

P O L S K A A K A D E M I A N A U K
I N S T Y T U T M A S Z Y N P R Z E P Ł Y W O W Y C H

PRACE
INSTYTUTU MASZYN
PRZEPŁYWOWYCH

TRANSACTIONS
OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

67-68

WARSZAWA—POZNAŃ 1975

P A Ń S T W O W E W Y D A W N I C T W O N A U K O W E

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

*

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 machinery

KOMITET REDAKCYJNY - EXECUTIVE EDITORS
KAZIMIERZ STELLER - REDAKTOR - EDITOR
JERZY KOŁODKO · JÓZEF ŚMIGIELSKI
ANDRZEJ ŻABICKI

REDAKCJA - EDITORIAL OFFICE
Instytut Maszyn Przepływowych PAN,
80-952 Gdańsk, skr. pocztowa 621, ul. Gen. Józefa Fiszer 14, tel. 41-12-71

Copyright
by Państwowe Wydawnictwo Naukowe
Warszawa 1975

Printed in Poland

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE - ODDZIAŁ W POZNANIU

Nakład 380 + 90 egz.	Oddano do składania 10 I 1975 r.
Ark. wyd. 28,5. Ark. druk. 22	Podpisano do druku 20 IX 1975 r.
Pap. druk. sat. kl. V, 70 g 70×100 cm	Druk ukończono we wrześniu 1975 r.
Nr zam. 112/77	R-17/661 Cena zł 86,-

DRUKARNIA UNIwersytetu im. A. Mickiewicza w Poznaniu

HYDROFORUM

KONFERENCJA NAUKOWO-TECHNICZNA

na temat

WSPÓŁCZESNE PROBLEMY BADAŃ
I EKSPLOATACJI MASZYN HYDRAULICZNYCH

Gdańsk, 3 - 5 października 1973 r.

*

HYDROFORUM

SCIENTIFIC-TECHNICAL CONFERENCE

on

MODERN PROBLEMS OF RESEARCH AND
UTILIZATION OF HYDRAULIC MACHINES

Gdańsk, October 3 - 5, 1973

*

ГИДРОФОРУМ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

на тему

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЙ
И ЭКСПЛУАТАЦИИ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ МАШИН

г. Гданьск, 3 - 5 октября 1973 г.

MARIAN HOFFMANN

Warszawa*

Wpływ rozwiązań konstrukcyjnych i wykonawstwa turbin wodnych na ich dyspozycyjność ruchową

1. Wstęp

Przedstawione poniżej rozważania wynikają z potrzeb poprawnego prowadzenia eksploatacji turbozespołów wodnych, stanowiących podstawową część wytwórczą elektrowni wodnej. Ponieważ jednak każda elektrownia wodna stanowi element składowy danego systemu elektroenergetycznego, dlatego też trzeba ją rozpatrywać na tle systemu i to z punktu widzenia zadań, jakie danej elektrowni wyznaczono do spełnienia w ramach pracy systemu. Krajowy system elektroenergetyczny jest połączony dzisiaj z systemem sąsiednich krajów socjalistycznych i nie jest wykluczone, iż w perspektywie kilkunastu — a może nawet kilku lat — współpracować będzie w systemie krajów zachodniej Europy. Ten aspekt należy mieć na uwadze przy rozpatrywaniu przyszłej roli elektrowni wodnych u nas w kraju i odpowiednio do tego stawiać wymagania dla turbin wodnych, jakie będą w nich instalowane.

Aby elektrownie mogły swe zadania właściwie wykonywać, słuszne będzie postawienie tezy, iż wszystkie zabiegi: badawczo-rozwojowe, konstrukcyjne i projektowe jak i cały cykl produkcyjny i montażowy turbozespołów, a więc i turbin wodnych, powinny zmierzać w takim kierunku, aby po odbyciu tzw. ruchu próbnego turbozespołów w danej elektrowni zostały osiągnięte wszystkie projektowe parametry techniczno-ekonomiczne przy maksymalnej dyspozycyjności ruchowej.

Poniższymi rozważaniami objęte zostały tylko większe turbiny wodne, klasyczne i odwracalne, ze współpracującymi urządzeniami pomocniczymi, z pominięciem problematyki prądnic względnie prądnic/silników oraz pozostałych urządzeń elektrycznych — nie będących tematem obecnej konferencji. W referacie nie porusza się także zagadnień tzw. pomp akumulacyjnych dla elektrowni pompowych, gdyż obecnie oraz w najbliższych latach nie planuje się instalowania ich w nowych elektrowniach wodnych w kraju.

2. Rola elektrowni wodnych w krajowym systemie elektroenergetycznym

Elektrownie wodne są najbardziej elastycznym i sprawnym źródłem energii w systemach elektroenergetycznych, głównie dzięki charakterystycznym cechom zainstalowanych w nich turbozespołów. Tymi zaletami są:

* Zjednoczenie Energetyki.

- wysoka sprawność turbin, dochodząca do 94 %;
- bardzo szybka uruchamialność z postoju do pełnej mocy turbozespołu, rzędu $50 \div 80$ s;
- wysoka dyspozycyjność, rzędu 98 %, wynikająca z dużej niezawodności wszystkich podstawowych urządzeń;
- dowolna ilość uruchomień i zatrzymań – spotykamy przypadki 30 i więcej uruchomień i zatrzymań w ciągu doby;
- bardzo małe zużycie na potrzeby własne, poniżej 0,5 % produkcji;
- łatwa regulacja mocy oraz prosta realizacja automatyzacji i zdalnego sterowania;
- łatwa możliwość pracy kompensatorowej (produkcja energii biernej) i regulacji napięcia w systemie;
- niski koszt utrzymania i wytwarzania, w którym główną pozycję (ok. $60 \div 70$ %) stanowią koszty odpisów amortyzacyjnych;
- niski wskaźnik zatrudnienia;
- nie są uciążliwe dla środowiska, a w przeważającej ilości wypadków stwarzają duże walory rekreacyjne i turystyczne.

Dla elektrowni pompowych dochodzą jeszcze następujące zalety:

- wypełnianie dolin obciążenia systemu, a tym samym poprawa wskaźników techniczno-ekonomicznych elektrowni ciepłych pracujących w podstawie wykresu;
- permanentne ich „odnawianie się”, na skutek pobierania energii elektrycznej na pompownie z coraz ekonomiczniejszych elektrowni ciepłych;
- moc regulacyjna tych elektrowni stanowi sumę mocy turbin i pomp.

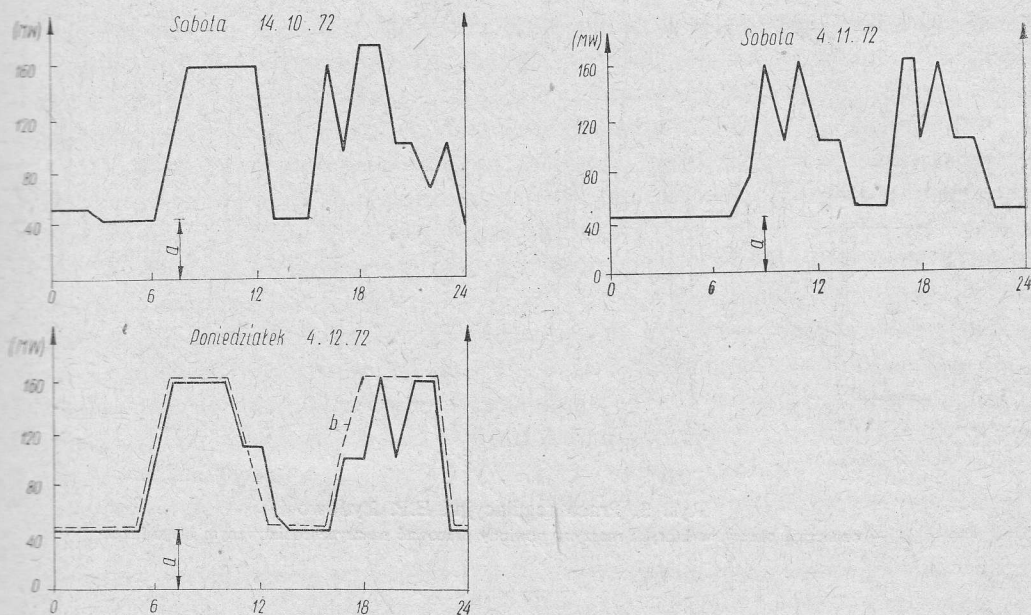
Krajowy system elektroenergetyczny bazujący w dominującym stopniu na elektrowniach ciepłych opalanych węglem, odczuwa silny brak mocy regulacyjnej i interwencyjnej, którą powinny tworzyć elektrownie z turbozespołami szybko-uruchamialnymi i dopuszczającymi częste i znaczne zmiany obciążenia w ciągu doby. Z przedstawionej wyżej charakterystyki elektrowni wodnych widać wyraźnie, iż one właśnie jak najbardziej nadają się dla poprawy „regulacyjności” systemu i to w szczególności przy uwzględnieniu zwiększonych potrzeb w tej dziedzinie przy rozrastającej się współpracy z coraz to nowymi systemami krajów Europy. Według różnych autorów, wartość optymalnego udziału elektrowni regulacyjno-interwencyjnych w pokryciu zapotrzebowania szczytowego jest podawana bardzo różnie i to w granicach ok. $8 \div 25$ %.

Dla potrzeb kraju udział ten powinien wynosić ok. 10 % [1], natomiast przy dalszym rozszerzaniu współpracy z innymi krajami Europy powinniśmy posiadać elektrownie z turbozespołami szybko-uruchamialnymi dla potrzeb regulacji i interwencji w wymiarze 12 % wielkości obciążenia szczytowego.

Obecnie udział elektrowni wodnych regulacyjnych w pokryciu obciążenia szczytowego systemu wynosi zaledwie 5 %, co okazuje się stanowczo za mało.

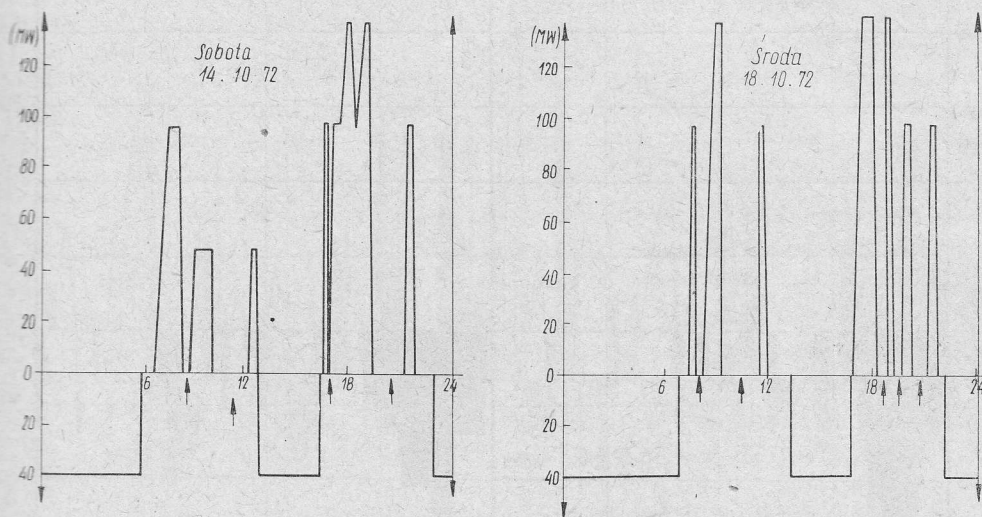
Dla porównania można przytoczyć, iż w systemie elektroenergetycznym RFN elektrownie pompowe pokrywają obecnie 9 % maksymalnego obciążenia systemu, przy czym do 1980 r. udział ten wzrośnie do 11 % [2].

Moc elektrowni wodnych pracujących podstawowo będzie przez długi okres wynosić ok. 100 MW i w ogólnym bilansie mocy można je w przyszłościowych rozważaniach pominąć. Ich rola streszcza się do pokrycia miejscowego zapotrzebowania energii na poziomie



Rys. 1. Praca podszczytowo-regulacyjna E.W. Włocławek

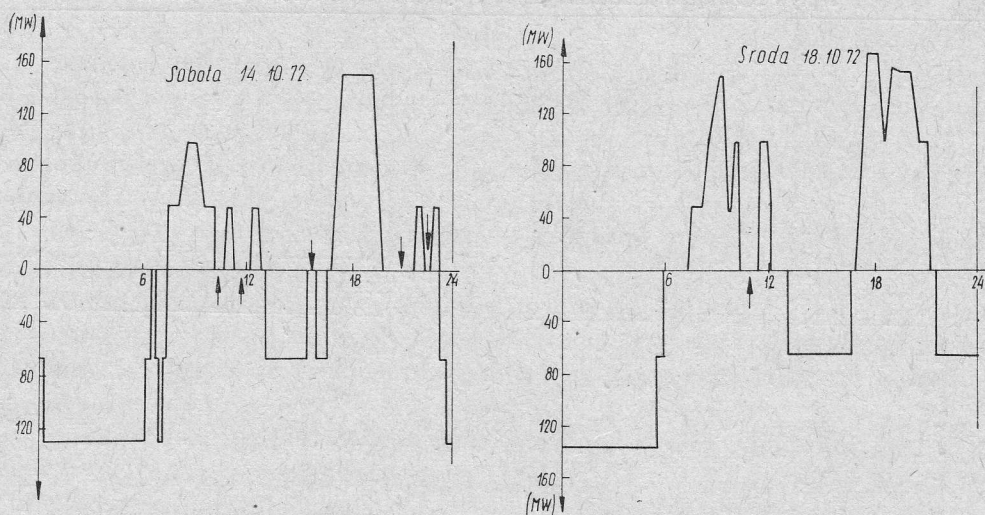
a — obciążenia odpowiadające minimalnemu obowiązkowemu odpływowi z elektrowni ze względu na niżej położonych użytkowników wody (po powstaniu stopnia Ciechocinek $a=0$ [MW]), b — przebieg obciążenia dla planowanej pracy podszczytowej



Rys. 2. Praca regulacyjna E.W. Solina

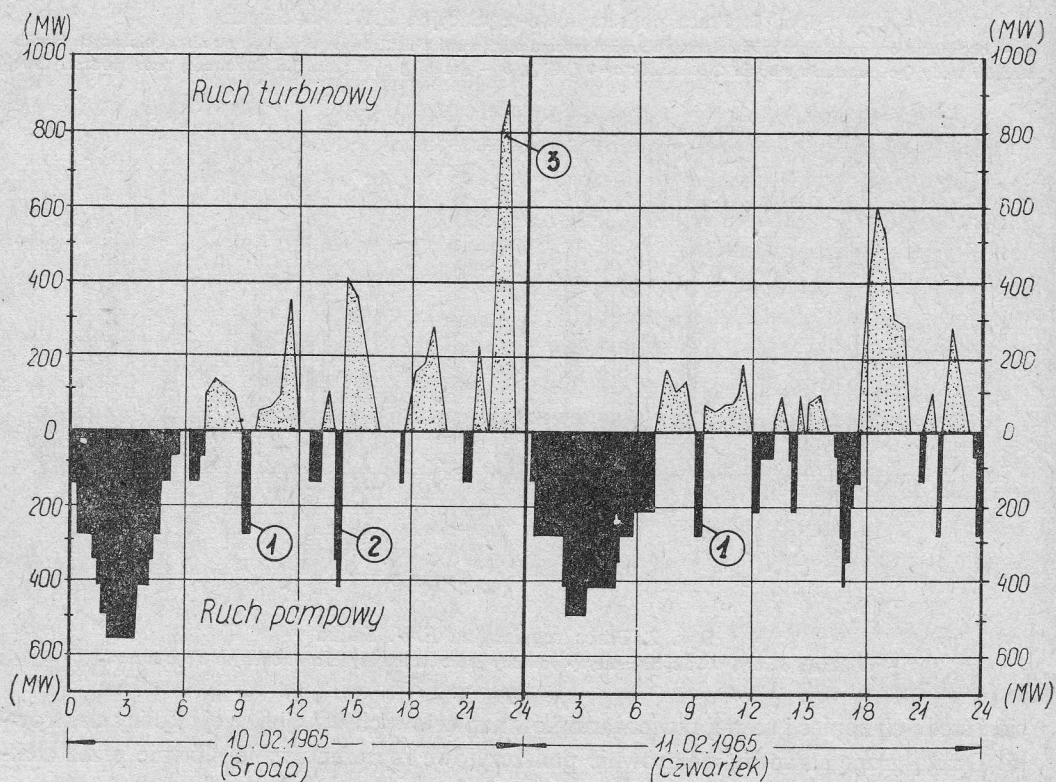
↑ — oznaczają okresy, w których maszyny powinny pracować na zsynchronizowanym biegu luzem

sieci średnich napięć i na poprawie warunków napięciowych w najbliższej okolicy elektrowni. Drugą grupę stanowią elektrownie podszczytowe reprezentowane głównie przez elektrownie kaskady dolnej Wisły. Najprawdopodobniej wyposażone będą one w turbiny rurowe. Do czasu zainstalowania wystarczającej mocy interwencyjno-regulacyjnej w elektrowniach pompowych elektrownie kaskady dolnej Wisły będą pracować w reżymie podszczy-



Rys. 3. Praca regulacyjna E.P. Żydowo

↑ — oznaczają okresy, w których maszyny powinny pracować na zsynchronizowanym biegu luzem



Rys. 4. Elektrownia pompowa Vianden (Luxemburg, pracująca na sieć RFN) $9 \times 100\text{MW} (+1 \times 200\text{MW}$ od 1973 r.)

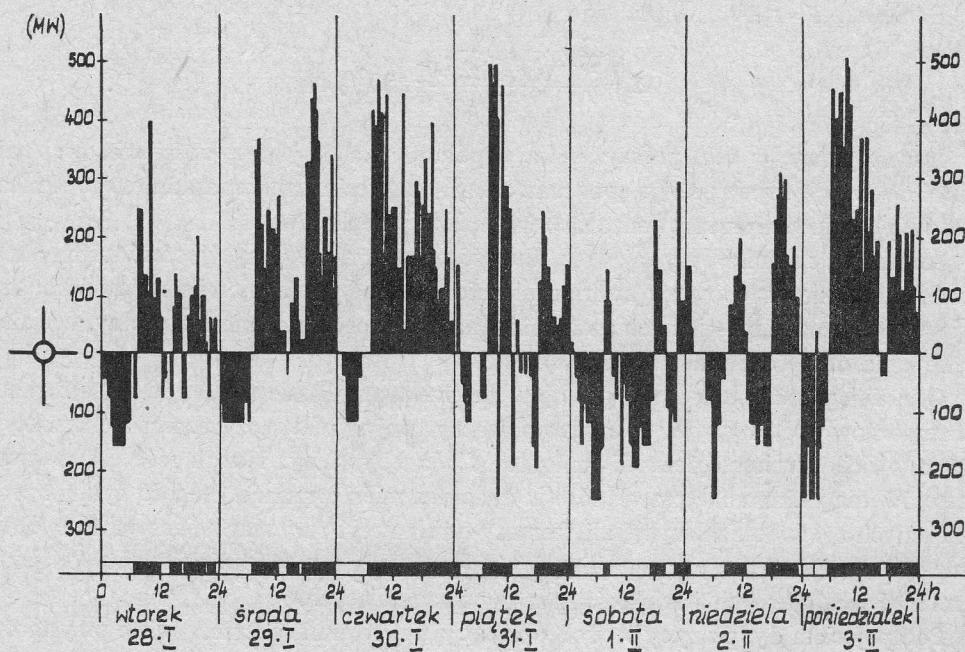
1 — przerwa śniadaniowa, 2 — przerwa obiadowa, 3 — atrakcyjny program telewizji RFN

towo-regulacyjnym, według którego pracuje pierwsza elektrownia powyższej kaskady, a mianowicie we Włocławku. Trzy charakterystyczne wykresy obciążenia dobowego dla tej elektrowni przedstawia rys. 1. W zasadzie elektrownie te, w przypadku istnienia poniżej stopnia wyrównawczego, powinny pracować podszczytowo względnie szczytowo.

Do trzeciej grupy należeć będą elektrownie szczytowe (jak np. Rożnów) oraz szczytowe z członem pompowym, których przykładem jest elektrownia Solina. W elektrowniach tych instalowane są turbiny Kaplana i odwracalne Francisa, a w przyszłości także odwracalne turbiny Deriaza. Elektrownie te pracować będą szczytowo z równoczesnym wykorzystaniem dla zadań regulacyjno-interwencyjnych. Na rys. 2 pokazano wykresy pracy elektrowni Solina dla dni o intensywnym jej wykorzystaniu do pracy regulacyjno-interwencyjnej.

Ostatnia grupa elektrowni, to klasyczne elektrownie pompowe (nie posiadające dopływu naturalnego do zbiornika górnego) spełniające w systemie przede wszystkim rolę elektrowni regulacyjno-interwencyjnych oraz elektrowni szczytowych. Przykłady pracy pierwszej tego typu elektrowni w naszym kraju — E.P. Żydowo przedstawiono na rys. 3. Ta uniwersalność elektrowni pompowych m. in. leży u podstaw olbrzymiego rozwoju ich budownictwa, jaki obserwuje się w ostatnich latach prawie we wszystkich rozwiniętych krajach świata. Potwierdzeniem tej właśnie roli elektrowni pompowych i prawie identycznego ich wykorzystywania za granicą, z punktu widzenia przebiegu obciążenia dobowego, są wykresy przytoczone na rys. 4 i 5.

Z wykresów przedstawionych na rys. 2 ÷ 5 w prosty sposób można odczytać specjalne wymagania, jakie trzeba stawiać szczególnie turbinom odwracalnym instalowanym w kla-



Rys. 5. Przebieg obciążenia tygodniowego zespołu E.P. Vorarlberger Illwerke (Austria) w 1958 r. Moc turbin 575 MW, moc pompowa 290 MW (wg EKG-ONZ dokument ST/EeE/EP/19 Genewa 1963 r.)

sycznych elektrowniach pompowych oraz w elektrowniach szczytowych z członami pompowymi, co będzie omówione w dalszej części opracowania.

Reasumując rolę elektrowni wodnych w krajowym systemie elektroenergetycznym trzeba stwierdzić, iż mają one stanowić źródło energii szczytowej oraz podstawową bazę mocy regulacyjno-interwencyjnej.

3. Dyspozycyjność ruchowa

Jak to określono we wstępie, od turbin wodnych dla większych krajowych elektrowni wodnych wymaga się maksymalnej dyspozycyjności ruchowej, na którą składa się dyspozycyjność czasowa oraz operacyjna.

Dyspozycyjność czasową charakteryzuje się współczynnikiem dyspozycyjności czasowej określanego wzorem:

$$d_t = \frac{\sum t_p + \sum t_r}{T} \cdot 100\%,$$

gdzie $\sum t_p$ — suma czasów pracy rzeczywistej turbiny [h], $\sum t_r$ — suma czasów gotowości ruchowej (h), T — ilość godzin kalendarzowych w okresie obliczeniowym (h).

Wyrażenie $(\sum t_p + \sum t_r) = t_a$ można nazwać „okresem dyspozycyjności turbiny”, a wyrażenie $(\sum t_a + \sum t_n) = t_n$ — „okresem niedyspozycyjności”, przy czym $\sum t_a$ — suma czasów postojów awaryjnych (h), $\sum t_n$ — suma czasów postojów w remontach i przeglądach (h).

Ponieważ $T = t_a + t_n$, wobec tego

$$d_t = \frac{T - (\sum t_a + \sum t_n)}{T} \cdot 100\%.$$

Innymi słowy, w celu podwyższenia współczynnika dyspozycyjności czasowej należy dążyć do przeciwdziałania występowaniu awarii oraz technicznie uzasadnionego skracania czasów postoju dla przeprowadzania remontów i przeglądów.

Analizując czynniki wpływające na długość „okresu niedyspozycyjności” turbiny należy stwierdzić, iż niewystępowanie awarii uzależnione jest od poprawności rozwiązań konstrukcyjnych i doboru odpowiednich materiałów na poszczególne elementy turbiny, od jakości wykonania oraz od poprawnej eksploatacji.

Odnosnie do czasu trwania postojów na przeprowadzenie remontów — abstrahując od remontów poawaryjnych — bardzo poważny wpływ mają rozwiązania konstrukcyjne, a mianowicie „technologiczność remontowa” danej turbiny. Na długość czasu trwania postojów dla dokonania przeglądów w znacznej mierze rzutuje długość cyklu operacji związanych z odwodnieniem spirali, komory turbinowej i rury ssawnej, co może być związane tylko częściowo z samą turbiną i jej konstrukcją, ale najczęściej zależy od jakości zamknięć remontowych i wielkości pomp odwadniających.

Pod pojęciem dyspozycyjności operacyjnej rozumie się rzeczywiste przystosowanie maszyny do najelastyczniejszego operowania nią odpowiednio do potrzeb systemu. Wskaźnikiem określającym dyspozycyjność operacyjną turbozespołu pompowego może być np. suma czasów trwania 4 przebiegów ruchowych, a mianowicie:

- rozruch turbozespołu z postoju do pełnego obciążenia turbinowego – t_T ,
- rozruch turbozespołu z postoju do pełnego wydatku pompowego – t_P ,
- przejście z pełnego obciążenia turbinowego w pełen wydatek pompowy – t_{TP} ,

oraz

- przejście z pełnego wydatku pompowego w pełne obciążenie turbinowe – t_{PT} .

Według danych firmy Escher-Wyss dla turbozespołu odwracalnego o mocy 230 MW przy spadzie 330 m czasy te wynoszą [3] około:

$$t_T = 80'', \quad t_P = 340'', \quad t_{TP} = 470'', \quad t_{PT} = 70''.$$

W danym przypadku wskaźnik dyspozycyjności operacyjnej turbozespołu wynosi:

$$d_{op} = 80 + 340 + 470 + 70 = 960''.$$

Powyższy wskaźnik stosować można przy porównywaniu ofert na dostawę maszyn, a przede wszystkim dla kontroli stanu turbozespołu i jego automatyki w funkcji czasu eksploatacji.

Zakres dyspozycyjności operacyjnej może być różny. I tak dla klasycznego turbozespołu może to być tylko praca turbinowa względnie turbinowa + kompensacyjna. Dla turbozespołu w elektrowni pompowej przy zastosowaniu turbin odwracalnych maksymalny zakres dyspozycyjności operacyjnej jest następujący:

- praca turbinowa,
- praca pompowa,
- praca kompensacyjna przy kierunku wirowania turbinowym,
- praca kompensacyjna przy kierunku wirowania pompowym,
- zsynchronizowany bieg jałowy przy kierunku wirowania turbinowym,
- zsynchronizowany bieg jałowy przy kierunku wirowania pompowym.

Turbozespoły pompowe trójmaszynowe posiadają jeden i ten sam kierunek wirowania wałów dla reżymu pracy turbinowej i pompowej i w związku z tym dla nich istnieje jeden wariant pracy kompensacyjnej i jeden zsynchronizowany bieg jałowy.

4. Wymagania stawiane turbinom wodnym

Mając na uwadze potrzeby systemu oraz opierając się o zdobyte doświadczenia eksploatacyjne i remontowe oraz przeprowadzone badania, wymagania jakie należy stawiać nowoczesnym turbinom wodnym, które będą instalowane w krajowych elektrowniach wodnych można usystematyzować następująco:

1. Wszystkie turbiny (i turbozespoły) zainstalowane w danej elektrowni powinny być jednakowe.
2. Należy od dostawców wymagać turbin o wysokich sprawnościach, przy czym dla turbin odwracalnych należy wymagać wyższych sprawności dla pracy turbinowej.
3. Turbiny dla elektrowni szczytowych i pompowych powinny posiadać szeroki zakres dyspozycyjności operacyjnej, być przystosowane do dużej ilości zmian reżymów pracy w ciągu doby oraz umożliwiać osiąganie przez turbozespół bardzo krótkich czasów zmian reżymów pracy (niski wskaźnik dyspozycyjności operacyjnej).
4. Turbiny winny posiadać możliwie wysokie obroty nominalne.

5. Elementy turbiny opływane przez wodę powinny być bardzo odporne na zjawiska kawitacyjne.

6. Praca turbiny powinna być cicha, bezdrganiowa.

7. Automatykacja powinna umożliwiać szybkie dokonywanie wszelkich zmian reżymów pracy (maksymalny „zakres dyspozycyjności ruchowej”) i to za pomocą jednoimpulsowego pobudzenia, a zastosowana aparatura w układach sterowania i automatyki musi być o najwyższym standardzie światowym.

8. Aparat kierowniczy musi wykazywać w stanie zamkniętym dużą szczelność.

9. Konstrukcja turbiny powinna umożliwiać wygodny dostęp do wszystkich łożysk i części szybko zużywających się, oraz gwarantować łatwą ich wymienialność.

10. Rozwiązania konstrukcyjne i zastosowane materiały powinny gwarantować osiągnięcie współczynnika dyspozycyjności czasowej turbin w wysokości $98 \div 99\%$ w skali rocznej oraz konieczność przeprowadzania remontów kapitalnych nie częściej niż co $5 \div 6$ lat.

Docelowym zadaniem stawianym dla przyszłych dużych elektrowni wodnych podległych Zjednoczeniu Energetyki jest zrealizowanie tzw. systemu „remontów przeglądowych”.

W systemie tym każdy turbozespół wodny podlega raz do roku szczegółowemu przeglądowi, połączoneму z remontem bieżącym (wymiana uszczelki i części szybko zużywających się) oraz z odwodnieniem turbiny i kontrolą elementów opływanych przez wodę. W wyniku takiego przeglądu — który uzupełniony będzie specjalnymi badaniami, jak np. ultradźwiękowymi metodami dla wykrywania pęknięć i wad materiałowych — określi się zakresy i terminy najbliższych remontów. Szacuje się, iż okres trwania dorocznego przeglądu turbozespołu powinien trwać nie dłużej niż $5 \div 6$ dni.

5. Analiza dyspozycyjności turbin wodnych w świetle zastosowanych rozwiązań konstrukcyjnych i jakości wykonawstwa

Po scharakteryzowaniu roli jaką elektrownie wodne odgrywają i mają odgrywać w krajowym systemie elektroenergetycznym oraz po usystematyzowaniu wymagań stawianych turbinom wodnym z punktu widzenia szeroko pojętych potrzeb poprawnej ich eksploatacji, można obecnie przeprowadzić analizę dyspozycyjności turbin wodnych w trzech największych, a zarazem najnowszych elektrowniach wodnych w kraju, jakimi są: elektrownia wodna niskospadowa przy stopniu na Wiśle we Włocławku, elektrownia szczytowa z członem pompowym w Solinie na rzece San oraz pierwsza krajowa klasyczna elektrownia pompowa w Żydowie. Analiza ta przeprowadzona będzie w oparciu o występujące wady i awarie w zestawieniu z rozwiązaniami konstrukcyjnymi rozpatrywanych turbin i jakością ich wykonania. O ile to będzie możliwe, dokona się także porównań z rozwiązaniami i technikami stosowanymi w innych krajach o wysokim poziomie techniki budowy turbin wodnych.

W elektrowni Włocławek — posiadającej 6 turbozespołów z turbinami Kaplana po 26,8 MW — większość postojów awaryjnych i przedłużanie się remontów planowych jest powodowana dwoma mankamentami turbin, a mianowicie:

- zacieraniem się tulei w głowicy rozdzielczej serwowatoru łopat wirnika,
- częstym uszkodzaniem się uszczelki gumowych czopów łopat wirników turbin.

Tabela 1

Dyspozycyjność turbozespołów w E.W. Włocławek

Rok	TZ1		TZ2		TZ3		TZ4		TZ5		TZ6	
	d_t [%]	Postoje [h]	d_t [%]	Postoje [h]	d_t [%]	Postoje [h]	d_t [%]	Postoje [h]	d_t [%]	Postoje [h]	d_t [%]	Postoje [h]
1970 ¹	96,7	150	100,0	—	88,8	500	100,0	—	100,0	—	72,3	1215
1971	87,3	1118	89,8	914	87,6	1083	91,3	713	87,5	1100	99,8 ⁴	19
1972	97,2	262	97,7 ⁴	198	99,3 ⁴	59	88,6	1006	99,4	54	94,2	514
1973 ²	95,0	452	90,8	811	91,5	662	99,7	42	95,7	383	94,4	504
1974 ³	97,4	240	97,4	240	97,4	240	98,1	168	98,1	168	98,1	168
Średnio:	94,72	—	95,14	—	92,92	—	95,54	—	96,14	—	91,76	—

¹ Obejmuje okres od przekazania do eksploatacji — 1 VII 1970 do dnia 31 XII 1970.

² Oszacowano w oparciu o wyniki z 8 miesięcy w roku.

³ Oszacowano w oparciu o plan remontów na 1974 r.

⁴ Obniżenie dyspozycyjności wyłącznie z przyczyn nie związanych z turbiną.

Średnia wartość dla wszystkich turbozespołów wynosi: $(d_t)_{\Sigma} = 95,14\%$.

O ile pierwszą wadę personel elektrowni wraz z Zakładem Remontowym Energetyki w Gdańsku wyeliminował całkowicie dzięki opracowaniu specjalnej technologii wytaczania wymienionych tulei łącznie z ich obudowami (zagwarantowanie dokładnej współosiowości), o tyle drugiej wady nie udało się do dzisiaj opanować. Przebadanie przyczyn tych częstych uszkodzeń jak i opracowanie propozycji przekonstruowania całego układu uszczelniającego czopy łopat wirnikowych turbin Kaplana w E.W. Włocławek powierzono Instytutowi Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku. Firmy zachodnioeuropejskie stosują obecnie do tego typu uszczelnienia różnego rodzaju tworzywa sztuczne, których skład jak i technologia wykonawstwa są strzeżone tajemnicą fabryczną.

Wpływ wyżej opisanych wad na obniżenie dyspozycyjności turbozespołów E.W. Włocławek wynika z tabeli 1. Są poważne podstawy do tego aby można było twierdzić, iż po wyeliminowaniu wady uszczelnień łopat wirników turbin w rozważanej elektrowni można będzie osiągnąć dyspozycyjność w wysokości 98% — zamiast obecnej 95,14% — gdyż rozwiązania i wykonawstwo części przepływowej turbin jest nienaganne.

Tabela 2

Dyspozycyjność turbozespołów w E.W. Solina

Turbozespół nr	Typ turbozespołu	$(d_t)_{\Sigma}$ [%]	1969		1970		1971		1972		1973 ¹		1974 ²	
			d_t	Po- stoje	d_t	Po- stoje	d_t	Po- stoje	d_t	Po- stoje	d_t	Po- stoje	d_t^*	Po- stoje
			[%]	[h]	[%]	[h]	[%]	[h]	[%]	[h]	[%]	[h]	[%]	[h]
1	klasyczny	98,31	97,0	280	93,5	789	95,4	413	89,0	967	94,4	485	93,6	528
2	klasyczny	94,81	95,8	371	96,6	293	94,1	523	96,0	350	92,8	641	93,6	528
3	odwracalny	76,25	36,1	5601 ³	78,4	1887	90,8	810	93,4	587	86,2	1214	72,6	2400
4	odwracalny	85,62	67,8	2818 ⁴	88,4	1015	93,4	579	94,3	502	86,3	1200	93,6	528

¹ Oszacowano w oparciu o wyniki z pierwsze 8 miesięcy roku.

² Określenie dyspozycyjności uwzględniającej tylko postoje na remonty planowe, bez uwzględnienia odstawień awaryjnych; d_t^* — wskaźnik dyspozycyjności „częściowy”.

³ W tym 5280 h na rekonstrukcję wirnika turbiny i mechanizmów aparatu kierowniczego.

⁴ W tym 2458 h na rekonstrukcję wirnika turbiny.

Średnia wartość dla wszystkich turbozespołów wynosi: $(d_t)_{\Sigma} = 87,62\%$.

W elektrowni Solina są zainstalowane dwa turbozespoły klasyczne, każdy z turbiną Francisa o mocy 48 MW i średnicy spawanych wirników 4460 mm, oraz dwa turbozespoły z turbinami odwracalnymi typu Francisa o mocy 21,2 MW, których wirniki, w całości odlewane, miały przy dostawie średnicę 4500 mm.

Zestawienie współczynników dyspozycyjności przedstawiono w tabeli 2. Wady konstrukcyjne, wykonawcze i materiałowe turbin elektrowni solińskiej można podsumować następująco:

W odniesieniu do turbin klasycznych stwierdzono występowanie pęknięć łopat wirników przy górnej piastie oraz bardzo intensywne zjawiska kawitacyjne w górnej części kanałów międzyłopatkowych. Przyczyną pęknięć łopat wirnika jest niewłaściwie przeprowadzony proces spawania łopat z nadlewkami górnej piasty jak i przekroczenie dopuszczalnych naprężeń w miejscu przejścia nadlewów w górną piastę. Należy tu podkreślić, iż wykonawca w celu obniżenia kosztów własnych nie wykonał powyższych wirników w całości odlewanych ze staliwa nierdzewnego lecz przeszedł na konstrukcję spawaną i to przy zastosowaniu dwu gatunków stali: łopaty ze staliwa chromowo-niklowego, górna piasta ze staliwa węglowego, nieodpornego na erozję kawitacyjną. Występowanie silnych zjawisk kawitacyjnych oraz erozji jest następstwem niewłaściwego rozwiązania kanałów międzyłopatkowych z punktu widzenia hydraulicznego (niewystarczające badania modelowe) oraz zastosowania niewłaściwego materiału. Poza tym erozja kawitacyjna oddziaływała ujemnie na osłabienie strefy występowania pęknięć.

Powyższe zjawiska powodują obniżanie dyspozycyjności turbin klasycznych:

- przez powiększenie zakresu robót remontowych,
- przez konieczność dokonywania aż kilkakrotnych przeglądów turbiny w ciągu roku, w celu przeprowadzenia kontroli stanu wirników (co wymaga całkowitego odwodnienia spirali, komory wirnika i rury ssawnej).

Zawarte w tabeli 2 wskaźniki dyspozycyjności turbin odwracalnych w elektrowni Solina należy uznać za bardzo niskie jak dla maszyn wodnych. Turbiny w Solinie wykazują szereg wad konstrukcyjnych, których przyczyn należy doszukiwać się w niedostatecznym rozeznaniu przez konstruktorów (głównie na skutek małego zakresu badań modelowych) specyficznych cech i zjawisk, jakie związane są z tego rodzaju maszynami hydraulicznymi. Ujawnione mankamenty można podzielić na dwie zasadnicze grupy, a mianowicie na:

- niewłaściwe zaprojektowanie wirników pod względem hydraulicznym, objawiające się w uzyskaniu nieodpowiednich warunków pracy dla ruchu pompowego, co w rezultacie pociągnęło za sobą konieczność przeprowadzenia rekonstrukcji wirników tych turbin,
- nierozeznanie wielkości i charakteru sił, jakie występują w całym układzie mechanizmów w samych łopatkach aparatu kierowniczego, a w szczególności w okresach zmian stanu pracy maszyny. Fakt ten doprowadza do uszkodzeń łopatek kierowniczych (pękanie w miejscu przejścia łopatki w czop napędowy) oraz „rozbijania” mechanizmów napędowych jak i tulei łożysk łopatek aparatu kierowniczego.

W odniesieniu do rekonstrukcji wirników turbin odwracalnych polegającej na powiększeniu ich średnicy o 50 mm i zmianie kątów wylotowych dla pracy pompowej, co uzyskano przez przyspawanie listew przedłużających łopatki, należy stwierdzić, iż poprawiono charakterystykę dla pracy pomp przy dużych wysokościach podnoszenia, natomiast przy niskich wysokościach podnoszenia powstała nowa wada – wystąpił tak duży pobór

mocy, że elektryczne silniki napędowe będą przeciążone. W związku z tym pompowanie będzie ograniczone od dołu do ok. 49,00 m, zamiast oferowanej minimalnej wysokości podnoszenia 43,00 m. Drugim ujemnym zjawiskiem jakie wystąpiło w wyniku rekonstrukcji jest to, iż w miejscach przyspawania listew przedłużających łopatki do dolnych pierścieni wirnika pojawiły się pęknięcia. Jeśli chodzi natomiast o cały układ kierowniczy, to na skutek bardzo dużych naprężeń dynamicznych oddziaływających na łopatki kierownicze wystąpiły na nich pęknięcia oraz wybijanie panewek łożyskowych. Te ostatnie zjawiska prowadzą do urywania się trzpieni tłoków aretujących łopatki w czasie pracy pompowej. Tylko w roku bieżącym trzpienie były uszkodzone pięciokrotnie. Poza tym okazało się, iż uszczelnienia gumowe łopatek kierowniczych są niewłaściwe — ulegały zniszczeniu w bardzo krótkich odstępach czasu. Zrekonstruowano je na układ uszczelnienia „stal na stal”, które jednakże nie zapewniają wymaganej szczelności oraz stwarzają warunki do występowania erozji kawitacyjnej w miejscach styków sąsiadujących łopatek.

Tak więc wady konstrukcyjne powodują i w tym przypadku dwojakie oddziaływanie na obniżenie się wskaźnika dyspozycyjności tych maszyn — przez powiększenie zakresu robót remontowych oraz konieczność częstego odstawiania turbozespołu z ruchu (połączonego z odwodnieniem turbiny) w celu dokonania kontroli stanu turbiny. Najwyższa wartość wskaźnika dyspozycyjności została osiągnięta przez turbozespół nr 4 w roku 1972 — w wymiarze 94,3%. Poza tym powstało zawężenie „zakresu dyspozycyjności operacyjnej” w wyniku ograniczenia zakresu wysokości podnoszenia w pracy pompowej, co jest szczególnie niekorzystne, gdyż dotyczy niskich poziomów w zbiorniku, a więc okresów niskich dopływów naturalnych.

Poza tym „przejścia” na pracę kompensacyjną względnie na zsynchronizowany bieg jałowy są bardzo utrudnione, głównie na skutek niedostatecznej szczelności aparatu kierowniczego. W konsekwencji powyższego, konieczność przerwania pracy turbozespołu (pompowej lub turbinowej) na krótki okres czasu wymaga odłączenia turbozespołu od sieci, co oznacza manewrowanie wyłącznikami bloków, które nie są przystosowane do wykonywania tak znacznej ilości manewrów. Stąd powstaje oddziaływanie ujemne na część elektryczną elektrowni, do której zaliczamy wyłączniki blokowe. Powyższy mankament uwypuklono na rys. 2 za pomocą strzałek.

W elektrowni pompowej Żydowo w zasadzie wystąpiły podobne niedomagania jak w elektrowni Solina, jednakże w mniejszym nasileniu i zakresie. Podstawowym błędem w odniesieniu do turbozespołów odwracalnych było występowanie zwiększonego poboru mocy w pracy pompowej w stosunku do wartości przewidywanych w projekcie. Z dwóch alternatyw rozwiązania problemu — zmniejszenia średnicy wirnika turbiny przez skrócenie łopatek wirnika względnie poprawienie warunków chłodzenia prądnicy/silnika — wybrano drugie rozwiązanie, które ma jednakże tę niedogodność iż przewidywana produkcja energii biernej przy pracy pompowej nie jest możliwa. Zarówno na łopatkach aparatu kierowniczego — w identycznych miejscach jak w elektrowni solińskiej — jak i na łopatkach wirnika turbin odwracalnych wystąpiły pęknięcia. Po raz pierwszy w praktyce krajowej wystąpiły tutaj pęknięcia na stałych łopatkach turbiny (tzw. statora) w miejscach ich połączeń ze spiralą. Dotyczy to obu turbin odwracalnych w Żydowie. Przyczyna tego zjawiska nie została jeszcze określona. Tak jak w Solinie na turbinach klasycznych, również w E.P. Żydowo wystąpiła bardzo silna erozja kawitacyjna wirników turbin odwracalnych,

których konstrukcja jest także spawana, i to przy zastosowaniu staliwa chromowego oraz stali węglowej (na górne piasty wirników). Natomiast na turbinie klasycznej obserwuje się szczególne nasilenie zjawisk kawitacyjnych połączonych z dużymi ubytkami materiału na łopatkach wirnika. Maksymalne głębokości wżerów po 4659 godz. pracy od uruchomienia wynoszą 11 mm.

Przy wszystkich turbinach E.P. Żydowo występują nieszczelności aparatów kierowniczych. Są one tak duże, że konieczne było wprowadzenie zamykania zaworów motylowych przy wlotach do turbin przy każdym zatrzymaniu zespołu. Wpłynęło to oczywiście na przedłużenie podstawowych operacji ruchowych, a tym samym pogorszyło wskaźnik dyspozycyjności operacyjnej. Także — na skutek tej samej wady aparatu kierowniczego — nie realizuje się pracy kompensacyjnej i zsynchronizowanego biegu luzem dla turbinowego kierunku obrotów wirnika, co wpłynęło na obniżenie „zakresu dyspozycyjności ruchowej”. Mankament ten z punktu widzenia ruchowego pokazano na rys. 3.

Bardzo szybkie niszczenie się gumowych uszczelnień łopat kierowniczych turbiny nr 3 (klasycznej) jest powodem trudności w stosowaniu turbiny do pracy kompensacyjnej, która często jest koniecznym zabiegiem ruchowym, w celu umożliwienia pracy pompowej TZ1 i TZ2, wtedy, gdy w systemie 220 kV występują niskie poziomy napięć. Pewne kłopoty stwarzają także uszczelnienia węglowe wałów turbinowych, na skutek szybkiego zużywania się węgla oraz bardzo trudny dostęp do łożysk nośnych i promieniowych.

Dyspozycyjność turbozespołów w E.P. Żydowo

Tabela 3

Turbo- zespół nr	Typ turbozespołu	$(d_t)_{\text{sr}}$	1971			1972			1973 ¹			1974 ²	
			d_t	Postoje	d_{tm}^3	d_t	Postoje	d_{tm}^3	d_t	Postoje	d_{tm}^3	d_t^*	Postoje remon- towe
			[%]	[%]	[h]	[%]	[%]	[h]	[%]	[%]	[h]	[%]	[h]
1	odwracalny	92,33	88,5	964 ⁴	97,4	96,7	285	97,2	95,0	450	95,7	89,1	960
2	odwracalny	88,67	76,6	1864 ⁵	90,6	95,9	358	96,3	87,7	1088	88,3	94,5	480
3	klasyczny	88,97	76,8	1752 ⁶	92,3	94,5	480	94,6	95,5	403	95,8	89,1	960

¹ Oszacowano w oparciu o wyniki za pierwsze 8 miesięcy roku.

² Określenie dyspozycyjności uwzględniające tylko postoje na remonty planowe, bez uwzględnienia odstawień awaryjnych; d_t^* — wskaźnik dyspozycyjności „częściowy”.

³ d_{tm} oznacza wskaźnik dyspozycyjności urządzeń mechanicznych z wyeliminowaniem postojów związanych z uszkodzeniami wyposażenia elektrycznego turbozespołów, tzn. generatora, transformatora blokowego, aparatury elektrycznej, oszynowania itp.

⁴ W tym 725 h postoju na modernizację generatora i sterowania zasuwy.

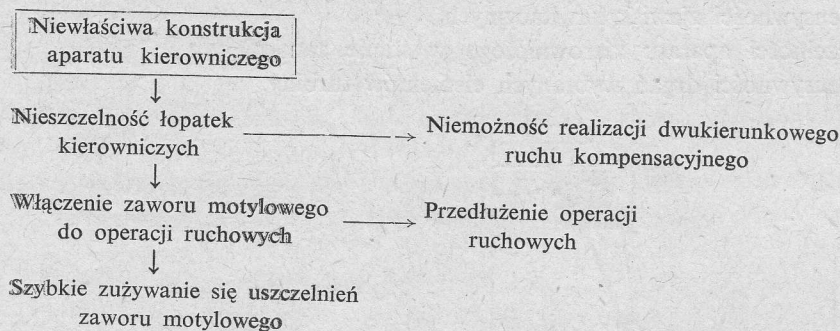
⁵ W tym 1137 h postoju na skutek uszkodzenia transformatora blokowego i wyłącznika bloku.

⁶ W tym 1164 h na naprawę uzwojeń stojana generatora.

Średnia wartość dla wszystkich turbozespołów wynosi: $(d_t)_{\text{sr}} = 89,99\%$.

Wszystkie wyżej wymienione wady turbin w elektrowni Żydowo oddziałują na obniżenie wskaźnika dyspozycyjności czasowej, co obrazuje tabela 3. Warto tu podkreślić jeszcze jeden fakt, iż każda wada pociąga za sobą ujemne oddziaływania na cechy ruchowe turbozespołu, a przede wszystkim na wskaźnik dyspozycyjności czasowej (d_t), a niekiedy także na wskaźnik dyspozycyjności operacyjnej (d_{op}) oraz na „zakres dyspozycyjności operacyjnej” (ZDO). Prześledzić można tę zależność np. na przykładzie nieszczelności

łopatek kierowniczych, której pierwotną przyczyną jest wadliwa konstrukcja całego mechanizmu aparatu kierowniczego.



6. Wnioski ogólne

Z wyżej przytoczonej analizy dyspozycyjności turbin wodnych można wyciągnąć wnioski i podać zalecenia, przestrzeganie których spowodowałoby poprawę dyspozycyjności ruchowej krajowych elektrowni wodnych.

1. Podstawowym wymaganiem, którego spełnienie jest nieodzownym warunkiem podpisania kontraktu na dostawę wielkich turbin wodnych jest przeprowadzenie pełnego zakresu badań modelowych na całkowicie odwzorowującym oferowaną turbinę modelu laboratoryjnym, obejmującym turbinę wraz ze spiralą i rurą ssącą. Badania muszą być przeprowadzone w obecności przedstawicieli nabywcy i to dla wszelkich stanów ruchowych z określeniem sprawności, warunków kawitacyjnych, wielkości mocy dla reżymów pompowych (turbiny odwracalne), sił działających na aparat kierowniczy itp.

2. Wirniki turbin, łopatki kierownicze, komory wirnikowe i ewentualnie górne partie rur ssących powinny być wykonane ze specjalnego staliwa chromowo-niklowego, odpornego na kawitację.

3. Przed podpisaniem kontraktu na dostawę należy dokonać wnikliwej analizy rozwiązań mechanizmów napędowych aparatu kierowniczego, oceny wytrzymałości łopat kierowniczych na siły statyczne i dynamiczne, analizy warunków remontowych (dostęp, możliwości demontażu) itp.

4. Rozwiązanie turbiny musi być tego rodzaju, aby był łatwy dostęp do dolnych części łożyskowych łopatek kierowniczych i była możliwość wymiany ich tulei, bez konieczności demontażu całej turbiny [3] (rys. 6).

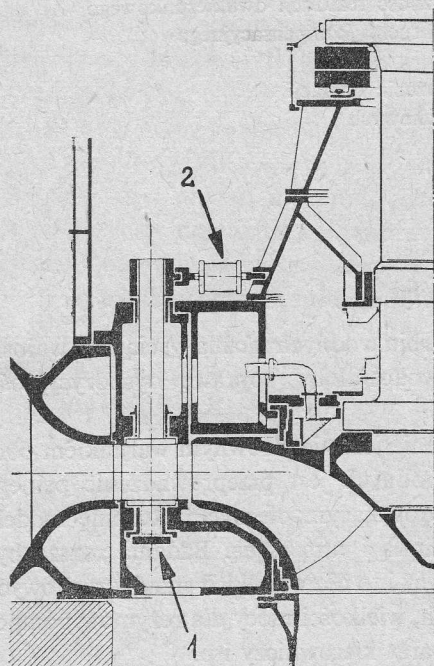
5. Należy zrewidować gatunek staliwa stosowanego w budowie turbin wodnych [4]. Dotychczas stosowane staliwo o zawartości ok. 13% Cr i 1% Ni należy zastąpić staliwem o zwiększonej zawartości niklu do 4%, wykazującym lepsze właściwości spawalne, bez konieczności stosowania wstępnego podgrzewu przy zabiegach remontowych.

6. Dla dużych turbin odwracalnych należy przeanalizować opłacalność stosowania rozwiązań z indywidualnymi serwowatorami napędowymi dla łopatek kierowniczych [3, 5], które gwarantują większą szczelność kierownicy oraz niższy poziom hałasu (rys. 6).

7. W celu podwyższenia poziomu eksploatacji, a tym samym poprawy wskaźnika dyspozycyjności wielkich turbin wodnych, a w szczególności odwracalnych, należy wypo-

sażyć je w specjalne urządzenia kontrolno-pomiarowe dla określenia następujących zjawisk zachodzących w turbinie:

- intensywności zjawisk kawitacyjnych,
- szczelności aparatu kierowniczego w stanie zamkniętym
- intensywności drgań wybranych elementów turbiny.



Rys. 6. Turbina odwracalna nr 10 w E.P. Vianden w Luxemburgu [3]

1 – dojście do dolnych łożysk łopat kierowniczych, 2 – indywidualne serwomotory łopat kierowniczych

8. Dla właściwego rozwoju elektrowni wodnych konieczne jest zrealizowanie pewnych specjalnych studiów i badań dotyczących wielkich turbin wodnych, a mianowicie:

- porównanie przydatności maszyn odwracalnych Francisa z maszynami Deriaza dla średnich spadów, a w szczególności dla dużej ich zmienności,
- przeprowadzenie analizy techniczno-ekonomicznej rozwiązań wirników turbin Francisa według technologii spawanej i odlewanej w całości,
- opracowanie kompleksowej metodologii pomiarów naprężeń na podstawowych elementach turbin, a w szczególności tych, które ulegają uszkodzeniom w elektrowniach Solina i Żydowo,
- przeprowadzenie analizy doboru optymalnych materiałów na uszczelnienia czopów łopat wirników turbin Kaplana.

Literatura

- [1] P. Kiżewski, E. Proppe, *Optymalny dobór elektrowni pompowych przy planowaniu rozwoju polskiego systemu energetycznego*. Instytut Energetyki, Warszawa 1971.
- [2] J. Frohnholzer, *Charakteristik des Betriebs von Pumpspeicherwerken für die Stromversorgung der Bundesrepublik Deutschland*. Energie Nr 2, 1973.

- [3] E. H. Mühlemann, *Hydraulische Maschinen für Pumpspeichieranlagen und Vergleiche von Kosten, Wirkungsgraden und Anfahrzeiten*. Escher Wyss Mitteilungen Nr 1, 1972.
- [4] R. Küpfer, *Ein neuer Stahlgusswerkstoff für hydraulische Maschinen*. Technische Rundschau Sulzer Nr 4, 1966.
- [5] K. Haenmaier, *Elektro-hydraulische Einzel-Leitschaufelregelung bei Wasserturbinen*. Energie und Technik, Nr 5, 1973.

Influence of Design Solutions and Execution of Water Turbines on their Operating Disposability

Summary

A thesis is advanced to the effect that all proceedings undertaken when constructing a water-power plant — beginning from the design — should aim at one goal, namely: to obtain immediately after putting the power plant into service the assumed operating parameters at the maximum disposability of the turbine sets installed.

The part which the water-power plants play in the national power network is presented next. The concepts of the operating disposability of a power plant and its equipment are described. Requirements to be met by modern water turbines are systematized.

Experience gained during the operation of three water-power plants recently built in this country served for pointing out the influence of an improper design of turbine sets and use of inadequate materials on the decrease of the operating disposability of these power plants.

Влияние конструкторского решения и изготовления гидротурбин на их эксплуатационную способность

Резюме

Во вступлении выдвигается тезис, что всякие мероприятия, связанные с постройкой гидроэлектростанций, начиная с конструкторских и проектных работ, должны быть направлены на достижение одной цели, т. е. на достижение электростанцией, сразу после введения ее в эксплуатацию, предположенных рабочих параметров при максимальной эксплуатационной способности установленных турбоагрегатов. Затем обсуждается роль гидроэлектростанций в отечественной электроэнергетической системе. Характеризуются понятия эксплуатационной способности электростанции и ее оборудования, а также систематизируются требования предъявляемые современным гидротурбинам. На основе опыта, накопленного в трех новейших отечественных электростанциях, доказывается влияние неправильных конструкторских решений турбоагрегатов, а также применения несоответствующих материалов на понижение эксплуатационной способности этих электростанций.