ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1996
Seria: ENERGETYKA z. 127 Nr kol. 1350

Maciej ZARZYCKI, Jan RDUCH
Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych
Politechnika Śląska

ODZYSK ENERGII HYDRAULICZNEJ W UKŁADACH TECHNOLOGICZNYCH

Streszczenie. W publikacji przedstawiono wyniki studiów i analiz możliwości zastosowania turbin hydraulicznych (wodnych) i pomp wirowych w ruchu turbinowym w różnych instalacjach i układach technologicznych. Podano również wybrane wyniki badań doświadczalnych pomp wirowych odśrodkowych wielostopniowych w ruchu turbinowym wykonanych w Instytucie Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej. Analizę i badania przeprowadzono w ramach realizacji projektu badawczego „Odzysk energii traconej w różnych procesach technologicznych za pomocą hydraulicznych maszyn wirowych".

THE RECOVERY OF HYDRAULIC ENERGY IN TECHNOLOGICAL SYSTEMS

Summary. The paper presents the results of studies and analyses concerning the possibilty of applying hydraulic turbines and impeller pumps used as turbines in various installations and technological systems. Some selected results of experimental investigations on centrifugal musti-stage impeller pumps used as turbines, carried out at the Institute of Energy Machines and Installations, Technical University of Silesia, have been presented, too. These analyses and investigations were carried out within the project „The Recovery of waste energy from various technological processes by means of turbo-machines".

DIE RÜCKGEWINNUNG HYDRAULISCHER ENERGIE IN TECHNOLOGISCHEN SYSTEMEN

Zusammenfassung. Der vorliegende Aufsatz enthält die Ergebnisse von Studien und Analysen der Anwendungsmöglichkeit hydraulischer Turbinen und Kreiselardpumpen im Turbinenbetrieb in verschiedentlichen technologischen Systemen. Angeführt werden auch die Ergebnisse experimenteller Untersuchungen von mehrstufigen

zentrifugalen Kreiselardpumpen im Turbinenbetrieb, die im Institut für Energetische Maschinen und Einrichtungen der Technische Universität in Gliwice durchgeführt worden sind. Diese Analysen ind Unterschungen wurden im Rahemen der Realisierung des Forschungsprojekts „Rückgewinnung der in verschiedenen technologischen Prozessen abfallenden Energie mit Hilfe hydraulischer Kreiselmaschinen".

1. Wprowadzenie

Analizując działanie różnych przemysłowych instalacji stwierdza się stosunkowo duże straty hydrauliczne z przyczyn technologicznych spowodowane rozprężeniem cieczy (redukcja ciśnienia bądź zrzuty cieczy) [1]. Współcześnie do tego celu najczęściej są stosowane zawory dławiące zmniejszające ciśnienie bez wykorzystania do pracy użytecznej. To rozwiązanie techniczne, wprawdzie łatwe do wykonania, związane jest jednak ze stratami. Dlatego aby zapobiec tym stratom, można do rekuperacji energii stosować turbiny hydrauliczne (wodne) napędzające generatory elektryczne bądź inne maszyny robocze. Do rekuperacji energii mogą być stosowane w zależności od ciśnień (spadów) turbiny wodne, które są stosowane w *małej energetyce wodnej* a więc turbiny Kaplana, śmigłowe, rurowe, Francisa, Banki-Michela i Peltona oraz w celu obniżenia kosztów inwestycyjnych również i pompy wirowe w ruchu turbinowym.

Ponieważ problem oszczędności energii jest zagadnieniem szczególnie ważnym, a zastosowanie pomp do pracy turbinowej jest mniej znane i upowszechnione, dlatego zajęto się tym tematem w ramach projektu badawczego finansowanego przez Komitet Badań Naukowych nt. „Odzysk energii traconej w różnych procesach technologicznych za pomocą hydraulicznych maszyn wirowych" [2].

2. Przykłady zastosowania turbin hydraulicznych do rekuperacji energii w różnych instalacjach technologicznych

Hydrauliczne maszyny wirowe do odzysku energii mogą być stosowane w różnych układach technologicznych [3]. Między innymi w niżej podanych instalacjach i układach do:

- oczyszczania gazów technicznych,
- przeróbki węglowodorów,
- oddzielania gazów w szybach wydobywczych ropy naftowej i gazu ziemnego,

- redukcji ciśnienia w sieciach wodociągowych,
- zmniejszenia ciśnienia w rurociągach ciepłowniczych i paliwowych,
- redukcji ciśnienia wody chłodzącej,
- oczyszczalniach ścieków.

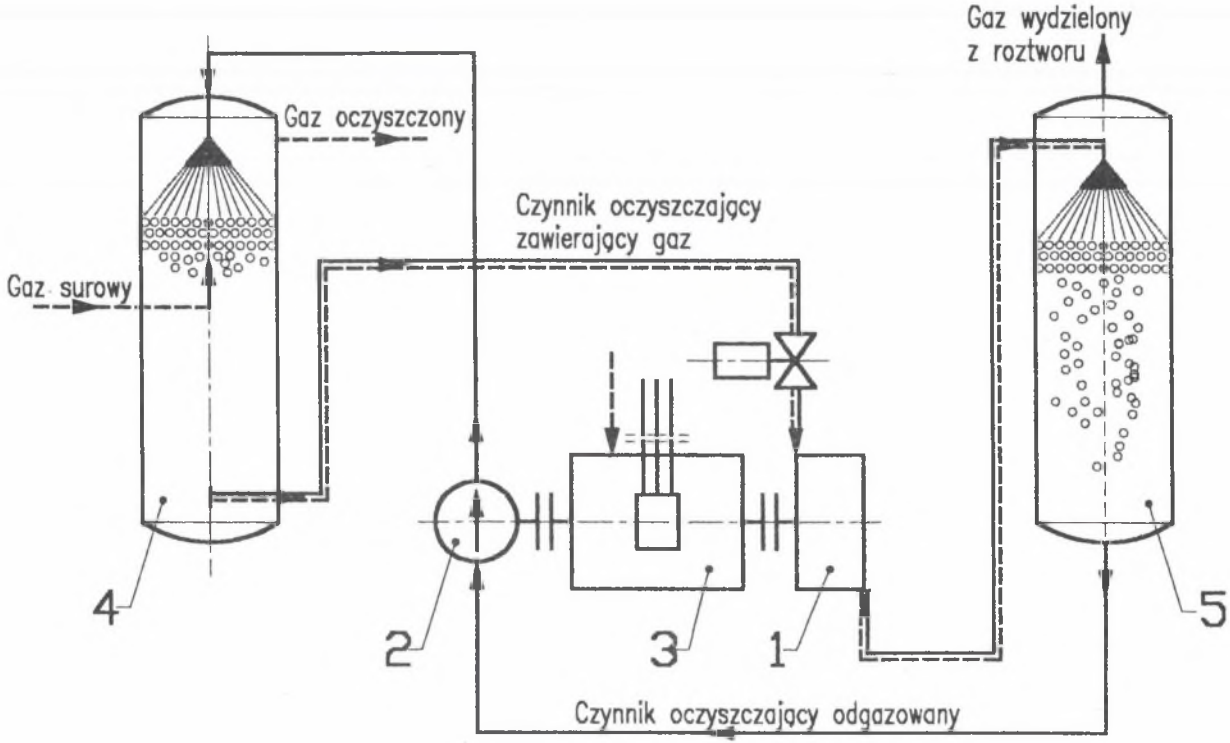
Współcześnie największe zainteresowanie odzyskiem energii w instalacjach hydraulicznych wykazuje przemysł chemiczny, a odzyskana energia jest wykorzystywana najczęściej do napędu maszyn roboczych (pompy, sprężarki) pracujących w tej samej instalacji. W celu zilustrowania możliwości, poniżej podano kilka wybranych przykładów.

Przykład zastosowania turbiny wodnej w oczyszczalni gazów technicznych podano na rysunku 1 [4]. Do wieży oczyszczania gazu doprowadzony jest surowy gaz, który opłukiwany jest cieczą oczyszczającą w celu usunięcia zanieczyszczeń. Proces ten jest realizowany przy wysokim ciśnieniu. Oczyszczony gaz jest odprowadzony do dalszej obróbki, a ciecz oczyszczająca jest kierowana do regeneracji w urządzeniu uwalniającym gaz z roztworu. Wynikiem regeneracji cieczy jest usunięcie z cieczy oczyszczającej zaabsorbowanych produktów gazowych, które wyzwalają się podczas rozprężenia cieczy. Konieczność obniżenia ciśnienia cieczy umożliwia wykorzystanie energii i zamienienie jej na pracę użyteczną. Ze względu na duże różnice ciśnień (spadu) do rekuperacji energii, które występują, w tych instalacjach są stosowane wysokospadowe turbiny Francisa bądź Peltona, które napędzają (wspólnie z silnikiem elektrycznym) pompy pompujące ciecz czyszczoną odgazowaną.

Na rysunku 2 pokazano schemat instalacji stanowiska badawczego w rafinerii z turbiną do odzysku energii w procesie przeróbki węglowodorów [5]. Ciśnienie płynu wypływającego ze zbiornika jest redukowane z p_1 = 28 MPa do około p_2 = 10 MPa za aparaturą dławiącą, przy czym przepływ zmienia się z jednofazowego na dwufazowy. Po rozprężeniu w turbinie czynnik dwufazowy jest doprowadzony do zbiornika przelewowego o ciśnieniu około p_3 = 3 MPa, z którego już oddzielnie odprowadzony jest gaz i ciecz do dalszej obróbki. W instalacji została zabudowana pompa wirowa pracująca w ruchu turbinowym (liczba stopni i = 8).

Rysunek 3 przedstawia schemat instalacji opracowany przez Zakład Dynamiki Cieczy Instytutu Maszyn Przepływowych do odzysku energii w procesie produkcji amoniaku [6]. Wyprodukowany amoniak jest gromadzony w zbiorniku ciśnieniowym pod ciśnieniem p = 29 MPa, a następnie odprowadzany jest do magazynu pod ciśnieniem p = 2 MPa. Do rozprężenia amoniaku przewidziano turbinę Peltona bądź pompę wirową wielostopniową. Moc turbiny oszacowano na P = 500 kW.

Na rysunku 4 przedstawiono zastosowanie turbiny wodnej do rekuperacji energii w zakładach wodociągowych [7]. Turbina pobiera wodę z rurociągu upustowego i napędza generator elektryczny. Powyższe rozwiązanie zastosowano w Niemczech. W instalacjach tych użyto pompy wirowe w ruchu turbi-

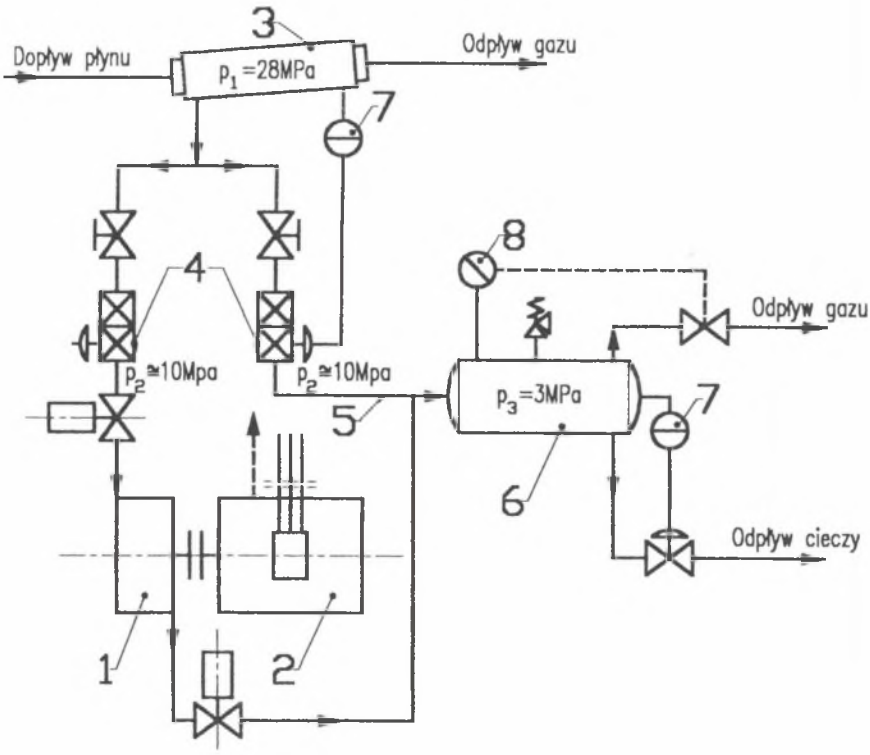


Rys. 1. Zespół turbina hydrauliczna – silnik elektryczny – pompa w instalacji do oczyszczania gazu: 1 – turbina hydrauliczna, 2 – silnik elektryczny, 3 – pompa, 4 – wieża oczyszczania gazu, 5 – urządzenie uwalniania gazu z roztworu

Fig. 1. The assembly of hydraulic turbine-electric motor-pump in an installation for the purification of gas. 1 – hydraulic turbine, 2 – electric motor, 3 – pump, 4 – gas-cleaning tower, 5 – instalation for the liberation of gas from the solution

nowym. Parametry nominalne turbiny są tak dobrane, aby przy wymaganym spadku ciśnienia wynoszącym około p = 0,45 MPa, cały przepływ był kierowany do przewodu upustowego (przy całkowicie zamkniętym zaworze w przewodzie głównym i całkowicie otwartym zaworze w przewodzie upustowym) i przez turbinę. W tym przypadku turbina osiąga moc około P=85 kW i napędza generator elektryczny.

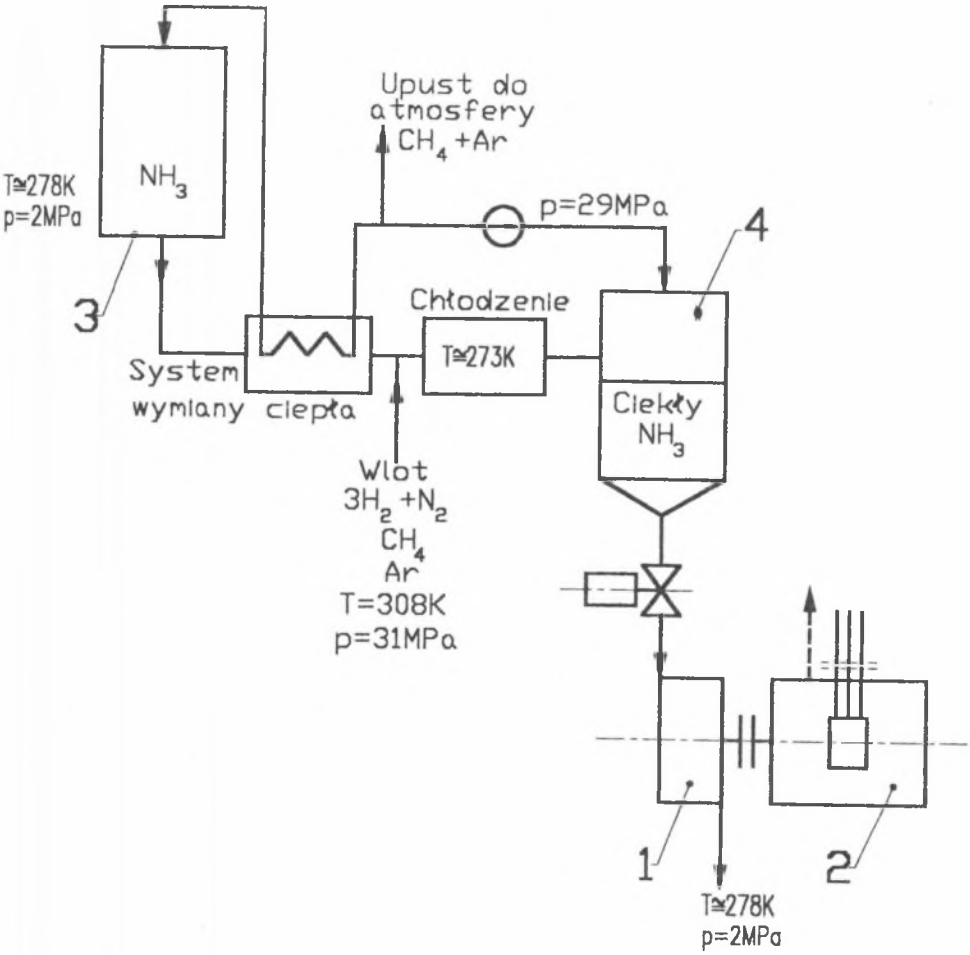
Na rysunku 5 pokazano schemat komory ciepłowniczej, z pompami wirowymi przetłaczającymi wodę w rurociągu zasilającym i podnoszące jej ciśnienie



Rys. 2. Zespół turbina hydrauliczna – generator elektryczny w instalacji w rafinerii, w procesie przeróbki węglowodorów: 1 – turbina hydrauliczna, 2 – generator elektryczny, 3 – zbiornik, 4 – aparatura dławiąca, 5 – upust, 6 – zbiornik przejściowy, 7 – regulator poziomu wody, 8 – regulator ciśnienia

Fig. 2. The assembly of hydraulic turbine-electromechanical generator in the installation of a refinery, used for the processing of hydrocarbons. 1 – hydraulic turbine, 2 – electromechanical generator, 3 – tank, 4 – throttling apparatus, 5 – sink, 6 – transistory container, 7 – water level control-unit, 8 – pressure regulator

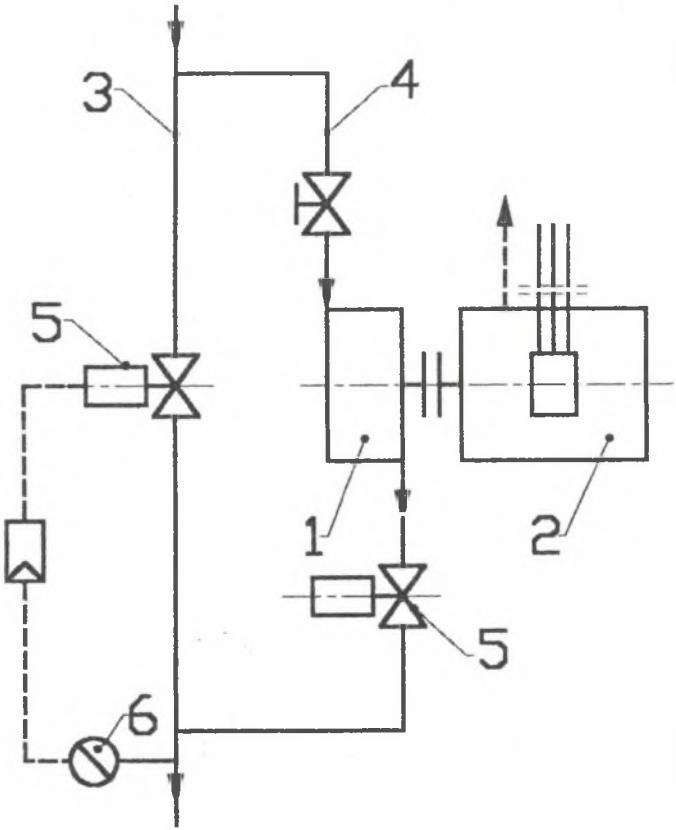
z p_1=0,4 MPa do p_2=0,9 MPa oraz zawory dławiące umieszczone w rurociągu powrotnym, redukujące ciśnienie wody z p_3 = 0,5 MPa do około p_4 = 0,2 MPa [8]. Dławienie przepływu można wyeliminować przez zastosowanie turbiny włączonej równolegle do przewodu z zaworem dławiącym. Odzyskując energię można poprawić bilans energetyczny stacji.



Rys. 3. Zespół turbina hydrauliczna – generator elektryczny w instalacji syntezy amoniaku w miejsce dotychczas stosowanego zaworu rozprężającego: 1 – turbina hydrauliczna, 2 – generator elektryczny, 3 – reaktor syntezy NH_3, 4 – zbiornik ciekłego amoniaku

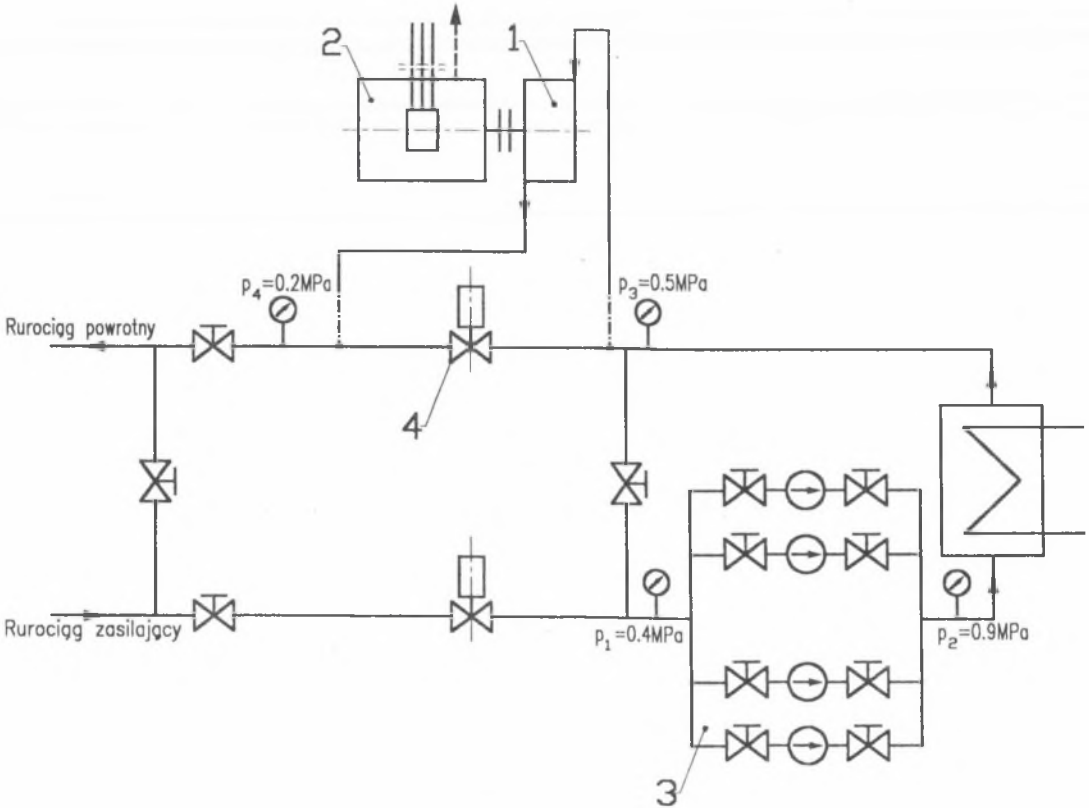
Fig. 3. The assembly of hydraulic turbine-electromechanical generator in an installation for the synthesis of ammonia, used instead of the expansion valve appiled so far. 1 – hydraulic turbine, 2 – electromechanical generator, 3 – reactor for the synthesis of NH_3, 4 – container of liquid amonia

Rysunek 6 podaje przykład zastosowania turbiny do odzysku energii w obiegu wody chłodzącej w głębokich kopalniach według projektu firmy Sulzer Escher Wyss [4]. Woda chłodząca jest wykorzystywana w wymiennikach ciepła do chłodzenia powietrza w korytarzach wydobywczych kopalni znajdujących się na głębokości 1500 do 3000 m pod ziemią. Ogrzana woda w wymiennikach jest wypompowywana do chłodni znajdujących się na powierzchni. Po ochłodzeniu woda jest ponownie doprowadzana do wymienników ciepła, a jej



Rys. 4. Zespół turbina hydrauliczna – generator elektryczny w instalacji redukcji ciśnienia w zakładach wodociągowych: 1 – turbina hydrauliczna, 2 – generator elektryczny, 3 – rurociąg główny, 4 – rurociąg upustowy, 5 – zawór regulacyjny, 6 – miernik ciśnienia

Fig. 4. The assembly of hydraulic turbine-electromechanical generator in a pressure-reducing installation used in waterworks. 1 – hydraulic turbine, 2 – electromechanical generator, 3 – main pipeline, 4 – sink piping, 5 – control valve, 6 – pressure meter

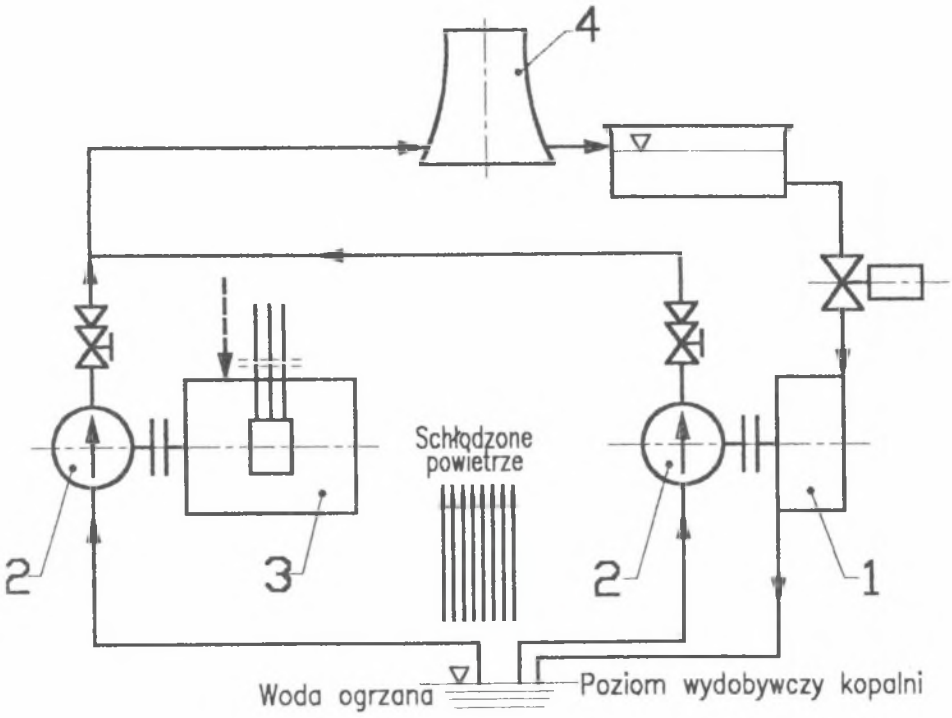


Rys. 5. Zespół turbina hydrauliczna – generator elektryczny w instalacji ciepłowniczej: 1 – turbina hydrauliczna, 2 – generator elektryczny, 3 – stacja pomp, 4 – zawór dławiący, 5 – rurociąg zasilający, 6 – rurociąg powrotny

Fig. 5. The assembly of hydraulic turbine-electromechanical generator in a heating installation. 1 – hydraulic turbine, 2 – electromechanical generator, 3 – pumping station, 4 – throttle valve, 5 – penstock, 6 – return piping

energia odzyskiwana w turbinie. Turbina napędza pompę przetłaczającą ogrzaną wodę z wymienników do chłodni.

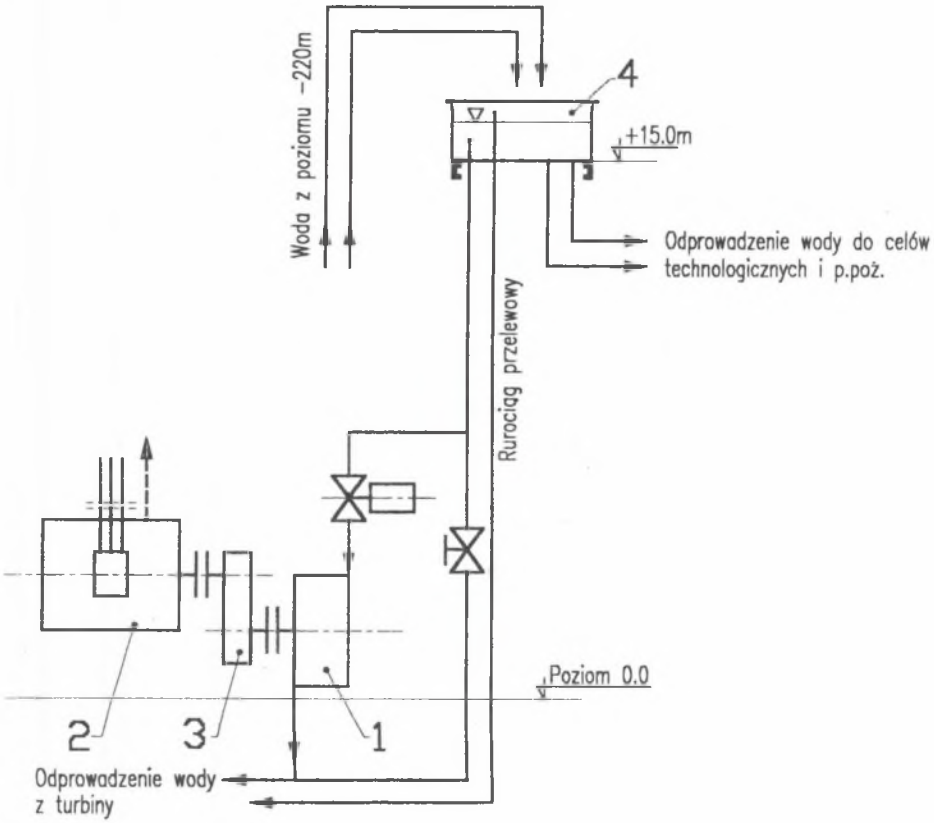
Na rysunku 7 przedstawiono schemat projektu instalacji hydraulicznej z zbiornikiem przelewowym, znajdującym się przy szybie wydobywczym kopalni [9]. Do zbiornika doprowadzona jest woda wypompowywana z poziomu wydobywczego kopalni. Część wody ze zbiornika kierowana jest do obiegu technologicznego (płuczka) i do celów przeciwpożarowych, natomiast jej nadmiar odprowadza się do kolektora ściekowego, co jest związane ze stratą energii. Dlatego zaproponowano do odzysku energii zastosować turbinę, która przez przekładnię napędzałaby generator elektryczny.



Rys. 6. Zespól turbina hydrauliczna – pompa w instalacji obiegu wody chłodzącej w kopalni: 1 – turbina hydrauliczna, 2 – pompa, 3 – silnik elektryczny, 4 – chłodnia

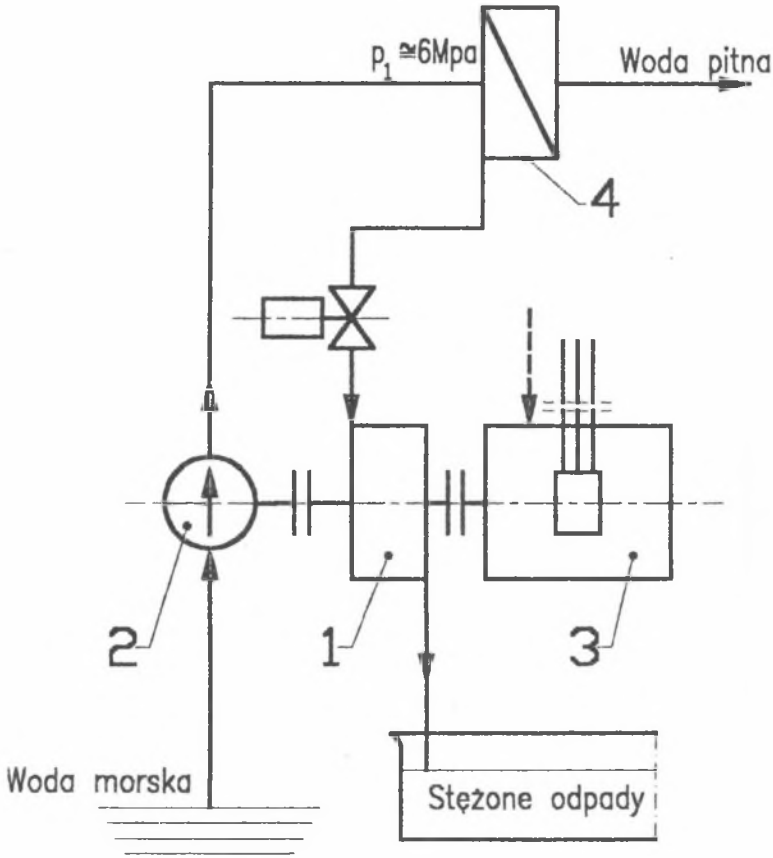
Fig. 6. The assembly of hydraulic turbine-pump in a circulatin innstallation of cooling water in a mine. 1 – hydraulic turbine, 2 – pump, 3 – electric motor, 4 – cooler

Przykład zastosowania turbiny do odzysku energii przy rozprężaniu solanki w instalacji odsalania wody morskiej według projektu firmy Escher Wyss [4] podano na rysunku 8. Woda morska jest przetłaczana przez półprzepuszczalną przeponę pod ciśnieniem około p_1 = 6 MPa. Stężone odpady w postaci solanki są odprowadzane do zbiornika po rozprężeniu w turbinie. Odzyskana energia jest wykorzystywana przez turbinę Peltona do napędu pompy (łącznie z silnikiem elektrycznym) pompującej wodę morską.



Rys. 7. Zespól turbina hydrauliczna - generator elektryczny w instalacji odprowadzającej wodę ze zbiornika przelewowego przy szybie wydobywczym kopalni: 1 – turbina hydrauliczna, 2 – generator elektryczny, 3 – przekładnia, 4 – zbiornik przelewowy

Fig. 7. The assembly of hydraulic turbine-electromechanical generator in an installation draining water from the overflow tank at output of mine. 1 – hydraulic turbine, 2 – electromechanic generator, 3 – transmission gear, 4 – overflow tank



Rys. 8. Zespół turbina hydrauliczna – pompa – silnik elektryczny w instalacji odsalania wody morskiej: 1 – turbina hydrauliczna, 2 – pompa, 3 – silnik elektryczny, 4 – urządzenie przeponowe do odsalania wody morskiej

Fig. 8. The assembly of hydraulic turbine-electric motor in an instalation for the desalting of sea water. 1 – hydraulic turbine, 2 – pump, 3 – electric motor, 4 – mambranes for the desalting of sea water

3. Schematy rozwiązań napędów za pomocą turbin wodnych bądź pomp wirowych w ruchu turbinowym

Turbiny wodne bądź pompy wirowe w ruchu turbinowym mogą napędzać maszyny robocze bezpośrednio bądź pośrednio poprzez przekładnie. W przypadku jeżeli maszyną roboczą jest generator elektryczny i energia elektryczna

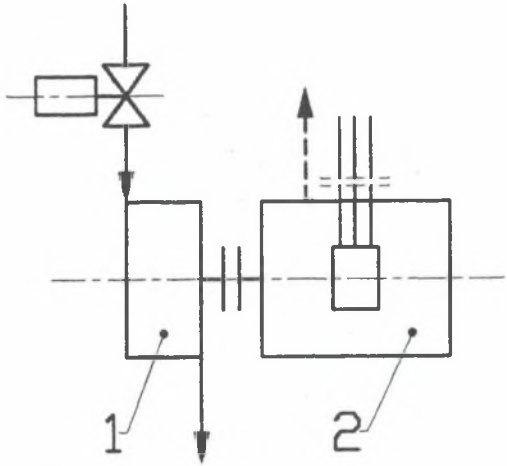
przekazywana jest do systemu energetycznego bądź gdy tego wymagają warunki ruchowe, to turbozespół hydrauliczny musi być wyposażony w odpowiednią automatykę i regulację. Z wielu możliwych rozwiązań technicznych poniżej omówimy trzy przypadki najczęściej stosowanych rozwiązań napędów. Pokazano turbozespoły składające się z:

- turbiny (bądź pompy w ruchu turbinowym) i generatora elektrycznego (rys. 9, 10),
- turbiny (bądź pompy w ruchu turbinowym) i pompy wirowej (lub innej maszyny roboczej – rys. 11),
- turbiny (bądź pompy w ruchu turbinowym), pompy wirowej (lub innej maszyny roboczej) i dodatkowo silnika elektrycznego (rys. 12).

Rozwiązanie przedstawione na rysunkach 9 i 10 jest dotychczas najczęściej stosowane w *małej energtyce wodnej*. Rozwiązanie to może być stosowane także do odzysku energii traconej w różnych procesach technologicznych, zwłaszcza wtedy, gdy nie jest możliwe zastosowanie rozwiązań przedstawionych poniżej. W rozwiązaniu tym mogą być użyte generatory prądu przemiennego (synchroniczne lub asynchroniczne) bądź stałego. Generatory asynchroniczne można stosować wyłącznie w sieciach sztywnych. Dla małych mocy jako generatory asynchroniczne można stosować standardowe silniki asynchroniczne. Użycie generatorów synchronicznych bądź generatorów prądu stałego wymaga stosowania odpowiednich układów regulacji. Można je jednak stosować w sieciach wydzielonych.

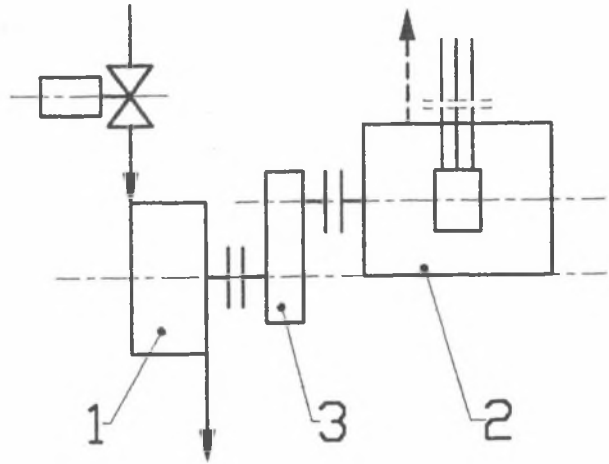
Rozwiązanie podane na rysunku 11 jest stosowane w różnych układach technologicznych. W tym przypadku turbina wodna bądź pompa w ruchu turbinowym napędza maszynę roboczą (inną niż generator elektryczny). Rozwiązanie to może być również stosowane do rekuperacji energii w różnych instalacjach przemysłowych, tam gdzie ciecz odpływa z układu technologicznego pod ciśnieniem. Rozwiązanie to podczas badań z pompą wirową wielostopniową w ruchu turbinowym było zrealizowane w jednej z kopalń węgla w zakładzie przeróbki mechanicznej. Zaletą tego rozwiązania jest polepszenie bilansu energetycznego całego układu technologicznego na skutek odzysku energii, która normalnie byłaby bezpowrotnie stracona dla celów użytecznych.

Rozwiązanie pokazane na rysunku 12 jest stosowane w różnych instalacjach (układach technologicznych) do odzysku energii. W rozwiązaniu podanym w tym przykładzie turbina wodna bądź pompa w ruchu turbinowym napędza pompę wirową (lub inną maszynę roboczą). Niedobór mocy do napędu maszyny roboczej dostarcza silnik elektryczny. Zaletą takiego rozwiązania jest rekuperacja energii przy stosunkowo prostym rozwiązaniu turbozespołu hydraulicznego. Napęd maszyny roboczej za pomocą dwóch silników (hydraulicznego i elektrycznego) wymaga jednak odpowiedniej automatyki i regulacji utrzymujących stałą prędkość obrotową oraz umożliwiających właściwe uruchomienie, prowadzenie ruchu i zatrzymywanie turbozespołu.



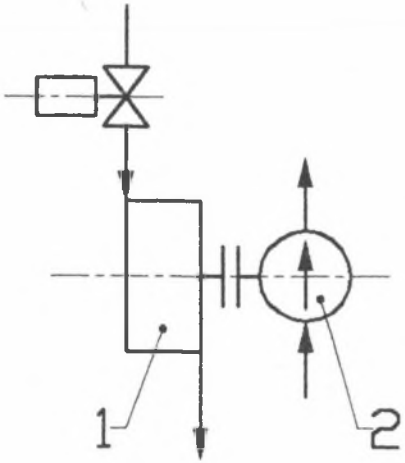
Rys. 9. Zespół turbina hydrauliczna (pompa w ruchu turbinowym) – generator elektryczny; napęd bezpośredni: 1 – turbina hydrauliczna (pompa w ruchu turbinowym), 2 – generator elektryczny

Fig. 9. The assembly of hydraulic turbine (pump used as turbine) – relectromechanic generator; direct drive. 1 – hydraulic turbine (pump used as trubine), 2 – electromechanical generator



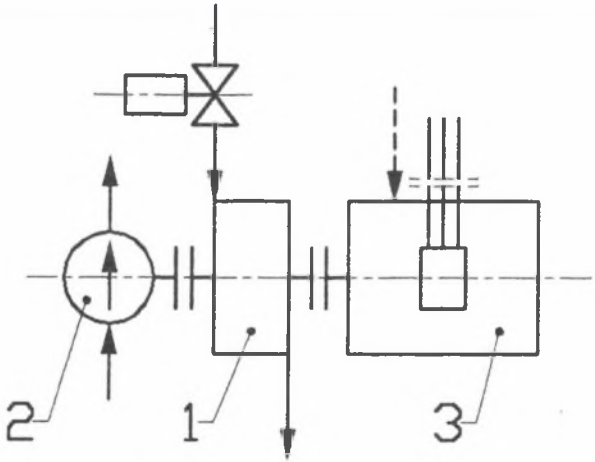
Rys. 10. Zespól turbina hydrauliczna (pompa w ruchu turbinowym) – generator elektryczny; napęd pośredni: 1 – turbina hydrauliczna (pompa w ruchu turbinowym), 2 – generator elektryczny, 3 – przekładnia

Fig. 10. The assembly of hydraulic turbine (pump used as turbine) – electromechanical generator; intermediate drive. 1 – hydraulic turbine (pump used as turbine), 2 – electromechanical generator, 3 – transmission gear



Rys. 11. Zespół turbina hydrauliczna (pompa w ruchu turbinowym) – maszyna robocza: 1 – turbina hydrauliczna (pompa w ruchu turbinowym), 2 – maszyna robocza (np. pompa)

Fig. 11. The assembly of hydraulic turbine (pump used as turbine) – operating machine. 1 – hydraulic turbine (pump used as turbine), 2 – operating machine (e.g. pump)



Rys. 12. Zespół turbina hydrauliczna (pompa w ruchu turbinowym) – maszna robocza – silnik elektryczny: 1 – turbina hydrauliczna (pompa w ruchu turbinowym), 2 – maszyna robocz (np. pompa), 3 – silnik elektryczny

Fig. 12. The assembly of hydraulic turbine (pump used as turbine) – operating machine – electric motor. 1 – hydraulic turbine (pump used as turbine), 2 – operating machine (e.g. pump), 3 – electric motor

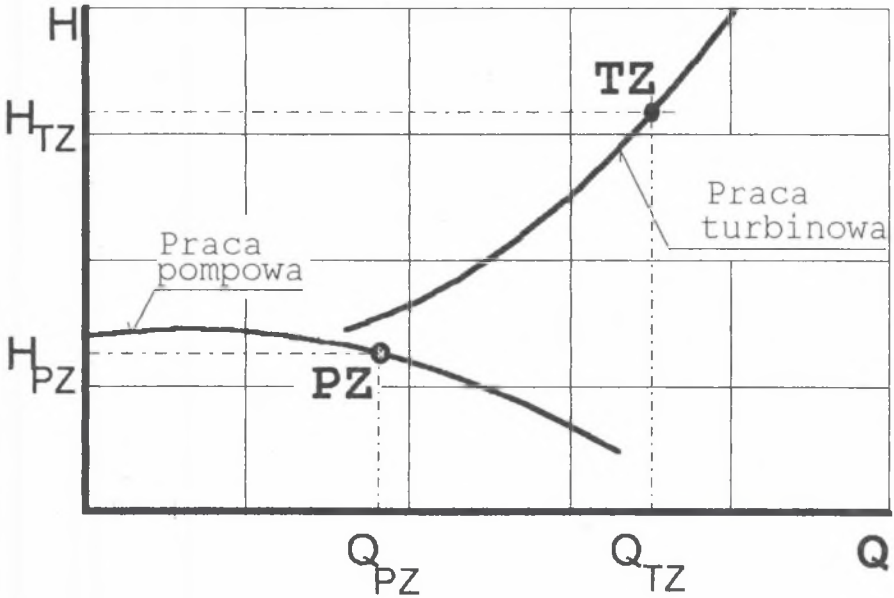
W systemach odzysku energii hydraulicznej, ze względów energetycznych, inwestycyjnych i eksploatacyjnych, najbardziej korzystne jest rozwiązanie z bezpośrednim napędem maszyny roboczej przez turbinę lub pompę w ruchu turbinowym (rys. 11). W bilansie energetycznym rozporządzalna energia hydrauliczna zamieniana jest na pracę mechaniczną ze sprawnością zastosowanej turbiny. Bezpośredni napęd wielu maszyn roboczych (np. pompy wirowe, wentylatory itp.) nie wymaga specjalnych układów regulacji i zabezpieczeń. Inwestycja nie jest więc kosztowna, a eksploatacja łatwa. Wytwarzanie energii elektrycznej (rys. 9 i 10) w systemach rekuperacji energii hydraulicznej jest rozwiązaniem mniej efektywnym pod względem energetycznym oraz inwestycyjnym i jest zalecane tylko wtedy, gdy nie można zastosować napędu bezpośredniego maszyny roboczej. Napęd turbiną wodną (pompą w ruchu turbinowym) i silnikiem elektrycznym (rys. 12) pod względem energetycznym jest porównywalny z rozwiązaniem pokazany na rysunku 11, jednak jest nieco droższy (konieczne układy automatyki i regulacji) oraz bardziej kłopotliwy w eksploatacji. Stosowany on jest między innymi w instalacjach chemicznych, w procesach oczyszczania gazów technologią mokrą.

4. Pompy wirowe w ruchu turbinowym

Ponieważ aktualnie w kraju nie buduje się seryjnie małych turbin wodnych, które mogłyby być stosowane do rekuperacji energii, dlatego w miejsce turbin wodnych można stosować seryjnie produkowane pompy wirowe. W ruchu turbinowym dla niższych ciśnień (mniejszych spadów) stosuje się pompy wirowe jednostopniowe, a dla wyższych ciśnień (spadów) pompy wirowe wielostopniowe. Zastosowanie pomp w ruchu turbinowym w miejsce turbin zmniejsza koszty inwestycyjne, przyspiesza i ułatwia realizację projektów dotyczących rekuperacji energii.

Pod względem energetycznym praca turbinowa stanowi odwrócenie pracy pompowej. Pompy wirowe pracujące w ruchu turbinowym mają przeciwny kierunek obrotów wirnika w stosunku do ruchu pompowego. Przemiany energetyczne w wirowej maszynie hydraulicznej (pompie bądź turbinie) przy przepływie izotermicznym nieściśliwej cieczy nielepkiej przez wirnik o nieskończenie wielkiej liczbie łopatek (przepływ osiowosymetryczny) opisane są równaniem Eulera dla maszyn wirowych. W rzeczywistej maszynie wirowej (przepływ cieczy lepkiej, wirnik o skończonej liczbie łopatek) parametry pracy są, w zależności od reżimu pracy, niższe bądź wyższe. W przypadku pracy pompowej użyteczne parametry pracy maszyny są mniejsze od parametrów teoretycznych o sprawność przekazywania energii w wirniku o skończonej liczbie łopatek i straty hydrauliczne związane z przepływem cieczy lekkiej. Natomiast w pracy turbinowej konieczne jest dostarczenie do wirnika więcej ener-

gii (o straty jak wyżej), niż to wynika z parametrów teoretycznych. Jeżeli dana pompa w pracy pompowej osiąga parametry znamionowe w punkcie „P" (rys. 13), to ta sama maszyna stosowana jako turbina wymaga dostarczenia więcej energii, określonej parametrami punktu „T" (rys. 13).



Rys. 13. Charakterystyki pompy w ruchu pompowym i turbinowym

Fig. 13. Performance of a pump in pump duty and turbine duty

Badania laboratoryjne pompy wirowej odśrodkowej jednostopniowej 150PJM250 zostały przeprowadzone w Zakładzie Dynamiki Cieczy IMP PAN i przedstawione między innymi w pracach [10, 11], natomiast poniżej podano wybrane wyniki badań doświadczalnych zrealizowanych w Zakładzie Maszyn i Urządzeń Hydraulicznych Politechniki Śląskiej.

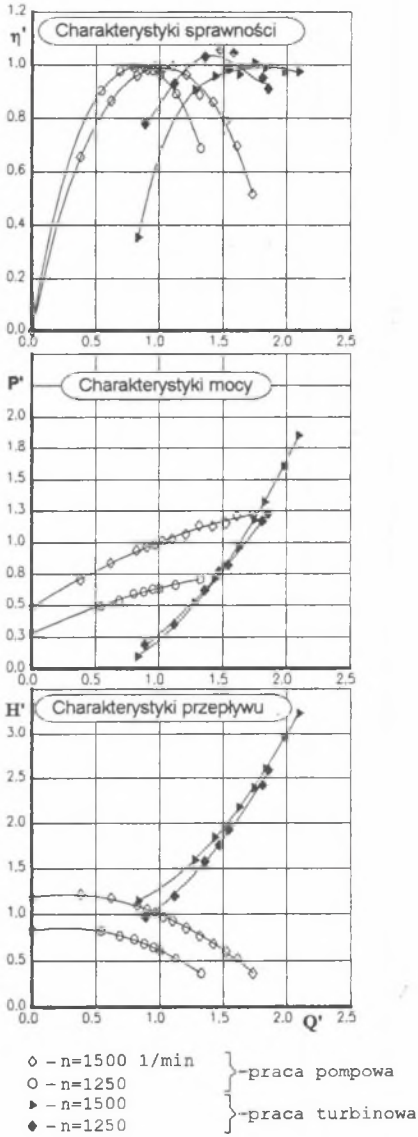
Badano pompy wirowe odśrodkowe wielostopniowe produkcji POWEN S.A. OS-80R/3 i OS-80M/2 na specjalnie przygotowanych stanowiskach badawczych w laboratorium Zakładu Maszyn i Urządzeń Hydraulicznych Politechniki Śląskiej oraz zespół turbina (pompa OS-80M w ruchu turbinowym) – maszyna robocza (pompa PŁP-50) w kopalni węgla podczas eksploatacji. Wyniki tych badań omówiomo między innymi w pracach [12 ÷ 15].

Indywidualne charakterystyki energetyczne pompy OS-80R/3 wyznaczone w ruchu pompowym i turbinowym przedstawiono na rysunku 14. Punktem

odniesienia bezwymiarowych charakterystyk są wyznaczone doświadczalnie w ruchu pompowym parametry znamionowe (odpowiadające maksymalnej sprawności) maszyny. Parametry odpowiadające maksymalnej sprawności badanych maszyn wielostopniowych w ruchu turbinowym są przesunięte do większych przepływów w odniesieniu do punktu znamionowego w ruchu pompowym. Sprawności maksymalne w obu reżimach pracy są prawie równe. Moc osiągana przez pompę w ruchu turbinowym jest większa niż moc pobierana w pracy pompowej.

Obecnie nie jest możliwe wskazanie dobrej metody analitycznej przeliczania parametrów pompowych na turbinowe. Rozrzut wyników badań i obliczeń jest znaczny. Porównania kilku metod obliczeniowych z wynikami badań doświadczalnych dokonano w publikacji [16].

Doboru pompy do ruchu turbinowego nie można ograniczyć jedynie do analizy parametrów użytkowych. Konieczna jest również szczegółowa analiza rozwiązań konstrukcyjnych poszczególnych węzłów maszyny (wał, łożyska, kadłub, połączenia śrubowe, uszczelnienia) w warunkach pracy pompowej. Przeanalizować należy również zagadnienie prędkości rozbiegu i ewen-



Rys. 14. Charakterystyki indywidualne pompy OS-80R/3 wyznaczone w ruchu pompowym i turbinowym

Fig. 14. Individual characteristics of pump OS-80R/3 determined while exploited as pump and as turbine

tualne zabezpieczenia oraz warunki pracy po stronie odpływowej (ssawnej) ze względu na kawitację.

5. Podsumowanie

Na podstawie zrealizowanych studiów, badań i analiz można sformułować następujące wnioski:

- do rekuperacji energii w różnych instalacjach technologicznych mogą być stosowane hydrauliczne maszyny wirowe,
- w miejsce brakujących w kraju turbin wodnych, stosowanie dla MEW i rekuperacji energii seryjnie produkowanych pomp wirowych (zwłaszcza o małych wydajnościach – przełyku), w ruchu turbinowym oraz silników asynchronicznych jako generatorów jest korzystne ze względu na przyspieszenie inwestycji i obniżenie nakładów finansowych,
- zastosowanie pomp wirowych w elektrowniach i siłowniach oraz w niektórych układach technologicznych wymaga jednak zastosowania przekładni, regulatorów oraz układów automatyki pracy,
- badania pomp wirowych odśrodkowych jednostopniowych 150PJM250 i wielostopniowych typu OS-80, nawet w obecnym rozwiązaniu konstrukcyjnym wykazały, że maszyny te mogą być stosowane w ruchu turbinowym dla określonych warunków lokalnych,
- sprawności maksymalne pomp w ruchu pompowym i turbinowym są prawie równe,
- powinno się prowadzić dalsze badania laboratoryjne (doświadczalne) pomp wirowych jedno– i wielostopniowych oraz podjąć prace konstrukcyjne, by zwiększyć ich sprawność przy ruchu turbinowym,
- w przypadku wykorzystania pomp wirowych odśrodkowych w ruchu turbinowym do rekuperacji energii należy stosować przede wszystkim napęd bezpośredni maszyny roboczej (innej niż generator elektryczny) w celu polepszenia bilansu energetycznego całego układu technologicznego,
- równolegle z badaniami laboratoryjnymi (doświadczalnymi) prowadzić należy dalsze badania aplikacyjne z pompami wirowymi w ruchu turbinowym, aby uzyskać odpowiednie informacje ruchowo–eksploatacyjne.

Literatura

1. Steller K.: Zastosowania wirowych maszyn hydraulicznych do odzysku energii w procesach przemysłowych, materiały konferencyjne HYDROFORUM-80, Porąbka Kozubnik, 20-23.09.1980.
2. Projekt badawczy nr 9 0041 29 01 KBN, Odzysk energii traconej w różnych procesach technologicznych za pomocą hydraulicznych maszyn

wirowych, 14 część, kierownik projektu: prof. M. Zarzycki, Gliwice-Gdańsk 1990.
3. Steller K., Łojek A., Reymann Z.: Przegląd procesów technologicznych, w których do odzysku energii traconej wskutek dławienia przepływu lub zrzutów cieczy przewiduje się stosowania pomp wirowych w ruchu turbinowym lub klasycznych turbin wodnych. Projekt badawczy nr 9 0412 91 01, IMP, Gdańsk 1992.
4. Power recovery turbines, prospekt firmy Sulzer Escher Wyss.
5. Apfelbacher R., Hamkins C.P., Jeske H.O., Schuster O.: Kreiselpumpen im Turbinenbetrieb bei Zweiphasen-Stromungen, KSB Technische Berichte 26.
6. Steller K. i inni: Studium teoretyczne nad możliwością zastosowania maszyny hydraulicznej do odzysku mocy w procesie ekspansji amoniaku, opracowanie IMP PAN nr 87, Gdańsk 1973.
7. Etzold F., Petry W., Bohr W.: Dynamische Probleme beim Einsatz einer Kreiselpumpe als Turbine am Beispiel eines Wasserversorgungsnetzs, Pumpentagung Karlsruhe-88, Fachgemeinschaft Pumpen im VDMA, Frakfurt/Main, Oktober 1988.
8. Łojek A.: 0cena koncepcji odzysku energii w komorze ciepłowniczej K-608 w Gdyni, opracowanie IMP PAN nr arch. 47, 1991.
9. Reymann Z., Łojek A.: Agregatyzacja, warunki zabudowy, ruchu i zabezpieczenia turbozespołu wodnego przeznaczonego do odzysku energii wody dołowej w kopalni węgla kamiennego „Komuna Paryska" w Jaworznie, opracowanie IMP PAN nr arch. 32, 1989 .
10. Łojek A., Adamkowski A., Stankiewicz Z.: Analiza konstrukcyjne niskociśnieniowych pomp PJM jako maszyn do rekuperacji energii, sprawozdanie IMP PAN nr 344, Gdańsk 1992.
11. Steller A., Łojek A., Reymann Z.: Sprawozdanie z badań laboratoryjnych niskociśnieniowej pompy wirowej odśrodkowej jednostopniowej typu PJM, sprawozdanie IMP PAN nr 173, Gdańsk 1992.
12. Zarzycki M., Dębiec J., Rduch J.: Analiza możliwości wykorzystania energii traconej w niektórych procesach technologicznych przemysłu węglowego za pomocą hydraulicznych maszyn wirowych, Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa nr 9 (291), Katowice 1994.
13. Zarzycki M., Rduch J.: Odzysk energii hydraulicznej za pomocą pomp wirowych wielostopniowych w ruchu turbinowym, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Energetyka z. 125, Gliwice 1995.
14. Zarzycki M., Rduch J.: Praca pomp wirowych wielostopniowych w ruchu turbinowym, Górnictwo Odkrywkowe nr 4, Wrocław 1994.
15. Zarzycki M.: Performance of centrifugal multistage pums as hydraulic turbines. Proceedings of the tenth conference on fluid machinery, Budapeszt 1995, s. 384-393.

16. Zarzycki M., Rduch J.: Analisys of the results of investigations concerning impeller pumps running in the turbine mode. Cieplne maszyny przepływowe, Zeszyt 108, Łódź, 1995.

Recenzent: Dr hab. inż. Andrzej Witkowski Prof. Politechniki Śląskiej

Wpłynęło do Redakcji: 10. 10. 1996 r.

Abstract

In plants aiming at increased saving of energy more and more attention is paid to a rational winning and consumption of the resources of energy. Of fundamental importance is aslo the recovery of waste energy from various hydraulic systems and installations, in wich liquids are reduced or dumped.

For that recuperation of energy hydraulic turbines may be used as well as impeller pumps (single-stage or multistage pumps) used as turbines. Hydraulic machines may be used for the recovery of energy in various systems and installations. The paper provides examples (diagrams) of applying turbines (or impeller pumps used as turbines) for the recuperation of energy in various industrial installations. The most frequently applied solutions of drives for machines, making use of turbines, have been discussed.

The industry of Poland does not produce hydraulic turbines on a larger scale. Therefore it is expedient to aplly impeller pumps operating as turbines.

As the application of impeller pumps in the role of turbines is less know and tested, this problem has been taken up within the research project „Recuperation of waste energy from various technical processes by means of hydraulic turbo-machines" sponsored by the Committee of Researches. The paper aslo provides some selected results of experimental investigations concerting centrifugal milti-stage impeller pumps used as turbines. Respective conclusions have been draw and specifed.