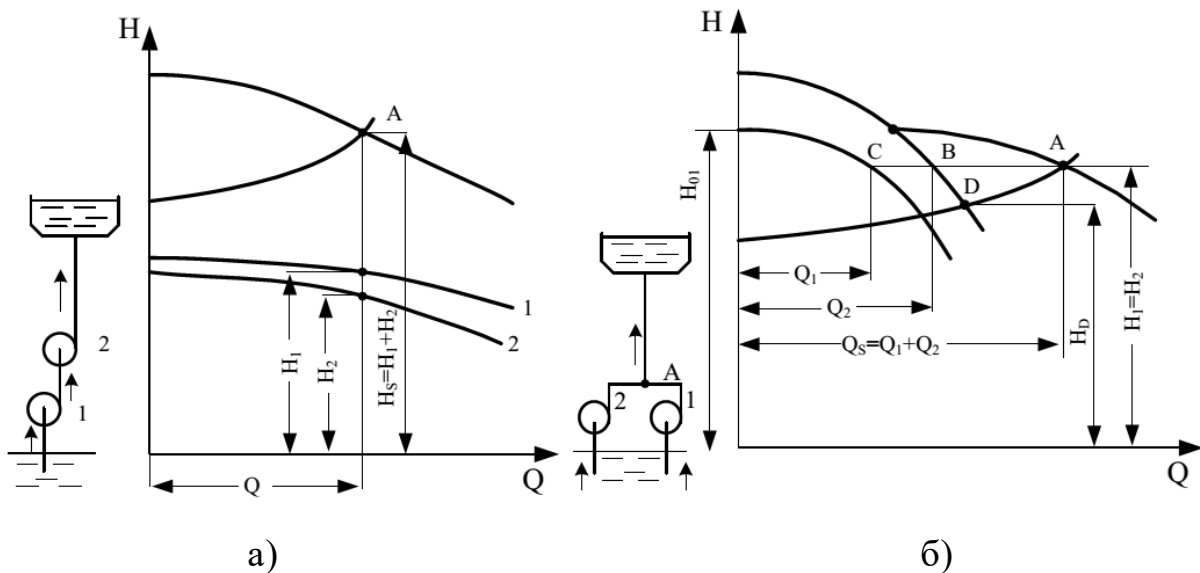


Рисунок 1.3 –Схемні варіанти вмикання окремих насосів на загальну трубопровідну мережу: а) при послідовному з'єднанні; б) при паралельному з'єднанні

Паралельне з'єднання насосів (рис. 1.3, б) зазвичай застосовують для збільшення подачі. Для отримання сумарної Н- Q характеристики насосів підсумовують значення подач агрегатів, що працюють при одному і тому ж значенні напору [2, 3, 5].

У якості електроприводу насосів, з огляду на компактність конструкції, простоту з'єднань з турбомеханізмів, легкої автоматизації та відносно низьких експлуатаційних витрат, масове застосування знайшли асинхронні електродвигуни змінного струму [2-5].

Гідравлічна інфраструктура систем водо- та теплопостачання являє собою складну трубопровідну мережу, яка складається з різноманітних ділянок трубопроводів. Ці ділянки можуть бути з'єднані як паралельно, так і послідовно, і кожна з них має унікальні технічні характеристики. Зокрема, кожен елемент мережі відрізняється власними параметрами, такими як діаметр труби, її

протяжність, геодезичне розташування, а також наявність та особливості запірно-регулюючої арматури.

Складність такої системи вимагає ретельного проектування та врахування всіх технічних нюансів для забезпечення ефективного та надійного функціонування інженерних комунікацій.

Особливістю гідравлічної мережі є її напірно-видаткова характеристика, яка має параболічну форму, рис. 1.4, [9]. Це означає, що зміна продуктивності системи відбувається нелінійно і залежить від складної взаємодії різних конструктивних і фізичних факторів трубопроводної мережі. Напірна характеристика трубопроводної мережі описується наступною залежністю, м:

$$H = H_{st} + R_s \cdot Q^2 \quad (1.1)$$

де H_{st} - статичний протитиск, який визначається абсолютною висотою підйому рідини, м;

R_s - гідравлічний опір гідротранспортної мережі, сек²/м⁵.

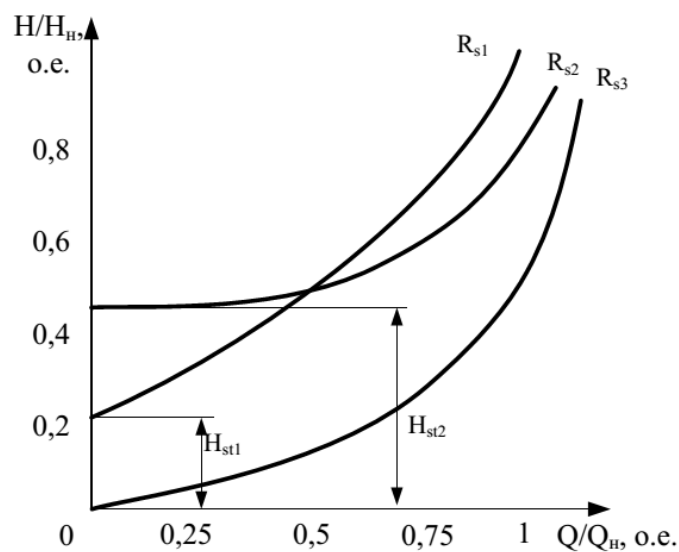


Рисунок 1.4 - Типова форма напірно-витратних характеристик гідротранспортної мережі

З науково технічної літератури [9] відомо, що в гідротранспортних мережах головного водовідливу залізорудних шахт статичний протитиск, який

визначається глибиною видобутку коорисних копалин, може сягати до 80 % номінального напору насоса, а при значній глибині видобутку використовуються послідовно-каскадні схеми шахтного водовідведення. Значення номінального напору насоса шахтного водовідливу обмежує максимально можливу відстань між окремими горизонтами системи водовідливу залізорудної шахти.

Другий доданок у виразі (1.1) визначає розподілені втрати напору в трубопроводі по довжині трубопроводу, а також втрати на місцевих гідравлічних опорах – поворотах та з'єднаннях трубопроводів, втратах у запірній арматурі та інше [1-3, 7-9].

Для визначення втрат гідравлічного тиску по довжині трубопроводу використовують відомий вираз - формулу Дарсі - Вейсбаха, метрів, [7]:

$$h_l = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (1.2)$$

де l - довжина трубопроводу, м;

d - діаметр трубопроводу, м;

λ – коефіцієнт гідравлічного тертя, що залежить від стану внутрішніх стінок;

v - швидкість руху рідини в поперечному перетині трубопровода, м/с.

Локальні втрати напору в гідравлічних системах виникають внаслідок різноманітних гідродинамічних факторів, що порушують стандартний режим руху рідини. До таких факторів належать раптові зміни конфігурації поперечного перерізу потоку, трансформації швидкісного режиму, явища поперечної циркуляції, процеси з'єднання або розділення потоків, а також наявність запірної-регулюючої арматури.

Кількісна оцінка цих гідравлічних втрат здійснюється за допомогою класичної формули Вейсбаха, м, [7-9], яка дозволяє розрахувати величину напірних втрат з урахуванням складних гідродинамічних процесів, що відбуваються в трубопроводних системах:

$$h_m = \zeta \frac{v^2}{2g} \quad (1.3)$$

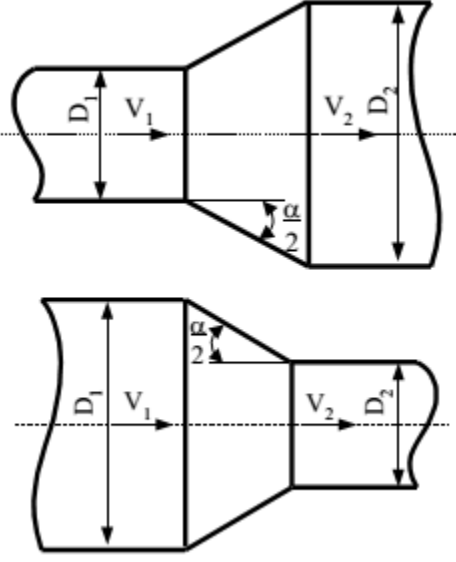
де ζ - коефіцієнт місцевого опору, який визначається типом місцевого опору і залежить від значення числа Рейнольдса.

Точний розрахунок локальних опорів гідравлічної мережі визначає енергетичну ефективність гідравлічних мереж та головних водовідливних установок залізорудних шахт.

Таблиця 1.1 містить вирази для розрахунку місцевих втрат тиску на головних різновидах місцевих опорів, які розповсюджені в гідравлічних схемах водовідливних установок.

Таблиця 1.1 – Головні типи місцевих опорів в трубопроводних системах

| № | Втрати напору | Схематичне зображення |
|---|---|-----------------------|
| 1 | <p>Раптове розширення</p> $h_m = \zeta_{vr} \frac{V_2^2}{2g};$ $\zeta_{vr} = \alpha_1 \left(\frac{D_2^2}{D_1^2} - 1 \right)^2$ | |
| 2 | <p>Раптове звуження</p> $h_m = \zeta_{vs} \frac{V_2^2}{2g};$ $\zeta_{vs} = 0,5 \left(1 - \frac{D_2^2}{D_1^2} \right)$ | |

| | | |
|---|---|--|
| 3 | <p>Дифузор</p> $h_m = \zeta_{dif} \frac{V_2^2}{2g};$ $\zeta_{dif} = k_{sm} \left(\frac{D_2^2}{D_1^2} - 1 \right)^2 + \zeta_{tr}$ |  |
|---|---|--|

У водовідливних установках трубопровідна арматура виконує широкий спектр функцій, включаючи захисні, запобіжні та регульовальні. До складу такої арматури входять засувки, затвори, зворотні клапани та інші елементи, призначені для контролю та управління гідравлічними потоками.

Процес управління запорною арматурою має критично важливе значення, оскільки безпосередньо впливає на перебіг перехідних процесів у гідравлічній системі. Це стосується як штатних режимів роботи (зокрема, регулювання та пуску), так і позаштатних, аварійних ситуацій.

Проте часто трапляються випадки неналежного маневрування арматурою, коли її закриття або відкриття здійснюється без дотримання необхідного темпу та тривалості. Такі дії можуть призвести до низки негативних наслідків: виникнення кавітаційних явищ, гідравлічних ударів у комунікаційній мережі, посилення коливань стінок та проточної частини насосу, коливань опору на валу насосного агрегата та його електропривода, а також критичного зниження подачі до повної зупинки.

Таким чином, професійне та обережне управління трубопровідною арматурою є запорукою надійної та стабільної роботи водовідливних установок.

Отож, водовідливна установка становить собою складну та високоенергоємну електрогідравлічну систему, яка має багатокomпонентну структуру. До її складу входять декілька ключових елементів: насосне обладнання з різноманітними варіантами підключення турбомеханізмів, трубопровідна мережа складної конфігурації, а також комплекс запірно-регулюючої та запобіжної арматури.

Характерною особливістю такої системи є те, що в більшості випадків насосне обладнання оснащується нерегульованим асинхронним або синхронним електроприводом. Це накладає певні технологічні обмеження та особливості функціонування всього комплексу.

Принципово важливою характеристикою електрогідравлічної системи є її інтегральність та взаємозалежність окремих елементів. Будь-яка зміна режиму роботи будь-якого компонента головного водовідливу шахти миттєво позначається на функціонуванні всієї системи, спричиняючи складні взаємопов'язані трансформації параметрів її роботи.

1.2 Структура багатоступінчастої головної водовідливної установки залізорудної шахти

Для відкачування води з шахти використовуються головні і проміжні шахтні водовідливні установки. Головна насосна установка відкачує весь водоприплив з шахти, проміжні насосні установки – відкачують воду з окремих ділянок або виробок до водозбірника головної водовідливної установки.

Схема головної водовідливної установки багатоступінчаста. На залізорудній шахті функціонує розгалужена система водовідведення з чітко визначеною вертикальною структурою. Водозбірники розміщені на різних горизонтах – а саме на позначках 475, 865, 1045 та 1135 метрів, безпосередньо біля стовбура № 1.

Принцип роботи системи базується на послідовному переміщенні шахтної води між водозбірниками. Зокрема, вода з нижніх горизонтів послідовно

перекачується до водозбірника на позначці 475 метрів, який виступає кінцевим накопичувачем перед остаточним транспортуванням.

Завершальним етапом є відкачування акумульованої води з водозбірника на позначці 475 метрів до віддаленого хвостосховища, що забезпечує повне видалення шахтних вод за межі гірничого підприємства.

На горизонті 865 метрів біля стовбура залізорудної шахти розташований водозбірник дренажних вод, що має значну ємність - 1600 кубічних метрів. Система водовідведення побудована таким чином, що дренажна вода з цього резервуара послідовно перекачується на горизонт 475 метрів і далі, по мірі накопичення, транспортується на денну поверхню.

Передбачено також аварійний режим: у випадку переповнення басейну дренажною водою, вона автоматично надходить самопливом до водозбірника на позначці 475 метрів, забезпечуючи неперервність водовідведення.

Технічне оснащення камер водовідливних установок на різних горизонтах включає спеціалізовані насоси, характеристики яких (кількість та продуктивність) детально представлені у відповідній таблиці 1.2.

Таблиця 1.2. Характеристики системи водовідливу залізорудної шахти

| Розташування насосної установки | Кількість насосів | Тип насоса | Продуктивність насосу, м ³ /год | Напір, м | Тип двигуна | Ємність водозбірника, м ³ | Нормальний приток води по горизонту, м ³ /год |
|---------------------------------|-------------------|------------------|--|----------|-------------------------------|--------------------------------------|--|
| горизонт 475 м | 6 | 8МС-7/10-300х600 | 300 | 600 | А-13-800 ВАО-2-80 | 370 | |
| горизонт 865 м | 6 | 8МС-7/8-300х480 | 300 | 80 | А-13-800 А-13-600 ВАО-2-80 | 641 | 110 |
| горизонт 1045 м | 5 | 8МС-7/4-300х240 | 300 | 40 | ВАО-2-315 | 100 | 350 |

| | | | | | | | |
|--|---|---------------------|-----|----|-----------------|-----|----|
| горизонт 1135 м | 4 | НС- 60x120 | 60 | 20 | 4АМУ- 250-54 | 300 | 70 |
| горизонт 865 м (дренажний водозбірник) | 4 | 8МС-7/8- 300x480 | 300 | 80 | А-13- 800 | 600 | |

Повну конфігурацію системи водовідливу унаочнено на спеціальній схемі. на рисунку 1.5.

СХЕМА

(Согласно проекта реконструкции
 (строительство водоотлива гар.1135)
 главных водоотливных установок
 шахтоуправления по подземной добыче руды
 (на правах шахты)
 ПАО "АрселорМиттал Кривой Рог"

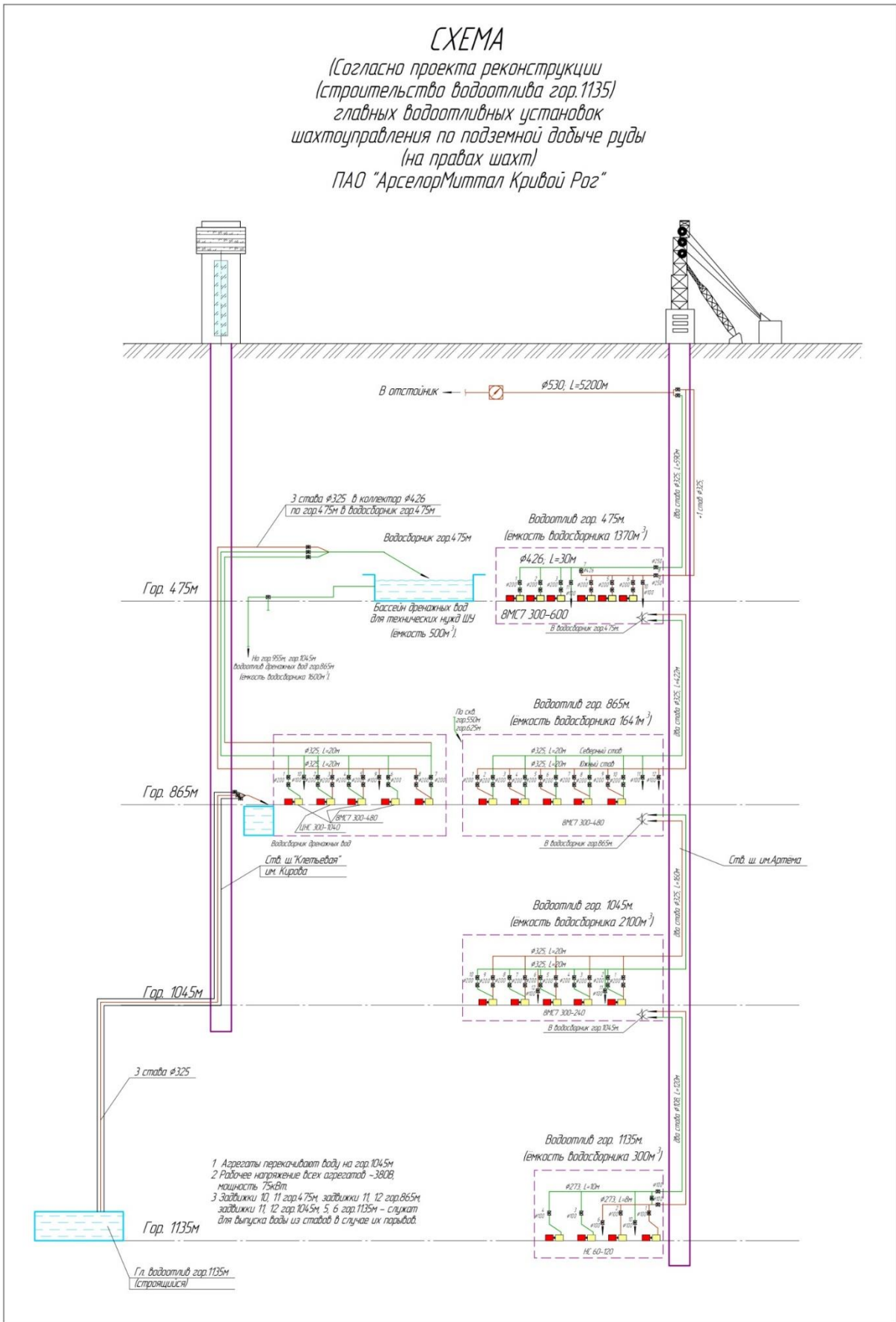


Рисунок 1.5 – Схема головного та проміжного водовідливу залізорудної шахти

Водовідливні установки оснащені відцентровими насосами серії ЦНС, що мають складну багатокомпонентну конструкцію. Типова установка включає насос з електродвигуном, комплекс трубопровідної арматури: всмоктуючий трубопровід з приймальною сіткою та клапанами, нагнітальний трубопровід з засушкою та зворотним клапаном, а також додаткові елементи, зокрема трубку з вентилем для попередньої заливки насоса водою перед його запуском. Контроль параметрів здійснюється за допомогою манометра, який вимірює тиск у нагнітальному трубопроводі.

Технологічний цикл водовідведення передбачає безперервне надходження води через водовідливні канавки до шахтних водозбірників. У цих резервуарах відбувається природне освітлення рідини та осадження механічних домішок у вигляді мулу.

Наступним етапом є транспортування води через колектори до приймальних колодязів, звідки вона відкачується на денну поверхню спеціалізованими насосами. Трубопроводи водовідливних ставів, прокладені по стовбуру № 1 залізорудної шахти, мають діаметр 325 мм і виготовлені зі сталевих труб, з'єднаних між собою методом зварювання.

Система водовідведення залізорудної шахти побудована за багаторівневою схемою послідовного переміщення шахтних вод. Головні водовідливні установки забезпечують транспортування води від нижніх горизонтів до верхніх, з поступовим піднесенням до денної поверхні.

Принципова схема руху водних потоків передбачає первинне відкачування води до водозбірника на горизонті 865 метрів, звідки вона далі перекачується до водозбірника на позначці 475 метрів і потім подається на поверхню.

Топологія головних водовідливних установок охоплює декілька горизонтів: 1135 метрів біля стовбура шахти, а також позначки 1225 та 1315 метрів. Шахтна вода надходить самопливом через водовідливні канавки до

водозбірника головного водовідливу на горизонті 1135 метрів, звідки потім по-
слідовно транспортується за раніше описаною уніфікованою схемою.

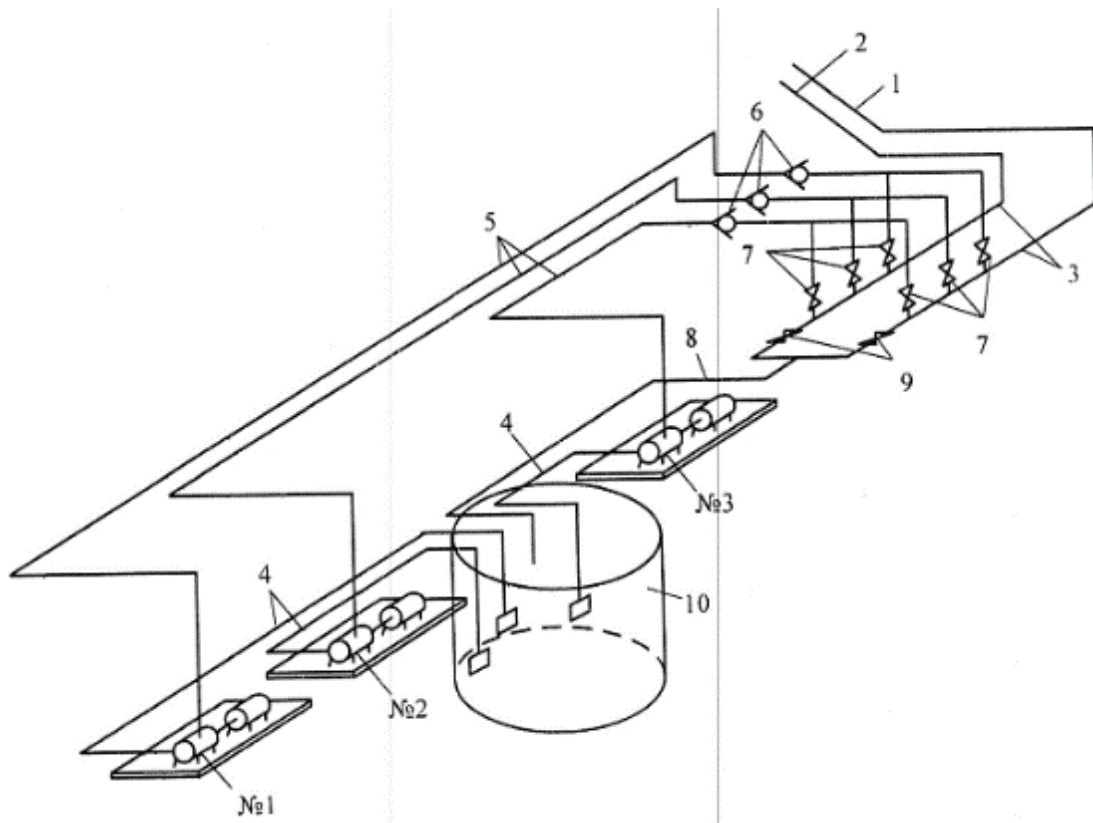


Рисунок 1.6 – Схема трубопроводів у насосній камері

Конфігурація трубопровідної системи в насосній камері являє собою складну інженерну конструкцію з продуманою схемою підключення та резервування. Основними елементами системи є два напірні стави - робочий та резервний, які замкнені в єдиному колекторі всередині насосної камери.

Технічна схема передбачає наявність трьох насосів, кожен з яких має власний підвідний трубопровід. Напірні трубопроводи насосів обладнані зворотними клапанами та приєднані до центрального колектора. Використання керованих розподільчих засувок дозволяє гнучко маневрувати, підключаючи будь-який насос до будь-якого напірного ставу.

Для забезпечення експлуатаційної надійності передбачено додаткові технічні рішення. Зокрема, через спеціальну трубу з допоміжними засувками є можливість випускати воду в колодязь у разі необхідності проведення ремонтних

робіт на ставах. Фіксація трубопроводів здійснюється за допомогою кронштейнів та балок, закріплених безпосередньо в стінках насосної камери.

Така багатокомпонентна система забезпечує максимальну гнучкість, надійність та ремонтпридатність водовідвідної інфраструктури.

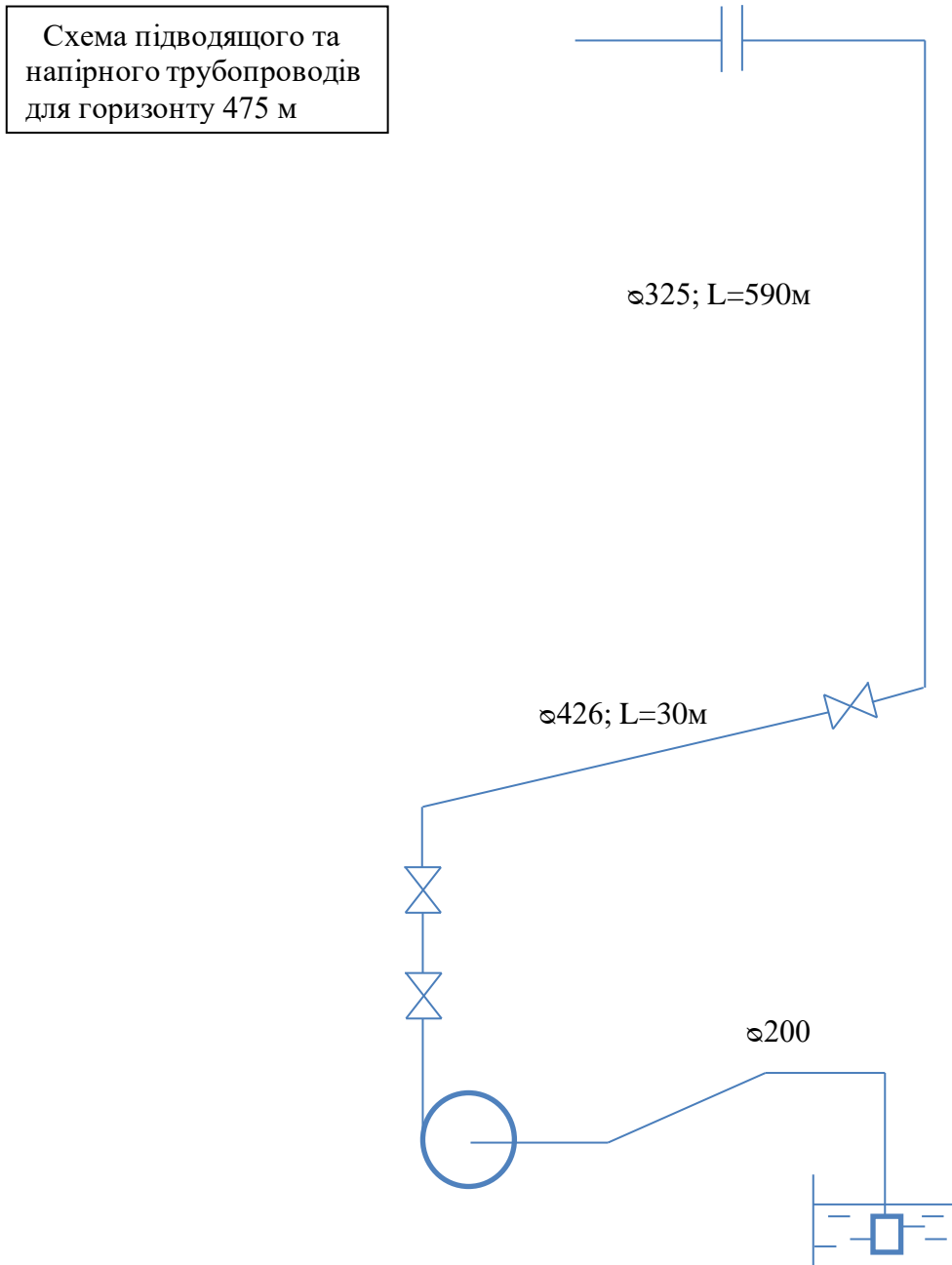


Рисунок 1.7 – Розрахункова схема ділянки водовідливу горизонту 475 м: 1 – підводящий трубопровід; 2-3, 3-4, 4-5 – ділянки напірного трубопроводу, розташовані відповідно у камері, у стволі та на поверхні

1.3 Технічні характеристики електромеханічного обладнання ділянки головного водовідливу горизонту 475 м

Рисунок 1.8 містить зображення напірної характеристики насоса типу ЦНС-300-420

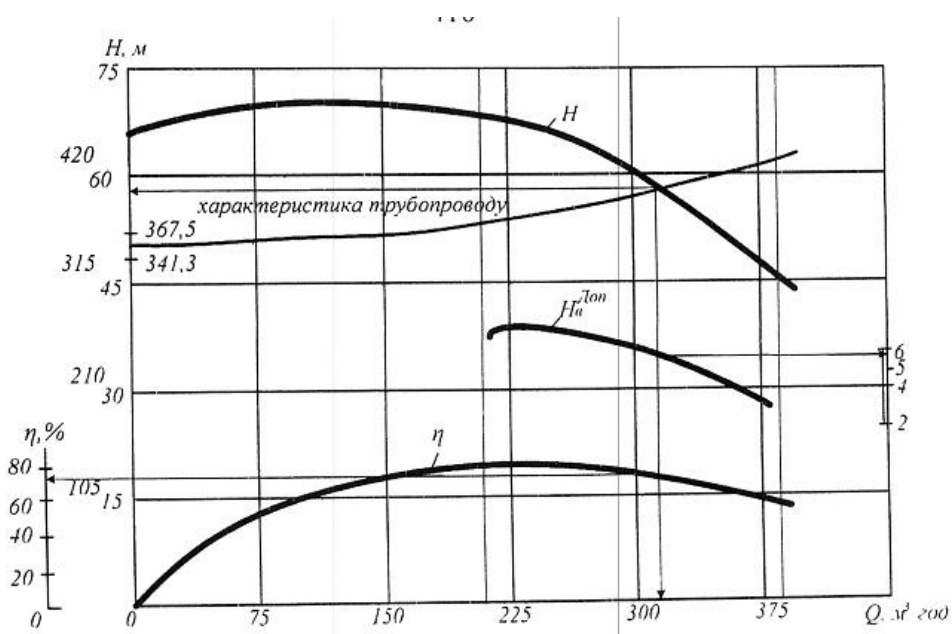


Рисунок 1.8 - Напірно-витратні характеристики насоса ЦНС-300-420

У якості електроприводу насоса ЦНС-300-420 у теперішній час використовується високовольтний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором ВАО 560 LA4 номінальною потужністю 800 кВт з частотою обертання ротора 1490 об/хв. Технічні характеристики цього двигуна наведено у табл. 1.2.

Таблиця 1.2. Технічні характеристики асинхронного двигуна ВАО 560 LA4.

| | |
|----------------------------|--------------|
| Тип електродвигуна | ВАО -560 LA4 |
| Потужність, кВт | 800 |
| Напруга, В | 6000 |
| Частота обертання, об/хв | 1490 |
| ККД, % | 95,7 |
| $\cos \varphi$ | 0,9 |
| Кратність пускового струму | 5,5 |

| | |
|-----------------------------|---|
| Перевантажувальна здібність | 2 |
|-----------------------------|---|

Розраховані параметри Т-подібної схеми заміщення обраного двигуна наведено в табл. 1.3.

Таблиця 1.3. Розраховані параметри схеми Т-подібної заміщення двигуна ВАО -560 LA4.

| | |
|---|-----------------------|
| Індуктивний опір фази статора, Ом | $X_{1\sigma} = 3.551$ |
| Індуктивний опір фази ротора, Ом | $X_{2\sigma} = 4.786$ |
| Активний опір фази статора, Ом | $R_1 = 0.644$ |
| Активний опір фази ротора, Ом | $R_2 = 0.415$ |
| Індуктивний опір контуру намагнічування, Ом | $X_{\mu} = 147.7$ |
| Струм намагнічування, А | $I_{\mu} = 22.196$ |
| Критичне ковзання | $s_k = 0.05$ |

Висновки по розділу 1

У першому розділі представлено комплексне дослідження гідротранспортних систем промислових підприємств, з акцентом на специфіці шахтних водовідливних установок. Основна увага приділена аналізу ключових аспектів функціонування таких систем, включаючи методологію забезпечення їхньої надійності та мінімізації ризиків виникнення аварійних режимів.

Зміст розділу охоплює декілька принципів напрямків: розгляд теоретичних принципів побудови гідротранспортних систем, детальне вивчення вимог до головних водовідливних установок залізорудних шахт, розроблення заходів з покращення показників надійності електромеханічного обладнання, а також розроблення ефективних стратегій захисту від потенційних аварійних ситуацій, пов'язаних з гідравлічною складовою обладнання.

Особливою складовою дослідження є представлення конкретних технічних параметрів: детальна інформація про конструкцію та геометричні

характеристики гідротранспортної системи головного водовідливу залізорудної шахти, а також вичерпні технічні характеристики електромеханічного обладнання насосної станції на позначці 475 метрів, яка виступає центральним об'єктом наукового аналізу.

Розділ 2 Експериментальні дослідження водопритоку залізорудної шахти

2.1 Вихідні дані експериментального дослідження водопритоку

Вихідні дані про водоприток залізорудної шахти було отримано з диспетчерської системи обліку роботи головного водовідливу залізорудної шахти.

Приклад звіту про витрату води наведено на рис.2.1.

арселор

шахтная вода
Группа: шахтоуправление

Отчет о потреблении воды
за Март 2023 года.

Отчет составлен 31.03.2023 7:15:02

Система 2: схема учета В.10

| Дата | Время | Показания вычислителя м3 | Расход м3/сут. | T1 °C | Время НАРАБОТКИ, мин:сек | | | Время ПРОСТОЯ, мин:сек | | | | |
|---------------|-------|--------------------------|----------------|--------|--------------------------|----------|------------------|------------------------|-----------------|--------------------|---------------|---------------|
| | | | | | Суммарное время | Работа | Расход отсут ст. | Расход > Оплач | Суммарное время | Отсутст. измерений | Реверс потока | Отсутст. сети |
| 01.03.2023 | 24:00 | 5080305.15 | 3074,15 | 12,173 | 1501570:37 | 17:04 | 479:41 | 00:00 | 237571:56 | 52:13 | 11:02 | 00:00 |
| 02.03.2023 | 24:00 | 5083533.38 | 3228,38 | 12,070 | 1502579:31 | 1008:54 | 339:17 | 00:00 | 237663:45 | 91:49 | 00:00 | 00:00 |
| 03.03.2023 | 24:00 | 5086779.32 | 3245,82 | 11,841 | 1503564:52 | 985:21 | 454:39 | 00:00 | 237663:45 | 00:00 | 00:00 | 00:00 |
| 04.03.2023 | 24:00 | 5089749.74 | 2970,74 | 11,956 | 1504540:07 | 975:15 | 464:45 | 00:00 | 237663:45 | 00:00 | 00:00 | 00:00 |
| 05.03.2023 | 24:00 | 5092842.65 | 3092,65 | 11,819 | 1505380:35 | 840:28 | 561:54 | 00:00 | 237663:45 | 00:00 | 37:38 | 00:00 |
| 06.03.2023 | 24:00 | 5096137.96 | 3295,46 | 11,788 | 1506274:43 | 894:08 | 540:35 | 00:00 | 237663:45 | 00:00 | 05:17 | 00:00 |
| 07.03.2023 | 24:00 | 5099667.93 | 3529,93 | 12,135 | 1507261:35 | 986:52 | 403:00 | 02:42 | 237664:55 | 01:10 | 46:16 | 00:00 |
| 08.03.2023 | 24:00 | 5102862.43 | 3194,43 | 12,564 | 1508180:44 | 919:09 | 299:50 | 00:00 | 237885:56 | 22:10 | 00:00 | 00:00 |
| 09.03.2023 | 24:00 | 5105908.37 | 3045,87 | 12,528 | 1508962:14 | 781:30 | 551:10 | 06:50 | 237972:32 | 86:36 | 13:54 | 00:00 |
| 10.03.2023 | 24:00 | 5109360.01 | 3451,51 | 12,475 | 1509909:53 | 947:39 | 446:44 | 00:00 | 237978:15 | 05:43 | 39:54 | 00:00 |
| 11.03.2023 | 24:00 | 5112691.29 | 3331,29 | 12,921 | 1510882:34 | 972:41 | 399:02 | 04:37 | 237978:50 | 00:35 | 63:05 | 00:00 |
| 12.03.2023 | 24:00 | 5115742.44 | 3051,44 | 13,676 | 1511783:37 | 901:03 | 506:59 | 06:07 | 238002:15 | 23:25 | 02:26 | 00:00 |
| 13.03.2023 | 24:00 | 5118914.35 | 3171,85 | 13,446 | 1512689:23 | 905:46 | 358:06 | 00:00 | 238178:23 | 17:608 | 00:00 | 00:00 |
| 14.03.2023 | 24:00 | 5121920.73 | 3006,23 | 13,404 | 1513592:47 | 903:24 | 535:33 | 00:00 | 238179:26 | 01:03 | 00:00 | 00:00 |
| 15.03.2023 | 24:00 | 5125294.75 | 3374,25 | 13,501 | 1514479:06 | 886:19 | 501:12 | 00:00 | 238231:55 | 52:29 | 00:00 | 00:00 |
| 16.03.2023 | 24:00 | 5128239.89 | 2944,89 | 13,602 | 1515376:10 | 897:04 | 482:04 | 00:00 | 238292:47 | 60:52 | 00:00 | 00:00 |
| 17.03.2023 | 24:00 | 5131384.81 | 3145,31 | 13,611 | 1516269:29 | 893:19 | 541:27 | 00:00 | 238292:47 | 00:00 | 05:14 | 00:00 |
| 18.03.2023 | 24:00 | 5134310.85 | 2925,85 | 13,566 | 1517125:01 | 855:32 | 418:57 | 00:00 | 238458:18 | 165:31 | 00:00 | 00:00 |
| 19.03.2023 | 24:00 | 5137480.81 | 3169,81 | 13,500 | 1517976:37 | 851:36 | 573:43 | 00:00 | 238472:59 | 14:41 | 00:00 | 00:00 |
| 20.03.2023 | 24:00 | 5140796.86 | 3316,36 | 13,484 | 1518890:21 | 913:44 | 526:16 | 00:00 | 238472:59 | 00:00 | 00:00 | 00:00 |
| 21.03.2023 | 24:00 | 5143718.77 | 2921,77 | 13,578 | 1519709:17 | 818:56 | 545:00 | 00:00 | 238472:59 | 00:00 | 76:04 | 00:00 |
| 22.03.2023 | 24:00 | 5146575.46 | 2856,46 | 13,775 | 1520566:28 | 857:11 | 517:21 | 00:00 | 238503:40 | 30:41 | 34:47 | 00:00 |
| 23.03.2023 | 24:00 | 5149584.65 | 3009,15 | 13,774 | 1521449:28 | 883:00 | 482:30 | 00:00 | 238578:10 | 74:30 | 00:00 | 00:00 |
| 24.03.2023 | 24:00 | 5152498.16 | 2913,66 | 13,809 | 1522314:06 | 864:38 | 552:16 | 00:00 | 238601:16 | 23:06 | 00:00 | 00:00 |
| 25.03.2023 | 24:00 | 5155683.39 | 3185,39 | 13,919 | 1523184:47 | 850:41 | 546:19 | 00:00 | 238644:16 | 43:00 | 00:00 | 00:00 |
| 26.03.2023 | 24:00 | 5158878.70 | 3195,20 | 13,998 | 1524029:53 | 865:06 | 565:35 | 00:00 | 238644:16 | 00:00 | 09:19 | 00:00 |
| 27.03.2023 | 24:00 | 5162336.52 | 3458,02 | 14,211 | 1524951:21 | 921:28 | 493:23 | 00:00 | 238669:25 | 25:09 | 00:00 | 00:00 |
| 28.03.2023 | 24:00 | 5165397.29 | 3060,79 | 13,958 | 1525816:31 | 865:10 | 574:50 | 00:00 | 238669:25 | 00:00 | 00:00 | 00:00 |
| 29.03.2023 | 24:00 | 5168609.54 | 3212,04 | 13,176 | 1526660:19 | 843:48 | 596:12 | 00:00 | 238669:25 | 00:00 | 00:00 | 00:00 |
| 30.03.2023 | 24:00 | 5172655.43 | 3445,93 | 12,915 | 1527584:46 | 924:27 | 482:26 | 00:00 | 238669:25 | 00:00 | 33:07 | 00:00 |
| 31.03.2023 | 06:00 | 5173377.82 | 1322,12 | 12,830 | 1527919:55 | 335:09 | 08:17 | 00:00 | 238669:25 | 00:00 | 16:34 | 00:00 |
| Всего: | | | 96146,73 | 13,10 | | 27246:22 | 14749:03 | 20:16 | | 1149:42 | 394:37 | 00:00 |

Представитель поставщика _____ Представитель потребителя _____

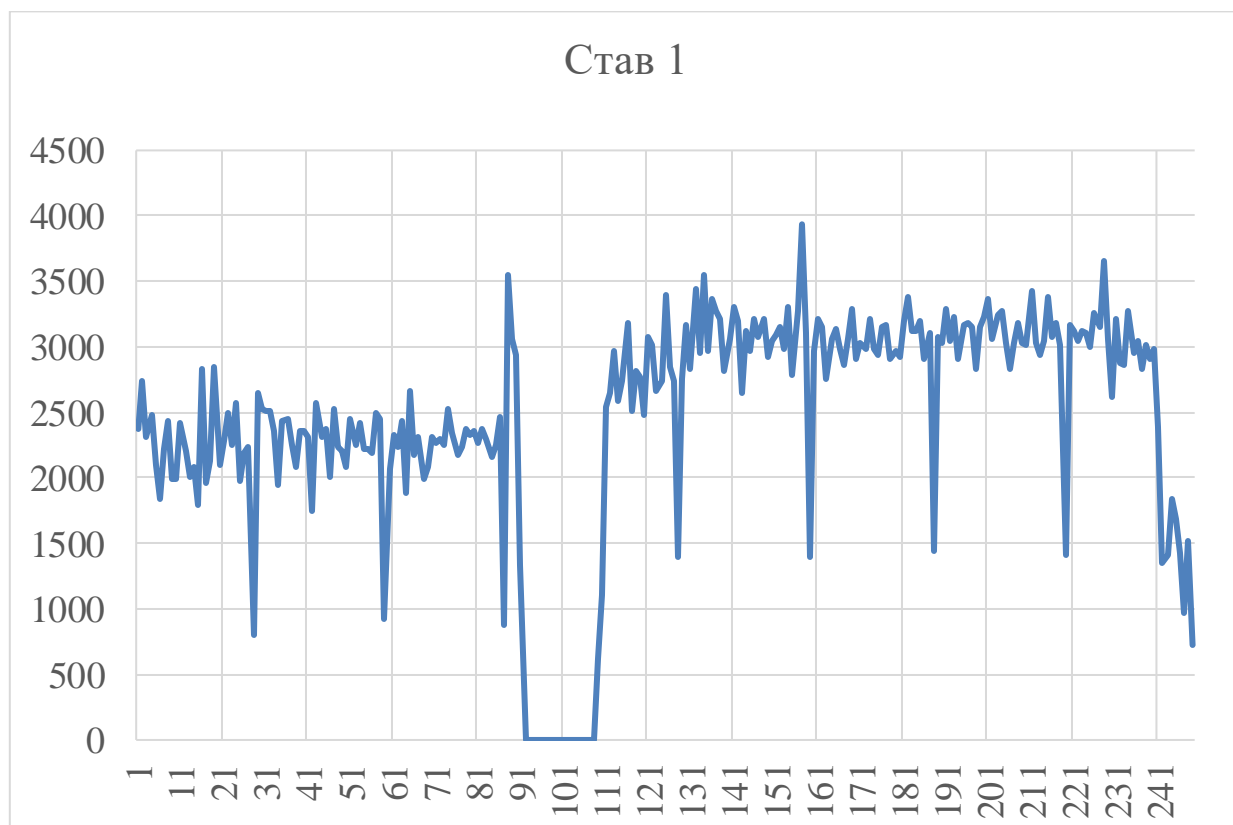
Рисунок 2.1 – Приклад місячного звіту диспетчерської системи обліку витрат води через головний водовідлив залізорудної шахти.

Диспетчерська система обліку реєструє витрати води через два окремих стави. Дані водопритоку зареєстровано для весняно-осіннього періоду 2023 року.

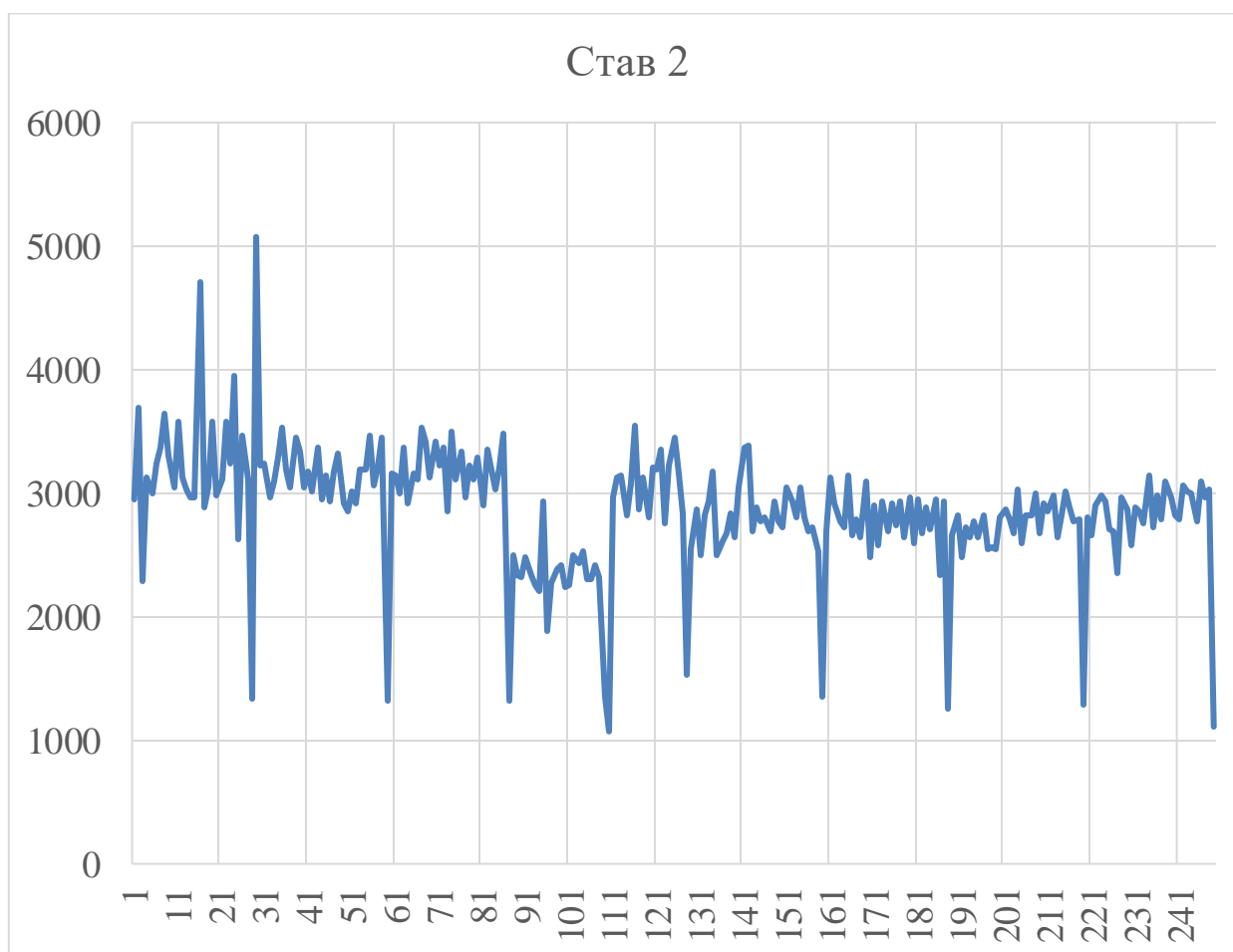
На жаль, отримані дані містять у своєму складі пропуски, пов'язані з технічними проблемами в експлуатації диспетчерської системи обліку витрат води.

Отримані від диспетчерської системи обліку роботи головного водовідливу залізорудної шахти числові значення водопритоку наведено у додатку А.

Графіки добової витрати води по окремим ставам системи головного водовідливу наведено на рис.2.2.



a)



б)

Рисунок 2.2 – Графіки добової витрати води по окремим ставам системи головного водовідливу залізорудної шахти: а – став 1; б – став 2.

З наведених графіків видно, що добовий водоприток має ймовірнісний характер. На обох графіках просліджується періодичне зменшення водопритоку з періодом близько до одного місяця.

Для встановлення типу статистичного розподілу добового водопритоку залізорудної шахти та параметрів цього розподілу виконаємо статистичний аналіз отриманих експериментальних даних.

В результаті статистичного аналізу експериментальних даних будуть встановлені параметри описової статистики даних водопритоку, перевірена гіпотеза про нормальний характер експериментальних даних водопритоку,

встановлено тип і параметри статистичного розподілу експериментальних даних водопритоку.

Для проведення необхідних розрахунків статичного аналізу був розроблений сценарій у програмі MATLAB з використанням технології LiveScript. Текст сценарію наведено у Додатку Б.

Нижче наведено результати обчислень основних результатів статистичного аналізу.

2.2 Статистична обробка експериментальних даних водопритоку по ставу №1

2.2.1 Описова статистика

Кількість отриманих даних: $N = 224$

Результати розрахунків описової статистики:

Мінімальне значення: $x_{\min} = 622.84$

Максимальне значення: $x_{\max} = 3935.99$

Математичне очікування: $M_x = 2678.10$

Дисперсія: $D_x = 300575.60$

Середньоквадратичне відхилення: $S_x = 548.25$

Незміщена асиметрія: $A_x = -0.99$

Незміщений ексцес: $E_x = 1.37$

Медіана: $Med_x = 2829.98$

Розмах вибірки: $R_x = 3313.15$

Довірчі інтервали для генерального МО

$p = 0.100: 2617.59 \leq m_x \leq 2738.60$

$p = 0.050: 2605.91 \leq m_x \leq 2750.28$

$p = 0.010: 2582.93 \leq m_x \leq 2773.27$

$p = 0.001: 2555.94 \leq m_x \leq 2800.25$

Довірчі інтервали для генеральної дисперсії:

$p = 0.900: 258960.20 \leq D_x \leq 353830.36$

$p = 0.950: 251747.36 \leq D_x \leq 365210.13$

$p = 0.990: 238410.85 \leq D_x \leq 388886.82$
 $p = 0.999: 224099.40 \leq D_x \leq 418968.76$

Довірчі інтервали для генеральної асиметрії

$p = 0.900: -1.50 \leq a_x \leq -0.47$
 $p = 0.950: -1.71 \leq a_x \leq -0.26$
 $p = 0.990: -2.60 \leq a_x \leq 0.63$
 $p = 0.999: -6.10 \leq a_x \leq 4.13$

Довірчі інтервали для генерального ексцесу

$p = 0.900: 0.37 \leq e_x \leq 2.37$
 $p = 0.950: -0.05 \leq e_x \leq 2.78$
 $p = 0.990: -1.80 \leq e_x \leq 4.53$
 $p = 0.999: -8.64 \leq e_x \leq 11.38$

2.2.2 Перевірка вихідних даних на нормальний характер розподілу

Найпростіший тест: $q = 10\%$

Відкидаємо гіпотезу про нормальний розподіл.

Тест Жарка-Бера: $q = 10\%$

Статистика тесту : 51.83

Критичне значення $critval$ для тесту : 4.08

Відкидаємо гіпотезу про нормальний розподіл.

За результатами перевірки відхилено гіпотезу про нормальний розподіл добового водопритоку залізорудної шахти.

2.2.3 Побудова гістограми емпіричного розподілу даних

Число інтервалів $k=15$

Ширина інтервалу $h= 220.8766667$

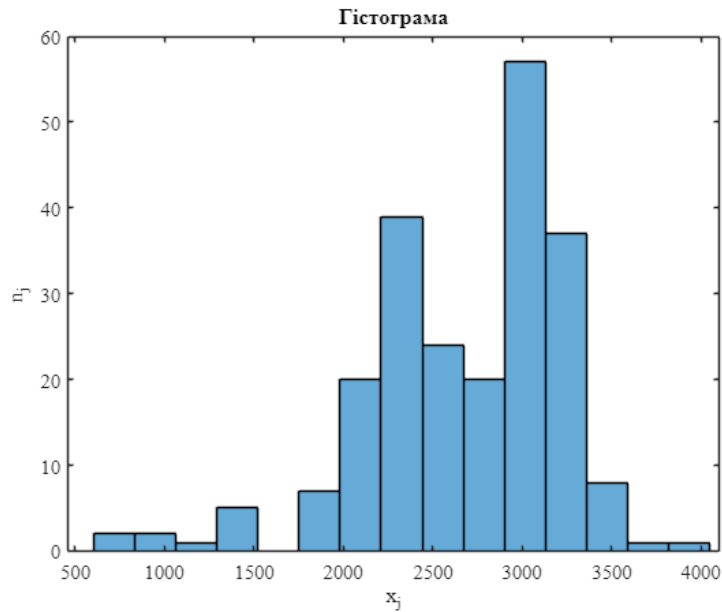


Рисунок 2.3 – Гістограма реального розподілу випадкової величини добового водопритоку, став №1

2.2.4 Параметри теоретичних розподілів

Для отриманого реального розподілу випадкової величини добового водопритоку розраховуємо значення параметрів різних відомих теоретичних розподілів випадкової величини.

Екстремальний розподіл:

$\mu=2926.5503650562$; $\sigma=434.2825506113$;

Експоненціальний розподіл:

$\mu=2678.0956696429$;

Гамма - розподіл:

$a= 18.3811298104$; $b=145.6980989342$;

Логнормальний розподіл:

$\mu= 7.8654128667$; $\sigma= 0.2554285418$;

Релеївський розподіл:

$b=1932.7998034088$;

Рівномірний розподіл:

$a=622.8400000000$; $b=3935.9900000000$;

Вейбуллівський розподіл:

$a=2885.6511021930$; $b= 6.1467283556$;

Побудуємо на одному графіку емпіричну і всі підібрані теоретичні щільності розподілу, рис.2.4.

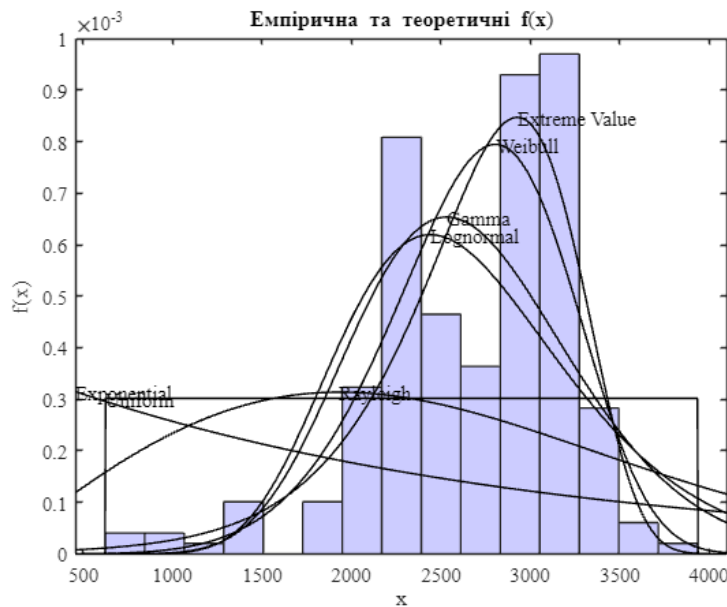


Рисунок 2.4 – Емпірична і всі підібрані теоретичні щільності розподілу добового водопритоку залізорудної шахти, став №1

Виконаємо перевірку співпадіння емпіричного та теоретичного розподілу за критерієм Колмогорова.

2.2.5 Перевірка теоретичних розподілів за критерієм Колмогорова

Критерій згоди Колмогорова:

Найкраще підходить Екстремальний розподіл;

критичний рівень значущості для нього = 0.12893

За найвищим значенням критерію Колмогорова визначаємо, що найбільш точно емпіричний розподіл співпадає з екстремальним розподілом. На рис. 2.5 наведено емпіричну та теоретичну інтегральну функцію розподілу ймовірності добового водопритоку залізорудної шахти, став №1.

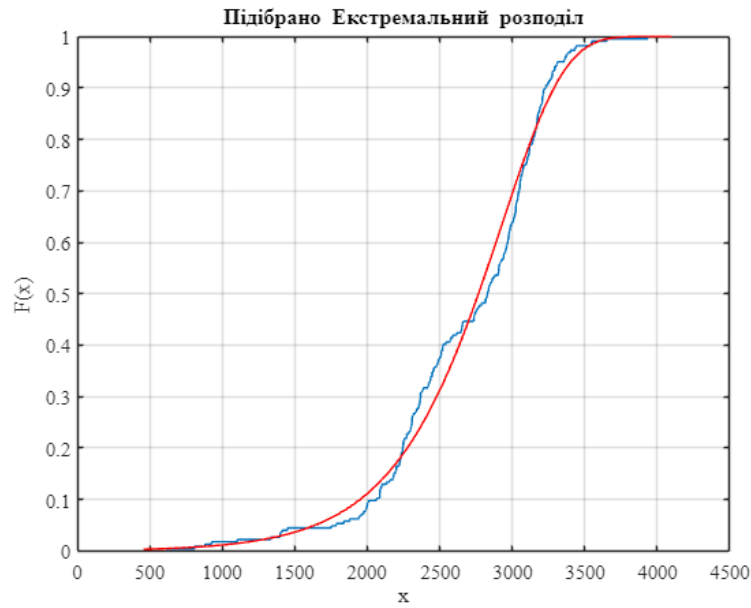


Рисунок 2.5 – Емпірична теоретична інтегральна функція розподілу ймовірності добового водопритоку залізорудної шахти, ставу №1

2.2.6 Автокореляційний аналіз

Для дослідження наявності трендів у графіках водопритоку залізорудної шахти було виконано автокореляційний аналіз даних ставу №1. Його результати наведено на рис. 2.6.

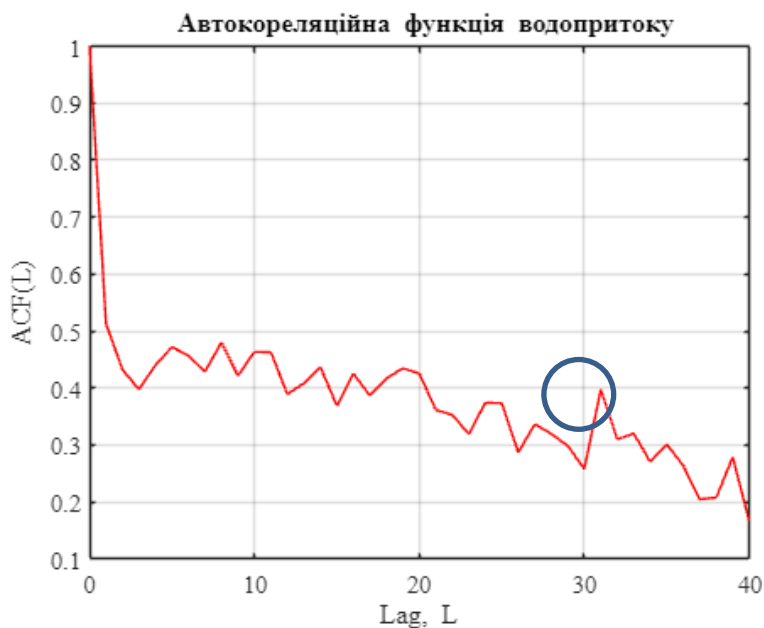


Рисунок 2.6 - Автокорелограма даних водопритоку ставу №1.

Значення автокореляційної функції слабо залежать від величини лагу, що вказує на відсутність лінійних трендів у процесі добового водопритоку на ставі №1. Відмічений локальний максимум автокорелограми може вказувати на існування періодичного тренду з періодом 31 день.

2.3 Статистична обробка даних по ставу 2

2.3.1 Описова статистика

Кількість отриманих даних: $N = 249$

Результати розрахунків описової статистики:

Мінімальне значення: $x_{\min} = 1071.08$

Максимальне значення: $x_{\max} = 5074.15$

Математичне очікування: $M_x = 2873.32$

Дисперсія: $D_x = 237016.44$

Середньоквадратичне відхилення: $S_x = 486.84$

Незміщена асиметрія: $A_x = -0.70$

Незміщений ексцес: $E_x = 4.89$

Медіана: $Med_x = 2924.09$

Розмах вибірки: $R_x = 4003.07$

Довірчі інтервали для генерального МО

$p = 0.100: 2822.38 \leq m_x \leq 2924.25$

$p = 0.050: 2812.55 \leq m_x \leq 2934.08$

$p = 0.010: 2793.23 \leq m_x \leq 2953.40$

$p = 0.001: 2770.57 \leq m_x \leq 2976.06$

Довірчі інтервали для генеральної дисперсії:

$p = 0.900: 205716.12 \leq D_x \leq 276561.21$

$p = 0.950: 200264.07 \leq D_x \leq 284961.75$

$p = 0.990: 190155.85 \leq D_x \leq 302379.96$

$p = 0.999: 179267.53 \leq D_x \leq 324399.19$

Довірчі інтервали для генеральної асиметрії

$p = 0.900$: $-1.18 \leq a_x \leq -0.21$

$p = 0.950$: $-1.38 \leq a_x \leq -0.01$

$p = 0.990$: $-2.23 \leq a_x \leq 0.84$

$p = 0.999$: $-5.56 \leq a_x \leq 4.16$

Довірчі інтервали для генерального ексцесу

$p = 0.900$: $3.94 \leq e_x \leq 5.84$

$p = 0.950$: $3.54 \leq e_x \leq 6.24$

$p = 0.990$: $1.88 \leq e_x \leq 7.90$

$p = 0.999$: $-4.64 \leq e_x \leq 14.42$

2.3.2 Перевірка вихідних даних на нормальний характер розподілу

Найпростіший тест: $q = 10\%$

Відкидаємо гіпотезу про нормальний розподіл.

Тест Жарка-Бера: $q = 10\%$

Статистика тесту : 255.84

Критичне значення $critval$ для тесту : 4.12

За результатами перевірки відхилено гіпотезу про нормальний розподіл добового водопритоку залізорудної шахти.

2.3.3 Побудова гістограми емпіричного розподілу даних

Число інтервалів $k=16$

Ширина інтервалу $h = 250.1918750$

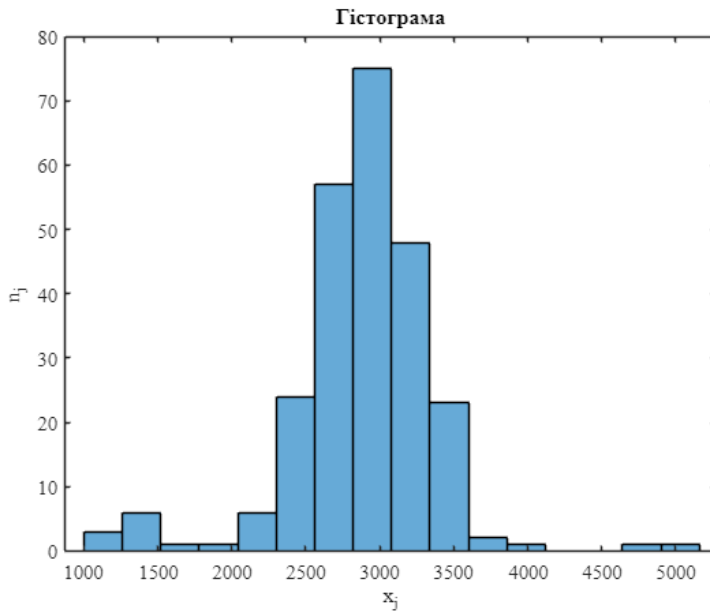


Рисунок 2.7 – Гістограма реального розподілу випадкової величини добового водопритоку, став №2

2.3.4 Параметри теоретичних розподілів

Для отриманого реального розподілу випадкової величини добового водопритоку розраховуємо значення параметрів різних відомих теоретичних розподілів випадкової величини.

Екстремальний розподіл:

$\mu=3106.6553592108$; $\sigma=575.0021581014$;

Експоненціальний розподіл:

$\mu=2873.3162650602$;

Гамма - розподіл:

$a=28.5034227428$; $b=100.8060081410$;

Логнормальний розподіл:

$\mu=7.9455778234$; $\sigma=0.2011283297$;

Релеївський розподіл:

$b=2060.5837674760$;

Рівномірний розподіл:

$a=1071.0800000000$; $b=5074.1500000000$;

Вейбуллівський розподіл:

$$a=3063.5183971041; b= 6.1121237363;$$

Побудуємо на одному графіку емпіричну і всі підібрані теоретичні щільності розподілу.

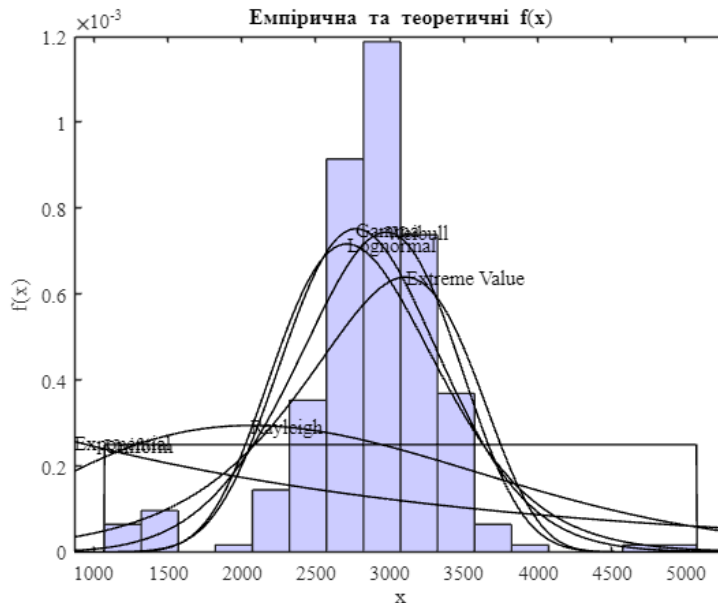


Рисунок 2.8 – Емпірична і всі підібрані теоретичні щільності розподілу добового водопритоку залізорудної шахти, став №2

Виконаємо перевірку співпадіння емпіричного та теоретичного розподілу за критерієм Колмогорова.

2.3.5 Перевірка теоретичних розподілів за критерієм Колмогорова

Критерій згоди Колмогорова:

Найкраще підходить Вейбуллівський розподіл;

критичний рівень значущості для нього = 0.00017

За найвищим значенням критерію Колмогорова визначаємо, що найбільш точно емпіричний розподіл співпадає з розподілом Вейбулла. На рис. 2.9 наведено емпіричну та теоретичну інтегральну функцію розподілу ймовірності добового водопритоку залізорудної шахти, став №1.

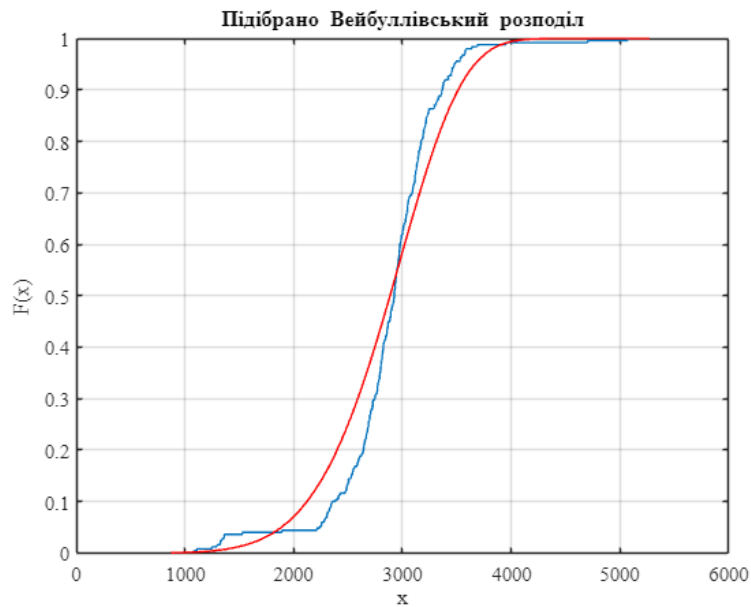


Рисунок 2.9 – Емпірична теоретична інтегральна функція розподілу ймовірності добового водопритоку залізорудної шахти, став №2

2.3.6 Автокореляційний аналіз

Для дослідження наявності трендів у графіках водопритоку залізорудної шахти було виконано автокореляційний аналіз даних ставу №1. Його результати наведено на рис. 2.10.

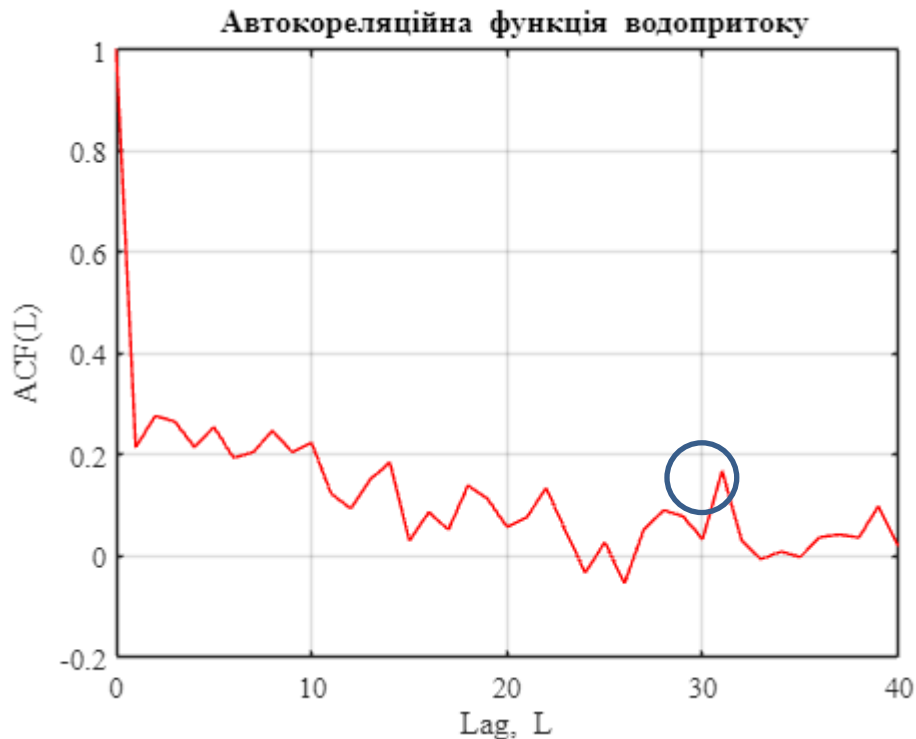


Рисунок 2.10 - Автокорелограма даних водопритоку ставу №2.

Значення автокореляційної функції слабо залежать від величини лагу, що вказує на відсутність лінійних трендів у процесі добового водопритоку на ставі №1. Відмічений локальний максимум автокорелограми може вказувати на існування періодичного тренду з періодом 31 день.

Висновки по розділу 2

Другий розділ присвячено статистичному аналізу стохастичного процесу добового водопритоку залізорудної шахти. На основі статистичного аналізу експериментальних даних про водоприток залізорудної шахти, отриманих з диспетчерської системи обліку роботи головного водовідливу, було розраховано важливі показники описової статистики експериментальних даних. За результатами тесту Жарка-Бера відхилено гіпотезу про нормальний розподіл добового водопритоку залізорудної шахти.

Розраховано параметри найбільш поширених теоретичних розподілів, за допомогою критерія Колмогорова виконано перевірку теоретичних розподілів.

Для става №1 найкращим виявився екстремальний розподіл, для става №2 найкращим виявився розподіл Вейбулла. Цю різницю можна пояснити недостатньою кількістю експериментальних даних, включених у генеральну сукупність.

Виконано автокореляційний аналіз добового водопритоку залізорудної шахти. Встановлено, що ці дані не містять лінійного тренду, але в даних присутній періодичний тренд з періодом близько 31 дня.

Отримані дані можуть бути використані при прогнозуванні добового водопритоку залізорудної шахти, а, отже, і при прогнозуванні енергоспоживання головної водовідливної установки залізорудної шахти.

Розділ 3 Макроаналіз енергоспоживання головної водовідливної установки залізорудної шахти та визначення напрямків енергозбереження

3.1 Матеріальні потоки головної водовідливної установки залізорудної шахти

У відомій науково-технічній літературі досить докладно розглянуто питання, присвячені створенню замкнутих систем керування рівнем рідини в резервуарах. Однак водозбірник шахтної водовідливної установки, будучи типовим резервуаром, має низку особливостей, які виділяють його в особливий клас об'єктів керування. Її основна відмінність шахтного водозбірника полягає в меті управління. Під час роботи шахтного водозбірника ніколи не виникає завдання стабілізації рівня рідини в резервуарі. Основне завдання полягає в повному очищенні водозбірника при досягненні максимально допустимого рівня рідини - тобто у відкачуванні рідини з водозбірника до мінімально необхідного рівня.

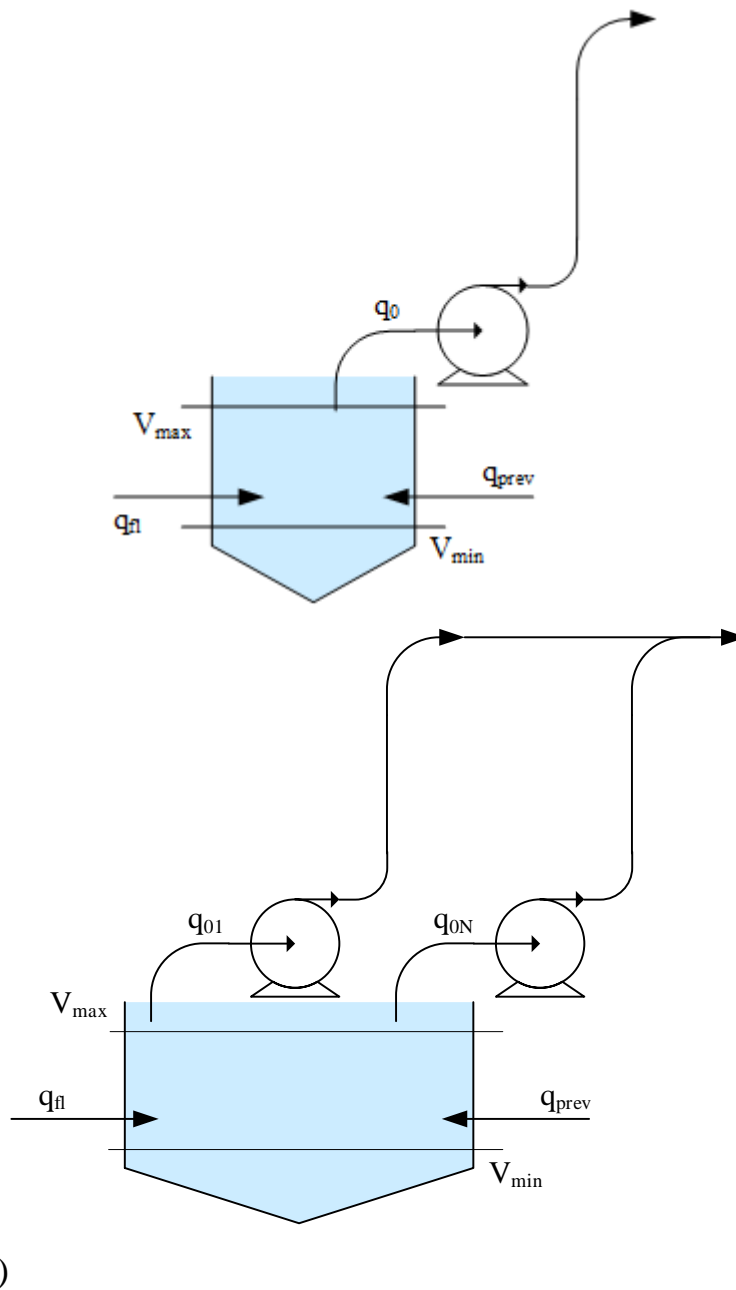
Схему потоків шахтних вод у типовому водозбірнику багаторівневої системи шахтного водовідливу зображено на рис. 3.1. На рис. 3.1 позначено:

V_{\min} , V_{\max} – мінімальний і максимальний рівні води у водозбірнику, м³.

q_{fl} – величина природного водоприпливу шахтних вод, м³/с;

q_{prev} – величина водоприпливу з попереднього рівня водовідливу, м³/с;

q_{ok} – величина водовідтоку під дією насосної установки з номером k , м³/с.



a)

b)

Рисунок 3.1 - Схема роботи водозбірника в багаторівневій системі шахтного водовідливу: а - водозбірник з одним насосом: б - водозбірник із багатонасосною станцією

Найпоширенішими є релейні системи керування водовідливною установкою, що ґрунтуються на контролі досягнення максимального і мінімального рівня води у водозбірнику. Водовідливна установка може перебувати в одному з двох станів (з.увімкнено/вимкнено), отже, і величина водовідтоку під дією

насосної установки q_0 може змінюватися від нуля до свого максимального значення. Зміна значення q_0 можлива завдяки застосуванню регулювальної гідравлічної апаратури або регульованого електроприводу.

3.2 Резервуар с однонасосною станцією.

Розглянемо роботу резервуара, обладнаного одним насосом. Стан електропривода водовідливної установки описуватимемо змінною стану S , яка може набувати одного з двох станів: $S = 0$ – рівень води менший за максимальний, водозбірник наповнюється водою; $S = 1$ – рівень води більший за мінімальний, вода відкачується з водозбірника.

Логіка визначення поточного стану електропривода водовідливної установки S така. Якщо рівень води у водозбірнику більший за максимальний АБО рівень води у водозбірнику менший за максимальний ТА $S = 1$, то стан електропривода водовідливної установки S встановити рівним 1. Якщо рівень води у водозбірнику менший за мінімальний АБО рівень води у водозбірнику більший за мінімальний ТА $S = 0$, то стан електропривода водовідливної установки S встановити рівним 0. Ці формулювання можна подати у формі такої логічної функції:

$$S(V) = \begin{cases} 1, V > V_{max} \vee (V < V_{max} \wedge S = 1) \\ 0, V < V_{min} \vee (V > V_{min} \wedge S = 0) \end{cases} \quad (3.1)$$

Тоді загальна величина водоприпливу в резервуар може бути обчислена за таким виразом:

$$q_T = q_{ft} + q_{prev} - S \cdot q_0, \quad (3.2)$$

а об'єм рідини у водозбірнику обчислюємо як:

$$V = V_0 + \int_0^t q_T dt \quad (3.3)$$

Для водозбірника найнижчого рівня величина водоприпливу q_{prev} з попереднього рівня водовідливу дорівнює нулю.

Запропоновані рівняння було реалізовано в MATLAB/Simulink, рис.3.2.

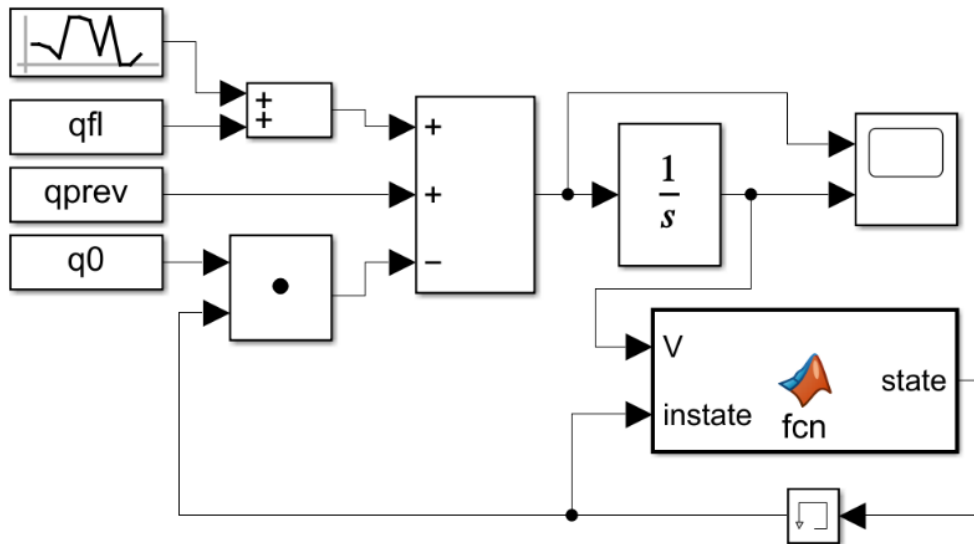


Рисунок 3.2 – Універсальна математична модель шахтного водозбірника

На рис.3.3 подано часові діаграми роботи цієї моделі з такими параметрами: $V_{\min} = 20 \text{ м}^3$, $V_{\max} = 100 \text{ м}^3$, $q_{fl} = 0,01, \text{ м}^3/\text{с}$; $q_{prev} = 0, \text{ м}^3/\text{с}$; $q_0 = 0,1, \text{ м}^3/\text{с}$.

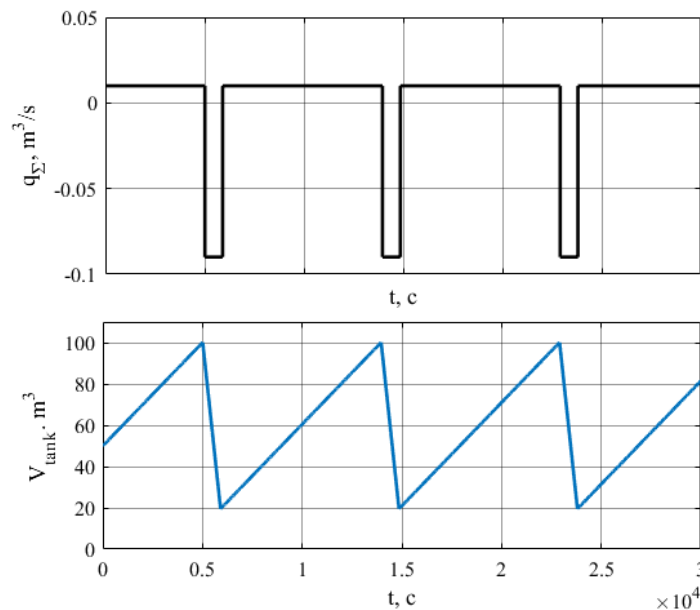


Рисунок 3.3 – Часові діаграми роботи моделі шахтної водовідливної установки

У реальних експлуатаційних умовах природний водоприплив q_{fl} є випадковою функцією часу. Як показують дослідження [****] ця функція є нестационарною, статистичні характеристики цієї функції мають явно виражений сезонний характер, залежать від локальної метеорологічної обстановки і глобальних

кліматичних змін. У розділі 2 наведено більш детальний аналіз статистичних характеристик природного водоприпливу.

На рис.3.4 подано часові діаграми роботи моделі шахтного водозбірника з урахуванням випадкової складової природного водоприпливу за розподілу Вейбулла з нульовим математичним очікуванням і дисперсією, що дорівнює $0,1q_{fl}$.

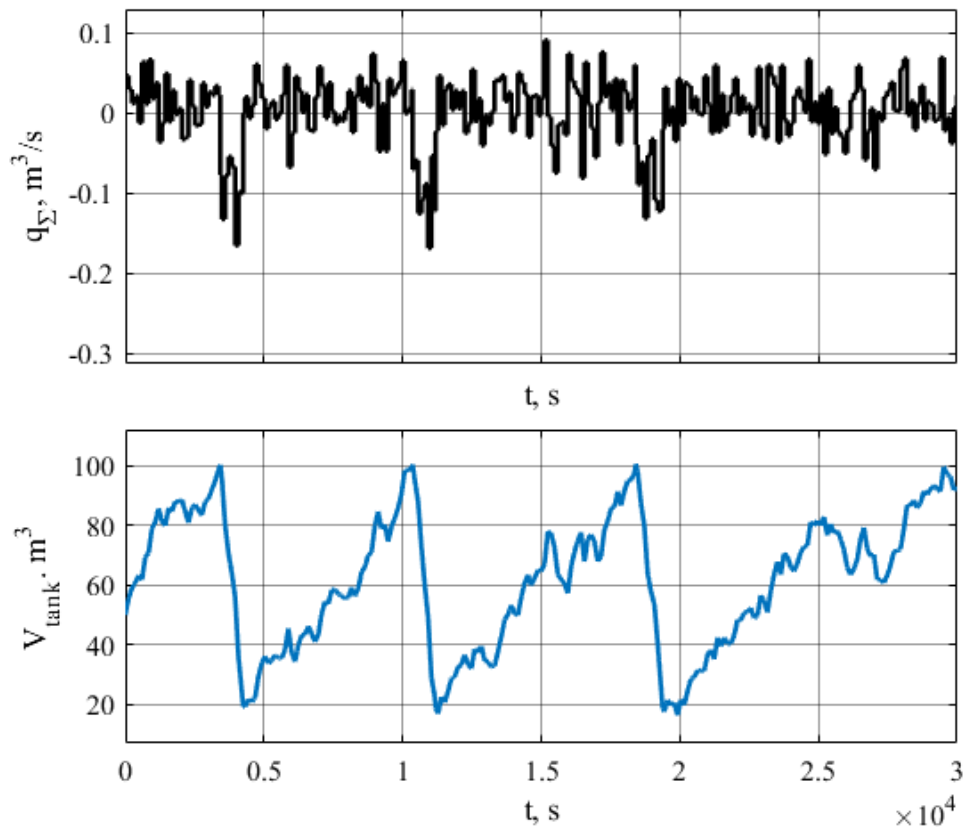


Рисунок 3.4 - Часові діаграми роботи моделі шахтної водовідливної установки з урахуванням імовірнісного характеру природного водоприпливу

Імовірнісний характер природного водоприпливу загалом незначною мірою впливає на роботу електроприводу комплексу шахтного водовідливу, оскільки тривалість інтервалів заповнення та відкачування водозбірника в середньому не змінюється. Це пояснюється симетричністю кривої нормального розподілу. Однак насправді розподіл імовірності природного водоприпливу не є нормальним. Це положення можна обґрунтувати неможливістю існування негативних значень водоприпливу.

Для розподілу ймовірності природного водоприпливу більше підходить розподіл Вейбулла, що й було достовірно обґрунтовано статистичною обробкою експериментальних даних у розділі 2.

Розподіл Вейбулла в теорії ймовірностей - двопараметричне сімейство абсолютно безперервних розподілів. Розподіл Вейбулла обчислюється за таким виразом:

$$f(x, k, \lambda) = \frac{k}{\lambda} \cdot \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k}, x \geq 0, k > 0, \lambda > 0$$

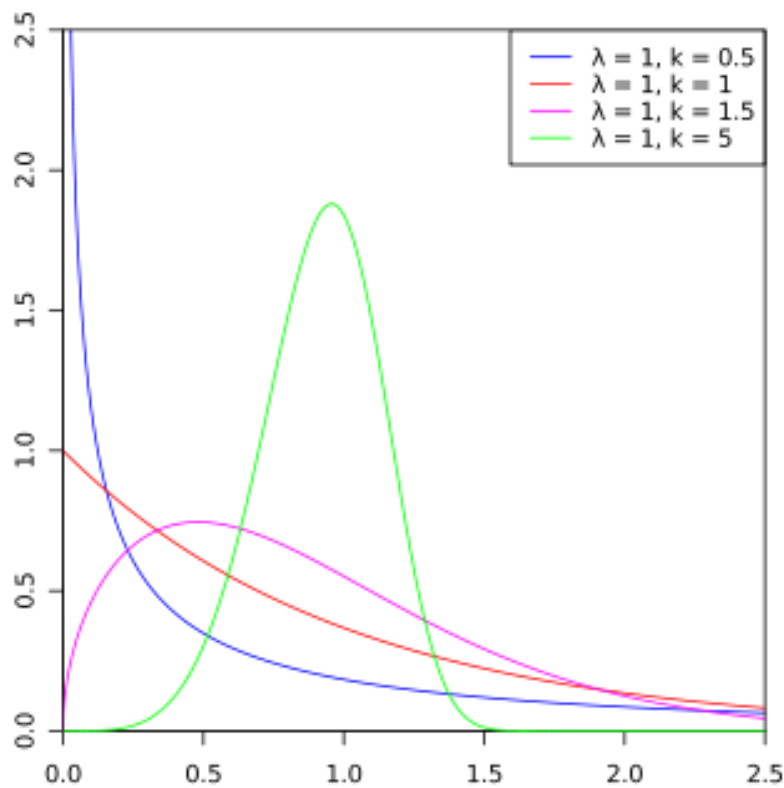


Рисунок 3.5 – Щільність ймовірності розподілу Вейбулла

Частковим випадком розподілу Вейбулла є розподіл Релея. Цей розподіл враховує той факт, що випадкова величина не може приймати від’ємні значення. Розподіл Релея - це розподіл імовірностей випадкової величини X з щільністю, що задається таким виразом:

$$f(x, \sigma) = \frac{x}{\sigma^2} \cdot e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, x \geq 0, \sigma > 0$$

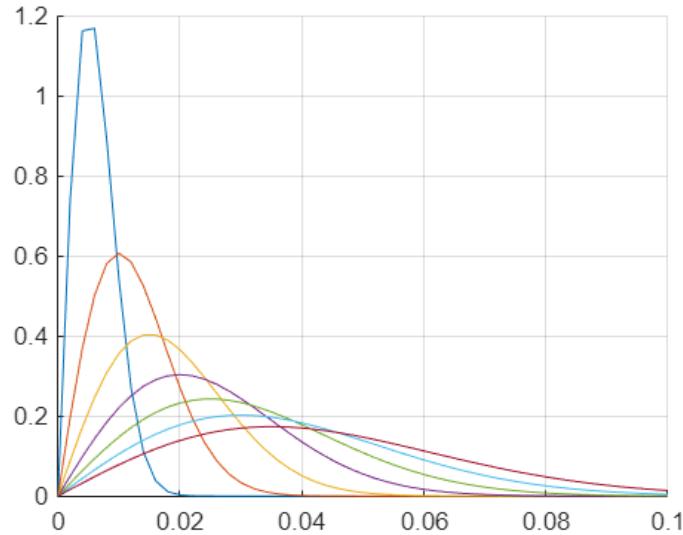


Рисунок 3.6 – Щільність ймовірності розподілу Релея

3.3 Резервуар із багатонасосною станцією

Верхні рівні каскадного шахтного водовідливу обладнані насосними станціями, що обладнані декількома насосами, що працюють паралельно і можуть послідовно вмикатися в разі виникнення виробничої необхідності.

Стан електропривода k -ої водовідливної установки описуватимемо змінною стану S_k , яка може набувати одного з двох станів: $S_k = 0$ – рівень води менший за максимальний, водозбірник наповнюється водою; $S_k = 1$ – рівень води більший за мінімальний, вода відкачується з водозбірника ТА ввімкнено всі попередні насоси.

Таким чином, увімкнення додаткових насосів відбувається послідовно, залежно від величини водоприпливу і стану резервуара, а вимкнення всіх насосів відбудеться одночасно, після завершення відкачування рідини. Логічна функція стану k -го насоса має такий вигляд

$$S_k(V) = \begin{cases} 1, ((V > V_{max}) \wedge ((S_1 = 1) \wedge \dots \wedge (S_{k-1} = 1))) \vee ((V < V_{max}) \wedge (S_k = 1)) \\ 0, (V < V_{min}) \vee ((V > V_{min}) \wedge (S_k = 0)) \end{cases} \quad (3.4)$$

3.4 Енергетичні діаграми шахтної водовідливної установки

Як випливає з виконаного вище аналізу, електропривод насосного агрегату шахтної водовідливної установки працює в режимі, близькому до релейного, з урахуванням того, що пускові режими електропривода займають нехтувано малий час порівняно з тривалістю інтервалу роботи електропривода. Споживання електроенергії відбувається тільки під час відкачування рідини з водозбірника.

Уведемо визначення активного об'єму водозбірника як об'єму рідини між мінімальним і максимальним рівнем водозбірника:

$$V_A = V_{max} - V_{min}. \quad (3.5)$$

Визначимо макропоказники процесу відкачування рідини від максимального об'єму до мінімального. Аналіз ускладнюється тим фактом, що в процесі роботи насосної установки триває природний водоприплив. Тому об'єм перекачаної води не збігатиметься з активним об'ємом водозбірника. Час заповнення активного об'єму водозбірника:

$$t_p = V_A / (q_{fl} + q_{prev}). \quad (3.6)$$

З погляду електропривода цей час є паузою, коли електропривод перебуває у вимкненому стані ($S = 0$). Позначимо час, необхідний на відкачування рідини до мінімального рівня символом t_w . За цей час із резервуара буде відкачано об'єм рідини, що дорівнює:

$$V_1 = V_A + t_w \cdot q_{fl}. \quad (3.7)$$

З іншого боку, для відкачування цього об'єму зі швидкістю q_0 потрібен час, що дорівнює:

$$t_w = V_1 / q_0. \quad (3.8)$$

Розглядаючи спільно рівнянь (3.7) і (3.8) отримаємо час, необхідний для відкачування води до мінімального рівня:

$$t_w = V_A / (q_0 - q_{fl}), \quad (3.9)$$

а обсяг перекачаної води становитиме

$$V_1 = V_A + \frac{V_A \cdot q_{fl}}{(q_0 - q_{fl})} = V_A \cdot \left(1 + \frac{q_{fl}}{(q_0 - q_{fl})} \right). \quad (3.10)$$

Оцінимо величину споживаної електроенергії, необхідну потужність електропривода. Потенційна енергія об'єму V_1 води, піднятої на висоту h_c ступеня водовідливу, збільшується на:

$$E_P = m \cdot g \cdot h_c = \rho \cdot V_A \cdot \left(1 + \frac{q_{fl}}{(q_0 - q_{fl})} \right) \cdot g \cdot h_c, \quad (3.11)$$

де g – прискорення вільного падіння в полі тяжіння Землі; h_c - висота ступеня водовідливу (з висотою підйому води).

Потужність, необхідна для підйому води, дорівнюватиме:

$$P = \rho \cdot g \cdot h_c \cdot q_0. \quad (3.12)$$

Як випливає з (3.12), потужність, необхідна для перекачування води, не залежить від параметрів водопритоку. Збільшення споживаної енергії, яке має місце за збільшення водоприпливу q_{fl} або зниження продуктивності насоса q_0 , пов'язане зі збільшенням тривалості інтервалу відкачування води або, що еквівалентно, збільшенню об'єму рідини, що перекачується.

Вирази (3.11) і (3.12) дають нижні оцінки енергії та миттєвої потужності, що витрачається на відкачування рідини з водозбірника, бо не враховують різні види втрат в електромеханічному та гідравлічному обладнанні насосної установки ΔP_Σ .

Наглядне уявлення про структуру загального енергоспоживання та втрат енергії насосної установки зображено за допомогою енергетичної діаграми, рис.3.7.

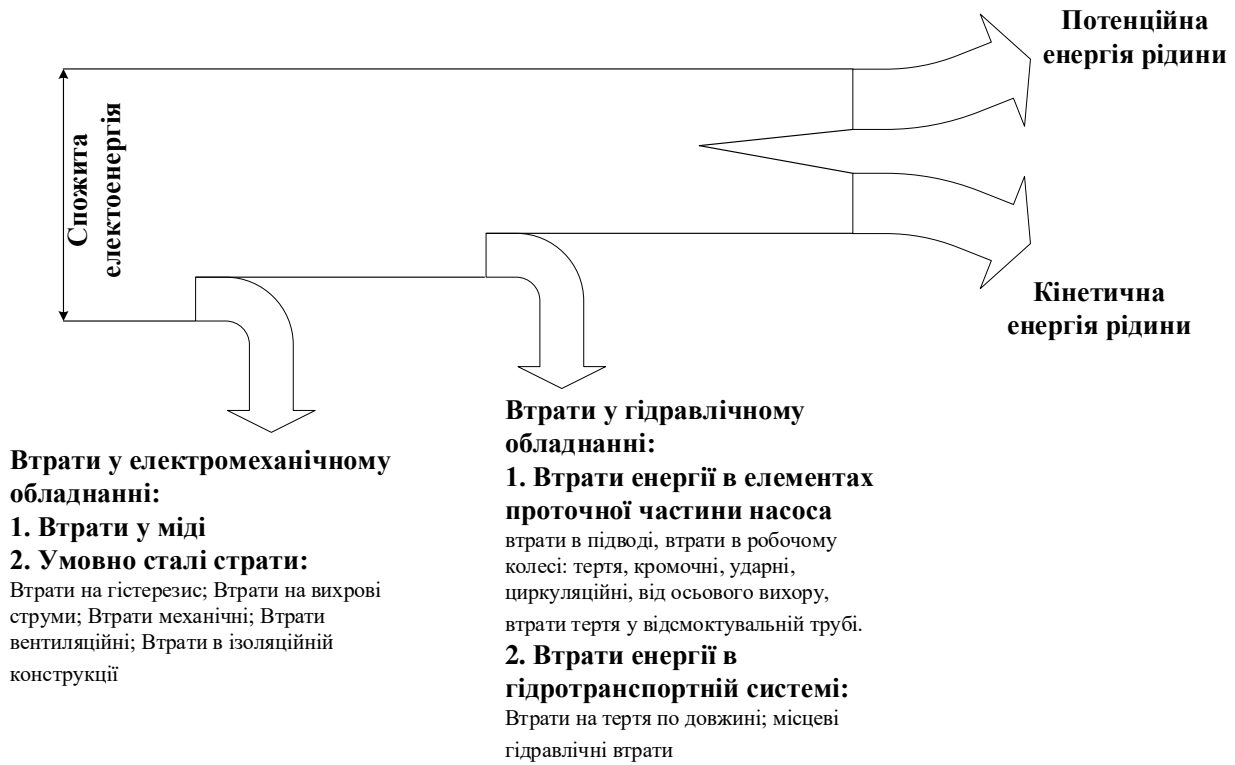


Рисунок 3.7 – Енергетична діаграма роботи головної водовідливної установки залізорудної шахти

Найзначніша частина спожитої електроенергії витрачається на створення потенційної енергії рідини при її підйомі з нижче розташованого горизонту, а також на створення кінетичної енергії рідини при її русі в трубопроводах. Ця частина енергії практично не залежить від зовнішніх умов, оскільки активний об'єм водозбірника є величиною сталою. Тому завжди виконується практично постійне технологічне завдання по перекачуванню постійного об'єму шахтних вод.

При роботі електромеханічного обладнання мають місце змінні втрати та умовно сталі втрати. Оскільки у якості електроприводу водовідливних

установок залізорудних шахт використовується, як правило, нерегульований асинхронний електропривод, то умовно сталі втрати дійсно змінюються незначно.

Гідравлічні втрати водовідливної установки залізорудних шахт складаються з втрат у проточній частині насоса та втрат у гідротранспортній системі.

Втрати на тертя у гідротранспортній системі визначаються в основному довжиною трубопроводу, і в реальних умовах будуть мати постійне значення, оскільки конфігурація трубопроводу не змінюється.

Місцеві гідравлічні втрати водовідливної установки залежать від складу запорної арматури та конфігурації водогону. Оскільки в умовах водовідливної установки шахти не використовується регулювання продуктивності за допомогою засувки, то й ця частина втрат практично не залежить від режиму роботи насосного обладнання.

Отже, з наведеного аналізу витікає, що можливості зменшення обсягів енергоспоживання в умовах головної водовідливної установки залізорудної шахти надзвичайно обмежені.

Єдиний шлях зменшення обсягів питомого енергоспоживання полягає у збільшенні швидкості перекачування рідини на поверхню, оскільки при цьому зменшуються втрати електроенергії на покриття усіх вищезгаданих видів умовно сталих втрат.

Саме тому для головних водовідливних установок найчастіше використовуються організаційні заходи, пов'язані з використанням можливостей багатозонних тарифних планів сплати за електроенергію. Слід розуміти, що такі міроприємства не впливають на питоме енергоспоживання головної водовідливної установки.

Тому слід визнати, що найбільш перспективним, а можливо й єдиним шляхом збільшення енергетичної ефективності головних водовідливних установок є повторне використання потенційної енергії шахтних вод, піднятих на поверхню.

Значні обсяги води, доставленої на поверхню, мають запаси потенційної та теплової енергії. Нині значну увагу привертає використання екологічно чистих низькопотенційних теплових енергетичних ресурсів. Так, у Великій Британії вивчають питання про використання теплової енергії підземних вод відпрацьованих вугільних шахт із температурою води всього лише 12°C.

Перелічимо кілька варіантів використання енергії цього джерела.

Варіант 1: Створення на проммайданчику гірничодобувного підприємства постійно діючих геотермальних електростанцій, що використовують теплову енергію води, із застосуванням низькотемпературних газових турбін на базі Organic Rankine Cycle, Organic Flash Cycle або їхніх модифікацій.

Варіант 2. Створення на проммайданчику гірничодобувного підприємства постійно діючих джерел теплової енергії із застосуванням технологій теплових насосів.

Варіант 3. Створення на проммайданчику гірничодобувного підприємства постійно діючих малонапірних гідроелектростанцій, що використовують потенційну енергію води під час її переміщення у відстійники.

Висновки по розділу 3

Третій розділ присвячено аналізу енергоспоживання головної водовідливної установки залізорудної шахти та визначення напрямків енергозбереження при її експлуатації.

Розглянуто основні матеріальні потоки, які визначають технологічний режим роботи головної водовідливної установки та її енергоспоживання. Кількість перекачуваної шахтної води навіть за умови постійного активного об'єму водозбірника залежить від поточної величини водоприпливу та є ймовірнісною функцією. Синтезовано закони релейного керування головної водовідливної установки з однасосною та багатонасосною насосними станціями.

На основі оцінки потенційної енергії рідини, що перекачується на поверхню, отримано вирази для нижньої оцінки енергоспоживання головної водовідливної установки залізорудної шахти.

Виконано аналіз різноманітних видів втрат енергії у головній водовідливній установці. Показано, що можливості зменшення обсягів енергоспоживання в умовах головної водовідливної установки залізорудної шахти надзвичайно обмежені. Це пов'язано з тим, що основні види додаткових втрат як в електромеханічній частині, так і в гідравлічній частині головної водовідливної установки відносяться до сталих втрат.

Тому слід визнати, що найбільш перспективним, а можливо й єдиним шляхом збільшення енергетичної ефективності головних водовідливних установок є повторне використання потенційної енергії шахтних вод, піднятих на поверхню. Визначено варіанти повторного використання енергії води, доставленої на поверхню, у тому числі з використанням геотермальних електростанцій на базі Organic Rankin Cycle, Organic Flash Cycle або їхніх модифікацій, теплових насосів та малонапорних гідроелектростанцій.

Висновки

У першому розділі представлено комплексне дослідження гідротранспортних систем промислових підприємств, з акцентом на специфіці шахтних водовідливних установок. Основна увага приділена аналізу ключових аспектів функціонування таких систем, включаючи методологію забезпечення їхньої надійності та мінімізації ризиків виникнення аварійних режимів.

Зміст розділу охоплює декілька принципів напрямків: розгляд теоретичних принципів побудови гідротранспортних систем, детальне вивчення вимог до головних водовідливних установок залізорудних шахт, розроблення заходів з покращення показників надійності електромеханічного обладнання, а також розроблення ефективних стратегій захисту від потенційних аварійних ситуацій, пов'язаних з гідравлічною складовою обладнання.

Особливою складовою дослідження є представлення конкретних технічних параметрів: детальна інформація про конструкцію та геометричні характеристики гідротранспортної системи головного водовідливу залізорудної шахти, а також вичерпні технічні характеристики електромеханічного обладнання насосної станції на позначці 475 метрів, яка виступає центральним об'єктом наукового аналізу.

Другий розділ присвячено статистичному аналізу стохастичного процесу добового водопритоку залізорудної шахти. На основі статистичного аналізу експериментальних даних про водопріток залізорудної шахти, отриманих з диспетчерської системи обліку роботи головного водовідливу, було розраховано важливі показники описової статистики експериментальних даних.

За результатами тесту Жарка-Бера відхилено гіпотезу про нормальний розподіл добового водопритоку залізорудної шахти.

Розраховано параметри найбільш поширених теоретичних розподілів, за допомогою критерія Колмогорова виконано перевірку теоретичних розподілів. Для става №1 найкращим виявився екстремальний розподіл, для става №2

найкращим виявився розподіл Вейбулла. Цю різницю можна пояснити недостатньою кількістю експериментальних даних, включених у генеральну сукупність.

Виконано автокореляційний аналіз добового водопритоку залізорудної шахти. Встановлено, що ці дані не містять лінійного тренду, але в даних присутній періодичний тренд з періодом близько 31 дня.

Отримані дані можуть бути використані при прогнозуванні добового водопритоку залізорудної шахти, а, отже, і при прогнозуванні енергоспоживання головної водовідливної установки залізорудної шахти.

Третій розділ присвячено аналізу енергоспоживання головної водовідливної установки залізорудної шахти та визначення напрямків енергозбереження при її експлуатації.

Розглянуто основні матеріальні потоки, які визначають технологічний режим роботи головної водовідливної установки та її енергоспоживання. Кількість перекачуваної шахтної води навіть за умови постійного активного об'єму водозбірника залежить від поточної величини водоприпливу та є ймовірнісною функцією. Синтезовано закони релейного керування головної водовідливної установки с однонасосною та багатонасосною насосними станціями.

На основі оцінки потенційної енергії рідини, що перекачується на поверхню, отримано вирази для нижньої оцінки енергоспоживання головної водовідливної установки залізорудної шахти.

Виконано аналіз різноманітних видів втрат енергії у головній водовідливній установці. Показано, що можливості зменшення обсягів енергоспоживання в умовах головної водовідливної установки залізорудної шахти надзвичайно обмежені. Це пов'язано з тим, що основні види додаткових втрат як в електромеханічній частині, так і в гідравлічній частині головної водовідливної установки відносяться до сталих втрат.

Тому слід визнати, що найбільш перспективним, а можливо й єдиним шляхом збільшення енергетичної ефективності головних водовідливних

установок є повторне використання потенційної енергії шахтних вод, піднятих на поверхню. Визначено варіанти повторного використання енергії води, доставленої на поверхню, у тому числі з використанням геотермальних електростанцій на базі Organic Rankin Cycle, Organic Flash Cycle або їхніх модифікацій, теплових насосів та малонапорних гідроелектростанцій.

Перелік використаних джерел

1. Онищенко Г. Б. Електропривод турбомеханізмів / Г. Б. Онищенко, М. Г. Юньков. - М.: Енергія, 1972. - 240 с.
2. Лезнов Б. С. Економія електроенергії в насосних установках / Б.С. Лезнов - М.: Энергоатомиздат, 1991. - 144 с.
3. Загірняк М. В. Керування кавітаційними процесами в насосному комплексі засобами регульованого електроприводу : монографія / А.А. Сердюк, Т. В. Коренькова, Д. І. Родькін, А. А. Сердюк, Т.В. Коренькова, Д. І. Родькін - Харків : Видавництво "Точка", 2017. – 156 с.
4. Лезнов Б. С. Енергозбереження та регульований привід у насосних і повітродувних установках / Б. С. Лезнов - М. : Энергоатомиздат, 2006. - 360 с.
5. Карелін В. Я. Насоси і насосні станції / В. Я. Карелін, А. В. Мінаєв. - М. : Будвидав, 1976. - 320 с.
6. Карелін В. Я. Насосні станції з відцентровими насосами / В.Я. Карелін, Р. А. Новодережкін. - М.: Будовидав, 1983. - 204 с.
7. Контаутас Р. К. Електропривод для насосних станцій / Р.К. Контаутас // Житлове та комунальне господарство. - 1985. - № 8. - С. 29-31
8. Герман-Галкін С. Г. Комп'ютерне моделювання напівпровідникових систем у MATLAB: навчальний посібник. - Санкт-Петербург: Корона Принт, 2001. - 320с.
9. Моделювання електромеханічних систем: Підручник / Чорний О.П., Луговой А.В., Родькін Д.Й., Сисюк Г.Ю., Садовой О.В. – Кременчук, 2001.- 376 с.
10. Гейєр В.Г., Тимошенко Г.М. Шахтні вентиляторні та водовідливні установки. Підручник для вузів. - М.: Надра, 1987. - 270 с.
11. Тимошенко Г.М., Оверко В.М., Глатко Г.М. Дослідження перехідного режиму в головній шахтній водовідливній установці під час вимкнення

насоса -У кн Розробка родовищ корисних копалин. - Київ: Техніка, 1979, вип 52, с 85-92.

12. Фокс Д. А. Гідравлічний аналіз несталої течії в трубопроводах -М. Энергоиздат, 1981, 247с.

13. В.Й. Путята, М.М. Сідляр. Гідроаеромеханіка. Київ, видавництво Київського ун-ту, 1963, 476 с.

14. Чарный И.А Неустановившееся рух реальної рідини в трубах -М -Л.: Гостехиздат, 1951, 224с

15. Аракелян А.К., Титюк В.К. Комунікаційна мережа як динамічний об'єкт керування в системах автоматизованого керування. "Дослідження систем автоматизованих електроприводів", міжвузівський збірник наукових праць. Чебоксари, вид-во Чуваського ун-ту, 1991, с.64-75

16. Абдурашитов С.А. Насоси і компресори// С.А. Абдурашитов, А.А. Туніченков та ін. М. : Надра, 1974, 450 с.

17. Chornyi, O. Tolochko, V. Tytyuk., D. Rodkin, G. Chekavskiy Mathematical models and specifics of numerical calculations of dynamic characteristics of electric drives with induction motors: monograph / – Kremenchuk: PE Shcherbatykh O.V. – 302 p. [in Ukrainian], 2016.

18. "AC power," [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/AC_power. [Accessed 25 10 2018].

19. A.E. Emanuel, "On The Definition of Power Factor and Apparent Power in Unbalanced Polyphase Circuits with Sinusoidal Voltage and Currents," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8, no. 3, p. 841–852, 1993.

20. H. Akagi, Y. Kanazava, A. Nubae, "Int. Power Electronics Conf.," in Generalized theory of the instantaneous power in three phase circuits, Tokyo, Japan, 1983.

21. Іглін С. П. Методичні вказівки до самостійної роботи студентів при виконанні типових розрахунків з курсу "Математична обробка результатів експерименту". - Харків, ХДПУ, 1999.