

Dr inż. Andrzej Miller
Instytut Techniki Ciepłej

TURBINY PAROWE WIELKIEJ MOCY

Konieczność zaspokojenia stale wzrastającego zapotrzebowania na energię elektryczną przy jednoczesnej konieczności oszczędzania środków inwestycyjnych oraz dążenie do lepszego wykorzystania możliwości produkcyjnych przemysłu urządzeń energetycznych w naturalny sposób prowadzą do projektowania i budowy turbin parowych o coraz większej mocy. Pojęcie "wielkiej mocy" jest w związku z tym zmienne i moc ta wykazuje stałą tendencję wzrostu.

W latach pięćdziesiątych w Europie moc jednostkowa turbozespołów nie przekraczała 200 MW. W tym okresie w USA budowano zespoły o mocach 300 ÷ 500 MW, przy czym znaczna część tych zespołów miała układ dwuwałowy [2]. Ówczesny poziom mocy jednostek wynikał zarówno z wielkości systemów energetycznych, jak i różnorodnych poważnych trudności konstrukcyjnych, związanych z powiększeniem mocy tak turbin parowych, jak i generatorów elektrycznych. Od tego czasu nastąpił wyraźny postęp w budowie turbozespołów parowych wielkiej mocy. Obecnie budowane są zespoły o mocach do ok. 850 MW w układzie jednowałowym oraz do ok. 1300 MW w układzie dwuwałowym. W stadium projektowania znajdują się turbozespoły o mocach rzędu 1500 MW i więcej.

Analiza danych statystycznych dotyczących rozwoju energetyki na świecie wykazuje, że przy podwojeniu mocy zespołu, w szczególności z poziomu 200 ÷ 250 MW do ok. 500 MW, spodziewać się można istotnego zmniejszenia kosztów inwestycyjnych przy jednoczesnej pewnej poprawie sprawności. Poprawa sprawności jest większa, jeśli przy powiększaniu mocy wprowadzane są

usprawnienia w układzie cieplnym turbozespołu, co zazwyczaj jest uzasadnione i stosowane. Ze zwiększeniem mocy maleje również liczebność obsługi w odniesieniu do jednostki mocy. W związku z tym, przy podwojeniu mocy jednostki, spodziewać się można zarówno obniżenia kosztów stałych jak i, w mniejszym stopniu, obniżenia kosztów zmiennych wytwarzania energii elektrycznej. Jednakże zwiększeniu mocy jednostek może towarzyszyć przejściowe zmniejszenie niezawodności pracy, co powoduje straty i częściowo zmniejsza spodziewane efekty wynikające z powiększenia mocy. Stwierdzić też należy, że lokalne warunki mogą uzasadniać zarówno zwłokę w powiększaniu mocy instalowanych jednostek, jak i wpływać na osiągnięte efekty ekonomiczne przy wzroście mocy.

Pokazany na wstępie, niezwykle dla innych silników cieplnych wzrost mocy turbiny parowej, możliwy dzięki właściwościom maszyny i czynnika roboczego, osiągnięto w stosunkowo krótkim okresie rozwoju turbin dzięki współdziałaniu nauki i techniki. Rozwój ten był i jest stałym źródłem inspiracji w kierunku poszukiwań najlepszych rozwiązań konstrukcyjnych, umożliwiających zachowanie niezawodności pracy przy dobrej sprawności i niskich kosztach wykonania. Studium konstrukcyjne turbiny może więc być dla dyscypliny konstrukcyjnej dobrym tematem pracy badawczej z dziedziny podstaw naukowych budowy maszyn, zwłaszcza, jeżeli temat taki ma powiązania z potrzebami gospodarki narodowej.

Szybki rozwój energetyki krajowej uwidacznia celowość instalowania w bliskiej przyszłości turbozespołów podstawowych o mocy większej niż największe budowane dotychczas w kraju jednostki 200 MW. Wielkość systemu krajowego i jego powiązania uzasadniają poziom mocy nowej jednostki podstawowej 500 MW [13].

Studium konstrukcyjne turbiny dużej mocy [1] znalazło się więc w planie Instytutu Techniki Ciepłej Politechniki Warszawskiej, gdzie było prowadzone w latach 1965 ÷ 1969 w Zakładzie Turbin Ciepłych Katedry Kotłów, Turbin i Pomp. Podsumowanie wyników prac prowadzonych w ramach tego studium jest dokonane dalej (część wyników opublikowano wcześniej [1], [3]) na tle pewnych problemów budowy turbozespołów parowych wielkiej mocy.

Powiększenie mocy turbin parowych wymaga pokonania szeregu różnorodnych i poważnych trudności konstrukcyjnych. Jedną z zasadniczych i najczęściej wysuwanych trudności jest konstrukcja odpowiedniej części niskoprężnej a w szczególności konstrukcja ostatniego stopnia turbiny [2], [7], [4], [10], w związku z tym, że wielka moc wymaga zwielokrotnionych wylotów o znacznych wymiarach. Charakterystyczne dane ostatnich stopni turbin wielkiej mocy szeregu wytwórni zestawiono w tablicy 1. Zestawienie to pokazuje, że liczba wylotów związana jest między innymi z mocą jednostki. Zbliżone do osiągnięć rekordowych są stopnie wytwórni ChTGZ oraz GE i Westinghouse (stopnie wytwórni w USA realizują mniejszą powierzchnię wylotu ze względu na większą prędkość obrotową 3600 obr/min). Te trzy osiągnięcia są już bliskie granicznej powierzchni wylotu przy obecnie stosowanych stalach stopowych i prędkości obrotowej 3000 obr/min (3600 obr/min). Dla krajowej turbiny 200 MW podano dane ostatniego stopnia oraz łączną powierzchnię wylotu, na którą składa się wobec zastosowanego w tej turbinie stopnia Baumanna, wylot z górnego piętra stopnia przedostatniego ($2,6 \text{ m}^2$) oraz wylot ze stopnia ostatniego ($5,04 \text{ m}^2$). Z pokazanego zestawienia wynika, że powierzchnia wylotu turbiny 200 MW wytwórni Zamech nie odbiega zbyt od przeciętnej. Przewidywana jest modernizacja tego wylotu przez powiększenie ostatniego stopnia i likwidację stopnia Baumanna.

Poza zagadnieniami związanymi z częścią niskoprężną występuje w budowie turbin wielkiej mocy szereg innych problemów, rzadziej może wysuwanych, które mają istotny wpływ na wybór układu turbiny. Zwielokrotnienie części niskoprężnej turbiny, niezbędne przy wielkiej mocy, znacznie wydłuża turbinę, z czym z kolei związane są istotne trudności natury konstrukcyjnej, montażowej i eksploatacyjnej.

Długość obecnie realizowanych konstrukcji turbin największej mocy przekracza 40 m, a łącznie z generatorem i wzbudnicą nawet 60 m. Opanowanie bardzo poważnych wydłużeń cieplnych takiego układu, wielokrotnie przewyższających stosowane luzy w części przepływowej i uszczelnieniach turbiny wymaga specjalnych zabiegów. Uwzględnić tu oczywiście należy nierównomierne i zmienne w czasie nagrzanie poszczególnych elementów turbiny i fundamentu.

Tablica 1

Charakterystyczne dane ostatnich stopni turbin
dużej mocy szeregu wytwórni [2], [10]

Wytwórnia	l mm	D mm	F m ²	z	N MW
Zamech	765	2100	2,6 ÷ 5,04	2	200
EEC; "Parsons"; AEI	914	2540	7,29	4 ÷ 6	500 ÷ 660
Alsthom	815	2540	6,5	8	600
LMZ	960	2480	7,48	8	800
ChTGZ	1050	2550	8,41	4	500
GE	851	2299	6,14	-	-
Westinghouse	787	2489	6,15	4 ÷ 6	800 ÷ 832

Oznaczenia:

l - wysokość części roboczej łopatki wirującej,

D - średnia średnica stopnia,

$F = \pi \cdot D \cdot l$ - powierzchnia wylotu,

z - liczba wylotów,

N - moc turbiny, w której zastosowano dany stopień.

Skróty nazw wytwórni

Zamech - Zakłady Mechaniczne im.Gen.K.Świerczewskiego - Elbląg,

EEC - The English Electric Co.Ltd. - Anglia,

Parsons - C.A.Parsons Co.Ltd. - Anglia,

AEI - Associated Electrical Industries Ltd. - Anglia,

Alsthom - Société Générale de Constructions Electriques Mé-
caniques - Francja,

LMZ - Leningradskij Metaliczeskij Zawod - ZSRR,

ChTGZ - Charkowski Turbo-Generatornyj Zawod - ZSRR,

GE - General Electric Co. - USA,

Westinghouse - Westinghouse Electric Co. - USA.

Tak długi układ komplikuje również łożyskowanie, sprzężanie i montaż linii wału z wymaganą dużą dokładnością oraz utrudnia w znacznym stopniu zachowanie linii wału nie powodującej pogorszenia stanu dynamicznego turbozespołu w różnych warunkach ruchowych, przy osiadaniu i nierównomiernym nagrzaniu fundamentu. W związku z tym opanowanie drgań takiego układu, w którym wirniki łączone są z reguły sprzęgłami sztywnymi, nie jest łatwym zagadnieniem [4], [8], [9]. Wszystko to stwarza specjalne ograniczenia eksploatacyjne. Właściwe rozwiązanie tych problemów ma zasadniczy wpływ na niezawodność pracy turbozespołu.

Ponadto przy wielkich mocach turbozespołów, niespotykanych w innych dziedzinach, problemy stanowią również nawet zwykłe zagadnienia ogólnej budowy maszyn, w rodzaju przeniesienia momentu obrotowego, zagadnienia momentu zwarcia generatora, konstrukcja i smarowanie łożysk i inne.

Analiza wykonanych konstrukcji turbin wielkiej mocy wykazuje, że z powyższych względów nie stosuje się na ogół obecnie na jednym wale więcej niż 5 kadłubów i 6 wylotów pary do skraplacza. Jeżeli ilość kadłubów i wylotów jest większa, występuje znowu potrzeba stosowania układu dwuwałowego, co przy niezmięnionej mocy turbozespołu znakomicie redukuje wszystkie wymienione trudności konstrukcyjne. Stwarza to ponadto możliwość obniżenia o połowę prędkości obrotowej wału z częściami niskoprężnymi, co z kolei umożliwia realizację znacznie większych powierzchni wylotowych ostatnich stopni. Możliwość zastosowania większej powierzchni wylotu powoduje, że turbozespoły dwuwałowe mają na ogół mniejsze zużycie ciepła w porównaniu z jednowałowymi tej samej mocy, dzięki mniejszej stracie wylotowej i lepszemu wykorzystaniu głębokich próżni, osiąganych przy zimnej wodzie obiegowej. Ma to istotne znaczenie przy drogim paliwie. Układ dwuwałowy upraszcza budowę fundamentu i ułatwia kompozycję pomieszczeń elektrowni, co ma szczególne znaczenie w przypadku rozbudowy elektrowni istniejących. Nieco większe koszty zainstalowania (przeciętnie o ok. 3%) turbozespołu dwuwałowego, wynikające głównie z bardziej rozbudowanej części elektrycznej, decydują o tym, że na ogół uważa się za celową budowę turbiny jednwałowej o ile wymagany poziom mocy i sprawności na to pozwalają.

Należy podkreślić, że budowa generatorów elektrycznych wielkiej mocy stwarza odrębne od turbinowych problemy konstrukcyjne, niełatwe do rozwiązania. W przypadku braku generatora potrzebnej mocy, zastosowanie układu wielowałowego jest jedynym środkiem umożliwiającym podwyższenie mocy turbiny. W historii turbin parowych były już okresy, w których rozwój turbin wyprzedzał rozwój generatorów i budowane były wtedy układy dwu a nawet trójwałowe.

Właśnie w braku generatora odpowiedniej mocy można upatrywać jednej z przyczyn zastosowania układu dwuwałowego w budowanych obecnie japońskich turbinach 350 oraz 600 MW [11].

Przegląd osiągnięć przodujących wytwórni turbinowych wykazuje, że możliwe jest opanowanie wymienionych trudności konstrukcyjnych na poziomie mocy 500 MW, stąd pełne uzasadnienie, że taka turbina przeznaczona dla energetyki krajowej ma układ jednowałowy.

Biorąc pod uwagę potrzeby energetyki krajowej przyjęto w omawianym studium konstrukcyjnym poziom mocy turbozespołu rzędu 500 MW, co było pierwszym głównym założeniem tematu. Uwzględniając naturalną w rozwoju budowy maszyn tendencję doskonalenia przyjętych rozwiązań konstrukcyjnych, oparto studium na wykorzystaniu lub przystosowaniu elementów budowanej w kraju turbiny 200 MM [1]. Maszyna ta jest już wypróbowana i stanowi obecnie podstawową jednostkę największej mocy w energetyce krajowej. W konstrukcji tej turbiny wprowadza się obecnie pewne ulepszenia, zaplanowane na trzy etapy, zmierzające między innymi do nadania turbinie większej elastyczności cieplnej. Oparcie rozważań na elementach turbiny 200 MW nadało studiom i poszukiwaniom cechę realności ważną w pracy naukowej. Dostosowało to też postawione zadanie do ograniczonych kompetencji i środków wykonawców pracy. Jak wynika z zestawienia w tablicy 1, część niskoprężną i wylot z krajowej turbiny 200 MW można by wykorzystać w budowie turbiny o mocy 500 MW a nawet większej, w przypadku zastosowania 4-6 takich wylotów.

Zaznaczyć należy, że z założenia rozważania w studium prowadzone były dla zbadania możliwości, z czysto technicznego punktu widzenia, rozwoju własnej konstrukcji w oparciu o maszyny już budowane w kraju. Nie wchodzi się tu w ogólniejsze zagadnienie celowości takiego rozwiązania.

Oparcie studium na turbinie 200 MW pozwoliło więc na zastosowanie w rozważanej turbinie 500 MW zdwojonej lub potrojonej (zależnie od temperatury wody chłodzącej) części niskoprężnej turbiny 200 MW praktycznie bez zmian. Tym samym została ominięta, wskazana wcześniej, jedna z zasadniczych trudności w budowie turbin parowych wielkiej mocy.

Kolejnym naturalnym założeniem studium była analiza wariantów konstrukcyjnych, umożliwiających porównanie i wybór rozwiązań lepszych od innych, w zależności od kryteriów porównania. Zamierzeniem studium nie było odkrywanie rzeczy nowych. W związku z tym rozważone warianty wynikały z przeglądu znanych rozwiązań, stosowanych w przodujących wytwórniach turbinowych, dla sprawdzenia możliwości zastosowania lub przystosowania takich rozwiązań w warunkach krajowych. Korzystano tu z prospektów i publikacji o turbinach dużej mocy. W doborze wariantów układu turbozespołu uwzględniono obok układu jednowałowego również i układ dwuwałowy zasadniczo dla celów poznawczych, jednakże ujawnione w trakcie pracy szczególne cechy układu dwuwałowego spowodowały poszerzenie tego zakresu pracy.

Omówione studium kryje niewątpliwie szerokie możliwości dydaktyczne. Do ich wykorzystania przyjęto z założenia studenckie prace dyplomowe jako elementy pomocnicze [1]. Wykonano 2 przesunięte w czasie serie po 4 prace, wykorzystując w drugiej serii wyniki uzyskane wcześniej. Liczba prac pozwoliła na dogodne zróżnicowanie tematów. Zróżnicowanie to, pozostawiając każdy temat w kręgu tego samego szerszego zagadnienia, dawało konieczną różnorodność w pracy poszczególnych studentów, a umożliwiając wzajemną wymianę informacji i doświadczeń poszerzyło zakres zdobytych wiadomości. Równoległa praca czterech projektujących zawierała też korzystny czynnik współzawodnictwa podnosząc efekt pracy [1]. Mimo charakteru pracy studenckiej wyniki prac dyplomowych mogą być traktowane jako elementy zamierzonego studium.

Przedmiotem zasadniczych rozważań była turbina czterokadłubowa, czterowylotowa o mocy 500 MW ze znamionowym ciśnieniem w skraplaczu rzędu 0,065 ata, co może odpowiadać temperaturze wody chłodzącej ok. 22°C. Ponadto rozpatrywano turbinę pięciokadłubową na głębszą próżnię, ze znamionowym ciśnieniem

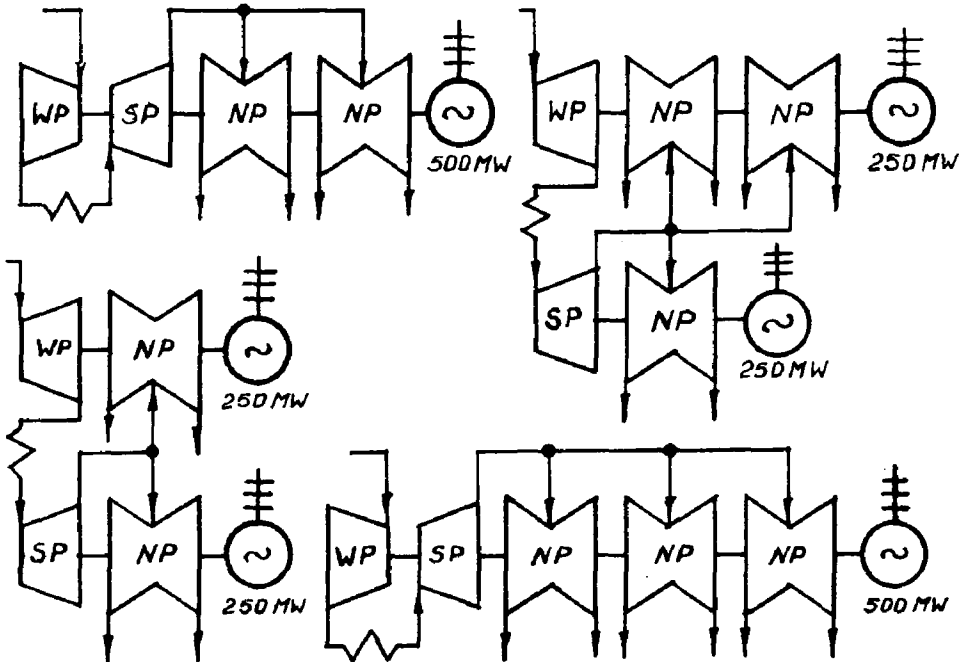
w skraplaczu rzędu 0,033 ata (temperatura wody chłodzącej ok. 12°C). Układ czterokadłubowy wydawał się bardziej interesujący w warunkach krajowych i w związku z tym podlegał szczegółow-szym opracowaniom.

W omówionym studium zagadnienia parametrów czynnika roboczego i układu cieplnego mają mniejsze znaczenie, rozpatrywane bowiem warianty konstrukcyjne turbiny nadają się do wykorzystania w szerszym zakresie parametrów. W związku z tym w wyniku oparcia studium o turbiny 200 MW przyjęto, zgodnie z parametrami eksploatowanych bloków [1], [13], [14], [16] ciśnienie pary przed zaworem głównym turbiny 130 ata i wyższą o 5°C temperaturę pary pierwotnie i wtórnie przegrzanej, co nie wymaga zmian materiałowych. Rozpatrywane warianty schematu cieplnego oparte były również na układach istniejących [1], [13], [16] przy większej o jeden liczbie podgrzewaczy regeneracyjnych i większej temperaturze podgrzewu skroplin do około 245°C oraz turbinowym napędzie pompy zasilającej.

Rozważone układy turbozespołu w wersji 4 i 5 kadłubowej zestawiono na rys.1. Układ dwuwałowy miał jednakową prędkość obrotową i moc znamionową obu wałów. Wszystkie te układy złożone są z tych samych zasadniczo elementów, to jest mają po jednym kadłubie wysoko i średnioprężnym oraz po dwa lub po trzy kadłuby niskoprężne. Rozpatrywano kadłuby wysoko i średnioprężne w wersji jedno lub dwustrumieniowej. Podkreślić należy, że konstrukcja części wysoko i średnioprężnej dla układu jedno lub dwuwałowego może być zasadniczo taka sama, co ma duże znaczenie.

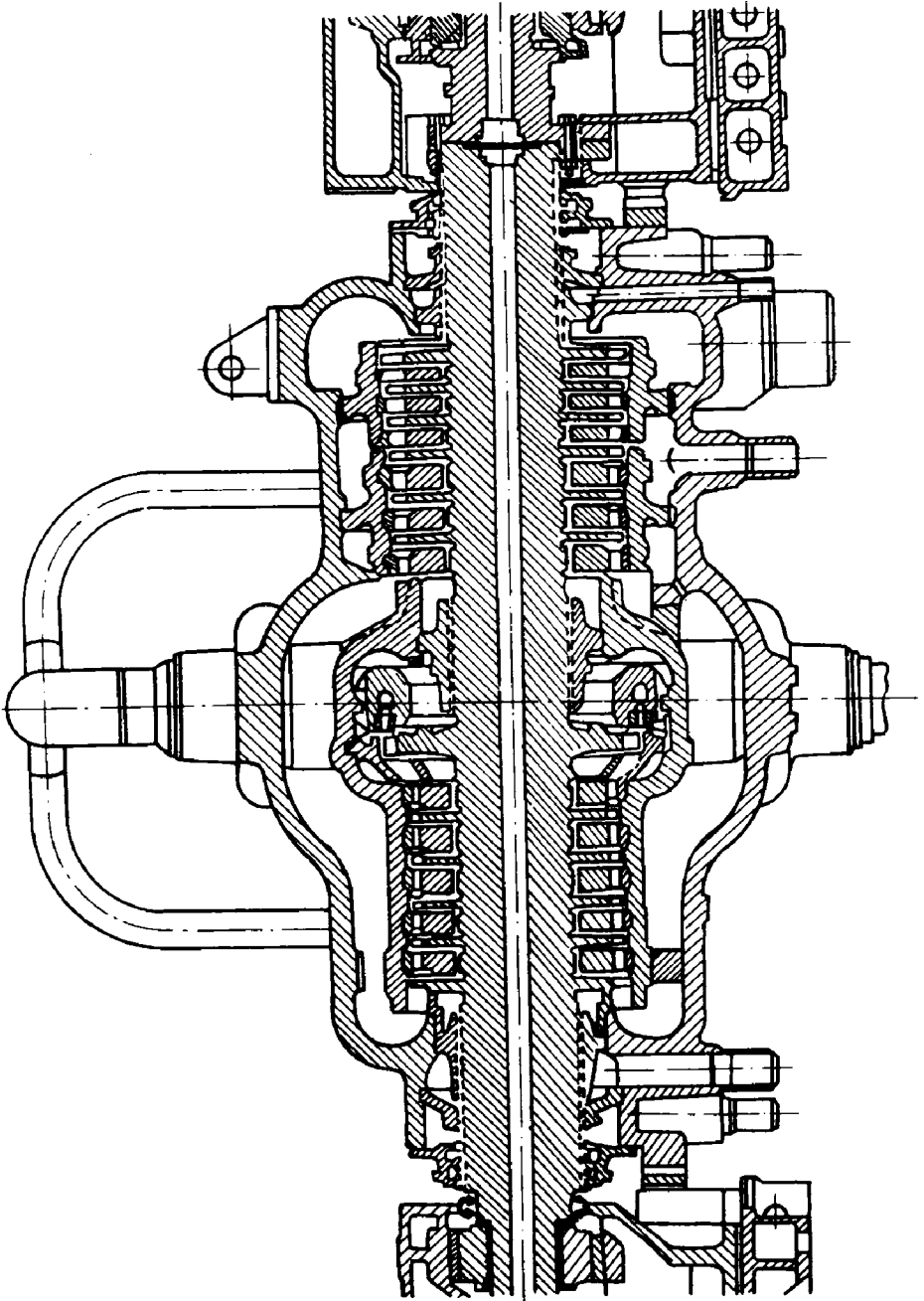
Jednym z zasadniczych elementów studium były badania możliwych rozwiązań konstrukcyjnych węzłów kadłuba i wirnika części wysoko i średnioprężnej turbiny. Analiza wykonanych projektów części wysokoprężnej wykazała, że najkorzystniejszym rozwiązaniem w turbinie 500 MW wydaje się być wersja (pokazana na rys.2) w układzie jednostrumieniowym nawrotnym. Układ dwustrumieniowy w porównaniu z jednostrumieniowym ma większą długość i ciężar. Przewaga układu dwustrumieniowego pod względem dławnic końcowych jest tu częściowo niwelowana przez wprowadzenie nawrotu pary. Układ pokazany na rys.2 umożliwia opisanie wysokich parametrów pary dolotowej przy zachowaniu

potrzebnej elastyczności cieplnej. Dzięki prowadzeniu zawracającego strumienia pary pomiędzy kadłubem wewnętrznym a zewnętrznym uzyskuje się korzystny podział różnic ciśnień i temperatur pomiędzy oba te elementy. Nawrót pary pozwala też na te łatwe wprowadzenie drugiego upustu regeneracyjnego do kadłuba wysokoprężnego. Na tej liczbie upustów w kadłubie wysokoprężnym poprzestaje się. W innych układach wprowadzenie już drugiego upustu jest trudne i miejsce pierwszego upustu pokrywa się z wylotem z kadłuba.

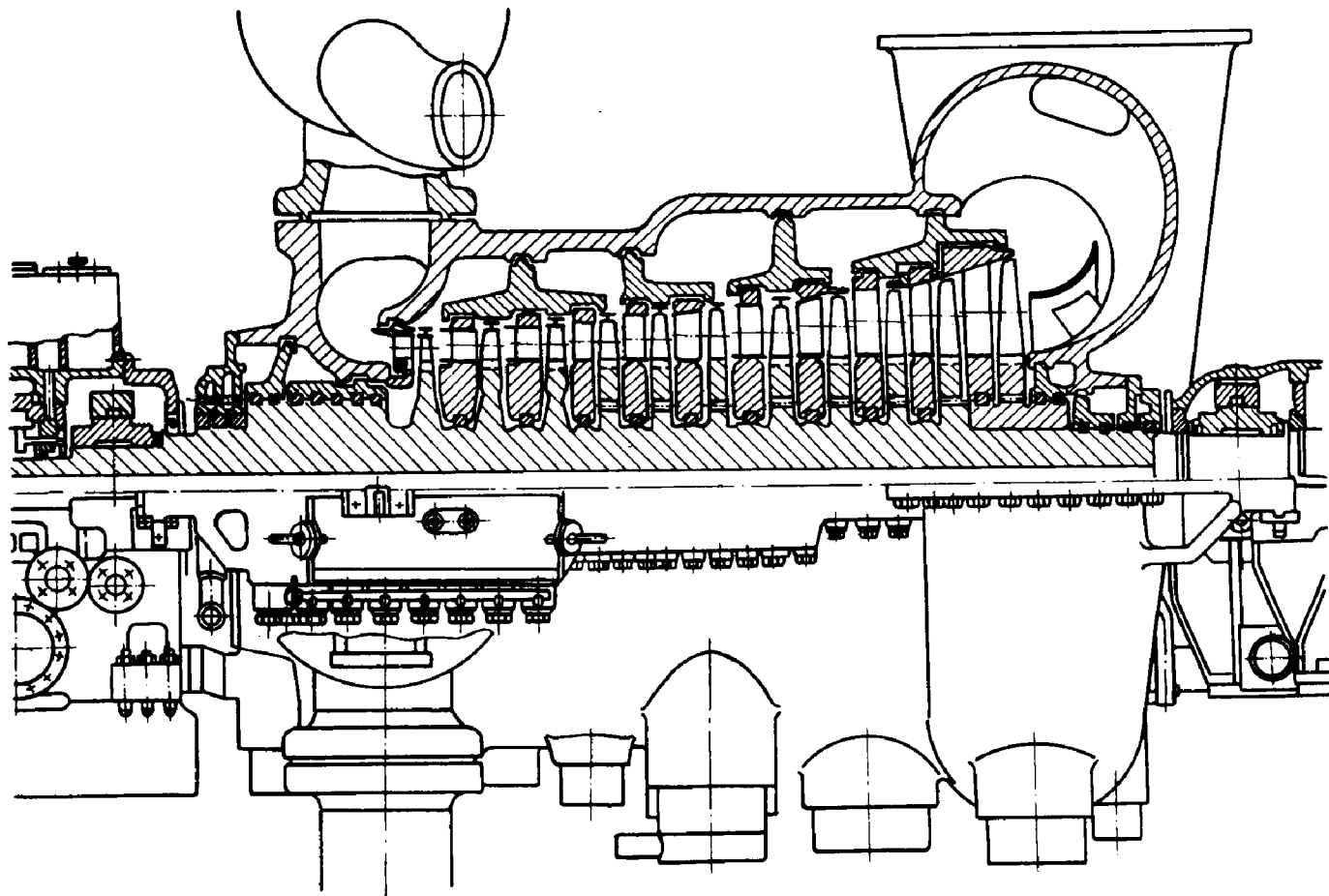


Rys.1. Układ turbiny parowej 500 MW

Przesądzenie wyboru układu jedno lub dwustrumieniowego w części średnioprężnej turbiny 500 MW jest trudniejsze, niż w przypadku części wysokoprężnej. Układ jednostrumieniowy ma tu, jak poprzednio, przewagę pod względem długości i ciężaru. Jednak objętościowe natężenie przepływu pary na wylocie z części średnioprężnej jest już na tyle duże, że w wersji jednostrumieniowej wymaga łopatek o znacznej wysokości. W związku z tym w wykonanych turbinach omoty rzędu 500 MW w części średnioprężnej spotykane są oba te układy. Przeprowadzone w ramach



Rys.2. Część wysokoprężna turbiny o mocy rzędu 500 MW



Rys.3. Część średnioprężna turbiny o mocy rzędu 500 MW

studium prace wskazują, że układ jednostrumieniowy (rys.3) nie nastęrcza nadmiernych trudności konstrukcyjnych i wobec jego zalet wydaje się, że powinien być stosowany. Podkreślić należy, że w układzie jednostrumieniowym można zastosować większą liczbę stopni, co nie tylko poprawia sprawność wewnętrzną ale ułatwia również rozmieszczenie miejsc upustów regeneracyjnych oraz wyprowadzenie pary upustowej z kadłuba. Pożądane miejsca upustów regeneracyjnych wynikają z wymagania minimalnego jednostkowego zużycia ciepła. Konstrukcja turbiny nakłada na to ograniczenia. Zachodzi więc w tym przypadku potrzeba kompleksowego rozwiązywania problemu. Przeprowadzone studia wykazują, że wymiary ostatniego stopnia części średnioprężnej turbiny 500 MW w układzie jednostrumieniowym zbliżone są do wymiarów trzeciego od końca stopnia w części niskoprężnej turbiny 200 MW przy łagodniejszych warunkach pracy wobec braku wilgotności pary. Wydaje się więc, że budowa takiego stopnia jest możliwa w warunkach krajowych. Oczywiście wymagałoby to badań, nie tyle przepływowych, ile badań charakterystyk dynamicznych, gdyż częstości drgań własnych i oddalenia od rezonansu drgań nie można wyznaczyć w przypadku takiego stopnia z potrzebną dokładnością na drodze teoretycznej. W pokazanym na rys.3 układzie części średnioprężnej turbiny zastosować można 4 upusty regeneracyjne, co łącznie z dwoma w części wysokoprężnej i dwoma w części niskoprężnej daje liczbę 8 upustów regeneracyjnych, którą, wydaje się, trudno dalej powiększyć.

Jak zaznaczono, w doborze wariantów układu turbozespołu uwzględniono również i układ dwuwałowy w zasadzie, jak się wtedy wydawało, w celu rozpoznania i spopularyzowania właściwości tego układu mało znanego w Europie. W trakcie studium ujawniły się szczególne zalety układu dwuwałowego przy prowadzeniu prac rozwojowych w budowie turbin wielkiej mocy. Nasunęło to myśl o wykorzystaniu tych zalet w przypadku podjęcia budowy jednowałowej turbiny 500 MW w oparciu o ewentualną konstrukcję krajową. Rozpatrując zagadnienie z czysto technicznego punktu widzenia, możliwości zaprojektowania i budowy takiej turbiny w kraju wydają się istnieć w związku z poniższym szeregiem przesłanek.

Krajowa turbina 200 MW (TK200 [14]) jest systematycznie poprawiana i ulepszana przez wytwórnice, przy czym zmiany te w rodzaju wprowadzenia dwupowłokowego kadłuba wysokoprężnego oraz średnioprężnego, czy też ulepszenia układu regulacji zbliżają układ do potrzebnego w przypadku turbiny 500 MW.

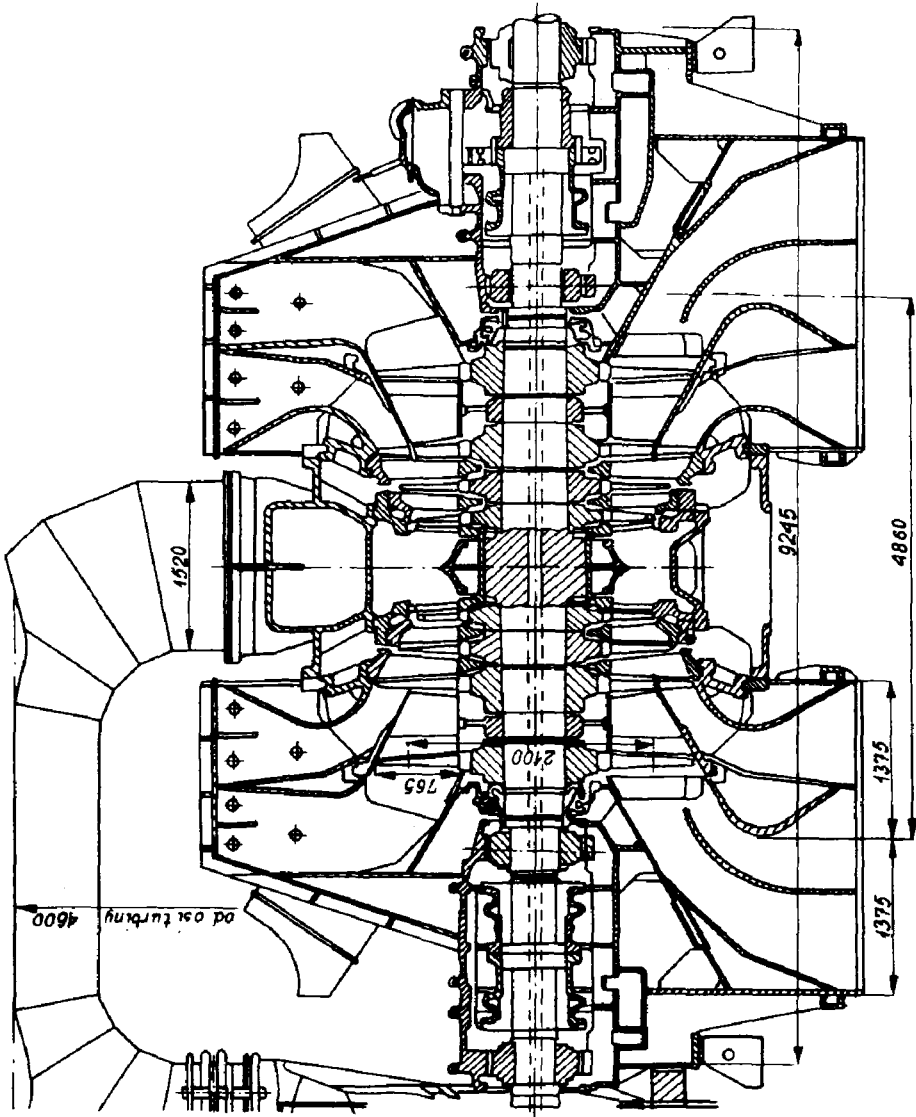
W oparciu o zmodernizowaną turbinę 200 MW oferuje się turbozespół o mocy 250 MW (13 K250 - [14]) w analogicznym układzie jak turbozespół 200 MW. Budowa takiej turbiny byłaby istotnym krokiem do konstrukcji turbiny 500 MW.

W budowie turbiny 500 MW występują poważne trudności w konstrukcji części niskoprężnej. Można je ominąć wykorzystując budowane obecnie w kraju (rys.4) lub zmodernizowane części niskoprężne turbiny 200 MW i 250 MW.

Turbina 500 MW wymaga konstrukcji nowej części wysoko i średnioprężnej turbiny, co jak pokazało studium oraz inne prace, jest możliwe.

Ze znaczną długością turbiny 500 MW w układzie jednowałowym związane są, jak pokazano, istotne trudności konstrukcyjne, montażowe i eksploatacyjne. Wprowadzenie układu dwuwałowego, jako etapu przejściowego na drodze do budowy turbiny jednowałowej, pozwala na znaczne zmniejszenie ryzyka niepowodzenia, dzięki możliwości stopniowego wprowadzania zmian i nowych elementów do układu. Jednocześnie pozwala to już w tym etapie przejściowym uzyskać praktycznie pełne korzyści z powiększenia mocy turbiny. W omówionym etapie budowany byłby turbozespół 500 MW w układzie dwuwałowym o równej mocy obu wałów na 3000 obr/min (rys.1). Pozwala to na pełne zdwojenie części elektrycznej turbozespołu w oparciu o generator, wzbudnicę, transformatory i zabezpieczenia wspomnianego turbozespołu 250 MW (13 K250 - [14]). Zmniejsza to koszty projektowania, produkcji, transportu, montażu i eksploatacji w porównaniu z wariantem o różnych mocach wałów.

Nowe elementy w układzie, to jest część wysoko i średnioprężna turbiny, umieszczone są na dwu różnych wałach o stosunkowo małej długości, krótszych nawet niż w turbinie 200 MW. Znikają tu więc trudności związane z długą linią wału. Ponadto nowe elementy daje się skoncentrować w przedniej części układu. W związku z obiema powyższymi przesłankami okres wdrażania



Rys.4. Część niskoprężna krajowej turbiny 200 MW

jednostki do eksploatacji powinien ulec znacznemu skróceniu, a straty związane z oswojeniem turbozespołu powinny zmniejszyć się w sposób istotny. Omawiana przejściowa, dwuwałowa wersja turbozespołu 500 MW pozwala już na istotne obniżenie jednostkowego kosztu wytwarzania turbiny w porównaniu z turbozespołami 200 MW. Tak na przykład zainstalowanie 5 turbozespołów o mocy 200 MW wymaga budowy 5 części wysokoprężnych i 5 części średnioprężnych, podczas gdy 2 turbozespoły dwuwałowe 500 MW mają tylko 2 części wysoko i 2 części średnioprężne. Porównywane są 2 oraz 5 turbozespołów dla uniknięcia wykazywania zysków w postaci 1 1/2 części wysoko czy średnioprężnej turbiny (każdeb i wirnik, łącznie najkosztowniejsze elementy turbiny).

Wprowadzenie przejściowego etapu z turbozespołem dwuwałowym łagodzi ponadto wagę problemu budowy generatora elektrycznego o mocy 500 MW.

Ostatnim etapem byłaby budowa jednowałowego turbozespołu 500 MW, złożonego z wypróbowanych już części wysoko i średnioprężnej, gdyż są one praktycznie jednakowe w obu wersjach układu turbiny, dwóch (lub trzech) wypróbowanych części niskoprężnych i nowego generatora 500 MW. Opanowanie trudności związanych z dużą długością jednostki jednowałowej, złożonej z wypróbowanych elementów, powinno być znacznie łatwiejsze niż w przypadku jednoczesnego wprowadzania zmian i nowych elementów tak w poszczególnych częściach turbiny, jak i w układzie linii wału.

Stwierdzić więc można, że układ dwuwałowy pozwala na dogodne stopniowanie trudności i stopniowe wprowadzenie oraz koncentrowanie zmian w wybranych elementach przy pracach rozwojowych w turbinach wielkiej mocy, co jest wielką zaletą tego układu. Korzyści te wykorzystywano niejednokrotnie w USA a ostatnio, jak wcześniej wspomniano, i w Japonii - kraju, który w wielu dziedzinach doścignął i prześciga największe potęgę gospodarcze. Szczególnie przykład Japonii skłania do analizy zalet układu dwuwałowego i wyciągania wniosków, pomimo braku zbyt wielu przykładów zastosowania układu dwuwałowego w Europie.

Należy dodać, że omawiane części wysoko i średnioprężne turbin kondensacyjnych o mocach 250 MW ÷ 500 MW pozwolą po-

dobnie, jak to się dzieje w przypadku turbin 120 MW, na wykorzystanie ich, ewentualnie z niewielkimi zmianami, w budowie rodziny różnych turbin przemysłowych i ciepłowniczych dużej mocy, potrzebnych w gospodarce krajowej. W związku z tym opisanie konstrukcji i wytwarzania tych elementów ma większe znaczenie.

Temat studium obejmuje liczne zagadnienia szczegółowe koncentrując się, oprócz zagadnień wymienionych wcześniej, na niektórych, dotyczących niezawodności pracy maszyny, elastyczności cieplnej, stanu dynamicznego układu, mocy granicznej turbin, zmniejszenia straty wylotowej, poprawy sprawności we współpracy stopni czy doboru rozrządu pary i określenia wpływu tego rozrządu na własności turbozespołu. Rozważano tu na przykład możliwość stosowania w turbinach wielkiej mocy dławieniowego rozrządu pary wobec związanej z nim skokowej poprawy elastyczności cieplnej. Rozpatrywano też rozrząd pary z obejściem, które pozwala wprowadzić znaczną rozpiętość między mocą ekonomiczną a mocą największą turbozespołu, co dało początek rozważaniom nad układami podstawowo-szczytowymi. Każde z pokazanych zagadnień szczegółowych może być przedmiotem odrębnych rozważań. Stwierdzić można, że omawiane studium kryje w sobie znaczną liczbę tematów, które mogą być przykładem tematyki naukowej związanej z potrzebami konstrukcji. Rozpoznanie tej tematyki uważane być może za jedną ze zdobyczy studium.

Przykładem opracowania takiego zagadnienia szczegółowego są przeprowadzone rozważania nad rozdziałem mocy w parowych turbozespołach dwuwałowych [3]. W pracy tej sformułowano ogólne zależności, pozwalające śledzić rozdział mocy w zmienionych warunkach pracy w dowolnym praktycznie układzie wielokadłubowym.

Jak wspomniano, przy badaniu wpływu rozrządu pary na własności turbozespołu wyłoniła się koncepcja wykorzystania elementów zmianowych turbin o mocach 200 ÷ 500 MW w budowie turbozespołu podstawowo-szczytowego. Turbozespół taki, przy mocy ekonomicznej, pracuje jako jednostka podstawowa z dobrą sprawnością cieplną. W momencie obciążenia, dzięki wprowadzeniu do turbiny przez obejście dodatkowej ilości pary uzyskuje się

znaczny przyrost mocy ponad moc ekonomiczną przy pewnym pogorszeniu sprawności. Idea takiego turbozespołu, podobnie jak układu dwuwałowego, nie jest nowa [12]. W ramach studium na tle warunków krajowych koncepcja ta odżyła i wydała się interesującą. W technice w różnych dziedzinach często spotkać można takie przypadki, że wraca się do rozwiązań znanych i stosowanych ale chwilowo zaniechanych.

W ramach omówionego studium rozpatrzono pewien wariant takiego turbozespołu, opartego o elementy turbiny 200 MW o mocy ekonomicznej rzędu 180 MW i mocy największej 250 MW. Przewidywano wprowadzenie obejścia na wlocie do części średnioprężnej turbiny, co jest wygodne pod względem konstrukcyjnym. Wydaje się, że w szczególności w warunkach krajowych podobnego typu bloki podstawowo-szczytowe mogą być układem konkurencyjnym w stosunku do innych możliwych źródeł energii szczytowej, potrzebnej w systemie energetycznym. W związku z tym planuje się, że koncepcja bloku podstawowo-szczytowego będzie przedmiotem dalszych poszukiwań i opracowań.

Bibliografia

1. Uklański A., Miller A.: "Studium konstrukcyjne turbiny parowej 500 MW". Ciepłe Maszyny Przepływowe Nr 59/1966.
2. Sobkowski S.: "Problemy konstruowania turbin parowych największej mocy". Przegląd Mechaniczny Nr 4/1968.
3. Uklański A., Miller A.: "Rozdział mocy w parowych turbozespołach dwuwałowych". Ciepłe Maszyny Przepływowe Nr 67/1968.
4. Szubienko-Szubin L.A., Sobolew S.P., Liniecki Sz.M.: "O niektórych wozmożnych konstruktywnych reszeniach turboagregatów bolszoi mosznosti". Tieploenergetika Nr 7/1966.
5. "Reheat steam turbines a review of design problems". Metropolitan-Vickers E.C.LTD Special Publication 7485/16.
6. Ecker R.; Carson P.F. "English Electric experience in the design and operation of large steam turbine generating plant". The English Electric Journal Nr 6/1964.

7. "Turbine - generator engineering". AEI Turbine-Generators Limited, Manchester 1970.
8. Carson P.F., Telfer R.H.: "Large steam turbine alignment problems". The Engineer 1963 Oct.25.
9. Keen R.H., Carson P.F.: "Alignment and assembly of large steam sets". Electrical Review March 1963.
10. Szubienko-Szubin L.A.: "Projektowanie roboczych kopatek poslednich stupieniej moszcznych parowych turbin". Energo-maszynostrojnie Nr 4/1962.
11. "1969 energy systems design survey". Power Nr 10/1969.
12. Hossli W.: "Deckung von Spitzenlast durch überlastung einer Dampfanlage". Brown-Boveri Mitteilungen Nr 3/1966.
13. Praca zbiorowa: Rozwój energetyki w PRL. WNT. Warszawa 1970.
14. Turbozespoły przemysłowe i energetyczne. Katalog ofertowy wytwórni Zamech. Elbląg.
15. Perycz S.: "Licencja czy konstrukcja własna - analiza techniczno-ekonomiczna celowości budowy turbin 250 i 500 MW". Przegląd Mechaniczny nr 20. 1968.
16. Praca zbiorowa: Informator energetyka. WNT. Warszawa 1969.

Паровые турбины большой мощности

К р а т к о е с о д е р ж а н и е

Разобрано ряд вопросов создания паровых турбоагрегатов большой мощности. Представлено итог результатов работ проводимых в рамках конструктивного эскиза паровой турбины 500 МВ. Показано ценные достоинства применения двухвального исполнения турбоагрегата при проведении прогрессивных работ в области паровых турбин большой мощности.

Large Steam Turbines

S u m m a r y

Several problems of the steam turbo-generator set of a large output were discussed. The work results that were made in the scope of construction study of the 500 MW turbine were summed up. The valuable qualities for application of the turbo-generator set with cross compounded arrangement in progressing works with steam turbines of a large output were presented.

Rękopis dostarczono w listopadzie 1970 r.