

11. Горда Е. В. Особенности визуализации дефектов строительных машин, оборудования и сооружений на основе изображений оптического диапазона // Теорія і практика будівництва. № 7. 2011. 22–24.

12. Горда О. В. Дослідження функції присутності дефекту типу «тріщина» на цифрових зображеннях об'єктів будівництва // Управління розвитком складних систем. № 10. 2012. С. 112–114.

*Рекомендовано до публікації д-р техн. наук, професор Михайленко В. М.
Дата надходження рукопису 23.10.2017*

Горда Елена Владимировна, кандидат технических наук, доцент, кафедра информационных технологий проектирования и прикладной математики, Киевский национальный университет строительства и архитектуры, пр. Воздухофлотский, 31, г. Киев, Украина, 03037
E-mail: anaalg@ukr.net

Пузько Алексей Александрович, аспирант, кафедра информационных технологий проектирования и прикладной математики, Киевский национальный университет строительства и архитектуры, пр. Воздухофлотский, 31, г. Киев, Украина, 03037

УДК 621.311.214

DOI: 10.15587/2313-8416.2018.118647

СТВОРЕННЯ ОБОРОТНИХ ГІДРОАГРЕГАТІВ ГАЕС В СТРУКТУРІ СИСТЕМ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ ЗАЛІЗОРУДНИХ ПІДПРИЄМСТВ

© О. М. Сінчук, Ю. Б. Філіпп, І. О. Сінчук, І. О. Бобріков, І. В. Касаткіна,
Р. І. Краснопольський

Розглянуті питання пошуку напрямків та оцінка узагальненого рівня достатності використання енергопотенціалу залізрудних підприємств. Доведено, що можливості підвищення рівня використання енергопотенціалу даних видів підприємств шляхом застосування організаційних заходів вичерпано. Необхідний пошук нових, нетрадиційних для залізрудних підприємств напрямів підвищення енергоефективності. Оцінено що одним із ефективних заходів в цьому напрямку може бути реструктуризація комплексів водовідводів шахт в оборотні гідроагрегати – гідроакмулюючі електростанції

Ключові слова: енергоефективність, гідроакмулюючі електростанції, енергетика, енергопотенціал, водовідлив, залізрудні шахти, оборотні гідроагрегати

1. Вступ

Залізрудна сировина (ЗРС) – головний продукт українського експорту, щорічно дозволяє поповнювати валютні запаси держави більше ніж на 60 % [1]. Позитивним моментом останніх років, після майже десятирічного спаду вітчизняним гірничорудним комплексом, простежується тенденція збільшення обсягів видобутку ЗРС [2]. Між тим, ситуація, що склалася на світовому ринку сировини і котра характеризується значним зниженням ціни на ЗРС, спонукає підприємства до пошуку шляхів зменшення собівартості ЗРС [3]. Однак, показники собівартості, зумовлюються комплексом як об'єктивних, так і суб'єктивних факторів поки ще як і раніше, мають стійку тенденцію росту [2].

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Незважаючи на прийняття різнонаправлених заходів в останні роки, проблеми вітчизняних гірничовидобувних підприємств збільшилися [2]. Це пов'язано з тим, що в умовах поступової інтеграції України в Європейські ринкові структури надзвичайно гостро постають питання забезпечення енергоефе-

ктивних технологій на зазначених вище видах підприємств, що мають можливість підвищити конкурентоспроможність рівня продукції.

Одним із шляхів вирішення даної проблеми для гірничодобувних підприємств є розробка і впровадження в практику їх функціонування енергоефективної стратегії, що враховує специфіку функціонування і розвиток підприємства та його претензійність на роль у зовнішньому середовищі. У зв'язку з цим, зростає практична потреба вітчизняних гірничовидобувних підприємств у розробці енергоефективних стратегій, проектів і програм.

Вирішення проблеми зменшення собівартості видобуваної ЗРС, в т. ч. шляхом зменшення енергопотреб на цей процес завжди було і є актуальною [4], тому і привертало до себе увагу наукових дослідників в різні періоди часу [5]. Між тим, рівень актуальності аналізованої проблеми з впливом часу не зменшився, а навпаки, зріс [6].

Пов'язано це з тим фактом, що енергопотреба в загальній собівартості видобутку ЗРС постійно зростає, і в останнє десятиріччя перевищила поріг у 30 % [4].

Нажаль, незважаючи на такий негативний факт, обсяг наукових пошуків у цьому напрямку в

Україні за десять років зростання потреб не зріс. В зв'язку з цим вітчизняні залізрудні підприємства виходячи, в основному, зі своїх можливостей нерідко шляхом прийняття апріорно організаційних заходів, роблять спроби впливу на цей процес [7]. Важливо, що незважаючи на незначні досягнення в цьому процесі «інтрига» до цього індексу дослідницького напрямку з'явилася. Особливо це стосується питань контролю за рівнем енергоспоживання, зменшення витрат електричної енергії в цехових системах живлення, оптимізації добових навантажень і т. п.

Безумовно, що ці вкрай необхідні напрямки досліджень, стосуються необхідності оцінки потенціалу можливостей застосування в системах енергопостачання даних видів підприємств автономних джерел генерації електроенергії (ЕЕ) на основі відновлюваних джерел [8]. Між тим, потенціальні можливості в структурах технології видобутку ЗРС існують. Це апріорно доведено в ряді відомих досліджень, в тому числі авторів [9].

3. Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – виявлення нового та ефективного методу здобуття залізрудними гірничодобувними підприємствами енергоефективності, а також виявлення напрямку сучасного енергетичного розвитку.

Для досягнення мети були поставлені наступні задачі:

1. Проаналізувати ряд гірничодобувних підприємств.
2. Провести точні розрахунки, з урахуванням економічних досліджень співробітниками самих підприємств.

4. Матеріали та методи досліджень оборотних гідроагрегатів ГАЕС в структурі систем енергопостачання

Для оцінки реального доступного показника реалізації енергопотенціалу залізрудних підприємств необхідно, перш за все, оцінити можливості в цьому напрямку найбільш впливових на рівень енергоспоживання приймачів електричної енергії конкретного підприємства, а точніше приймачів-регуляторів даного виду енергії. Представляє інтерес застосування гідрогенераторів-акумуляторів, які працюють разом з насосними установками шахт і кар'єрів. При цьому в години максимуму енергосистеми (ранкового і вечірнього) генератор виробляє електроенергію за рахунок енергії води, що спускається з поверхні шахти або кар'єру, поповнюючи водозбірник.

Таким чином, споживання підприємства в години максимуму, коли енергія має максимальну ціну, знижується і, відповідно, знижується плата за електроенергію. Може бути також поліпшений режим роботи системи електропостачання: знижені втрати напруги і енергії, поліпшений коефіцієнт потужності і ін.

5. Результати досліджень

Результати такого аналізу наведені на рис. 1, які свідчать, що найбільш енергоємними споживачами по залізрудній шахті є: скіпові підйомні ус тановки (СкПУ), вентиляційні комплекси та водовідлив,

які в сумі споживають ЕЕ в діапазоні 56–95 % від загального обсягу.

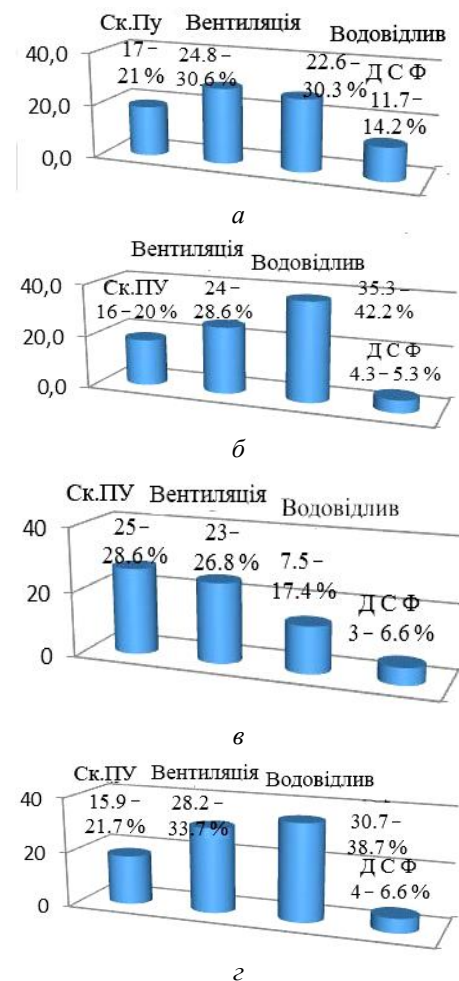


Рис. 1. Діапазони коливань рівнів споживання електричної енергії за видами споживачів, шахт: а – «Жовтнева»; б – «Родіна»; в – «Гвардійська»; г – «Тернівська» ПАТ «Криворізький залізрудний комбінат»

В свою чергу, аналіз технологічного розподілу цих приймачів показує наступне. Скіповий підйом – його результативність залежить від обсягів видобутку ЗРС і часу роботи, а значить обсяги споживання ЕЕ визначається цими основними факторами.

Вентиляція – а точніше вентилятори головного провітрювання, розраховуються на необхідну кількість та швидкість повітряного потоку, який необхідно подати в підземні горизонти шахт згідно відповідних нормативів.

Водовідлив – єдиний приймач, режими та рівні споживання якого не залежать від обсягів видобутку ЗРС, а лише від природного рівня притоку підземних вод.

Наближений до апріорного аналіз вищезазначених приймачів виявив те, що єдиний реальний потенціальний споживач ЕЕ, котрий може бути переведений в стан споживача-регулятора це водовідлив. Разом з тим, і цей висновок потребує свого диференціювання, з точки зору підвищення його енергоефективності, який в свою чергу може залежати від рівня та часу доби енергоспоживання.

Залізрудні підприємства, увійшовши в новий економічний період, дещо змінили своє ставлення до електроенергетичної складової економіки своїх підприємств [4]. Більш того, як відомо, форма розрахунків підприємств за спожиту ЕЕ за цей період змінилася, і істотно, перейшовши від двоставкових тарифів до одноставкового з диференційованою оплатою за часом доби [5].

Підприємства України намагаються в основному за рахунок організаційних заходів [4, 5] будувати добовий графік споживання електроенергії таким чином, щоб в нічну зміну працювали найбільш енергоємні агрегати: водовідлив, частково скіпової підйом, тоді як у поза піковий час – інші споживачі (рис. 2).

Відкачування води з підземних горизонтів рудних шахт здійснюється непростим за структурою і режимом роботи електромеханічним гідроенергетичним комплексом. Ця складність полягає в тому, що, поперше, водоприток в шахтах і обсяги води для відкачування непостійні, по-друге, що триває так звана «мокра консервація» відпрацьованих шахт, з одного боку, «збійка», тобто з'єднання горизонтів різних шахт в єдиний комплекс, з іншого – поглиблення, тобто зниження рівня ведення гірничих робіт, ставить тактику вирішення завдання вибору раціональних режимів роботи водовідкачуючих насосів як електромеханічних комплексів, вимушених функціонувати в багатокритеріальному алгоритмі з невстановленим прогнозом [7].

Внаслідок роботи насосних установок в нічний зоні, хоча її тривалість становить 7 годин, споживання електричної енергії складає 40 %. Споживання енергії в години «напівпік» тривалістю 11 годин складає 38 %, а в години «пік», тривалістю 6 годин – 22 %. Тобто, водовідлив є одним з найбільших споживачів електричної енергії в години «пік» і «напівпік».

Водовідливні (дренажні) установки за призначенням підрозділяють на головні (центральні), допоміжні (дільничні) і тимчасові (прохідницькі). До головних відносяться установки, призначені для перехоплення і відкачування всього або більшої частини очікуваного припливу води до гірничих виробок.

При великій протяжності шахтних полів та значних глибинах в шахтах використовується кілька головних водовідливних установок. На шахтах, як правило, діють дві–три головні водовідливні установки. Вони розміщені на двох–трьох горизонтах (рис. 3).

Головний водовідлив кожної шахти складається з 4-х ступенів, яка включає в себе: водозбірники, насосну камеру, камеру підстанції і т. і.

Кожна насосна камера обладнується стаціонарними насосними агрегатами, які складаються з: насоса ЦНС-300, електродвигуна, вакуум бака, запірної арматури і т. д.

Кількість насосних агрегатів кожного ступеня на кожній з шахт визначені проектом. У першому півріччі 2015 року середні притоки води по шахтам ПАТ «КЗРК» склали:

- ш. Тернівська – 183,1 м³/год;
- ш. «Гвардейская» – 142,1 м³/год;
- ш. «Октябрьская» – 129,7 м³/год;
- ш. «Родіна» – 476,2 м³/год.

Для приводів водовідливних установок застосовуються відцентрові насоси з приводами потужністю по 800 кВт. На кожному з горизонтів шахт може працювати до 6 таких насосів.

Графіки споживання насосами активної потужності за добу на шахтах Криворізького залізрудного басейну наведені на рис. 4.

На графіках видно, що насоси працюють не постійно, а включаються раз або кілька разів на добу для відкачування води. Коли водозбірники мають достатній обсяг для накопичення води, то відкачування води здійснюється повністю в нічний час (ш. Гвардійська). Коли цей обсяг не достатній для збору всієї води, то персонал змушений включити водовідливні установки і в денний час (ш. Родіна і ш. Жовтнева).

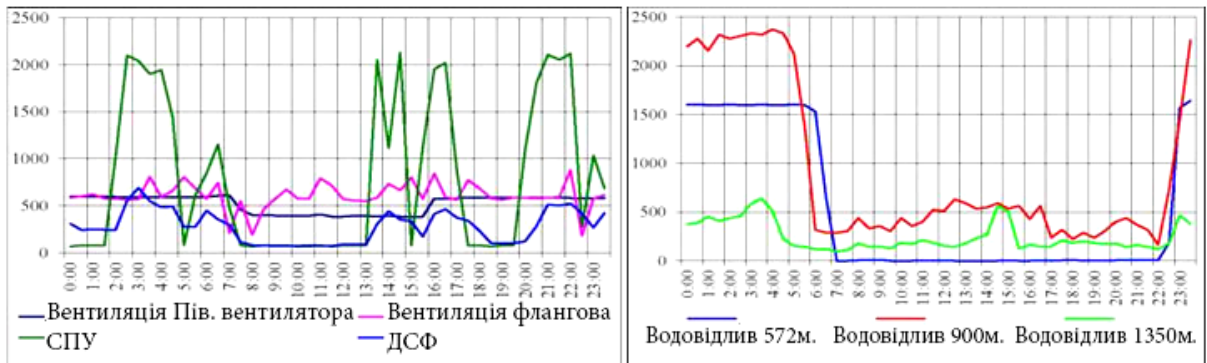
На рис. 5 наведено річний графік навантаження водовідливних установок ряду шахт Криворізького залізрудного басейну. Як видно з графіків, коливання навантаження водовідливних установок незначні, що пов'язано зі зміною припливу води.

Як відзначалось раніше, при розрахунках за електроенергію за тарифними зонами доби вигідно знижувати споживання в години максимуму енергосистеми і збільшувати споживання в нічні години, коли енергія дешевше (в 4,8 рази) [8].

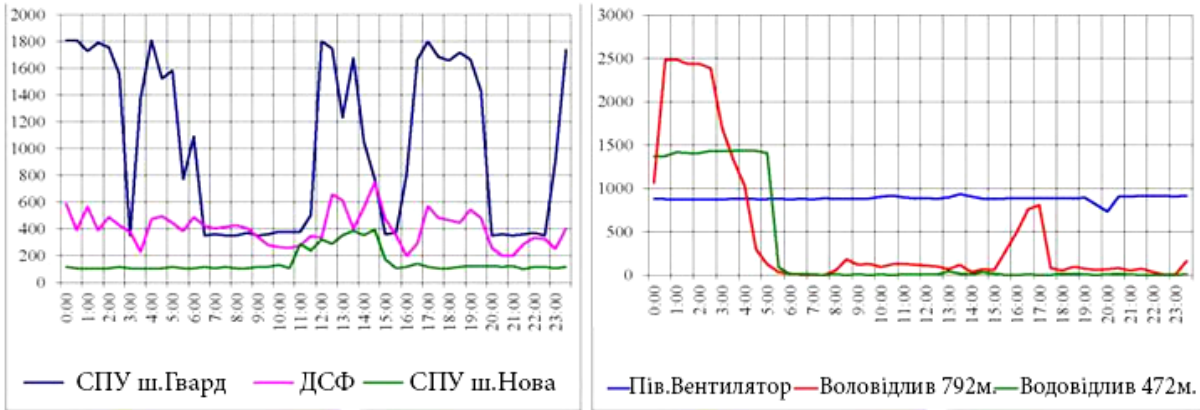
Максимальний ефект досягається, якщо в нічні години вода повністю відкачується, а в інші години доби насоси не включаються (рис. 6). Але для цього необхідно мати достатній обсяг водозбірників і запас продуктивності насосів.

Більш того, з точки зору оцінки енергоспоживання водовідливу шахт в структурі технології видобутку ЗРС, то він найменше впливає на цей процес, а отже і переформатизація його функцій в іншу, більш економічну, тарифну зону електроспоживання не спричинить за собою зміни технології видобутку ЗРС. Як приклад наведені розрахунки для ш. Тернівська ПАТ «Криворізький залізрудний комбінат» табл. 1.

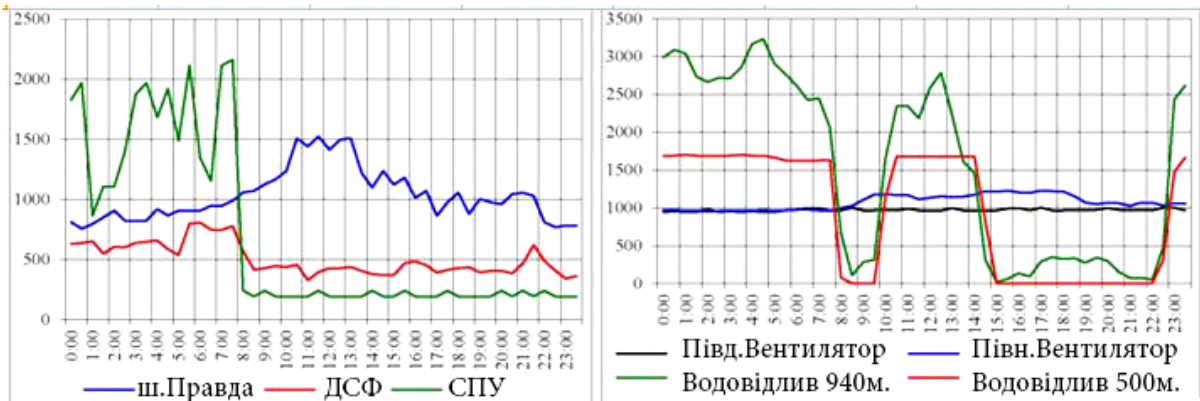
Згідно розрахунків служби енергоменеджменту ПАО «Криворізький залізрудний комбінат» вищезазначені заходи за рік дають очікувану економію для підприємств, більш ніж 11 млн. гривень. Між тим проблема підвищення енергоефективності процесу видобутку ЗРС тільки запропонованими методами не завершується, тим паче, що частіше, всі ці заходи вже вичерпано. Це свідчить про предмет подальших досліджень, одним з яких є створення на основі водовідливних установок шахт і кар'єрів оборотних гідроагрегатів гідроакумуючих електростанцій як джерел розподільчої генерації електричної енергії в структурах систем електропостачання залізрудних підприємств. Можливий варіант структури такого комплексу наведено на рис. 7.



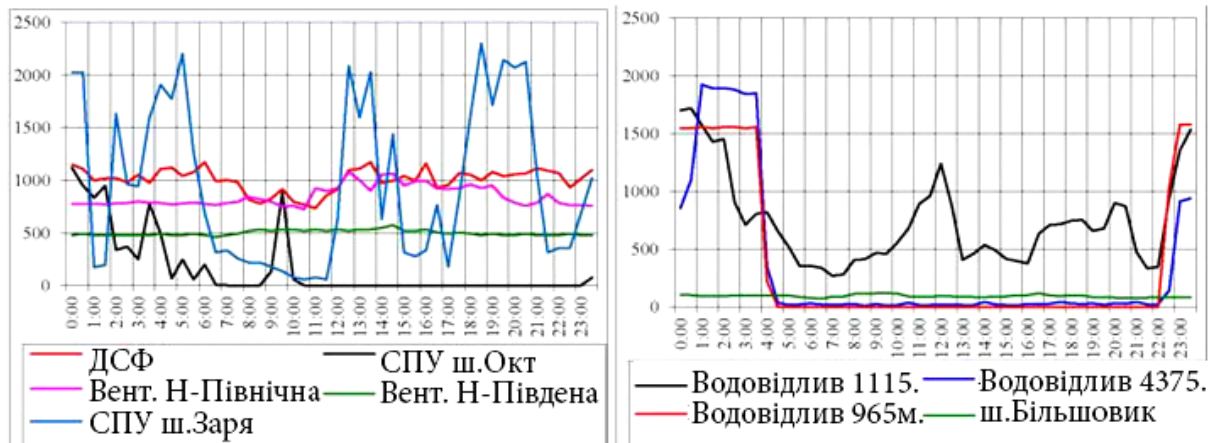
a



б



в



г

Рис. 2. Графіки споживання електричної енергії по шахтах ПАТ «Криворізький залізорудний комбінат» протягом доби: а – ш. Тернівська; б – ш. Гвардійська; в – ш. Родіна; г – ш. Октябрська

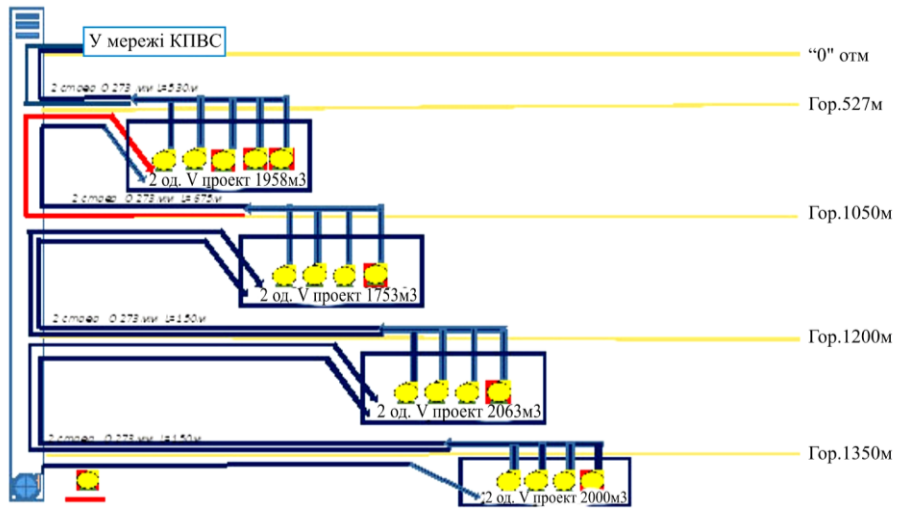


Рис. 3. Схема діючого водовідлива шахти Родіна ПАТ «Криворізький залізорудний комбінат»

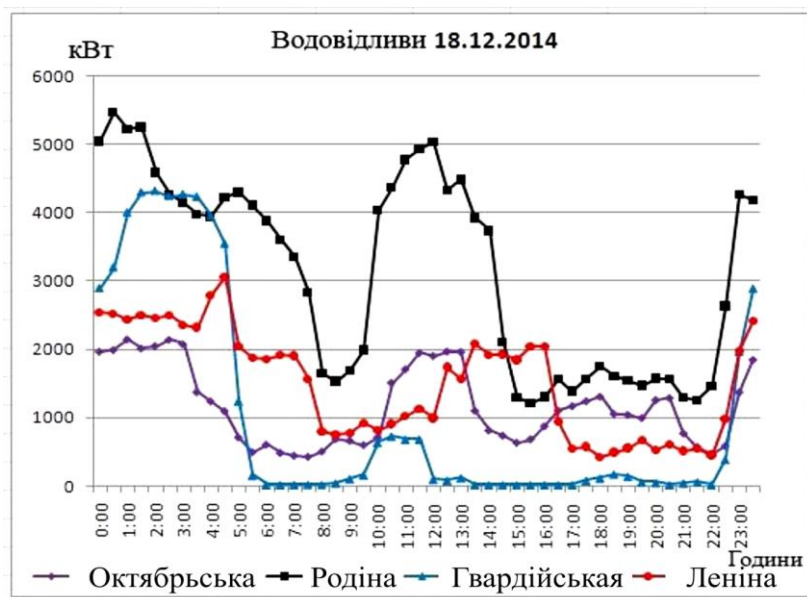


Рис. 4. Добовий графік активної потужності водовідливних установок ПАТ «Криворізький залізорудний комбінат»

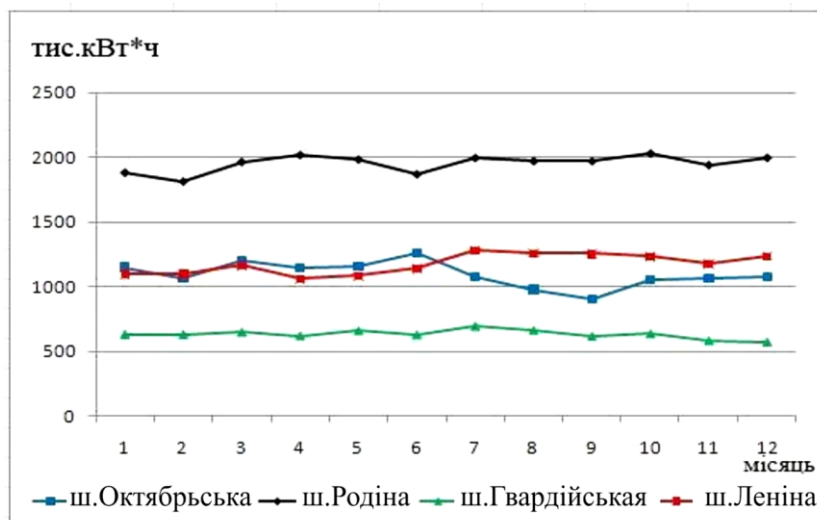


Рис. 5. Річний графік навантаження водовідливних установок шахт Криворізького залізорудного басейну



Рис. 6. Робота головних водовідливних установок горизонту 940 м ш. Тернівська

Таблиця 1

Існуючий графік відкачки води по ш. Тернівська

Горизонт	Робота в пік, години	Робота в п/пік, години	Робота в ніч, години	Потужність електропри- вода, кВт	Тариф електро- енергії в пік, грн.	Тариф електро- енергії в п/пік, грн.	Тариф електро- енергії в ніч, грн.	Витрати на роботу водовідлива за рік, тис. грн.
527	0	3103	2555	800	2,2509	1,27551	0,31263	3 804,8
1050	0	3103	2555	800	2,2509	1,27551	0,31263	3 804,8
1200	0	3103	2555	250	2,2509	1,27551	0,31263	1 189,0
1350	0	730	2190	315	2,2509	1,27551	0,31263	509,0
Усього								9 307,6
Пропонуемий графік відкачки води по ш. Тернівська								
Горизонт	Робота в пік, години	Робота в п/пік, години	Робота в ніч, години	Потужність електропри- вода, кВт	Тариф електро- енергії в пік, грн.	Тариф електро- енергії в п/пік, грн.	Тариф електро- енергії в ніч, грн.	Витрати на роботу водовідлива за рік, тис. грн.
527	0	0	5658	800	2,2509	1,27551	0,31263	1 415,0
1050	0	0	5658	800	2,2509	1,27551	0,31263	1 415,0
1200	0	0	5658	250	2,2509	1,27551	0,31263	442,2
1350	0	730	2190	315	2,2509	1,27551	0,31263	509,0
Усього								3 781,1

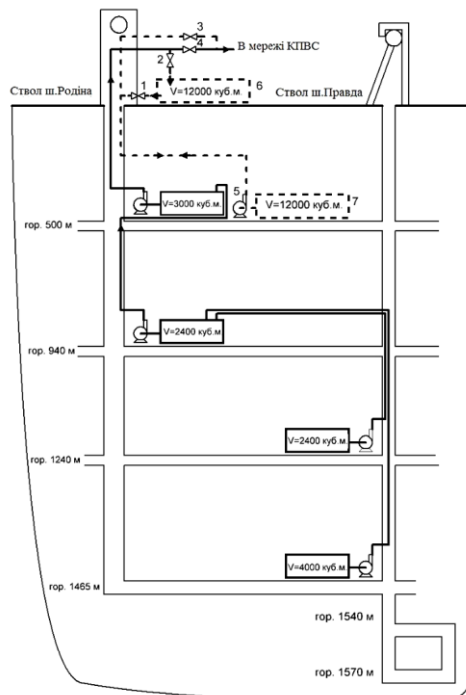


Рис. 7. Схема розташування водовідливу

Між тим у різних країнах розглядаються проекти по використанню відпрацьованих шахт в якості гідроакмулюючих електростанцій. Так в Австралії в селищі Кідстон на півночі Квінсленд планують створити центр відновлюваних джерел енергії на базі сонячних батарей потужністю до 320 МВт і гідроакмулюючої електростанції потужністю 250 МВт на базі покинутої шахти по видобутку золота [9]. У США компанією MorigiaHydroCorp. ведуться роботи з будівництва гідроелектростанції на базі старих залізних рудників OldBed, Bonanza, Harmony компанії Republic Steel Corp [10]. У проекті передбачається перекачування води з низького рівня зберігання в напівпі-

ковий інтервал часу доби на більш високу позначку і подальшої виробленням електроенергії при скиданні води в піковий час. У Німеччині також на діючій шахті Prosper-Haniel в Північній Рейн-Вестфалії (Західна Німеччина) після її виведення з експлуатації планується створити гідроакмулюючу станцію [11]. Такі електростанції використовують оборотний турбоагрегат як для перекачування води, так і вироблення електроенергії. Як приклад, у ПАТ «Кривбасзалізрудком» в експлуатації перебувають 4 видобувних шахти, на яких експлуатуються водовідливні установки. У табл. 2 наведені дані по водовідливним установкам цих шахт.

Таблиця 2

Характеристика водовідливів ряду шахт Криворізького залізрудного басейну

Шахти	Добовий водоприток, м ³	Питомий водоприток, м ³ /час	Обсяг водозбірника, м ³
Родіна	11429	476	26600
Жовтнева	3112	129	20080
Гвардійська	3410	142	15000
Тернівська	4392	183	15548

6. Обговорення результатів дослідження

Найбільший водоприток має місце на шахті Тернівська, що обумовлено складними гірничо-геологічними умовами. Алгоритм роботи водовідливів з гідроаккумуляцією може бути описаний таким чином:

а) в нічний час вода надходить в додатковий водозбірник з $V_{ст}=12000$ куб. м на нульовій позначці;

б) під час періоду «пік» вода скидається в додатковий водозбірник $V_{в}=12000$ куб. м на гор. 500 м, при цьому додаткові насоси працюють в режимі гідрогенераторів з виробленням електроенергії;

в) в нічний час скинута вода повторно відкачується на нульову позначку і далі в мережі підприємства КПВС.

Кількість насосів, що працюють в режимі гідрогенератора при скиданні всієї води з нульової позначки на горизонт 500 м, визначиться:

$$n = \frac{V_{в}}{t_{н} \times Q_{н}};$$

де $V_{в}$ – ємність водозбірника, м³, $Q_{н}$ – номінальна подача насоса, м³/год, $t_{н}$ – сумарний час доби, відповідне ранкового і вечірнього піку, ч.

Добове споживання електроенергії при відкачці води на нульову позначку можна визначити як:

$$W_{о} = k_{з} \times \frac{\gamma \times g \times V_{в} \times H}{3600 \times 1000 \times \eta_{н} \times \eta_{д} \times \eta_{с}};$$

а генерація електроенергії при скиданні відкачаної води в піковий години:

$$W_{г} = k_{з} \times \frac{\gamma \times g \times V_{в} \times H \times \eta_{н} \times \eta_{д} \times \eta_{с}}{3600 \times 1000};$$

де $k_{з}$ – коефіцієнт запасу зпаса; γ – щільність шахтної води, кг/м³; $V_{в}$ – об'єм водозбірника, м³; g – прискорення вільного падіння; H – перепад висот між водосборниками, м; $\eta_{н}$ – к.п.д. насосу; $\eta_{д}$ – к.п.д. двигуна; $\eta_{с}$ – к.п.д. мережі.

Повна спожита електроенергія за добу визначиться як:

$$W_{п} = 2 \times W_{о} - W_{г};$$

Річний економічний ефект може бути визначений наступним чином:

$$\mathcal{E}_{г} = (c_{1} \times W_{г} - 2 \times c_{2} \times W_{о}) \times T_{г}.$$

де $T_{г}$ – час роботи насосів протягом року; c_{1} , c_{2} – тарифи зон «пік» і «ніч». Число 2 у формулах враховує подвійну відкачування води з горизонту 500 м на нульову позначку.

Використання шахтного водовідливу для генерації електроенергії в пікові години вимагає вирішення ряду завдань:

- спорудження додаткових водозбірників в шахті;
- установка додаткових насосів з синхронними двигунами;
- установка додаткових трубопроводів і пристроїв управління водопотоками (засувками з електроприводами);
- регулювання і стабілізація швидкості обертання насосів в режимі гідрогенератора;
- встановлення відповідної системи автоматизації, захисту і сигналізації.

7. Висновки

1. Одним з реальних напрямків підвищення енергоефективності видобутку ЗРС є застосування на базі водовідливних установок оборотних гідроагрегатів

ГАЕС – джерел генерації електричної енергії в структурах систем енергопостачання гірничих підприємств.

2. Рівнів виробництва ЕЕ достатньо для забезпечення живлення енергоємних споживачів залізрудної шахти на протязі години «ППК».

3. Отримання електроенергії в режимі гідроакумуляції в шахтах необхідна установка додаткових водозбірників і насосів, що не може бути проблемою в досягненні поставленої цілі.

Література

1. Основні параметри енергозабезпечення національної економіки на період до 2020 року / Б. С. Стогній та ін. Київ: Видавництво Інституту електродинаміки НАН України, 2011. 275 с.
2. Дослідження техніко-економічних показників гірничодобувних підприємств України та ефективності їх роботи в умовах змінної кон'юнктури світового ринку залізрудної сировини / Є. К. Бабець та ін.; ред. Є. К. Бабій. Кривий Ріг: вид. Р. А. Козлов, 2015. 391 с.
3. Сінчук О. М., Бажал А. Г. Кривбас на межі тисячоліть: шляхи відродження. Київ: АДЕФ-Україна, 1997. 31 с.
4. Оценка потенциала и тактика повышения электроэнергоэффективности подземных железорудных производств / О. Н. Сінчук та ін. // Технологический аудит и резервы производства. 2014. Т. 3, № 4 (17). С. 34–39. doi: 10.15587/2312-8372.2014.25329
5. До проблеми ефективності споживання електричної енергії залізрудними підприємствами: зб. наук. пр. / О. М. Сінчук, І. О. Сінчук, Т. М. Берідзе, А. М. Ялова // Вісник криворізького національного університету. 2014. № 36. С. 160–167.
6. Овчаренко, А. С. Повышение эффективности электроснабжения промышленных предприятий. Киев: Техника, 1989. 287 с.
7. К управлению электропотреблением в условиях дефицита энергоресурсов / А. В. Праховник, В. П. Калинин, П. Я. Декель // Известия вузов СССР. Энергетика. 1986. № 10. С. 12–15.
8. Режимы нагрузок электроприемников приисков / В. И. Щуцкий, А. В. Ляхомский, Н. А. Ковальчук // Колыма. 1984. № 9. С. 27–29.
9. Kidston S. Turning an abandoned gold mine into a renewable energy hub / Aus IMM bulletin, 2017. URL: <http://www.ausimmbulletin.com/feature/turning-abandoned-gold-mine-renewable-energy-hub/>
10. McKinsty L. Moriah hydro project proceeds. Press Republican, 2015. URL: http://www.pressrepublican.com/news/local_news/moriah-hydro-project-proceeds/article_c3bc56ac-2a4a-5eea-b16d-de87f3045b5b.html
11. В Германии угольную шахту превратят в гидроаккумулирующую электростанцию. URL: <https://geektimes.ru/post/287320/>

Дата надходження рукопису 29.11.2017

Сінчук Олег Миколайович, доктор технічних наук, професор, кафедра автоматизованих електромеханічних систем в промисловості та транспорті, ДВНЗ «Криворізький національний університет», вул. Віталія Матусевича, 11, м. Кривий Ріг, Україна, 50027
E-mail: speet@ukr.net

Філіпп Юлій Борисович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра автоматизованих електромеханічних систем в промисловості та транспорті, ДВНЗ «Криворізький національний університет», вул. Віталія Матусевича, 11, м. Кривий Ріг, Україна, 50027

Сінчук Ігор Олегович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра автоматизованих електромеханічних систем в промисловості та транспорті, ДВНЗ «Криворізький національний університет», вул. Віталія Матусевича, 11, м. Кривий Ріг, Україна, 50027

Бобріков Ігор Олегович, начальник відділу, відділ енергоменеджменту, ПАТ «Криворізький залізрудний комбінат», вул. Сімбірцева, 1а, м. Кривий Ріг, Україна, 50029

Касаткіна Ірина Віталіївна, кандидат технічних наук, доцент, кафедра автоматизованих електромеханічних систем в промисловості та транспорті, ДВНЗ «Криворізький національний університет», вул. Віталія Матусевича, 11, м. Кривий Ріг, Україна, 50027

Краснопольський Роман Ігорович, аспірант, кафедра автоматизованих електромеханічних систем в промисловості та транспорті, ДВНЗ «Криворізький національний університет», вул. Віталія Матусевича, 11, м. Кривий Ріг, Україна, 50027