

## Koncepcja układu odzyskiwania energii z rurociągu szybowego

mgr inż. Dawid Lazar  
dr hab. inż. Stanisław Szweda,  
prof. Pol. Śl.  
Instytut Techniki Górniczej KOMAG

### Streszczenie:

Przedmiotem artykułu jest koncepcja układu odzyskiwania energii ze strugi wody technologicznej transportowanej do wyrobisk rurociągiem przeciwpożarowym w szybie. Przedstawiono problem projektowania mini turbiny oraz dobór pozostałych urządzeń układu. Oszacowano ilość rocznie produkowanej energii elektrycznej oraz okres zwrotu nakładów inwestycyjnych.

Słowa kluczowe: rurociągi szybowe, odzyskiwanie energii, turbina Peltona

Keywords: shaft pipelines, energy recovery, Pelton turbine

### Abstract:

Idea of the system for energy recovery from a stream of technological water transported to mine workings through fire pipeline in a mine shaft is the work subject. Problem of designing the mini-turbine and other components of the system is discussed. Annual cost of electric energy produced in the system and time for return of investment were estimated.

## 1. Wprowadzenie

Konieczność dostarczania wody rurociągami z powierzchni do podziemnych wyrobisk górniczych wynika z wymagań bezpieczeństwa oraz realizowanych operacji technologicznych. Woda transportowana jest do poszczególnych poziomów eksploatacyjnych za pomocą sieci rurociągów przeciwpożarowych. W odcinku tego rurociągu zlokalizowanym w szybie, ze względu na dużą różnicę wysokości położenia, niezbędna jest redukcja ciśnienia statycznego wody transportowanej rurociągiem. Wykorzystuje się w tym celu pływakowe zawory upustowe oraz zbiorniki przelewowe.

W przypadku standardowych rurociągów, zgodnie z normą PN-G-05011:1997 [10] oraz Rozporządzeniem Ministra Gospodarki z dnia 28 czerwca 2002 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych [12], ciśnienie hydrostatyczne słupa wody w rurociągu może osiągnąć wartość nie większą niż 1,6 MPa [10]. Dla większych wartości ciśnienia, wymagane jest stosowanie elementów sieci przeciwpożarowej odpowiednio do tego przystosowanych.

W związku z tym rurociąg przeciwpożarowy dzielony jest w szybie na odcinki o różnicy poziomów, wynoszącej do 160 m. Słup wody wywiera wówczas w dolnej części rurociągu ciśnienie hydrostatyczne o wartości do 1,6 MPa. Z pionowej części rurociągu ciecz przepływa przez zawór regulacyjny do otwartego zbiornika przelewowego, w którym następuje wyrównanie ciśnienia statycznego strugi cieczy do poziomu ciśnienia hydrostatycznego wytworzonego przez słup cieczy w zbiorniku. Zbiornik przelewowy zasila kolejny odcinek rurociągu przeciwpożarowego, prowadzący wodę na niższy poziom kopalni.

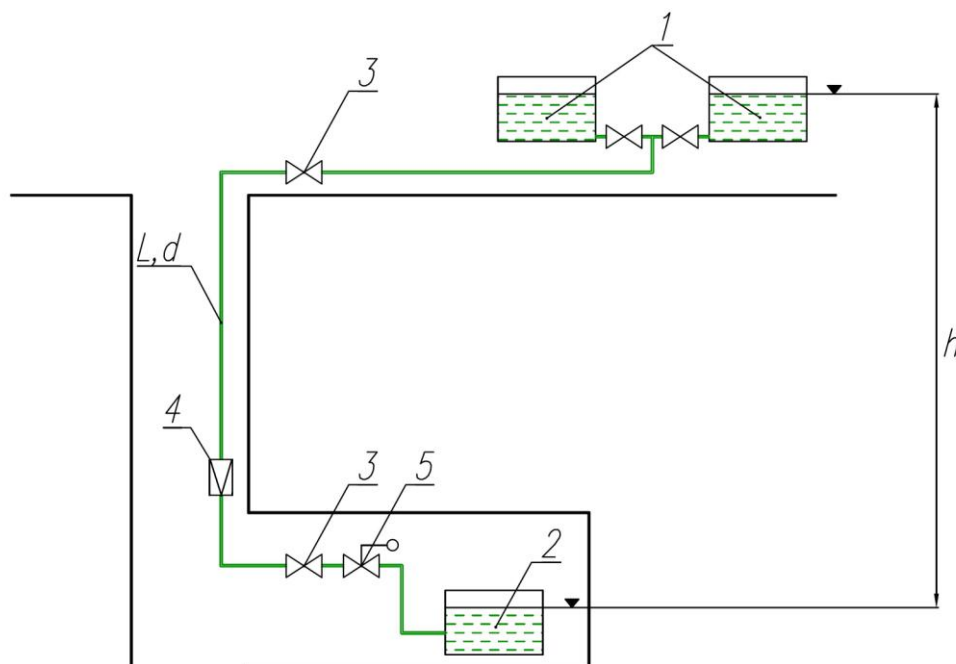
W przypadku zastosowania rur o podwyższonej wytrzymałości różnica poziomów między kolejnymi zbiornikami przelewowymi może być większa niż 160 m, co powoduje, że ciśnienie statyczne strugi wody przed zaworem regulacyjnym również może być większe.

Zastosowany sposób redukcji ciśnienia statycznego wody w rurociągu szybowym polega więc na bezproduktywnym rozpraszaniu energii ciśnienia. W ramach pracy dyplomowej magisterskiej [4] zrealizowanej na Wydziale Górnictwa i Geologii Politechniki Śląskiej podjęto więc próbę opracowania układu umożliwiającego wykorzystanie tej, dotychczas rozpraszanej, energii strugi wody płynącej rurociągiem szybowym, do wytwarzania energii elektrycznej. Przedmiotem niniejszego artykułu jest przedstawienie koncepcji odzyskiwania energii z rurociągu szybowego oraz wstępna analiza cech użytkowych opracowanego układu.

## 2. Analiza parametrów technicznych przykładowego odcinka rurociągu szybowego

Rurociągi przeciwpożarowe usytuowane w szybie, oprócz transportu wody niezbędnej w wypadku wystąpienia zagrożenia pożarowego do celów gaśniczych, służą również do transportu tzw. wody technologicznej, stosowanej przede wszystkim w procesach wydobywczych, np.: do chłodzenia napędów maszyn, zraszania organów urabiających, czy zraszania przesypów. Zapotrzebowanie na wodę technologiczną może zmieniać się w stosunkowo szerokim zakresie.

Analizę możliwości odzyskiwania energii ze strugi wody płynącej rurociągiem przeprowadzono na przykładzie odcinka rurociągu łączącego zbiorniki zasilające usytuowane na powierzchni z pierwszym zbiornikiem przelewowym znajdującym się na poziomie 240 m, przedstawionym schematycznie na rysunku 1.



Rys.1. Schemat analizowanego odcinka rurociągu przeciwpożarowego [4]

1 – zbiorniki zasilające, 2 – zbiornik wyrównawczy, 3 – zawór odcinający,  
4 – zawór zwrotny, 5 – zawór

Analizowany odcinek rurociągu o średnicy  $d = 150$  mm ma łączną długość  $L = 300$  m. Nominalna wartość natężenia przepływu wody, wynosi  $35 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , natomiast wartość maksymalna –  $45 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Rurociąg spełnia wszystkie wymagania podane w [10] i [12].

Miarą energii strugi cieczy, wykorzystywaną przy projektowaniu układu odzyskiwania energii, jest spad rurociągu –  $H$ , wyznaczany z zależności [6]:

$$H = h - \sum h_{str} \quad (1)$$

gdzie:

- $H$  – spad rurociągu [m],
- $h$  – różnica poziomów wody górnej (ustabilizowane zwierciadło wody w zbiorniku zasilającym na nadszybiu) i wody dolnej (ustabilizowane zwierciadło wody w zbiorniku przelewowym) [m],
- $\sum h_{str}$  – suma wysokości strat energetycznych [m].

W tabeli 1 zestawiono wartości podstawowych parametrów technicznych układu odzyskiwania energii z rozpatrywanego odcinka rurociągu.

#### Zestawienie parametrów technicznych przykładowego układu odzyskiwania energii [4]

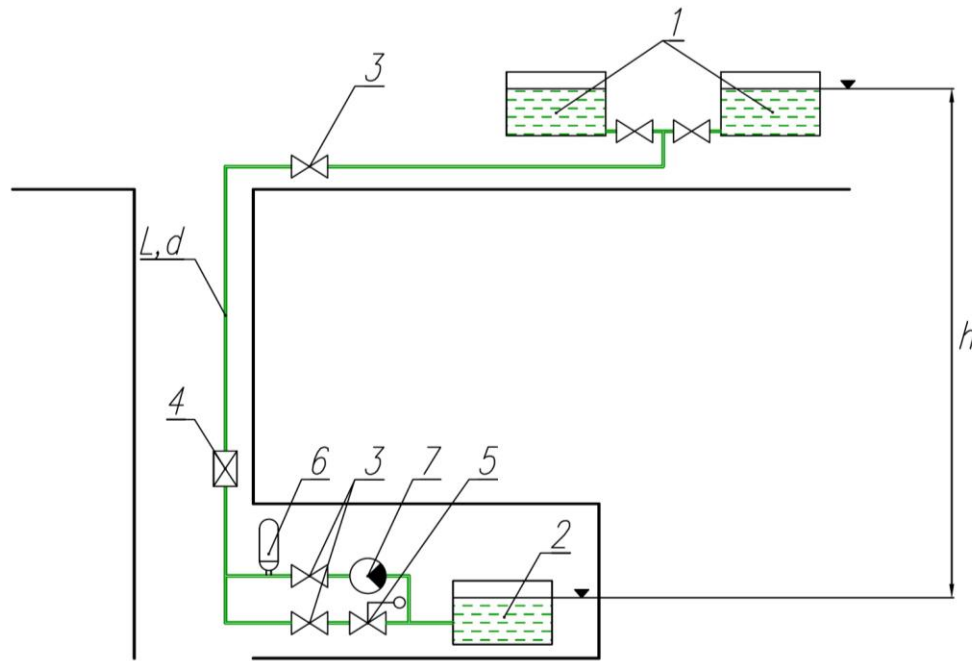
Tabela 1

Parametr	Dla natężenia przepływu o wartości:	
	nominalnej	maksymalnej
Natężenie przepływu [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]	0,035	0,045
Prędkość przepływu [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]	1,98	2,55
Spad rurociągu [m]	223,27	212,34

Wartości parametrów zestawionych w tabeli 1 są niezbędne do doboru maszyn i urządzeń tworzących turbozespół przekształcający energię mechaniczną strugi wody płynącej rurociągiem szybowym w energię elektryczną.

### 3. Budowa układu odzyskiwania energii z rozpatrywanego odcinka rurociągu szybowego

Schemat hydrauliczny układu odzyskiwania energii z rurociągu szybowego przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat hydrauliczny układu odzyskiwania energii z rozpatrywanego odcinka rurociągu [4]

1 – zbiorniki zasilające, 2 – zbiornik przelewowy, 3 – zawór odcinający, 4 – zawór zwrotny, 5 – zawór pływakowy, 6 – akumulator hydropneumatyczny, 7 – turbozespół

Układ odzyskiwania energii tworzą: akumulator hydropneumatyczny, turbozespół i ręczny zawór odcinający [5]. Są one zabudowane na dodatkowej gałęzi łączącej rurociąg szybowy ze zbiornikiem przelewowym. Instalacja turbiny na odrębnej gałęzi, niezależnej od już istniejącego rurociągu przeciwpożarowego jest konieczna, gdyż minimalizuje ona ryzyko wystąpienia groźnych, w aspekcie bezpieczeństwa stanowiskowego i procesowego, przerw w dostawie wody do wyrobisk, spowodowanych, zarówno zdarzeniami losowymi, jak również awariami elementów układu. Ułatwia również prowadzenie okresowej konserwacji oraz czynności naprawczych zmierzających do przywrócenia pierwotnych właściwości turbozespołu. W przypadku budowy systemu złożonego z układów pozyskiwania energii elektrycznej zainstalowanych bezpośrednio na kilku odcinkach rurociągu przeciwpożarowego w szybie, utworzono by system szeregowy, niepożądany z punktu widzenia teorii niezawodności.

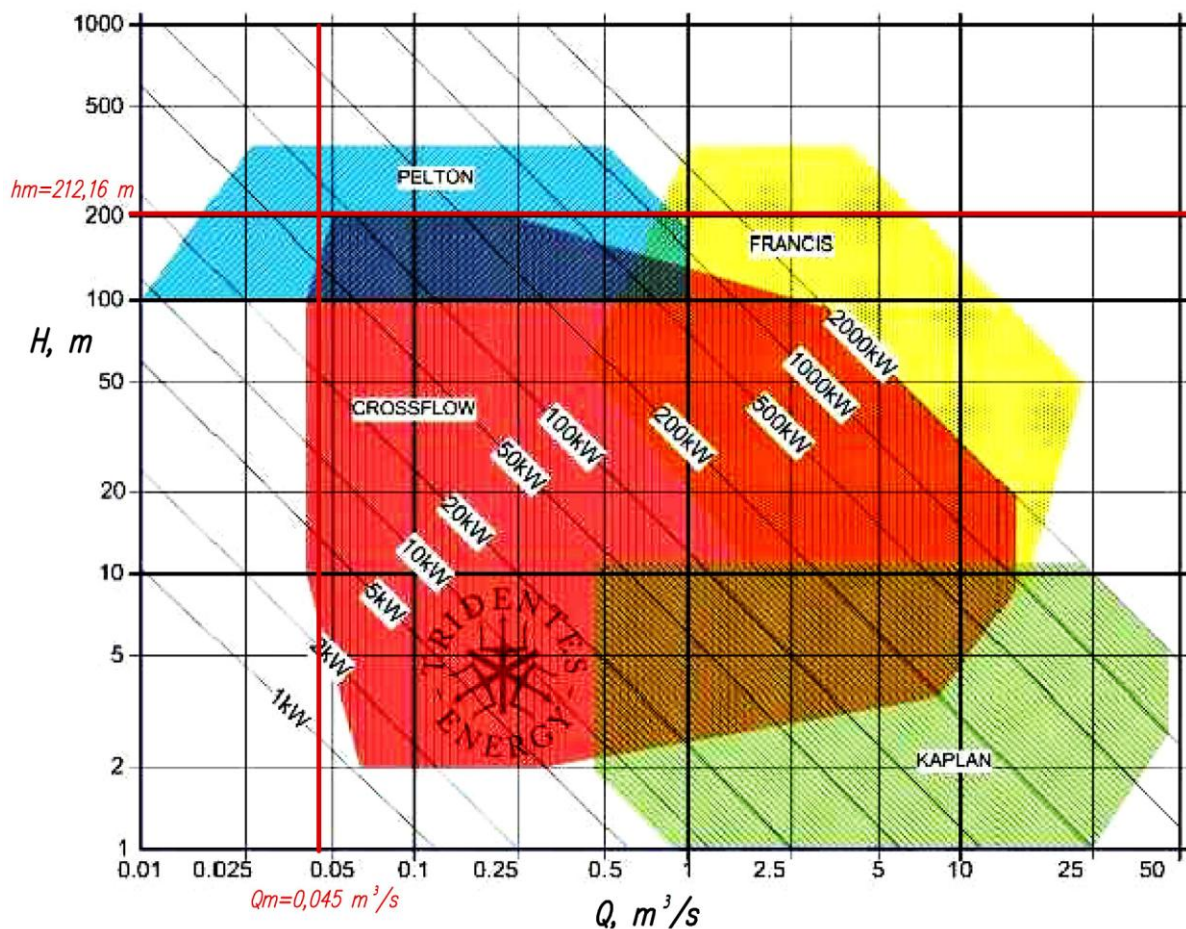
Układ odzyskiwania energii strugi wody płynącej rurociągiem szybowym opracowano przy założeniu, że parametry uzyskiwanej energii elektrycznej umożliwią jej bezpośrednie wykorzystanie w sieci kopalnianej. Stwierdzono, że urządzeniem umożliwiającym najefektywniejsze wykorzystanie energii wody jest miniaturowa turbina mechaniczna o zasadzie działania zbliżonej do działania tych turbin, które z powodzeniem stosowane są w elektrowniach wodnych. Przy projektowaniu takiej turbiny należy jednak uwzględnić szereg problemów natury technicznej związanych głównie ze znacznie mniejszymi parametrami strugi wody, w szczególności dużym zróżnicowaniem prędkości i natężenia przepływu wynikającym ze zmiennego zapotrzebowania na wodę.

Specyfika przepływu cieczy w rurociągach przeciwpożarowych wymaga zastosowania turbiny niewrażliwej na zmiany natężenia przepływu wody, o możliwie płaskiej charakterystyce mechanicznej i dużej sprawności. Istotny wpływ na wybór rodzaju turbiny

mają: natężenie przepływu, spad rurociągu i pożądana prędkość obrotowa turbiny. Schematyczny nomogram zakresu stosowania różnych rodzajów turbin przedstawiono na rysunku 3. Czerwonymi liniami zaznaczono maksymalną wartość natężenia przepływu w przykładowo rozpatrywanym rurociągu (rys. 2) oraz spad rurociągu. Z nomogramu wynika, że dla założonych wartości  $Q_m$  i  $H_m$ , szacunkowa moc turbiny, wynosi  $70 \div 80$  kW.

Podstawowym parametrem uwzględnianym przy doborze turbiny z uwagi na bezpieczeństwo procesowe, jest maksymalne natężenie przepływu  $Q_m$  wody w rurociągu. Przepływ turbiny, definiowany jako "objętość wody przepływająca przez turbinę w czasie jednej sekundy, z włączeniem przecieków w dławicach i w przewodach odprowadzających układu zmniejszania naporu osiowego, lecz z wyłączeniem ilości wody koniecznej dla ruchu generatora i urządzeń pomocniczych oraz dla chłodzenia łożysk" [2, 11] nie może bowiem ograniczać zapotrzebowania wyrobisk podziemnych w wodę.

Kolejnym czynnikiem decydującym o wyborze rodzaju turbiny jest zależność jej sprawności od natężenia przepływu wody w rurociągu, zmieniającego się w stosunkowo szerokim zakresie. Z wykresu przedstawionego na rysunku 4 wynika, że w tym aspekcie najkorzystniejszy jest wybór turbiny Peltona. Osiąga ona bowiem największą sprawność, zmieniającą się w przedziale od 85%, (w przypadku gdy natężenie przepływu stanowi jedynie 20% wartości maksymalnej) do 90%, (przy maksymalnym natężeniu przepływu  $Q_m = 0,045$  m<sup>3</sup>/s).

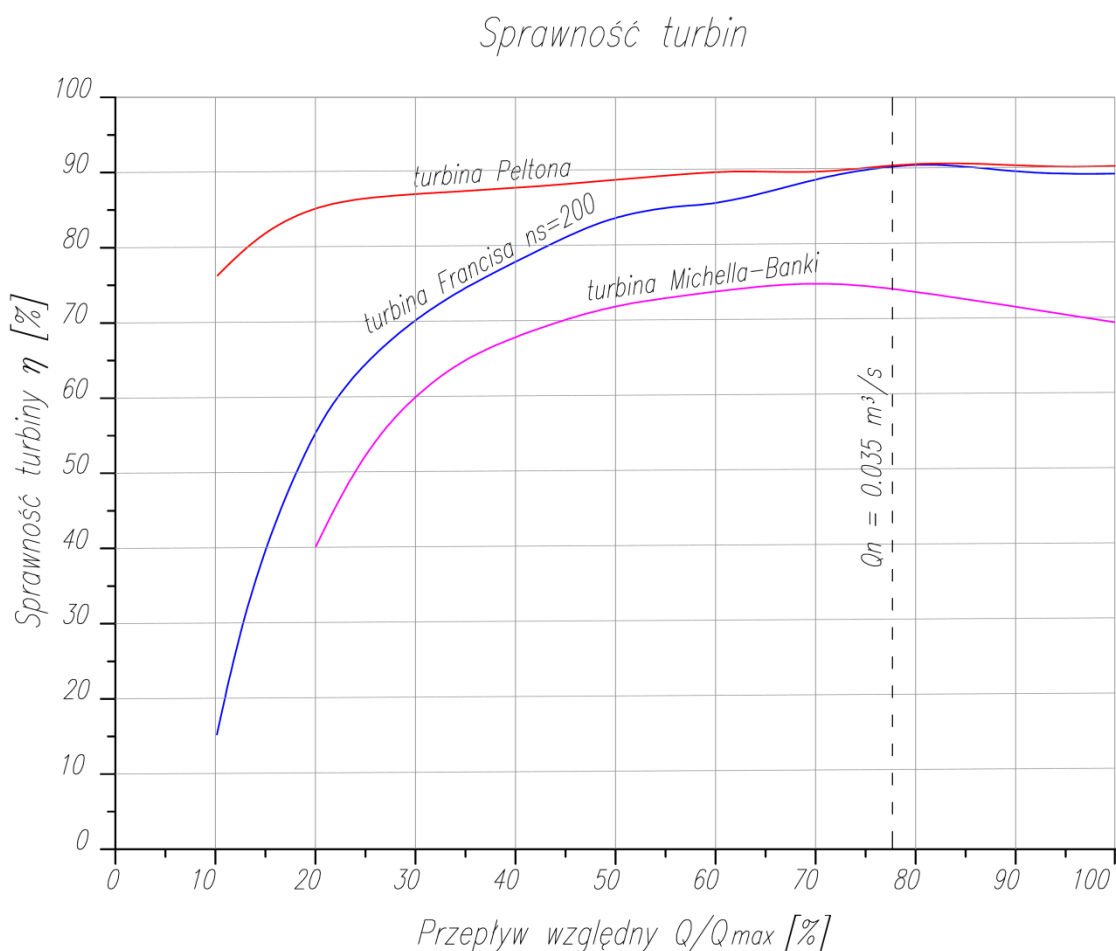


Rys. 3. Nomogram zakresu stosowania poszczególnych rodzajów turbin [14]

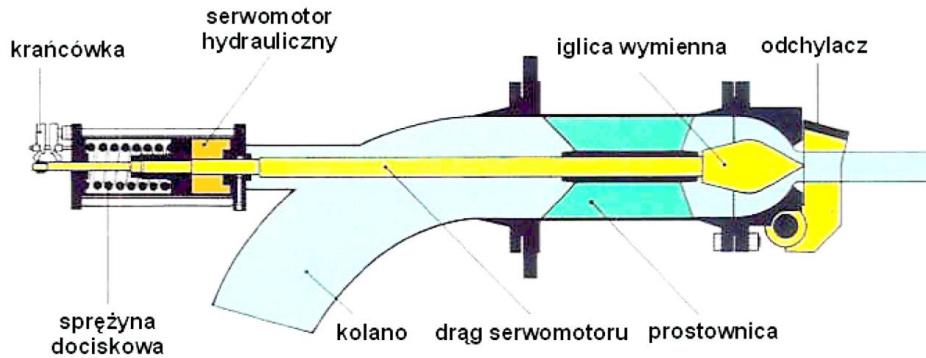


Turbiny wodne projektowane są każdorazowo pod wybraną inwestycję, co umożliwia osiągnięcie maksymalnej sprawności całego układu odzyskiwania energii z płynącej wody przy określonej wartości spadu rurociągu i natężenia przepływu. W przypadku turbiny Peltona o stopniu wykorzystania energii wody decyduje w głównej mierze liczba dysz natryskowych oraz liczba łopat i ich geometria [6, 8]. Zasada działania turbiny Peltona umożliwia więc wysoce efektywne wykorzystanie, zarówno silniejszego, jak i słabszego strumienia cieczy.

Budowa dyszy natryskowej turbiny Peltona umożliwia płynną regulację strumienia cieczy oraz zamykanie przewodu w sposób zautomatyzowany (rys. 5). Dzięki temu możliwa jest praca turbiny w przypadku ciągłego przepływu cieczy o zróżnicowanym natężeniu, bądź skokowego jej zasilania strugą o jednakowym natężeniu przepływu o wartości zbliżonej do wartości maksymalnej.

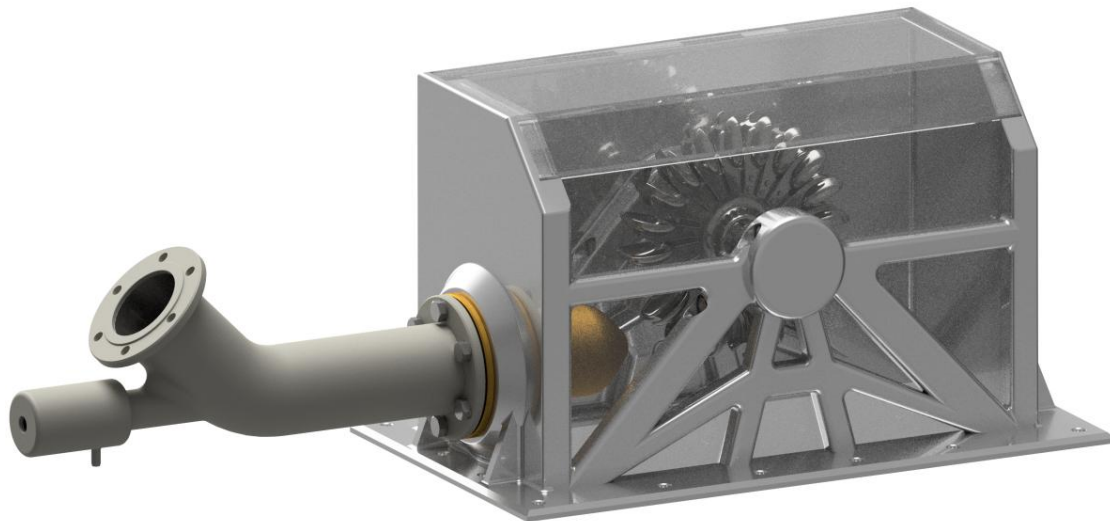


Rys. 4. Wykres sprawności wybranych turbin wodnych w funkcji przepływu względnego [opracowanie własne wg [2, 3, 8]]



Rys. 5. Schemat dyszy natryskowej turbiny Peltona [9]

W pracy [4] określono podstawowe parametry turbiny służącej do odzyskiwania energii cieczy z odcinka rurociągu (rys. 1) o parametrach zestawionych w tabeli 1. Korzystając z [1, 3] zaprojektowano geometrię łopaty oraz opracowano model fizyczny turbiny. Ponadto przeprowadzono wstępne analizy numeryczne modelu oraz techniką druku 3D wykonano model turbiny w skali 1:3 [4].



Rys. 6. Model fizyczny turbiny Peltona poddany analizie numerycznej [4]

Z obliczeń przedstawionych w pracy [4] wynika, że moc użyteczna opracowanej turbiny przy nominalnym natężeniu przepływu wynosi 57,4 kW. W przypadku maksymalnego natężenia przepływu wody w rurociągu szybowym moc użyteczna tej turbiny wynosi 70,2 kW. Projektując turbinę założono, że prędkość obrotowa wału osiągnie wartość zbliżoną do prędkości znamionowej generatorów dostępnych na rynku [6].

Ze względu na rosnące zainteresowanie pozyskiwaniem energii ze źródeł odnawialnych oraz postęp technologiczny koszty związane z produkcją prądnic synchronicznych maleją, a zakres ich stosowania poszerza się. Coraz częściej spotkać można generatory synchroniczne włączone w turbozespół o mocy mniejszej od 100 kW. Przykładowo firma *HS-Dynamic Energy* oferuje turbozespoły o mocy od 5 do 100 kW (rys. 7) [13].

Celem oszacowania ilości energii elektrycznej produkowanej przez zaproponowany układ odzyskiwania energii strugi wody płynącej odcinkiem rurociągu szybowego (rys. 2) założono, że całkowita sprawność systemu turbina – prądnica – regulator napięcia wynosi  $\eta = 0,75$ .



Rys. 7. Turbozespół o mocy 100 kW ofertowany przez *HS-Dynamic Energy* [13]

Moc turbiny uzależniona jest od systemu sterowania przepływem wody. Celem oszacowania ilości wytworzonej energii elektrycznej przyjęto, że średni czas zasilania punktów odbiorczych w wyrobiskach wodą o nominalnym natężeniu przepływu wynosi 8 godzin w ciągu jednej doby. Uwzględniono ponadto cykliczną pracę turbiny, wynikającą z objętości zbiornika przelewowego i różnych natężeń przepływu w poszczególnych odcinkach rurociągu szybowego. Moc rocznie produkowanej energii elektrycznej oszacowano na około 150 MW.

Maszyny i urządzenia tworzące układ odzyskiwania energii, oprócz turbiny, są dostępne na rynku. Turbina jest projektowana indywidualnie z uwzględnieniem parametrów odcinka rurociągu szybowego oraz kryterium maksymalnej mocy użytkowej. Koszt projektowania i wytwarzania turbozespołu można więc określić jedynie orientacyjnie. Z informacji podanych w [7] wynika, że w przypadku zastosowania turbiny Peltona koszt ten można oszacować korzystając z zależności:

$$CO_{t-a} = 17693 \cdot P^{0,635275} \cdot H^{-0,281735} \quad (2)$$

gdzie:

- $CO_{t-a}$  – łączne koszty inwestycyjne [€],
- $P$  – moc turbiny [kW],
- $H$  – spad rurociągu [m].

W związku z tym orientacyjny koszt turbozespołu produkującego energię elektryczną na przykładowo analizowanym odcinku rurociągu szybowego wynosi:

$$CO_{t-a} = 17693 \cdot 70,2^{0,635275} \cdot 212,34^{-0,281735}$$

$$CO_{t-a} \approx 58\,244 \text{ €}$$



Można więc oszacować, że zwrot poniesionych kosztów zakupu kompletnego turbozespołu (nie licząc kosztów pośrednich związanych z transportem, montażem oraz czynnościami diagnostycznymi) nastąpi w okresie  $3 \div 3,5$  roku. W obliczeniach przyjęto koszt 1 kWh energii elektrycznej w wysokości 0,46 zł i kurs Euro, wynoszący 4,31 zł.

#### 4. Podsumowanie

Transport wody technologicznej do podziemnych wyrobisk kopalń węgla kamiennego za pomocą rurociągu przeciwpożarowego usytuowanego w szybie wiąże się z koniecznością etapowego rozpraszania energii strugi wody w zbiornikach wyrównawczych.

Na podstawie analizy aspektów prawno – ekonomicznych związanych z wykorzystaniem tej rozpraszanej energii do napędu mini turbiny produkującej prąd elektryczny, stwierdzono [4], że istnieje możliwość budowy systemu odzyskiwania energii strugi wody z rurociągu szybowego i wykorzystanie wytworzonej energii elektrycznej do zasilania urządzeń elektrycznych w wyrobiskach.

Elementami zaproponowanego systemu są: mini turbina Peltona, generator synchroniczny trójfazowy, falownik, hydroakumulator, układ sterowania i diagnostyki systemu. Wszystkie maszyny i urządzenia tworzące system odzyskiwania energii, oprócz turbiny projektowanej indywidualnie z uwzględnieniem parametrów odcinka rurociągu szybowego oraz kryterium maksymalnej mocy użytkowej, są dostępne na rynku.

Analizując przykładowy odcinek rurociągu szybowego opisany w rozdziale 2. niniejszej pracy wykazano, że zaproponowany system może w ciągu roku wyprodukować do 150 MW energii elektrycznej, a szacunkowy okres zwrotu nakładów inwestycyjnych związanych z budową systemu wynosi  $3 \div 3,5$  roku. Można więc domniemywać, że zastosowanie rozpatrywanej koncepcji w odpowiednich warunkach jest ekonomicznie uzasadnione.

Prace badawczo – projektowe nad wdrożeniem koncepcji systemu odzyskiwania energii strugi wody z rurociągu szybowego są aktualnie prowadzone w ITG KOMAG.

#### Literatura

- [1] Eisenring M.: Micro Pelton turbines, Niederuzwil 1991
- [2] Karolewski B., LIGOCKI P.: *Wyznaczanie parametrów małej elektrowni wodnej*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej Nr 56, Wrocław 2004, s 1-12. Wydanie elektroniczne, "Studia i Materiały" -<http://www.kmnipe.pwr.edu.pl/wyd-stud.dhtml>
- [3] Krzyżanowski W.: Turbiny wodne – konstrukcja i zasady regulacji. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1971
- [4] Lazar D.: Analiza możliwości odzyskiwania energii wody z rurociągu kopalnianego. Praca dyplomowa magisterska. Politechnika Śląska, Wydział Górnictwa i Geologii. Gliwice 2016, Biblioteka Instytutu Mechanizacji Górnictwa Pol. Śl. (praca niepublikowana)
- [5] Lazar D.: Sposób odzyskiwania energii z rurociągu kopalnianego. Zgłoszenie patentowe nr P.419480

- [6] Michałowski S., Plutecki J.: Energetyka wodna, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1971 Warszawa, 1975.
- [7] Ogayar B., Gomez P.: Tools for Determination of the Cost of a Turbine\_Alternator Set of Small Hydro-Power plant, Australia, Hiszpania. [home.agh.edu.pl/](http://home.agh.edu.pl/)
- [8] Prosnak W.: Mechanika płynów, PWN Warszawa 1970
- [9] Traboulsi A., Olleik M.: Présenté pour obtenir le titre de Ingenieur de l'Universite Libanaise Faculté de Génie –Branche III, Liban 2013
- [10] PN-G-05011:1997 Górnictwo - Rurociągi szybowe - Zasady projektowania
- [11] BN-64/0300-01 Turbiny wodne - pojęcia i określanie
- [12] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 28 czerwca 2002 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych. Dz. U. 2002 nr 139 poz. 1169
- [13] Oferta handlowa turbozespołu 100 kW HS-Dynamic Energy
- [14] <http://www.tridentes.com/energy/en/turbines.html>

*Czy wiesz, że ....*

*...w Laboratorium Badawczym Instytutu KOMEL zaprojektowano, zbudowano i uruchomiono stanowisko do badania maszyn elektrycznych, głównie silników i generatorów o mocach od 10 do 200 kW, prędkości obrotowej do 3000 obr./min i momencie obrotowym do 1200 Nm. Stanowisko umożliwia również przeprowadzanie badań sprzęgieł elektromagnetycznych. W skład stanowiska wchodzi: hamownia wraz z układem zasilania, ława montażowa, układ pomiarowy i pulpit sterowniczy oraz oprogramowanie pomiarowe i wspomagające edycję sprawozdań z badań. Nowe stanowisko badawcze cechuje modułowa i kompaktowa budowa, która pozwala na dość dowolne rozlokowanie poszczególnych elementów w istniejącej infrastrukturze. Ponadto, nie jest wymagane wykonywanie specjalnych przygotowawczych prac budowlanych. Wszystkie zastosowane podzespoły są dostępne w Polsce, przez co usuwanie ewentualnych awarii nie nastręczy większych problemów.*

*Napędy i Sterowanie 2017 nr 9 s.139-141*