

POLSKA AKADEMIA NAUK

INSTYTUT MASZYN PRZEPŁYWOWYCH

TRANSACTIONS
OF THE INSTITUTE OF
FLUID-FLOW MACHINERY

PRACE
INSTYTUTU MASZYN PRZEPŁYWOWYCH

101



GDAŃSK 1996

THE TRANSACTIONS OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

exist for the publication of theoretical and experimental investigations of all aspects of the mechanics and thermodynamics of fluid-flow with special reference to fluid-flow machines

*

PRACE INSTYTUTU MASZYN PRZEPŁYWOWYCH

poświęcone są publikacjom naukowym z zakresu teorii i badań doświadczalnych w dziedzinie mechaniki i termodynamiki przepływów, ze szczególnym uwzględnieniem problematyki maszyn przepływowych

Wydanie publikacji dofinansowane zostało przez PAN ze środków DOT uzyskanych z Komitetu Badań Naukowych

EDITORIAL BOARD – RADA REDAKCYJNA

TADEUSZ GERLACH * HENRYK JARZYNA * JERZY KRZYŻANOWSKI
WOJCIECH PIETRASZKIEWICZ * WŁODZIMIERZ J. PROSNAK
JÓZEF ŚMIGIELSKI * ZENON ZAKRZEWSKI

EDITORIAL COMMITTEE – KOMITET REDAKCYJNY

EUSTACHY S. BURKA (EDITOR-IN-CHIEF – REDAKTOR NACZELNY)
JAROSŁAW MIKIELEWICZ
EDWARD ŚLIWICKI (EXECUTIVE EDITOR – REDAKTOR) * ANDRZEJ ŻABICKI

EDITORIAL OFFICE – REDAKCJA

Wydawnictwo Instytutu Maszyn Przepływowych
Polskiej Akademii Nauk
ul. Gen. Józefa Fiszer 14, 80-952 Gdańsk, skr. poczt. 621,
☎ (0-58) 46-08-81 wew. 141, fax: (0-58) 41-61-44,
e-mail: esli@imppan.imp.pg.gda.pl

ISSN 0079-3205

MAREK KLEIN, ANDRZEJ ŁOJEK¹

Maszyna rekuperacyjna jako reduktor ciśnienia w instalacjach przemysłowych²

Dokonano przeglądu instalacji technologicznych z rekuperacją energii czynnika roboczego za pomocą maszyn hydraulicznych. Opisano wykonany w Instytucie Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku prototypowy układ rekuperacyjny o mocy $N = 22$ kW, składający się z pompy wirowej pracującej w ruchu turbinowym i silnika elektrycznego pracującego w ruchu generatorowym oraz zespołu sterowania i zabezpieczeń. Scharakteryzowano sposób działania tego układu przy sterowaniu za pomocą sterownika programowalnego oraz członów wykonawczych w postaci zaworów motylowych i hamulca. Przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych układu w warunkach ustalonych oraz w przejściowych stanach ruchu podczas uruchamiania i zatrzymywania maszyny rekuperacyjnej.

1. Wstęp

W wielu procesach technologicznych do rozprężania cieczy lub gazów stosuje się zawory dławiące, zmniejszające ciśnienie płynu bez wykonania pracy użytecznej. Jest to niewątpliwie tani, ale nieefektywny sposób regulacji ciśnienia, prowadzący do nieodwracalnych strat energii i do – wywołanego rozpraszaniem energii – wzrostu drgań, hałasu oraz zużycia armatury. Można uniknąć tych niepożądanych skutków dławienia przepływu stosując maszyny zastępujące organy dławiące i przetwarzające energię płynu na pracę użyteczną. Maszynami do rekuperacji energii mogą być klasyczne turbiny wodne lub pompy wirowe, przystosowane do pracy turbinowej. Ich włączenie do instalacji przemysłowych nie może zakłócać przebiegu procesów technologicznych, zarówno w ustalonych jak i przejściowych stanach ruchu. Konieczne jest zwłaszcza zabezpieczenie maszyn przed rozbiegiem i gwałtownymi zmianami parametrów ruchu, których skutkiem byłoby uderzenie hydrauliczne.

¹Instytut Maszyn Przepływowych PAN, Zakład Dynamiki Ciepły, ul. Fiszer 14, 80-952 Gdańsk

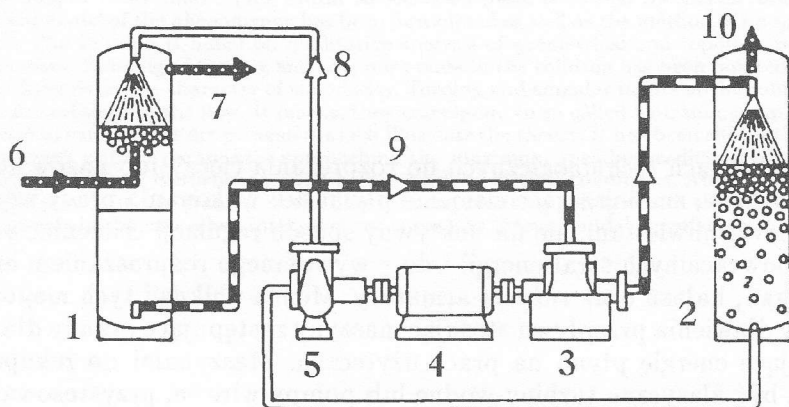
²Fragmenty artykułu były treścią referatu prezentowanego na konferencji HYDROFORUM'94 w Gdańsku.

2. Przegląd instalacji z rekuperacją energii

Największe zainteresowanie wzbudzała dotychczas idea odzysku energii w przemyśle chemicznym w procesach, których cechą znaną jest występowanie stosunkowo dużych spadków ciśnienia [1-2]. Przykład zastosowania maszyny rekuperacyjnej w oczyszczalni gazów technicznych przedstawiono na rys. 1. W tzw. wieży oczyszczania gazu (1), surowy gaz (6) – celem usunięcia zeń niepożądanych składników – jest opłukiwany cieczą oczyszczającą (8). Proces ten odbywa się przy wysokim ciśnieniu. Oczyszczony gaz (7) jest odprowadzany do dalszej obróbki a ciecz oczyszczająca (9) jest poddawana regeneracji w tzw. odpędzaczu (2). Celem regeneracji jest usunięcie z cieczy oczyszczającej zaabsorbowanych produktów gazowych, które wyzwala się podczas jej rozprężania. Konieczność obniżenia ciśnienia cieczy stwarza możliwość przetworzenia zawartej w niej energii na pracę użyteczną. Energia możliwa do odzyskania podczas rozprężania jest proporcjonalna do parametrów hydraulicznych czynnika, które w procesach chemicznych osiągają najczęściej następujące wartości: natężenie przepływu $Q \approx 20$ do $800 \text{ m}^3/\text{h}$, a różnica ciśnień $p \approx 0.7$ do 10.5 MPa [3]. Instalowane w zakładach chemicznych układy rekuperacyjne mają na ogół moc kilkuset kilowatów a odzyskiwana przez nie energia jest zużywana przeważnie do napędu maszyn roboczych

– pom
W

luje się na

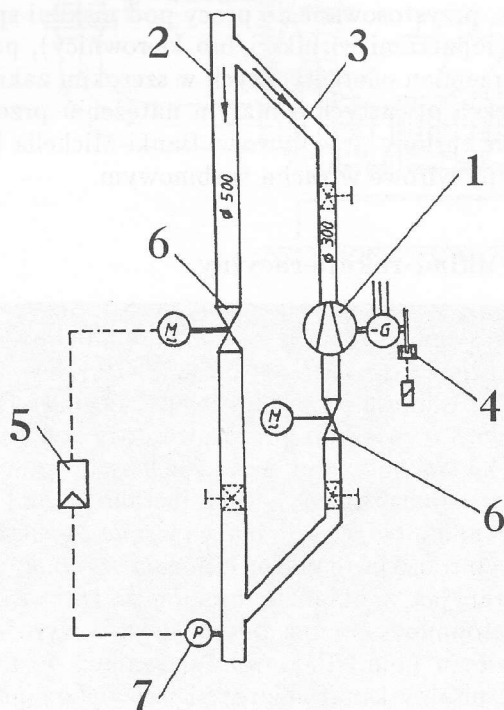


Rys. 1. Układ rekuperacji energii w oczyszczalni gazu [4], 1. wieża oczyszczania gazu, 2. odpędzacz, 3. maszyna rekuperacyjna, 4. silnik, 5. pompa, 6. gaz surowy, 7. gaz oczyszczony, 8. czynnik oczyszczający odgazowany, 9. czynnik oczyszczający zawierający gaz, 10. gaz wydzielający się z roztworu

przykład w wytwórni amoniaku Zakładów Azotowych „Włocławek” [5]. Maszyną rekuperacyjną jest turbina Francisa (produkcji firmy Escher Wyss), wykorzystywana do wspomagania napędu pompy zasilającej kolumnę absorpcyjną (wieżę oczyszczania gazu). Moc turbiny wynosi $N = 415 \text{ kW}$ przy prędkości obrotowej $n = 3000 \text{ obr/min}$. Takie parametry ruchu osiąga ona przy natężeniu przepływu

czynnika roboczego $Q \approx 900 \text{ m}^3/\text{h}$ i spadku ciśnienia wynoszącym $p \approx 2.3 \div 2.4 \text{ MPa}$. Czynnikiem roboczym jest 30% roztwór wodny węglanu potasu (tzw. roztwór Benfielda) o temperaturze $T \approx 100^\circ\text{C}$. Turbina jest wyposażona w kierownicę do regulacji natężenia przepływu, przestawianą za pomocą siłownika pneumatycznego, sterowanego ręcznie lub automatycznie. Sygnałem do przestawienia łopatek kierownicy turbiny jest zmiana poziomu cieczy w kolumnie absorpcyjnej oraz spadek ciśnienia oleju w układzie smarowania turbiny.

Od początku lat osiemdziesiątych w niektórych zakładach wodociągowych w Niemczech, w miejsce zużytych i wymagających remontu urządzeń do redukcji ciśnienia stosuje się seryjnie produkowane pompy wirowe jako turbiny, które w połączeniu z prądnicami prądu zmiennego oprócz wymaganej redukcji ciśnienia umożliwiają ponadto odzysk energii. Przykład takiego rozwiązania technicznego stacji redukcyjnej ciśnienia pokazano na rys. 2. Maszyną rekuperacyjną jest



Rys. 2. Pompa wirowa w ruchu turbinowym jako maszyna do rekuperacji energii w stacji redukcyjnej ciśnienia [6], 1. pompa w ruchu turbinowym, 2. rurociąg główny, 3. przewód obejściowy, 4. hamulec, 5. regulator, 6. zawór regulacyjny, 7. pomiar ciśnienia

dwustrumieniowa pompa wirowa (1), włączona do rurociągu głównego (2) równolegle, za pośrednictwem przewodu obejściowego (3). Jej parametry w ruchu turbinowym dobrano tak, aby przy wymaganym spadku ciśnienia wynoszącym $p = 0.45 \text{ MPa}$, cały przepływ był kierowany przez maszynę rekuperacyjną. W takich warunkach, przy natężeniu przepływu $Q \approx 900 \text{ m}^3/\text{h}$, osiąga ona moc

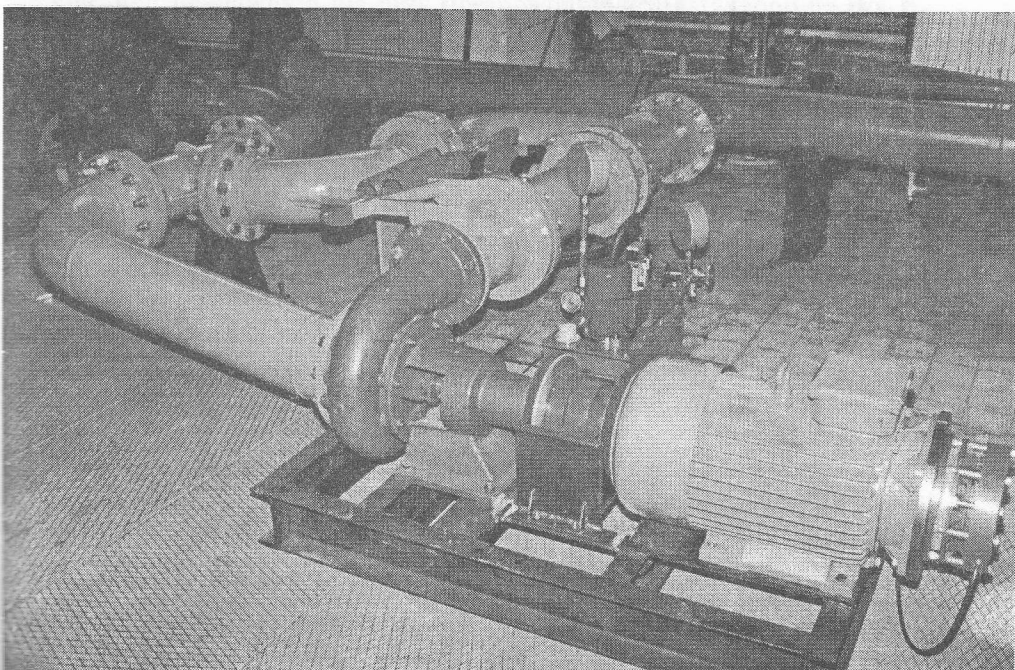
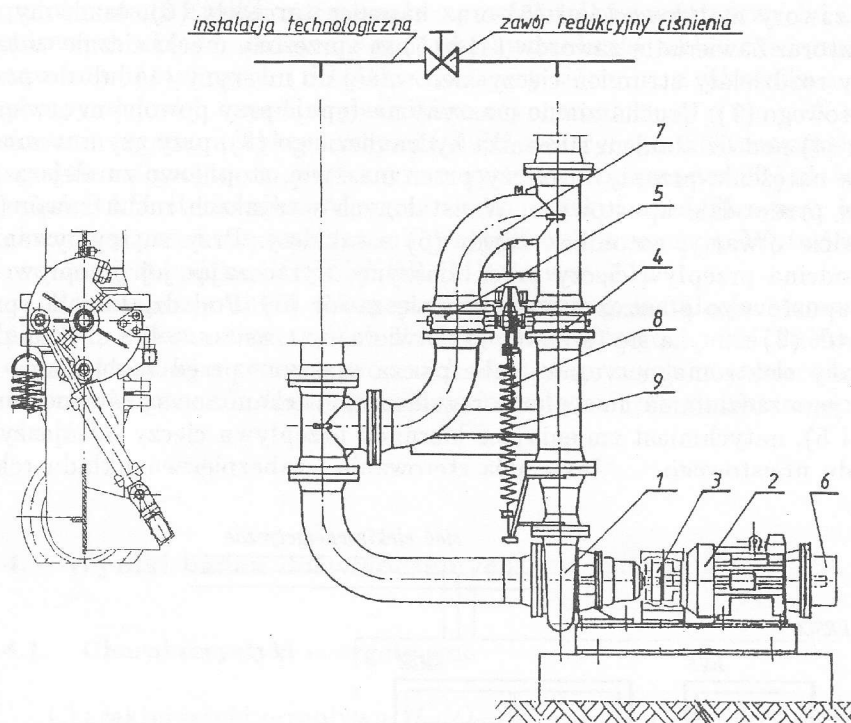
$N \approx 85 \text{ kW}$ [6].

Wymienione dotychczas instalacje przemysłowe stanowią obiegi zamknięte, o stosunkowo małym natężeniu przepływu czynnika roboczego, przy dużych spadkach ciśnienia. Duże spadki ciśnienia, stwarzające możliwość odzyskiwania znaczącej ilości energii, występują również w procesach przeróbki węglowodorów [7], syntezy amoniaku [8], separatorach oddzielających ropę naftową i gaz w szybach wydobywczych, urządzeniach do odsalania wody morskiej [9] i obiegach wody chłodzącej w głębokich kopalniach [10]. W instalacjach tych do rekuperacji energii stosuje się wysokospadowe turbiny Francis'a i Peltona lub wielostopniowe pompy wirowe pracujące w ruchu turbinowym. Zgoda odmienne warunki przepływu występują natomiast w obiegach otwartych, charakteryzujących się przeważnie małymi spadkami ciśnienia. W tego rodzaju instalacjach, jak na przykład w obiegach wody chłodzącej elektrowni ciepłych, bądź też kanałach zrzutowych oczyszczalni ścieków mogą być stosowane klasyczne turbiny wodne rurowe lub śmigłowe, przystosowane do pracy pod niskimi spadami i wyposażone w układy regulacji (łopatkami wirnika i/lub kierownicy), pozwalające utrzymać wysoką sprawność przemian energetycznych w szerokim zakresie zmian natężenia przepływu. W obiegach otwartych o małym natężeniu przepływu cieczy, zastosowanie mogą znaleźć turbiny przepływowe Banki-Michella lub niskociśnieniowe, jednostopniowe pompy wirowe w ruchu turbinowym.

3. Prototypowy układ rekuperacyjny

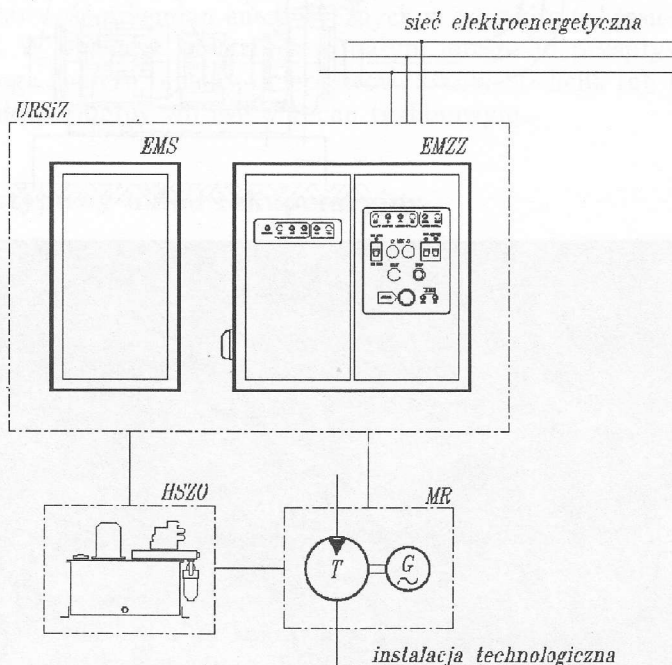
Na rys. 3 przedstawiono schemat i widok układu maszyny rekuperacyjnej, wykonanej w Instytucie Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku. Maszyny i urządzenia należące do układu są produkowane seryjnie. Dobrano je z myślą o zastosowaniu w obiegach o natężeniu przepływu do $Q = 0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ i różnicy ciśnień do $p = 0.35 \text{ MPa}$, jak na przykład w stacjach redukcyjnych ciśnienia w sieci wodociągowej lub przewodach obejściowych instalacji ciepłowniczych. W takich obiegach maszyna rekuperacyjna może być włączona do instalacji technologicznej równolegle, jako swego rodzaju reduktor ciśnienia, zamiast zaworu dławiącego.

Maszyną rekuperacyjną w układzie jest pompa wirowa (1) w ruchu turbinowym. Jest to jednostopniowa pompa odśrodkowa o wyróżniku szybkobieżności $n_{qP} = 45$, z typoszeregu pomp PJM produkowanych w Leszczyńskiej Fabryce Pomp. Posiada ona spiralny kanał zbiorczy i jest wykonana z poziomym wałem oraz tzw. przystawką napędową. W ruchu turbinowym napędza silnik indukcyjny (2), pracujący jako generator asynchroniczny. Jest to silnik o mocy $N = 22 \text{ kW}$, w wykonaniu specjalnym – z wałem do zamocowania hamulca. Obie maszyny są posadowione na wspólnej ramie fundamentowej i połączone sprzęgłem palcowym (3). Celem zapewnienia warunków bezpiecznej eksploatacji i zminimalizowania czynności obsługowych, układ rekuperacji energii wyposażono w instalację automatycznego sterowania. Szczególnie ważnym jej zadaniem jest zabezpieczenie maszyny przed rozbiegiem a równocześnie uniknięcie gwałtownych zmian parametrów ruchu, których skutkiem mogłoby być uderzenie hydrauliczne. Do tego



Rys. 3. Prototypowy układ rekuperacyjny na stanowisku badawczym w laboratorium IMP PAN w Gdańsku

celu służą zawory motylowe (4) i (5) oraz hamulec tarczowy (6), osadzony na wale generatora. Zawieradła zaworów (4) i (5) są sprzężone mechanicznie w taki sposób, aby rozdzielały strumień cieczy kierowanej do maszyny (1) lub do przewodu upustowego (7). Uruchamianie maszyny następuje przy powolnym otwieraniu zaworu (4) pod działaniem siłownika hydraulicznego (8), przy czym w miarę zwiększania natężenia przepływu cieczy przez maszynę, stopniowo zmniejsza się przepływ w przewodzie upustowym. W ustalonych warunkach ruchu zawór (4) jest całkowicie otwarty, natomiast zawór (5) zamknięty. Przy zatrzymywaniu, zawór (4) odcina przepływ cieczy przez maszynę, wymuszając jej przepływ do przewodu upustowego poprzez otwierający się zawór (5). Pod działaniem sprężyn (9) zawór (4) zamyka się (a zawór (5) otwiera) w czasie $\tau \approx 0.3$ s. Hamulec (6), luzowany elektromagnetycznie, zabezpiecza maszynę przed rozbiegiem. W przypadku jego zadziałania na sygnał z regulatora, uruchamiane są równocześnie zawory (4 i 5), natychmiast zmieniające kierunek przepływu cieczy od maszyny do przewodu upustowego. Instalacja sterowania i zabezpieczeń układu rekuperacji



Rys. 4. Schemat blokowy instalacji sterowania i zabezpieczeń układu rekuperacyjnego

składa się z elektronicznego modułu sterującego (EMS) oraz elektrycznej stacji zasilania i zabezpieczeń (EMZZ). Najważniejszym elementem układu jest sterownik komputerowy (serii 90-20 firmy General Electric-Fanuc), zainstalowany w EMS. Na wejście tego sterownika podawane są sygnały wprowadzane przez operatora z

pulpitu stacji EMZZ oraz sygnały z przetworników pomiarowych i członów wykonawczych układu. Jednym z nich jest hydrauliczny układ otwierania/zamykania zaworów motylowych (HSZO), składający się m.in. z siłownika i zasilającej go pompy olejowej, napędzanej silnikiem asynchronicznym o mocy $N = 250$ W. Sterowanie organami wykonawczymi (silniki elektryczne, elektromagnesy), następuje zgodnie z algorytmem, zapisanym w systemie Logicmaster 90 i utrwalonym w pamięci RAM sterownika. Algorytm ten może być modyfikowany, jest natomiast chroniony przed niepowołaną lub przypadkową ingerencją. Wytwórcą układu sterowania jest spółka GOVERNOR IMP-Service [11].

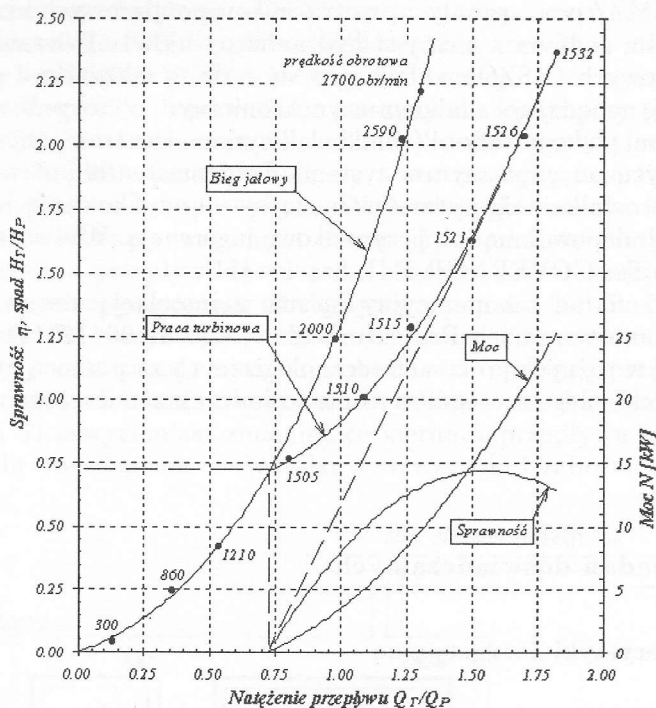
Prototypowy układ rekuperacyjny łącznie z instalacją sterowania i zabezpieczeń, wykonano w ramach Projektu Badawczego nr 904129101 pn. „Odzysk energii traconej w różnych procesach technologicznych za pomocą hydraulicznych maszyn wirowych”. Jego szczegółowy opis techniczny zamieszczono w opracowaniu [12].

4. Wyniki badań doświadczalnych

4.1. Charakterystyki energetyczne

Charakterystyki przepływu $H_T(Q_T)$ w warunkach ustalonego ruchu cieczy w kierunku przeciwnym niż przy pompowaniu, przedstawiono na rys. 5.

Wartości spadu H_T i natężenia przepływu Q_T odniesiono do optymalnej, ze względu na sprawność, wysokości podnoszenia H_P i wydajności Q_P w ruchu pompowym, przy prędkości obrotowej wirnika $n_P = 1500$ obr/min. Charakterystyki $H_T(Q_T)$ określają warunki ruchu maszyny na biegu luzem (moc $N = 0$, $n \neq \text{const}$) oraz w pracy turbinowej ($N > 0$) przy prędkości obrotowej wirnika $1500 < n < 1532$ obr/min. Wskazują, że prędkość równą synchronicznej $n = 1500$ obr/min osiąga maszyna na biegu jałowym pod spadem $H_T = 0.7H_P$ i przy natężeniu przepływu $Q_T = 0.7Q_P$. Natomiast w miarę zwiększania spadu, powiększa się różnica pomiędzy prędkością obrotową wirnika na biegu jałowym a jego prędkością pod obciążeniem. Na przykład przy spadzie $H_T = 2H_P$, prędkość obrotowa maszyny nieobciążonej jest o 70% wyższa od prędkości obrotowej maszyny włączonej do sieci elektroenergetycznej. W tym stanie ruchu prędkość przepływu cieczy jest o ok. 25% niższa, niż w pracy turbinowej. Wynik tego porównania wskazuje, że skutkiem nagłego odciążenia maszyny, na przykład przy zaniku napięcia w sieci elektroenergetycznej, może być znaczny wzrost prędkości obrotowej wirnika i zmniejszenie się prędkości przepływu cieczy. Najkorzystniejsze warunki pracy turbinowej występują przy natężeniu przepływu zmieniającym się w zakresie $Q_T = (1.35 \div 1.75)Q_P$ i spadzie $H_T = (1.40 \div 2.20)H_P$. W takim zakresie zmian parametrów hydraulicznych maszyna osiąga najwyższą sprawność a generowana przez nią moc elektryczna zawiera się w granicach $N = 12$ do 23 kW.



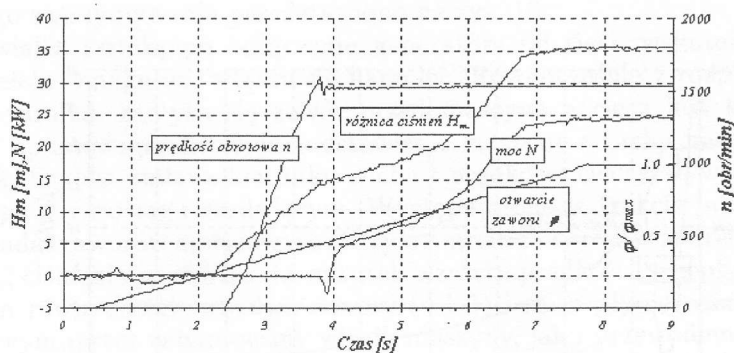
Rys. 5. Charakterystyki przepływu, mocy i sprawności pompy odśrodkowej w ruchu turbinowym

4.2. Przejściowe stany ruchu

Uruchamianie Wirnik maszyny zaczyna się obracać przy otwarciu zaworu (4) równym $\varphi \cong 25\% \varphi_{max}$ (rys. 6), po 2 sek. od momentu uruchomienia siłownika (8). Czas biegu luzem, do chwili włączenia generatora do sieci wynosi $\tau \approx 1.3$ s.

Proces samosynchronizacji generatora z siecią jest krótkotrwały ($\tau = 0.2 \div 0.3$ s) i charakteryzuje się powstaniem chwilowych prądów wyrównawczych oraz wahań prędkości obrotowej, spowodowanych niezgodnością parametrów sieci i generatora w chwili jego włączenia. Zjawisko to nie ma istotnego wpływu na warunki przepływu cieczy. Od momentu włączenia generatora do sieci, jego prędkość obrotowa jest „trzymana” przez sieć a wirnik maszyny działa jak reduktor ciśnienia, odbierający cieczy energię proporcjonalną do różnicy ciśnień i natężenia przepływu. Uruchamianie maszyny z postoju do stanu jej maksymalnego obciążenia, przy jednostajnym otwieraniu zaworu, trwa niespełna 8 sek.

Zatrzymywanie Maszynę można zatrzymać w dowolnej chwili poleceniem STOP (przycisk w stacji EMZZ), którego następstwem jest zamknięcie zaworu (4) pod działaniem sprężyn (9) i skierowanie cieczy do przewodu upustowego. Zmiana kierunku przepływu cieczy od maszyny do przewodu upustowego następuje w ciągu



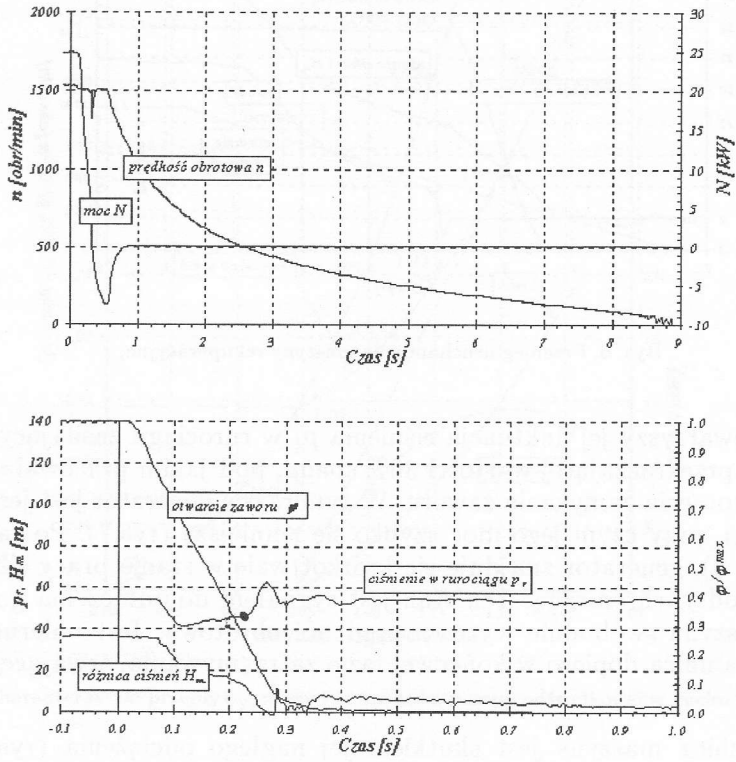
Rys. 6. Przebieg uruchamiania maszyny rekuperacyjnej

$\tau = 0.3$ s. Towarzyszy jej fluktuacja ciśnienia p_r w rurociągu zasilającym, o amplitudzie nie przekraczającej wartości 30% spad, pod jakim pracowała maszyna w czasie rozpoczęcia zamykania zaworu. W tym czasie generator jest jeszcze włączony do sieci, przy czym jego moc szybko się zmniejsza (rys.7). Po zamknięciu zaworu ($\varphi = 0$), generator znajduje się krótkotrwale w stanie pracy silnikowej z prędkością podsynchroniczną. Ten stan jest sygnałem do odłączenia go od sieci, po czym maszyna swobodnie wytraca prędkość obrotową. Jest unieruchamiana za pomocą hamulca dopiero w końcowej fazie zatrzymywania, trwającego 9 sek.

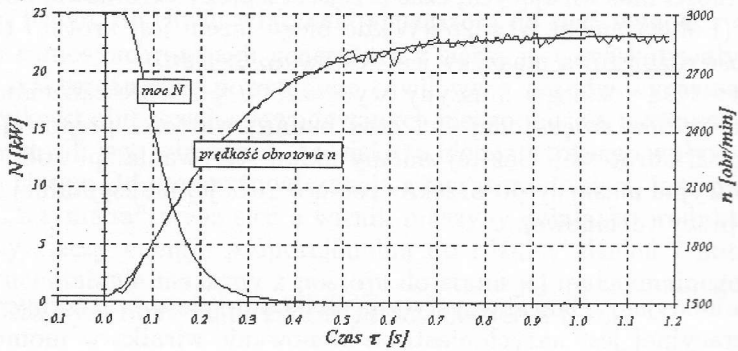
Rozbieg Rozbieg maszyny jest skutkiem jej nagłego odciążenia (rys.8). Wirnik maszyny jest przyspieszany od chwili zmniejszenia się momentu oporu do chwili ponownego zrównoważenia momentu hydraulicznego i momentu oporu w stanie biegu jałowego z prędkością nadsynchroniczną. Ze względu na mały moment bezwładności mas wirujących, czas przejścia z pracy turbinowej pod spadem $H_T = 2.3H_P$ (i obciążeniem $N = 25$ kW) do biegu luzem jest krótki i trwa tylko 1 sek. Prędkość rozbiegowa maszyny jest równa $n_R \cong 1.9n_P$.

Charakterystykę rozbiegu maszyny wyznaczono po wprowadzeniu do programu jej sterowania zwiększonej (na czas badań) wartości progowej, dopuszczalnej prędkości obrotowej. Bez tej zmiany układ sterowania spowodowałby zatrzymanie awaryjne maszyny po przekroczeniu o 20% jej maksymalnej prędkości obrotowej w pracy turbinowej.

Zatrzymywanie awaryjne Charakterystyczną cechą awaryjnego zatrzymywania maszyny rekuperacyjnej jest natychmiastowe hamowanie wirnika w momencie wykrycia przez układ pomiarowy wzrostu prędkości obrotowej powyżej wartości dopuszczalnej (w odróżnieniu od zatrzymywania „normalnego”, w którym maszyna jest najpierw odciążana a dopiero w końcowej fazie hamulec luzuje się i unieruchamia wirnik). Możliwe jest również zatrzymanie maszyny w trybie awaryjnym na polecenie operatora (przycisk AWARIA w stacji EMZZ). Przebieg takiego



Rys. 7. Przebieg zatrzymywania maszyny rekuperacyjnej



Rys. 8. Rozbieg maszyny

awaryjnego zatrzymywania przedstawiono na rys. 10.

Z niewielką zwłoką po odłączeniu generatora od sieci, wskutek przerwania zasilania elektromagnesu, włącza się hamulec. Równocześnie z rozpoczęciem hamowania wirnika, zamyka się zawór przed maszyną a ciecz jest kierowana do przewodu upustowego. Awaryjne odstawienie maszyny z ruchu następuje w czasie 0.4 sek. Szybka zmiana kierunku ruchu i prędkości cieczy wywołuje wahania ciśnienia p_r w rurociągu zasilającym. Występują one w trakcie przemieszczania się zawierań zaworów motylowych. Przy otwarciu zaworów w zakresie od 20% do 80% ϕ_{max} , ciśnienie p_r obniża się wskutek wzrostu prędkości przepływu. Otwarte są bowiem równocześnie obydwie zawory (4 i 5) i ciecz płynie zarówno przewodem głównym, przez zahamowany wirnik maszyny, jak i przewodem upustowym. Ciśnienie w rurociągu zasilającym stabilizuje się krótko po „odcięciu” przepływu przez maszynę i „przerzuceniu” przepływu do przewodu upustowego.

Na rys. 10 przedstawiono dla porównania przebieg ciśnienia p_r przy zamykaniu zaworu bez możliwości skierowania cieczy do przewodu upustowego. Dynamiczna zmiana ciśnienia w rurociągu zasilającym jest 5-krotnie większa niż przy awaryjnym zatrzymywaniu według procedury opisanej powyżej (por. rys. 9 i 10). Przyczyną uderzenia hydraulicznego jest w tym przypadku gwałtowne zmniejszenie się prędkości przepływu w rurociągu od wartości 1.2 m/s do zera.

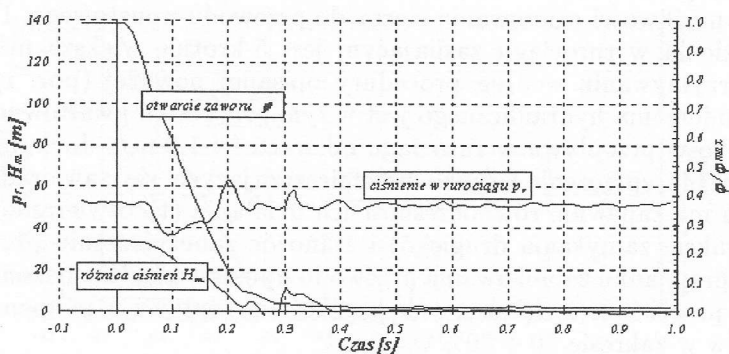
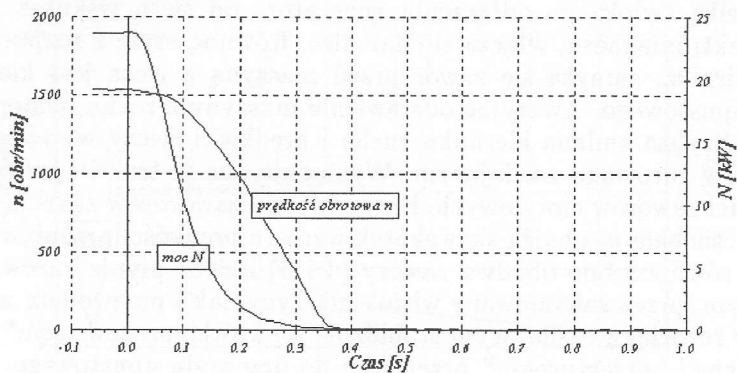
Mechaniczne sprzężenie szybko przemieszczających się zawierań zaworów motylowych ma zapewnić równoczesność ich działania (tj. otwieranie się jednego z nich w trakcie zamykania drugiego) i stanowić zabezpieczenie przed sytuacją taką, jak w przypadku zablokowania przewodu upustowego. Niedoskonałością tego układu jest przejściowe zwiększenie się prędkości przepływu w momencie otwarcia obu zaworów w zakresie 20 ÷ 80% ϕ_{max} .

5. Podsumowanie

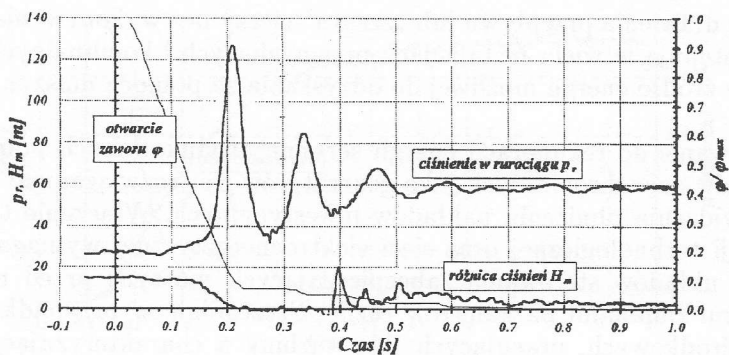
Procesy dławienia przepływu lub „zrzutu” cieczy bez wykonywania pracy użytecznej występują w wielu instalacjach przemysłowych i komunalnych. Stanowią potencjalne źródło energii możliwej do odzyskania za pomocą maszyn hydraulicznych.

Zastosowanie do rekuperacji energii seryjnie produkowanych pomp jako turbin a silników asynchronicznych jako generatorów jest rozwiązaniem korzystnym z punktu widzenia obniżenia nakładów inwestycyjnych. Włączenie tych maszyn do instalacji technologicznej oraz sieci elektroenergetycznej wymaga jednak zastosowania układów sterowania zabezpieczających maszynę przed rozbiegiem i gwałtownymi zmianami parametrów ruchu. Szczególnie w przypadku pomp wirnikowych odśrodkowych, pracujących jako turbiny a charakteryzujących się małym momentem bezwładności mas wirujących i pozbawionych „autonomicznych” urządzeń regulacyjnych, duży wpływ na warunki ruchu wywiera sposób ich sterowania.

Układ sterowania z członami wykonawczymi w postaci hamulca oraz zaworów motylowych skutecznie zabezpiecza maszynę przed rozbiegiem. Zastosowanie



Rys. 9. Przebieg awaryjnego zatrzymywania maszyny



Rys. 10. Przebieg zatrzymywania maszyny w przypadku zablokowania przewodu upustowego

przewodu upustowego, do którego ciecz jest kierowana w trakcie odcinania przepływu przez maszynę, pozwala złagodzić skutki szybkich zmian warunków ruchu.

W niektórych przypadkach zastosowanie hamulca i szybko działających zaworów motylowych można traktować jako alternatywne rozwiązanie układu sterowania. Wybór sposobu sterowania zależy od dopuszczalnych warunków eksploatacji instalacji przemysłowej.

Pracę zgłoszono w marcu 1996

Literatura

- [1] Steller K.: *Zastosowanie wirowych maszyn hydraulicznych do odzysku energii w procesach przemysłowych*, Materiały Konferencyjne HYDROFORUM'80, Porąbka-Kozubnik, 20-23 września 1980.
- [2] Franzke A.: *Benefits of Energy-Recovery Turbines*, Chem. Eng., Feb. 1970.
- [3] Jenett E.: *Hydraulic Power Recovery Systems*, Chem. Eng. April 1968.
- [4] Stankiewicz Z., Łojek A.: *Zapotrzebowanie na odzysk energii traconej wskutek dławienia przepływu w różnych procesach technologicznych*, Oprac. IMP PAN nr 151/93.
- [5] Etzold F.: *Dynamische Probleme beim Einsatz einer Kreiselpumpe als Turbine am Beispiel eines Wasserversorgungsnetzes*, Pumpentagung Karlsruhe'88, Frankfurt/Main, Oktober 1988.
- [6] Apfelmacher R. i inni: *Kreiselpumpen im Turbinenbetrieb bei Zweiphasen-Strömungen*, KSB Berichte 26.
- [7] Steller K. i inni: *Studium teoretyczne nad możliwością zastosowania maszyny hydraulicznej do odzysku mocy w procesie ekspansji amoniaku*, Oprac. IMP PAN nr 87/73.
- [8] Engeda A. i inni: *Auswahl von Kreiselpumpen als Turbinen*. Pumpentagung Karlsruhe'88, Frankfurt/Main, Oktober 1988.
- [9] Prospekt firmy Sulzer Escher Wyss: *Power Recovery Turbines*.
- [10] Riesterer J. C.: *Energy Recovery Turbines in Mining*, Sulzer-Escher Wyss, Ravensburg.
- [11] Klein M., Pacyński S.: *Układ regulacji, zabezpieczeń i połączeń elektrycznych maszyny rekuperacyjnej*, Konferencja HYDROFORUM'94, Straszyn, 21-23 września 1994.

- [12] Stankiewicz Z., Klein M.: *Prototypowa instalacja do rekuperacji energii w Ciepłowni Miejskiej w Łomży. Opis techniczny*, Oprac. IMP PAN nr 292/94.

Energy-recovery machine as a pressure reductor in industrial installations

Summary

A survey of technological installations with the recovery of energy of working medium by means of hydraulic machines is given. A prototype of energy recovery unit with an impeller centrifugal pump operated in turbinizing regime and an induction motor of $N = 22$ kW power operated as an asynchronous generator is described. The machine has been manufactured in the Institute of Fluid-Flow Machinery, in Gdańsk. The paper describes operation principle of the machine and its control system governing the motion of butterfly valves and a brake by means of a programmable controller. Results of laboratory tests under steady-state and transient operation conditions, taking place when starting and stopping the machine, are also presented.