

JULIUSZ KRUPIŃSKI
HERBERT WIRTH

Perspektywy rozwoju infrastruktury energetycznej na przykładzie projektu podziemnej elektrowni szczytowo-pompowej w wybranym szybie KGHM po zakończeniu eksploatacji

Artykuł porusza aspekty techniczne oraz technologiczne w zakresie możliwości stworzenia infrastruktury energetycznej po zakończeniu produkcji w wybranym szybie KGHM Polska Miedź S.A. Zaproponowano kaskadowy system umieszczenia turbin w szybie i rozważono możliwości jego utworzenia, respektując przy tym wymiary turbin i szybu. W trakcie analizy zbadano odpowiednie moce turbin, przepływy, wymiary infrastruktury oraz możliwe rozwiązania w przewyżczeniu ograniczeń rozwoju podziemnej elektrowni szczytowo-pompowej (PESP) w obiekcie pogórnym.

Słowa kluczowe: magazyny energii, hydroelektrownia, rekultywacja, podziemna elektrownia szczytowo-pompowa, obiekty pogórnice

1. WSTĘP

Niniejsza analiza jest propozycją kierunku rozwoju oraz dalszego poszukiwania możliwości projektowych w zakresie zagospodarowania infrastruktury pogórnicej na potrzeby magazynowania i produkcji energii. Głównym jej celem jest przeanalizowanie możliwości wykorzystania infrastruktury górniczej, np. szybów i infrastruktury dołowej, do magazynowania i produkcji energii dla zabezpieczenia potrzeb energetycznych LGOM. Artykuł opiera się na obliczeniach i analizach wykonanych w pracy magisterskiej pt. *Opportunities for future development of an energy infrastructure after production closure in KGHM shaft, by the example of an underground pumped – storage hydropower creation*. W celu pogłębienia tematu, procesów i przeprowadzonych analiz autorzy zachęcają do sięgnięcia po oryginalną pracę dyplomową [1].

2. PROPOZYCJA BUDOWY INFRASTRUKTURY ENERGETYCZNEJ W SZYBIE KGHM POLSKA MIEDŹ S.A. PO ZAKOŃCZENIU EKSPLOATACJI

W dobie wzrastającej świadomości ekologicznej wiele przedsiębiorstw zgodnie z zaleceniami UE zwiększa swoją neutralność klimatyczną w działalności gospodarczej. Taki trend również widoczny jest w górnictwie, realizowany np. przez zastosowanie elektrycznych samochodów, zakładanie farm fotowoltaicznych i wiatrowych na zrekultywowanych terenach pogórnich [2]. KGHM Polska Miedź S.A. w swojej polityce nie odbiega od ogólnego, międzynarodowego, proekologicznego trendu. Plan firmy zakłada, by do roku 2030 w 50% produkować energię elektryczną z własnych, ekologicznych, należących do spółki źródeł [3]. Po zaprzestaniu wydobywania szyby górnicze zostaną zlikwidowane zgodnie z Prawem Górniczym i Geologicznym.

Ważnym elementem likwidacji obiektów górniczych jest ich efektywne wykorzystanie [4]. Jedną z takich propozycji jest lokalizacja w szybie instalacji elektroenergetycznej do produkcji energii elektrycznej. W literaturze można znaleźć wiele przykładów wykorzystania infrastruktury pogórnicej na potrzeby utworzenia systemu produkującego energię, lecz żaden do tej pory nie został skomercjalizowany [5]. Zazwyczaj można znaleźć w literaturze propozycje przekształcenia energii potencjalnej w kinetyczną z wykorzystaniem naturalnego spadku w szybie górniczym lub korzystając z energii gromadzonej w wodzie czy nawet gromadzonej grawitacyjnie. Jeżeli chodzi o rozwiązanie z użyciem wody, to taki pomysł nazwany został podziemną elektrownią szczytowo-pompową (PESP, ang. *Underground Pumped-Storage Hydropower*). Prezentowane rozwiązanie można połączyć z już istniejącymi obiektami energetycznymi spółki miedziowej i efektywnie wykorzystywać nadwyżki energii, magazynując je w elektrowni wodnej, a w czasie zwiększonego zapotrzebowania na energię można zmagazynowaną uprzednio energię potencjalną przekształcić w energię elektryczną. Wytworzona w ten sposób energia może posłużyć do uniezależniania energetycznego pobliskich miast w zagłębiu miedziowym, da też szansę na nowy impuls rozwojowy regionu po zakończeniu eksploatacji rud miedzi w KGHM-ie.

3. PODSTAWOWE ZASADY DZIAŁANIA ELEKTROWNI SZCZYTOWO-POMPOWYCH

Jak podaje Instytut Techniki Górniczej KOMAG w „Przeglądzie Rozwiązań Magazynowania Energii”, elektrownie szczytowo-pompowe są najbardziej opłacalnymi magazynami energii w porównaniu z innymi propozycjami rynku energetycznego dostępnymi w roku 2021 [6]. W Polsce działa aż sześć takich obiektów, a kilka znajduje się jeszcze w fazie projektowej. Elektrownie tego typu przede wszystkim wykorzystują do pracy nadwyżkę energii produkowanej przez blisko działające obiekty elektroenergetyczne, w tym OZE. W okresach, w których ta energia nie jest zużywana, można ją magazynować, natomiast wykorzystuje się ją w czasie dużego zapotrzebowania energetycznego. W reakcji na dane potrzeby rynku odbywa się to stosunkowo szybko.

Infrastruktura elektroenergetyczna takich elektrowni to turbiny, pompy, generator wraz z silnikiem, a poza szybem górny i dolny zbiornik, gdzie magazynuje się wodę. Często funkcję rezerwuarów wodnych na potrzeby ESP pełnią jeziora, stawy bądź sztuczne zbiorniki. Pompa może być stosowana jako samodzielne urządzenie, ale znane są również i dość często wyko-

rzystywane tzw. turbiny Francisa oraz pompoturbiny które mogą służyć albo jednocześnie za pompy oraz za turbiny w zależności od systemu, w jakim działają [6].

4. WYZWANIA DOTYCZĄCE ROZWOJU INFRASTRUKTURY PESP W WYBRANYM SZYBIE KGHM POLSKA MIEDŹ S.A.

4.1. Ograniczenia systemu PESP

Informacje na temat badań rozwoju PESP w kopalniach podziemnych można znaleźć w literaturze, np. w „The FCN Working Paper Series” czy w „Energies” [7, 8]. W Polsce wstępne analizy nad implementacją PESP prowadzono w JSW S.A., oraz w Instytucie Techniki Górniczej KOMAG, zaś w Europie badania tego typu robiono w Niemczech, Hiszpanii czy w Czechach – w kopalni węgla kamiennego Jeremenko, gdzie został utworzony prototyp systemu. Rozwiązanie to opierało się na wykorzystaniu turbiny Peltona oraz na istniejącym systemie odwadniania kopalni [9].

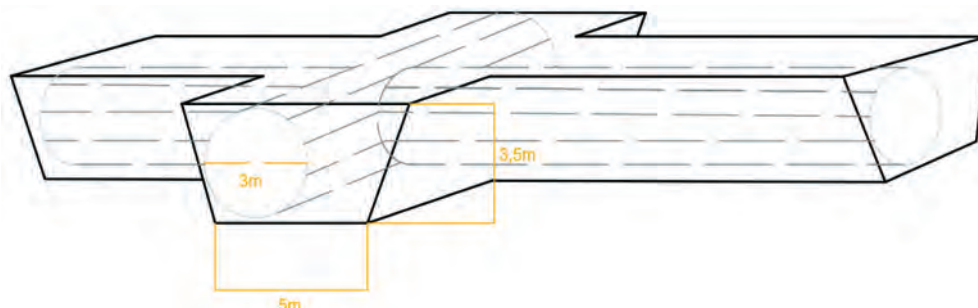
Analizując możliwości zaprojektowania systemu PESP w KGHM-ie, łatwo dojść do wniosku, że projekt dolnego zbiornika będzie stanowić duże wyzwanie. W zagłębiu miedziowym eksploatacja prowadzona jest metodą komorowo-filarową, z ugięciem stropu oraz z zastosowaniem posadzki hydraulicznej. Taki system już na wstępie zakłada bardzo duże ograniczenia projektowe. Dolny zbiornik nie może pełnić funkcji rezerwuaru w pełnym znaczeniu tego terminu, ponieważ w wyrobiskach brakuje odpowiedniej przestrzeni. Rozważano również możliwość zalania wyrobisk po ich uprzednim uszczelnieniu, jednak takie rozwiązanie wiązałoby się ze zbyt dużym ryzykiem. Wynika to z konieczności zapewnienia stałego dostępu do wyrobisk górniczych, co uniemożliwia ich zalanie. Dodatkowym problemem jest potencjalne ryzyko wycieku wody. Niemieckie centrum badawczo-naukowe E.ON zaproponowało alternatywne rozwiązanie polegające na budowie nowych tuneli, które miałyby pełnić funkcję dolnego rezerwuaru. Choć jest to obiecujący pomysł, jego realizacja może wymagać zbyt dużych nakładów finansowych ze względu na wysokie koszty prowadzenia robót górniczych [8].

4.2. Założenia projektowe

Po dokładnej analizie możliwości zdecydowano się na wykonanie sieci rur pod ziemią. Część wyrobisk

zostanie przeznaczona na magazyn wody gromadzonej w rurach. Druga część będzie stanowić drogę dojazdową, która pozwoli na wykonanie prac zabezpieczających itd. Przy takiej propozycji należałoby również przemyśleć odpowiednie odpowietrzanie, by dało się sprawnie sterować przepływem w dolnym zbiorniku. Na rysunku 1 przedstawiono wyciek w typowym wyro-

bisku kopalnianym KGHM o uśrednionych rozmiarach, w którym zamontowano sieć rur. W przypadku takiego systemu należy uwzględnić dodatkowe koszty związane z projektowaniem sieci oraz niezbędnymi pracami górniczymi, które są nieodzowne przy jej budowie. Wyliczono, że można zastosować rury o średnicy zewnętrznej od 3 m do 3,5 m.



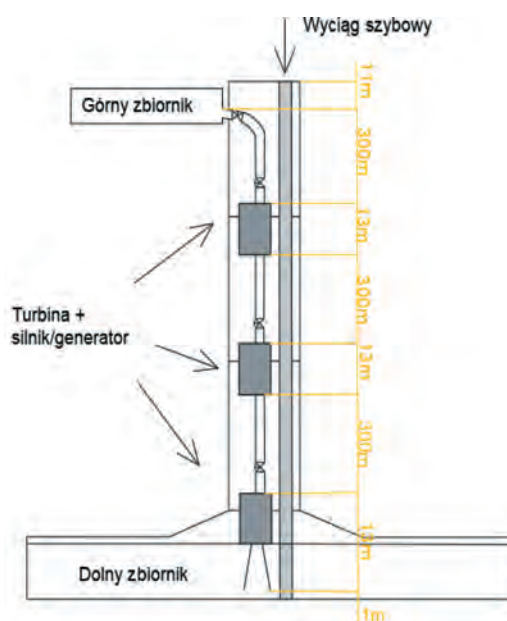
Rys. 1. Wycinek z przykładowej sieci rur pod ziemią (dolny zbiornik)

Obliczenia przeprowadzone na rurach o proponowanych wymiarach ukazują, że do tego celu można wykorzystać wyrobiska dołowe, najlepiej transportowe (upadowe oraz chodniki) o długości od 73 km do nawet 100 km.

Górny zbiornik, w przeciwieństwie do dolnego, nie powinien stwarzać tak dużych problemów technicznych, a jego projektowanie powinno być prostsze. Konceptyjnie byłby to standardowy rezerwuuar wodny, przy czym najbardziej korzystnym rozwiązaniem byłoby wykorzystanie istniejącego w pobliżu zbiornika. Gdy nie ma takiej możliwości, proponuje się jego wybudowanie oraz odpowiednie uszczelnienie. Zależnie od tego, czy w PESP będzie wykorzystana woda dołowa (z odwadniania kopalni) czy też nie, odpowiednio trzeba będzie zabezpieczyć zbiornik przed możliwym wyciekami oraz skażeniem środowiska.

Do analizy projektowej wybrano szyb SW-3 o długości 950 m, znajdujący się blisko miasta Polkowice. Jest to szyb wentylacyjny (rys. 2). Ma on również wieżę szybową z wyciągiem, która może być odpowiednio przekształcona, co zostało potwierdzone podczas rozmowy z pracownikiem KGHM Cuprum – CBR Sp. z o.o. Głównym założeniem jest odpowiednie zagospodarowanie i wykorzystanie średnicy szybu w celu zbudowania infrastruktury PESP w systemie kaskadowym. W szybie zostałyby zamontowane turbiny Francisza wraz z silnikiem i generatorem. Byłoby to rozwiązanie konkurencyjne dla tego z elektrowni w czeskiej kopalni węgla kamiennego Jeremenko, gdyż nie będzie ono wymagało tak dużego nakładu robót górniczych. Nie trzeba będzie również prowadzić eksploatacji dodatkowej w rejonach szybu, co jest raczej niewskazane ze względu na możliwe naruszenie sta-

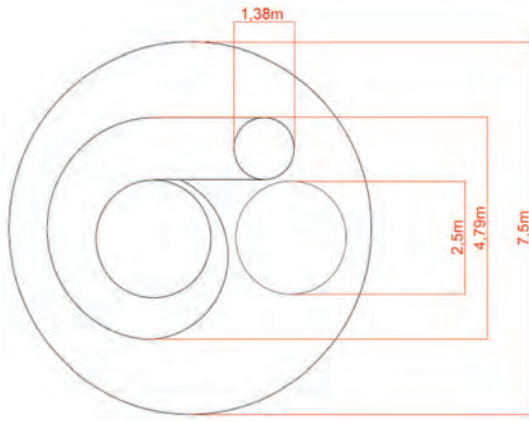
teczności wyrobisk i samego szybu. Do takiego rozwiązania potrzeba będzie wykonać odpowiednie obliczenia rozmiaru turbin, zwłaszcza ich średnicy, tak aby mogły zmieścić się w szybie.



Rys. 2. Rozmieszczenie infrastruktury w szybie O/ZG Polkowice-Sieroszowice SW-3

Horyzontalny rzut szybu może w łatwiejszy sposób ukazać pomysł rozmieszczenia infrastruktury w kopalni. Zwymiarowane części infrastruktury na rysunku 3 to:

- wlot do obudowy spiralnej – 1,38 m,
- średnica obudowy spiralnej wybranej turbiny Francisza – 4,79 m,
- miejsce na „przebudowany szyb” – 2,5 m (nie jest to wiążący wymiar, a raczej propozycja),
- średnica szybu SW-3 – 7,5 m.



Rys. 3. Rozmieszczenie infrastruktury w szybie O/ZG Polkowice-Sierszowice SW-3 – rzut horyzontalny

5. OBLICZENIA

5.1. Podstawowe parametry turbiny Francisa

Podczas prowadzonych analiz zastosowano odpowiednie założenia projektowe, które umożliwiły poprawne przeprowadzenie obliczeń. Obliczono wydajność (objętościowe natężenie przepływu) a z niej objętość wody, jaka może zostać wypompowana z typowego spad systemu, wynoszącego 300 m, i opracowano rysunek obudowy turbiny (rys. 4). Wynik pozwolił przyjąć odpowiednią wydajność do dalszych obliczeń. Jest to wartość, która i tak może być kontrolowana przez odpowiednie ustawienie łopatek samej turbiny. $Q_p = 12,24 \text{ m}^3/\text{s}$, a $Q_g = 15,12 \text{ m}^3/\text{s}$ [9].

Podczas pompowania:

$$Q_p = \frac{P_p \cdot \eta_p}{g \cdot \rho \cdot h} \quad (1)$$

Podczas generowania energii:

$$Q_g = \frac{P_g}{g \cdot \rho \cdot h \cdot \eta_g} \quad (2)$$

gdzie:

- Q_p – wydajność [m^3/s],
- P_p – moc [W]
- η_p – sprawność [–],
- g – przyspieszenie ziemskie [m/s^2],
- ρ – gęstość wody [$1000 \text{ kg}/\text{m}^3$],
- h – spad wody [m].

Wyniki obliczeń wskazały, że rezeruar wodny będzie miał objętość min 0,69 Gł wody. Do wykonania analiz matematycznych przyjęto sprawności podczas pompowania i generowania $\eta = 90\%$, natomiast liczy-

by te mogą się ostatecznie zmienić ze względu na specyfikę systemu.

5.2. Wymiary turbin Francisa

Dalsze obliczenia wymagały iteracyjnego przeanalizowania wymiarów turbin z uwzględnieniem średnicy szybu wynoszącej 7,5 m. Po dokładnej analizie wynika, że najrozsądniejszy będzie wybór turbiny o mocy około 40 MW. Taka jednostka będzie mogła bez większych problemów być zamontowana w szybie. Wykorzystane zostały do tego wzory, które zaproponowali F. de Siervo i F. de Leva [10].

$$A = \left(1,2 - \frac{19,56}{N_s} \right) \cdot D_r \quad (3)$$

$$B = \left(1,1 + \frac{54,8}{N_s} \right) \cdot D_r \quad (4)$$

$$C = \left(1,32 + \frac{49,25}{N_s} \right) \cdot D_r \quad (5)$$

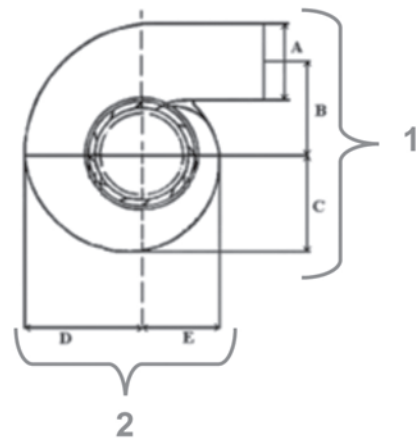
$$D = \left(1,5 + \frac{48,8}{N_s} \right) \cdot D_r \quad (6)$$

$$E = \left(0,98 + \frac{63,6}{N_s} \right) \cdot D_r \quad (7)$$

gdzie:

D_r – średnica na wylocie z wirnika [m],

N_s – wyróżnik szybkobieżności [–].



Rys. 4. Obudowa spiralna turbiny Francisa (opracowanie własne na podstawie [10])

$$1 = D + E, \quad 2 = 1/2A + B + C$$

Na podstawie tych wartości dla każdej mocy turbiny można było iteracyjnie sprawdzić wartości najdłuższego boku 1 i 2.

5.3. Działanie systemu w trakcie cyklu pompowania

Dalsze badania polegały na sprawdzeniu strat wysokości ciśnienia wody, czyli tzw. strat hydraulicznych w trakcie pompowania w systemie kaskadowym, zaproponowanym na rysunku 2. W tabeli 1 przedstawiono wartości parametrów w trakcie pompowania wody.

$$H_{total} = H_s + H_d \quad (8)$$

gdzie:

H_s – statyczna wysokość ciśnienia [m],
 H_d – dynamiczna wysokość ciśnienia [m].

$$H_d = \frac{Kv^2}{2g} \quad (9)$$

gdzie:

K – współczynnik strat [–],
 v – prędkość w rurze [m/s],
 g – przyspieszenie ziemskie [m/s²].

Tabela 1

Warunki pracy i wartości parametrów w trakcie pompowania wody

Parametr	Wartość	Jednostka
I Turbina		
Wysokość	306,3253	[m]
Moc	40 885 053	[W]
Moc (bufor)	42	[MW]
II Turbina		
Wysokość	305,3812	[m]
Moc	40 771 506	[W]
Moc (bufor)	42	[MW]
III Turbina		
Wysokość	305,3812	[m]
Moc	40 759 041	[W]
Moc (bufor)	42	[MW]

Wyniki analizy współpracy turbin w zaproponowanym systemie kaskadowym wykazały, że warto przyjąć odpowiedni bufor bezpieczeństwa dla mocy turbiny. Choć zapotrzebowanie wynosi niecałe 41 MW, rozsądnym rozwiązaniem jest zwiększenie tej wartości. Na rysunku 3 przedstawiono wymiary dla turbiny Francisza

o mocy 42 MW, które spełniają założenia projektowe. Taka turbina może być zamontowana w szybie kopalnianym SW-3.

5.4. Działanie systemu w trakcie cyklu generowania energii

Na potrzeby wstępnej analizy pracującego systemu zdecydowano się na wykorzystanie podstawowego równania w mechanice płynów, czyli równania Bernoulliego. Zakłada ono jednak szereg uproszczeń, w tym założenie, że przepływ nie jest turbulentny, lecz laminarny, co jest nieprawdziwe. Przepływ laminarny występuje w przyrodzie bardzo rzadko, aczkolwiek daje on pole do obiecujących analiz. Dzięki zastosowaniu równania Bernoulliego, które jest odpowiednio rozszerzone, można otrzymać na potrzeby akademickich rozważań bardzo rzetelne wyniki [9].

$$P_1 + 0,5\rho v_1^2 + \rho gh_1 + P_p = P_2 + 0,5\rho v_2^2 + \rho gh_2 + f_R \rho g + P_T \quad (10)$$

gdzie:

P_i – ciśnienie [Pa],
 ρ_i – gęstość wody [1000 kg/m³],
 v_i – prędkość wody [m/s],
 h_i – wysokość [m],
 P_p – moc pompowania [W],
 f_R – współczynnik tarcia [–],
 P_T – moc podczas generowania [W],
 g – przyspieszenie ziemskie [9,81 m/s²].

Tabela 2

Warunki pracy i wartości parametrów w trakcie generowania energii

Jednostka	Moc [MW]	Sprawność [%]
I Turbina	36,86	87,76
II Turbina	35,22	83,85
III Turbina	35,20	83,82

Wyniki przedstawione w tabeli 2 są zadowalające i wskazują na poprawność założeń projektowych i doboru mocy. Wydajność większości systemów ESP mieści się w granicach 0,81 (0,9 × 0,9). Podobnie też kształtowały się wyniki niniejszej analizy, dla pompowania i generowania: I Turbina – 78,99%, II Turbina – 75,46%, III Turbina – 75,44%. Całkowita sprawność systemu wynosi 76,63%.

Tabela 3

Całkowita ilość energii w różnych cyklach pracy

Cykl	Ilość energii [MWh]	Czas [h]
Generowanie	1173,12	11
Pompowanie	1652,61	13,5

Z tabeli 3 wynika, że czas operacyjny potrzebny na wypompowanie wody na powierzchnię będzie wynosił, zgodnie z założeniami, 13,5 godziny, natomiast przez prawie 11 godzin będzie można generować energię.

6. PODSUMOWANIE

Możliwości energetyczne systemu są bardzo zbliżone do elektrowni aktualnie funkcjonujących na rynku. Moc wyżej analizowanego systemu wynosi 107,28 MW. W celu porównania parametrów elektrowni szczytowo-pompowych możemy wykorzystać aktualnie działającą ESP Żydowo, której moc wynosi 156 MW, a różnica wysokości to 80 m. Może ona pracować około 5 godzin. Proponowana instalacja Podziemnej Elektrowni Szczytowo-Pompowej ze względu na większy spad wody oraz regulację przepływu ma szansę być równie istotną jednostką w utrzymaniu stabilności energetycznej, co najmniejsza ESP w Polsce – Żydowo.

Przeprowadzone obliczenia pokazały, że wstępna analiza proponowanego systemu kaskadowego ukazuje potencjalne możliwości projektowe dla rozważanej koncepcji. Proponowaną PESP można wybudować w szybie po zakończonej eksploatacji. Oczywiście należałoby wykonać dodatkowe, bardziej szczegółowe analizy, takie jak:

- Dokładne zbadanie możliwości zaprojektowania podziemnej sieci rur jako dolnego zbiornika z odpowiednim odpowietrzaniem. Należałoby się skupić nie tylko na doborze niwelacji, ale również na zabezpieczeniu infrastruktury przed potencjalnym wyciekami. Trzeba również rozważyć możliwość doprowadzenia dodatkowej ilości wody w razie rozszczelnienia się sieci rur.
- Przeanalizowanie pracy turbin Francisz i strat w zaproponowanym systemie za pomocą CFD albo innych obliczeń eksperymentalnych.
- Finansowa analiza projektu, bazująca na przebadanych możliwościach technicznych szybu i kaskadowego systemu pracy turbin Francisz z uwzględnieniem specyfiki elektrowni podziemnej.

W trakcie budowy i dalszego funkcjonowania Podziemnej Elektrowni Szczytowo-Pompowej (PESP) należy przyjąć, że system pracy będzie podobny do tego, który istniał podczas funkcjonowania kopalni. Istotne będzie zachowanie funkcji dozoru górniczego, utrzymanie wyrobisk (prace naprawcze, rewizje itp.) oraz odpowiednie przewietrzanie kopalni, dlatego może pojawić się potrzeba włączenia dodatkowego szybu do systemu. Oczywiście wiąże się to z większymi kosztami utrzymania całej infrastruktury PESp. Prawdopodobnie nadzór nad całym przedsięwzięciem będzie również spoczywał po stronie Wyższego Urzędu Górniczego.

Literatura

- [1] Krupiński J.: *Opportunities for future development of an energy infrastructure after production closure in KGHM shaft, by the example of an underground pumped – storage hydropower creation*. Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Wrocław 2024 [praca magisterska].
- [2] PGE Polska Grupa Energetyczna SA: *Sprawozdanie na temat informacji niefinansowych PGE Polskiej Grupy Energetycznej SA oraz Grupy Kapitałowej PGE za 2020 rok*. <https://www.gkpge.pl/dla-inwestorow/akcje/dane-finansowe> [15.09.2024].
- [3] KGHM Polska Miedź S.A. <https://kgbm.com/pl/inwestorzy/esg> [15.09.2024].
- [4] *Rozporządzenie Ministra Rozwoju z dnia 23 listopada 2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych*. Dz.U. 2017, poz. 1118.
- [5] Koritarov V., Ploussard Q., Kwon J., Balducci P.: *A Review of Technology Innovations for Pumped Storage Hydropower*. U.S. NREL, HydroWIREs, April 2022, <https://publications.anl.gov/anlpubs/2022/05/175341.pdf> [15.09.2024].
- [6] Instytut Techniki Górniczej KOMAG: *Mechaniczne zasobniki energii*. Przegląd Rozwiązań Magazynowania Energii, 2021: 3–6.
- [7] Menéndez J., Fernández-Oro J.M., Galdo M., Loredó J.: *Transient Simulation of Underground Pumped Storage Hydropower Plants Operating in Pumping Mode*. Energies 2020, 13, 1781: 1–4.
- [8] Madlener R., Specht J.M.: *An Exploratory Economic Analysis of Underground Pumped-Storage Hydro Power Plants in Abandoned Coal Mines*. FCN Working Paper 2013, 2: 1–22.
- [9] Peczkis G.: *Elektrownie szczytowo-pompowe. Możliwości wykorzystania likwidowanych kopalń*. Pompy – Pompownie 2022, 1/22 (802): 20–30.
- [10] de Siervo F., de Leva F.: *Modern trends in selecting and designing Francis turbines*. Water Power & Dam Construction 1976, 28, 8: 28–35.

mgr inż. JULIUSZ KRUPIŃSKI

prof. dr hab. inż. HERBERT WIRTH

Herbert.Wirth@pwr.edu.pl

Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii

Politechnika Wrocławska

ul. Na Grobli 15, 50-421 Wrocław