

УДК 621.311, 621.316.7

Розен В.П.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Великий С.С.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Реуцький М.О.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ФОРМУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ВОДОВІДЛИВНИХ УСТАНОВОК НА ГІРНИЧОВИДОБУВНОМУ ПІДПРИЄМСТВІ

У статті визначена математична модель погоризонтного шахтного водовідливу, параметри якої дозволяють визначити енергоефективні режими роботи насосів для тризонного тарифу. Використання алгоритму управління електроспоживанням шахтних водовідливних установок визначає режим роботи насосів для лінійної зміни притоку. Для змінного притоку визначення режиму роботи супроводжується визначенням гідравлічної потужності обладнання водовідливу. Визначені вимоги до гідравлічного обладнання водовідливу при змінному притоці. Показані межі гідравлічної потужності обладнання водовідливу та вплив зміни параметрів на режим роботи.

Ключові слова: максимум енергосистеми, гідравлічний потенціал обладнання, горизонт шахти, водний притік у шахту, погоризонтна схема водовідливу.

Постановка проблеми. Для економіки України розвиток гірничовидобувної галузі є пріоритетним напрямком, оскільки особливо важливого значення в сучасних умовах набуває питання ефективного використання електроенергії в енергоємних галузях промисловості. На сьогодні переважна більшість сировини видобувається підземним способом. Зі збільшенням глибини виробок зростає енергоємність гірничого підприємства. Тому ефективне використання електроенергії в гірничій промисловості стає все більш важливим завданням, яке необхідно вирішувати з погляду раціонального її використання з урахуванням обмежень зі сторони енергосистеми. Графік навантаження енергосистеми формується споживачами електричної енергії. Аналіз зміни графіків навантаження енергосистеми показує, що нерівномірність навантаження має тенденцію до зростання. Добові графіки навантаження сучасних енергосистем мають, як правило, два явно визначені піки – ранковий двогодинний (8:00–10:00 год) та вечірній чотиригодинний

(17:00–21:00 год). Між піками знаходиться зона зниженого навантаження. Ще більше зниження спостерігається протягом семигодинного нічного часу (23:00–06:00 год).

У зв'язку зі збільшенням нерівномірності графіка електричних навантажень енергосистеми енергетичні компанії змушені змінювати тарифні коефіцієнти для стимулювання споживачів. Виробничий процес, зазвичай, не дозволяє переривати роботу споживачів. У гірничовидобувній промисловості як регулятор навантаження енергосистем доцільно використовувати водовідливну установку, яка характеризується значною потужністю та вільним циклічним графіком роботи в часі [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На практиці під час проектування та експлуатації шахтного водовідливу глибоких шахт (800–1 600 м) все більшого поширення набуває погоризонтна або багатоступенева схема водовідливу [5]. Використання погоризонтної схеми шахтного водовідливу обумовлено не лише самим характером поступового заглиблення гірничих

робіт, але й відсутністю потреби у використанні високонапірних насосних агрегатів. Основною складністю під час проектування та експлуатації комплексів шахтного водовідливу є врахування нестабільності водного притоку. У роботах [6; 7] автори зазначають, що прогнозне визначення притоку води в шахту зазнає значних похибок, однак коливання притоку відбувається в певних межах. У разі значних перевищень нормального притоку води до горизонту [8] необхідно визначити надлишковий потенціал гідравлічних потужностей обладнання, тобто об'єм водозбірної споруди (водозбірника) та потужності насосного обладнання, яке у процесі проектування зазвичай приймається відповідно до вимог правил безпеки.

Постановка завдання. Метою даної роботи є визначення надлишкових гідравлічних потужностей обладнання під час можливих змін водного притоку для підвищення рівня енергоефективності функціонування водовідливних установок.

Виклад основного матеріалу дослідження. Витрати на електроенергію Проб у процесі роботи водовідливу на горизонті залежать від його режиму роботи [2; 3]:

$$P_{роб} = \frac{\rho \cdot Q_p \cdot H_p}{10^3 \cdot \eta_d \cdot \eta_c \cdot \eta_p} \cdot \sum t_p \cdot a_i, \quad (1)$$

де ρ – щільність рідини, кг/м³;

Q_p, H_p, η_p – робочі параметри насоса (подача, м³/год; напір, м; ККД);

η_d, η_c – ККД двигуна і електричної мережі;

$\sum T_p$ – сума робочого часу насосів;

a_i – величина плати за електроенергію у відповідній зоні.

Функція мети у процесі регулювання водовідливу шахти в певних тарифних зонах має вигляд:

$$\sum t_p \cdot a_i \rightarrow \min, \quad (2)$$

де $\sum T_p$ – сума робочого часу насосів;

a_i – зонні тарифи на електроенергію.

Для зменшення витрат на електроенергію необхідно зменшити тривалість увімкнення насосів не лише в часи пікового тарифу, а також під час напівпікового періоду. Час увімкнення насосів, які знаходяться на горизонті водовідливу, залежить від параметрів моделі погоризонтного шахтного водовідливу:

$$\langle Q_{np}, Q_{под}, V_{вод} \rangle, \quad (2)$$

де $Q_{np} = Q_{под-1} + Q_{сop}$ – притік води до водозбірника на горизонті водовідливу, який залежить від фактичного притоку води на горизонті та подачі води з попереднього (нижнього) горизонту, м³/год;

$Q_{под} = f(H_{сop}, Q_{нас}, \eta_{нас}, R_{mp}, N_{np}, P_{нас})$ – подача води з горизонту шахтного водовідливу, м³/год, яка залежить від глибини горизонту водовідливу $H_{сop}$;

$Q_{нас}$ – робоча подача насоса, встановленого на горизонті водовідливу;

$\eta_{нас}$ – коефіцієнт корисної дії насоса;

R_{mp} – еквівалентний опір трубопроводу на горизонті водовідливу;

N_{np} – кількість паралельно працюючих насосів на горизонті водовідливу;

$P_{нас}$ – споживана електрична потужність одного двигуна на горизонті водовідливу;

$V_{вод}$ – об'єм водозбірника на горизонті водовідливу, м³.

Дана модель описує будь-який погоризонтний шахтний водовідлив, що дозволяє застосовувати її як для існуючих шахт, так і для проектування нових. Параметри математичної моделі погоризонтного шахтного водовідливу поділяються на два типи: нерегульовані Q_{np} параметри, під які необхідно підлаштувати режими роботи споживачів, та регульовані $Q_{под}, V_{вод}$ параметри, які можна змінювати для досягнення мінімальних витрат на електроенергію.

Постійний видобуток вугілля або руди призводить до зменшення покладів на робочих горизонтах, що потребує поглиблення шахти. Проектування роботи водовідливу нового горизонту (нижнього) дозволяє врахувати характеристики гідравлічної потужності обладнання під час побудови водовідливу. Для роботи нижнього горизонту математична модель погоризонтного водовідливу шахти значно спрощується, оскільки притік Q_{np} не залежить від роботи попереднього горизонту ($Q_{сop-1} = 0, Q_{np} = Q_{сop}$) за умови, що очищення трубопроводу проводиться за планом, і трубопровід знаходиться в робочому стані ($Q_{под} = Q_{н}$). Спрощена математична модель погоризонтного шахтного водовідливу має вигляд:

$$\langle Q_{сop}, Q_{н}, V_{вод} \rangle, \quad (3)$$

Для розрахунку за спрощеною моделлю погоризонтного шахтного водовідливу за алгоритмом управління електроспоживанням шахтних водовідливних установок необхідно визначити параметр нормального притоку води до горизонту. Параметр нормального притоку води до горизонту визначається геологічним відділом на залізнично-вугільному підприємстві. За відомим параметром притоку можливо визначити межі гідравлічної потужності значень регульованих параметрів (об'єм водозбірника, подачу насоса).

Для описання алгоритму управління електроспоживанням шахтних водовідливних установок приймемо такі припущення:

– притік води протягом добового проміжку часу є рівномірним, тобто рівняння заповнення водозбірника лінійне;

– параметри насосів і трубопроводів для кожного режиму їх роботи протягом добового проміжку часу, на якому виконується моделювання, постійні;

– відкачка води з горизонту виконується насосами одного типу.

Основною задачею алгоритму є визначення моменту часу ввімкнення водовідливних насосів, які зможуть забезпечити до моменту максимуму енергосистеми відкачування води з водозбірника.

Нехай графік зміни рівня води у водозбірнику для працюючої водовідливної установки задається лінією BC (рис. 1).

Заповнення водозбірника відбувається на лінії АВ. Необхідно, щоб точка С, яка показує момент часу повної відкачки води з водозбірника, була поєднана з початком періоду максимуму навантаження енергосистеми (T_1 – для ранкового максимуму, T_3 – для вечірнього максимуму). Для цього проведемо з точки С лінію паралельну АВ, і з точки T_1 – лінію, паралельну ВС. Проекція точки В' на вісь часу показує момент увімкнення t_2 водовідливної установки, який визначається за формулою:

$$t + h(t)S / (Q_n - Q_n) - T_1 + E \geq 0, \quad (4)$$

де $h(t)$ – поточний рівень води в водозбірнику;

t – поточний час;

S – площа водозбірника;

Q_n – подача насосної установки;

Q_n – приток води у водозбірнику;

E – запас часу, що гарантує завершення відкачування води до розрахованого моменту.

У разі досягнення верхнього рівня води в водозбірнику (точка D) водовідливна установка вмикається від сигналу датчика верхнього рівня

(у момент t_3). Час мінімальної роботи водовідливної установки в період максимуму навантаження енергосистеми визначається як проекція лінії DE на вісь часу. Точка E знаходиться на перетині ліній DE і EF. Сигнал на відключення водовідливної установки формується в момент часу t_4 . Момент відключення водовідливної установки визначають за формулою:

$$H - h(t) - Q_n(T_2 - t) / S \geq 0, \quad (5)$$

де H – висота водозбірника;

T_2 – закінчення ранкового максимуму.

Точка G показує момент часу повної відкачки води з водозбірника.

Якщо продуктивність працюючої водовідливної установки не дозволяє відкачати воду з водозбірника у період між ранковим та вечірнім максимумами навантаження енергосистеми (закон зміни об'єму води в водозбірнику при працюючій водовідливній установці заданий лінією FG), передбачається вироблення керуючого сигналу на вмикання резервного насоса. Момент відключення додаткового насоса визначається за формулою:

$$T_2 - T_3 + E + h(t)S / (Q_{n1} + Q_{n2} - Q_n) + h(t)S / (Q_{n1} - Q_n) \leq 0 \quad (6)$$

Даний алгоритм працює за умови лінійної зміни притоку води в шахту і є ідеальною умовою. Хоч притік води в шахту досить складно визначити точно, зміна водного притоку не може відбуватися миттєво, що свідчить про плавну зміну водного притоку. Плавність зміни притоку пов'язана з особливістю будови стоку води в водозбірник із гірничої виробки, яка проходить через водовідливні канали, довжина яких сягає декількох кілометрів, отже, сумарний об'єм водовідлив-

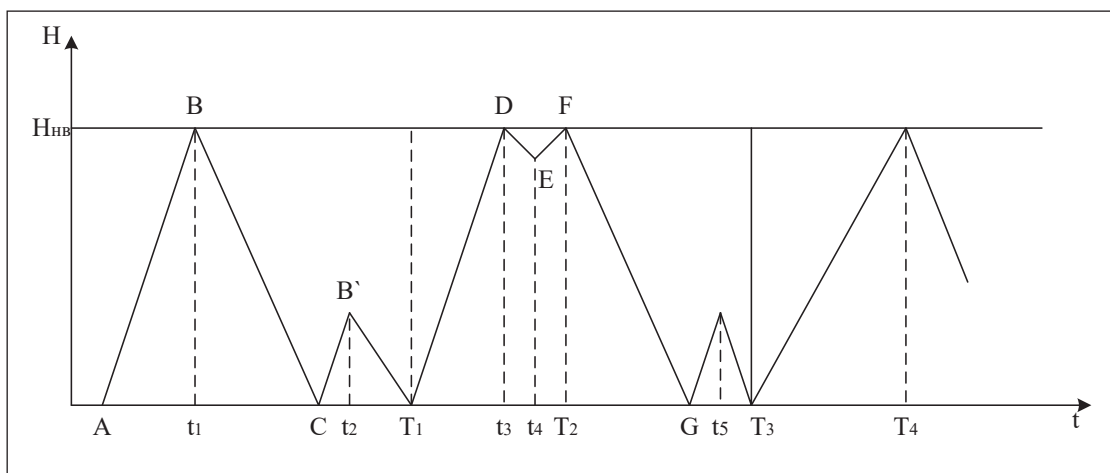


Рис. 1. Графік роботи водовідливної установки в режимі позапікового споживання електричної енергії

них канал становить приблизно 100–300 м³ [7]. Таким чином, водовідливні канали є натуральним буфером, який згладжує різкі зміни водного притоку. Відповідно, сезонні коливання притоку протягом року проходять поступово, без різкої зміни, що спричиняє накладення певних вимог на гідравлічне обладнання водовідливу шахти на кожному горизонті:

1. Необхідність моніторингу зміни притоку та швидкості заповнення водозбірника в реальному часі.

2. Визначення гідравлічних потужностей обладнання для зменшення роботи в пікові та напівпікові періоди енергосистеми за умови коливань притоку.

Для дотримання першої умови необхідне встановлення лічильників на притоці води до водозбірника або датчиків, які б показували кількість води у водозбірнику. Однак через особливості будови водозбірника обидва варіанти вирішення потребують значних коштів. Для вирішення першої умови пропонується скористатися проблемою нерегульованого привода шахтного водовідливу, а саме – зміною статичного напору [9]. Зміна статичного напору пропорційна зміні притоку води до горизонту шахти. Реалізується за допомогою встановлення датчика тиску на всмоктувальному трубопроводі, який знаходиться в нижній точці

водозбірника; датчик показуватиме швидкість прибування води до водозбірника та швидкість відкачування.

Дотримання другої умови дозволить визначити необхідність збільшення гідравлічних потужностей обладнання, а саме збільшення водозбірника, заміну насосів на більш потужні або дооснащення насосними агрегатами. Визначення мінімальної межі гідравлічної потужності обладнання проводиться відповідно до правил безпеки на вугільній шахті, згідно з якими об'єм водозбірника головного водовідливу повинен забезпечувати накопичення не менш ніж чотиригодинного максимального припливу води, що дозволяє перекрити час чотиригодинного вечірнього пікового періоду. Мінімальний об'єм водозбірника повинен складати:

$$V_{\min} = k_s \cdot t_m \cdot Q_{\max}, \quad (7)$$

де: $k_s = 1,15$ – середнє значення замулення вітки водозбірника від максимально допустимого, що дорівнює 30%;

$t_m = 4$ год – найбільша тривалість одного періоду проходження максимуму навантаження в енергосистемі;

Q_{\max} – максимальне значення годинного шахтного притоку води, м³/год.

Із формули (7) визначається мінімальне значення об'єму водозбірника для функціонування водовід-

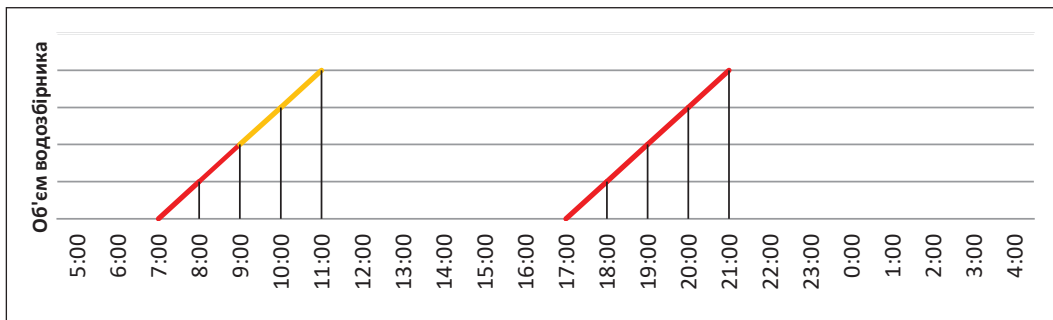


Рис. 2. Графік чотиригодинного заповнення водозбірника

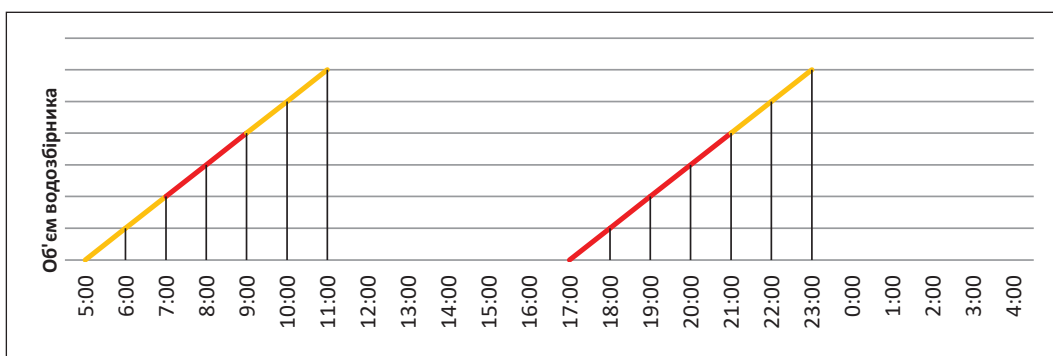


Рис. 3. Графік шестигодинного заповнення водозбірника

ливу на горизонті шахти, відповідно до реального об'єму водозбірника на горизонті отримуємо:

$$V_{\min} \leq V_{\text{вод}} \quad (8)$$

Якщо задатися умовою, що до періоду початку максимумів енергосистеми водозбірник має бути порожнім, то графік чотиригодинного заповнення матиме такий вигляд (рис. 2).

Якщо точно визначити приток води до горизонту досить складно, існує два можливих варіанти умов, а саме:

– водозбірник заповниться до 11:00, о 21:00 датчик верхнього рівня спрацює раніше, а насос почне відкачувати воду в час максимуму енергосистеми, що є неенергоефективним для підприємства.

– водозбірник заповниться після 11:00, о 21:00 датчик верхнього рівня спрацює після і насос почне відкачувати воду; чим пізніше насос почне відкачувати воду, тим вигідніше для підприємства (за умови, що насос відкачає воду до часу початку максимуму).

За рахунок наявності більшого водозбірника та можливості заповнення за шестигодинний нормальний притік зміститься початок ранкового максимуму (рис. 3), що може призвести до зменшення часу роботи в напівпікові періоди.

Це створить двогодинний запас (9:00–11:00 год, 21:00–23:00 год), який повинен урахувати збільшення водного притоку. Величина запасу визначається співвідношенням:

$$\frac{Q_{\max}}{Q_{\text{нор}}} = 1 + \frac{t_{\text{зан}}}{t_3}, \quad (9)$$

де Q_{\max} – максимальний притік води до горизонту;

$Q_{\text{нор}}$ – нормальний притік води до горизонту;

$t_{\text{зан}}$ – час запасу;

t_3 – час заповнення водозбірника у разі нормального притоку води до горизонту.

Водовідливні установки, як правило, обладнані відцентровими насосами, що обумовлюється високою надійністю їх роботи, високою економічністю порівняно з поршневыми та здатністю використовувати високошвидкісні електродвигуни [4]. Подача насоса визначається з правил безпеки, у яких визначається, що головні і дільничні водовідливні установки повинні бути обладнані не менш ніж трьома насосними агрегатами, подача кожного з яких має забезпечувати відкачування добового припливу води не довше, ніж за 20 годин.

$$20 > \frac{V_{\text{вод}}}{Q_{\text{нор}} + Q_n} > T_m - t_{\text{зан}} + t_3, \quad (10)$$

де T_m – період часу між максимумами енергосистеми.

Збільшення водозбірника повинно враховувати здатність насосів відкачати збільшений об'єм до початку максимуму енергосистеми. Здатність насосів визначає час, за який насоси повинні відкачати весь об'єм водозбірника при максимальному притоці, і включають у себе робочу та резервну групи.

Висновок. Розроблена математична модель погоризонтного шахтного водовідливу та алгоритм управління електроспоживанням шахтних водовідливних установок дозволяють встановити вимоги до гідравлічного обладнання водовідливу. Врахування коливань водного притоку визначає межі гідравлічної потужності обладнання.

Список літератури:

1. Праховник А.В., Розен В.П., Дегтярев В.В. Энергосберегающие режимы электроснабжения горнодобывающих предприятий. Москва: Недра, 1985. 232 с.
2. Про затвердження Порядку застосування тарифів на електроенергію від 13 червня 2017 р. № 764 / Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сфері енергетики. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0599-12>.
3. Данильчук Г.И., Шевчук С.П., Василенко П.К. Автоматизация электропотребления водоотливных установок. Киев: Техніка, 1981. 102 с.
4. Попов В.М. Рудничные водоотливные установки. Москва: Недра, 1972. 304 с.
5. Стожков Д.С. Обоснование зависимости затрат на электропривод насосных агрегатов от высоты ступени в многоступенчатом шахтном водоотливе. Известия Уральского государственного горного университета. 2013. № 1 (29). С. 59–62.
6. Тимухин С.А., Долганов А.В., Угольников А.В. Проблемы проектирования и эксплуатации комплексов шахтного водоотлива. Известия Уральского государственного горного университета. 2014. № 3 (35). С. 68–74.
7. Лисицкий А.В. Совершенствование системы управления шахтным водоотливом за счет краткосрочного прогноза водопритоков. Записки Горного института. 2002. № 150. С. 96–99.
8. Тимухин С.А., Иващенко Е.П., Марченко А.Ю., Марченко М.Ю., Салтанов С.Н., Баринов И.М., Викулов Е.А. О необходимости более полного учета максимальных притоков воды в проектных решениях

комплексов главного водоотлива. Известия Уральского государственного горного университета. 2015. № 4 (40). С. 41–45.

9. Бабокин Г.И. Энергосбережение в насосных станциях водоотлива средствами регулируемого электропривода. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. № 11. С. 305–306

ФОРМИРОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВОДООТЛИВНЫХ УСТАНОВОК НА ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

В статье определена математическая модель погоризонтного шахтного водоотлива, параметры которой позволяют определить энергоэффективные режимы работы насосов для трехзонного тарифа. Использование алгоритма управления электропотреблением шахтных водоотливных установок определяет режим работы насосов для линейного изменения притока. Для переменного притока определение режима работы сопровождается определением гидравлической мощности оборудования водоотлива. Определены требования к гидравлическому оборудованию водоотлива при переменном притоке. Показаны границы гидравлической мощности оборудования водоотлива и влияние изменения параметров на режим работы.

Ключевые слова: максимум энергосистемы, гидравлический потенциал оборудования, горизонт шахты, водный приток в шахту, погоризонтная схема водоотлива.

FORMATION OF ENERGY-EFFICIENT MODES OF WORKING OF WATER-RESISTANT INSTALLATIONS ON MINE-ENTERPRISE ENTERPRISES

In the article a mathematical model of the horizontally shaft drainage is determined, the parameters of which allow to determine energy-efficient modes of operation of pumps for a three-zone tariff. The use of the management algorithm for managing the consumption of mine drainage systems determines the mode of operation of the pumps for the linear change of inflow. For an alternating tributary, the determination of the operating mode is accompanied by the definition of the hydraulic power of the drainage equipment. As well as certain requirements for hydraulic drainage equipment with variable inflow. Displays the limits of the hydraulic power of the drainage equipment, and how the change of parameters affects the operating mode.

Key words: maximum of the power system, hydraulic potential of the equipment, mine horizon, water flow into the mine, horozontous drainage scheme.