

OGÓLNOPOLSKIE FORUM
„MAŁA ENERGETYKA '96”
Chańcza, 28÷30 maja 1996

TURBOZESPOŁY DLA MAŁEJ ENERGETYKI WODNEJ
- WYNIKI WYBRANYCH PRAC BADAWCZO-ROZWOJOWYCH

Tytus Wilski
Zakłady Pomiarowo-Badawcze Energetyki ENERGOPOMIAR Sp. z O.O.,
Zakład Techniki Ciepłej i Gospodarki Energetycznej
Oddział Badań i Pomiarów Hydroenergetycznych w Gdańsku
ul.Polanki 12, 80-308 Gdańsk

Janusz Steller
Instytut Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk
ul.Gen.J.Fiszera 14, 80-952 Gdańsk

1. WPROWADZENIE

Wykonane w roku 1983 przez Główne Biuro Studiów i Projektów Energetycznych ENERGOPROJEKT „Studium terenowe możliwości wykorzystania małych cieków wodnych w Polsce” objęło 2131 istniejących obiektów (starych siłowni i elektrowni - przeważnie nieeksploatowanych i w znacznym stopniu zdewastowanych) oraz 863 obiekty przy wznoszonych i planowanych spiętrzeniach.

Po dokonanej wstępnej analizie techniczno-ekonomicznej tego potencjału, przewidziano do roku 2000 uruchomienie 611 małych elektrowni wodnych (MEW) w istniejących obiektach (łąčna moc: 84 MW) oraz 415 elektrowni w obiektach przy wznoszonych i planowanych piętrzeniach (łąčna moc przewidywana: 120 MW). Powyższe 1026 obiektów cechowała najwyższa opłacalność budowy wynikająca z oszacowanych kosztów wyprodukowania 1 kWh. Zasadnicze znaczenie dla zapoczątkowania realizacji tych zamierzeń miała podjęta w 1981 roku uchwała Rady Ministrów opatrzona numerem 192 [1].

Piętnaście lat, które w tym roku mijają od „wejścia w życie” Uchwały stwarza właściwą perspektywę czasową dla dokonania przeglądu osiągnięć oraz oceny realizacji przyjętych zamierzeń. Ze względu na zasadniczo różne warunki gospodarcze, okres ten można podzielić na 8 lat (1981÷89) centralnie sterowanej gospodarki planowej i 7 lat (po roku 1989) gospodarki rynkowej.

Lata do roku 1989 cechuje funkcjonowanie dużej liczby ustaw, uchwał i zarządzeń wydawanych przez różne szczeble administracji państwowej. Dotyczyły one w szczególności spraw: administracyj-

nych, finansowych, przekazywania obiektów hydroenergetycznych, współpracy z Zakładami Energetycznymi, warunków przyłączania małych elektrowni do sieci energetycznej. Należy w tym miejscu podkreślić, że wszystkie opublikowane wówczas akty prawne w praktyce sprzyjały rozwojowi małych elektrowni wodnych (MEW) o mocach do 5 MW.

W tym okresie zostały również uruchomione dwa centralne programy badawczo-rozwojowe pn. *Kompleksowy rozwój energetyki* (program PR-8 w latach 1981-1985 i program CPBR 5.1 w latach 1986-1990). Elementem składowym tych programów były działania zmierzające do zapewnienia bazy technicznej i produkcyjnej dla MEW.

Koordynatorem prac został Instytut Maszyn Przepływowych PAN (IMP PAN). Ośrodkami współpracującymi były m.in. Katedra Turbin Wodnych i Pomp (obecnie: Katedra Mechaniki Płynów i Maszyn Wirnikowych) Politechniki Gdańskiej, Instytut Automatyki Systemów Energetycznych O/Gdańsk (obecnie: Instytut Energetyki O/Gdańsk), Instytut Elektrotechniki w Warszawie, GBSiPE ENERGOPROJEKT Warszawa, ZPBE ENERGOPOMIAR O/Gdańsk, OBR Górnictwa Surowców Chemicznych CHEMKOP w Krakowie, Zakłady Remontowe Energetyki Gdańsk, Zakłady Energetyczne Słupsk i Zamość.

Do zasadniczych efektów prac realizowanych w ramach obu programów należy zaliczyć:

- opracowanie dokumentacji inwentaryzacyjnej obiektów hydroenergetycznych,
- opracowanie szeregu dokumentacji projektowych podstawowych urządzeń stanowiących wyposażenie MEW,
- uruchomienie 10 pilotowych małych elektrowni wodnych,
- wydanie informatorów [2÷8] oraz poradnika [9] dla inwestorów MEW.

Ważną rolę organizacyjną i informacyjną odegrał utworzony w 1983 roku Punkt Koordynacyjno-Konsultacyjny Małych Elektrowni Wodnych, zorganizowany na wniosek byłego Ministerstwa i Energetyki przy Gdańskim Oddziale ZPBE ENERGOPOMIAR. Zasadniczym zadaniem Punktu było zapewnienie pomocy oraz właściwej informacji jednostkom gospodarki społecznej i osobom prywatnym przy planowaniu, realizacji i eksploatacji małych elektrowni wodnych.

W roku 1988 grupa właścicieli elektrowni i osób zainteresowanych rozwojem małej energetyki wodnej doprowadziła do powstania lobby dla MEW w postaci Towarzystwa Rozwoju Małych Elektrowni Wodnych, którego jednym z podstawowych zamierzeń jest oddziaływanie na tworzenie korzystnych warunków ekonomicznych i prawnych oraz na rozwój zaplecza technicznego dla budownictwa elektrowni.

Charakterystycznym dla tego okresu zjawiskiem była budowa MEW „sposobem gospodarczym” z wykorzystaniem istniejących często bardzo zdewastowanych obiektów hydroenergetycznych. Elektrownie te były najczęściej wyposażone w stare wyeksploatowane, a nawet w wielu przypadkach - złomowane urządzenia: turbiny, prądnice, przekładnie. Realizowane były elektrownie kilkudziesięciokilowatowe - naj-

częściej w granicach 20 kW do 40 kW, tylko w kilku przypadkach uzyskano moce nieznacznie przekraczające 100 kW. Cykl budowy elektrowni był długi - 2 do 5 lat.

Okolicznością sprzyjającą rozwojowi obiektów MEW były dość dobre warunki ekonomiczne takie jak: kredytowe, podatkowe (np. kilkuletnie zwolnienie od podatku po uruchomieniu elektrowni), korzystna cena za energię sprzedawaną Zakładom Energetycznym, a także stosunkowo niskie nakłady inwestycyjne, umożliwiło to inwestorom uzyskanie krótkiego okresu amortyzacji - 2 do 3 lat, w niektórych przypadkach nawet rocznego.

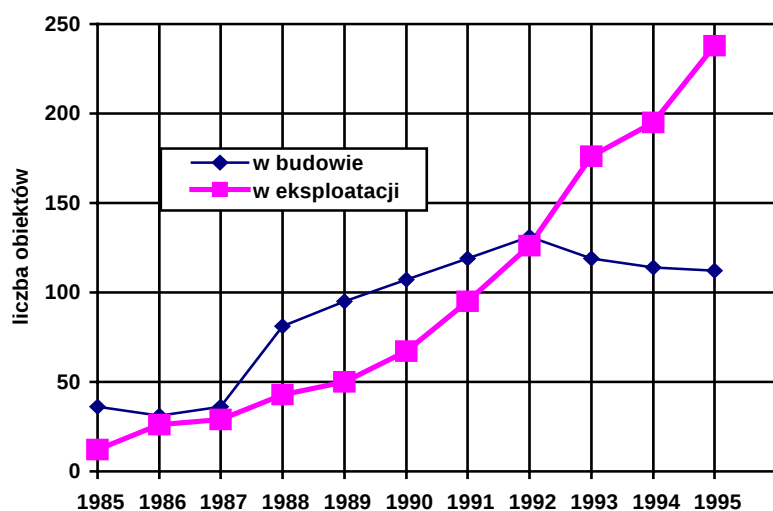
Trudności przy realizacji obiektów MEW związane były głównie:

- z załatwieniem spraw formalno-prawnych,
- z uzyskaniem odpowiednich urządzeń stanowiących podstawowe wyposażenie MEW,
- z brakiem profesjonalnych pracowni projektowych oraz małych specjalistycznych firm wykonawczych.

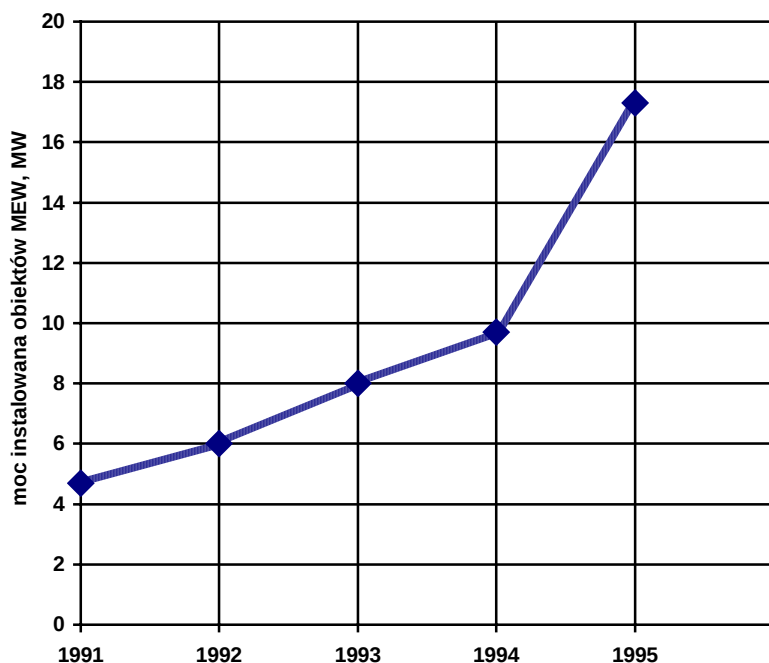
Po roku 1989 zasadniczymi postanowieniami naczelných władz państwowych podkreślającymi istotne znaczenie rozwoju odnawialnych źródeł energii dla gospodarki kraju były:

- uchwała Sejmu z dnia 9 listopada 1990 roku, w której uznano zwiększenie udziału produkcji energii z odnawialnych źródeł za jeden z podstawowych kierunków polityki energetycznej kraju oraz zlecono wspieranie działań społecznych na rzecz odnawialnych źródeł energii,
- zarządzenie Ministra Finansów o 5-letnim zwolnieniu od podatku właścicieli MEW, którzy do końca roku 1990 uruchomią elektrownię,
- decyzja Ministra Przemysłu i Handlu Nr 26 z dnia 14 lipca 1993 roku (wydana w porozumieniu z Ministrem Finansów), w której ustalono cenę urzędową energii elektrycznej zakupywanej przez Zakłady Energetyczne od małych elektrowni wodnych oraz podano sposób jej określania.

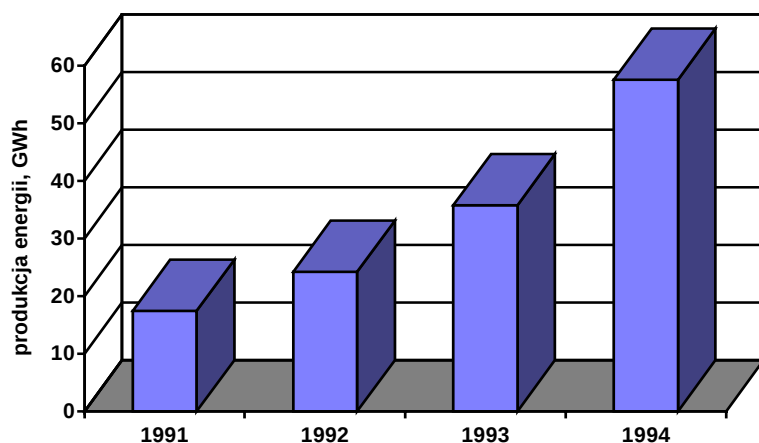
Należy podkreślić, że postanowienia te - a zwłaszcza wspomniana uchwała Sejmu z listopada 1990 roku - pozostają w zgodzie z trendami obserwowanymi w Unii Europejskiej. Ich wyrazem jest między innymi tzw. Deklaracja Madrycka sformułowana w marcu 1994 roku na konferencji pn. „Plan działań na rzecz źródeł odnawialnych w Europie”. We wnioskach z Konferencji wskazano zasadnicze kierunki działania - polityczne, prawodawcze i administracyjne, finansowe i fiskalne, techniczne, edukacyjne i informacyjne - zapewniające prawidłowe wykorzystanie odnawialnych źródeł energii. Zaproponowano również konkretne środki dla przezwyciężenia istniejących barier. Zaleceniem konferencji jest, by do roku 2010 udział energii ze źródeł odnawialnych w bilansie energetycznym krajów Unii Europejskiej wynosił nie mniej niż 15 %. Niewielkie zasoby energii wodnej - użyteczny potencjał hydroenergetyczny szacowany na 13700 GWh/rok - nie pozwolą Polsce nigdy osiągnąć takiego poziomu. Z drugiej strony zauważyć należy, że nawet ten skromny potencjał wyzyskany jest w zaledwie 12 %, co oznacza pokrycie niewiele ponad 1 % rocznego zapotrzebowania kraju na energię elektryczną. Udział innych odnawialnych źródeł energii



Rys.1 Przyrost liczby obiektów MEW do końca 1994 roku



Rys.2 Moc instalowana obiektów MEW uruchomionych do końca 1994 roku



Rys.3 Roczna produkcja energii z obiektów MEW w latach 1991-94

(głównie elektrowni wiatrowych) pozostaje w tym bilansie niezauważalny. Warto natomiast zwrócić uwagę, że w 1994 roku 3.3 % energii dostarczanej przez energetykę wodną pochodziło z obiektów MEW

Silną tendencję wzrostową wykazywała przy tym zarówno liczba uruchamianych obiektów (rys.1), jak i ich średnia moc instalowana. O ile w latach osiemdziesiątych wartość mocy instalowanej kształtowała się poniżej 30 kW, to w roku 1990 przekroczyła próg 45 kW, a w 1994 roku osiągnęła już około 74 kW. W związku z tym w ostatnich latach należy również odnotować znaczne przyrosty mocy zainstalowanej (rys.2), jak i produkcji energii elektrycznej w MEW (rys.3). I tak - w roku 1993 przyrost produkcji wyniósł prawie 49 %, a w roku 1994 - 60 %. Należy sądzić, że z uwagi na utrzymującą się tendencję wzrostową, niewielką liczbę powstających elektrowni wodnych o mocach powyżej 5 MW i całkowity brak wielkich inwestycji hydroenergetycznych, w najbliższych latach udział obiektów MEW w produkcji energii ze źródeł odnawialnych będzie nadal rósł mimo pogorszenia się warunków kredytowych i podatkowych oraz wzrostu nakładów inwestycyjnych na 1 kW zainstalowanej mocy.

Wśród przyczyn stałego zainteresowania inwestowaniem w obiekty MEW wymienić można:

- skuteczne zabiegi o korzystne uregulowanie sposobu naliczania ceny za energię elektryczną,
- pojawienie się inwestorów dysponujących kapitałem pozwalającym na budowę elektrowni o mocach przekraczających próg 100 kW (moc największej zrealizowanej obecnie MEW wynosi 350 kW; w kilku przypadkach rozpoczęto budowę elektrowni od podstaw wraz z piętrzeniem),
- pojawienie się profesjonalnych pracowni projektowych a także szeregu małych firm wykonawczych,
- dość znaczną poprawę na rynku urządzeń stanowiących podstawowe wyposażenie MEW (znaczną część dostaw małych turbin wodnych pochodzi dziś od prywatnych wytwórców), korzystny klimat dla prywatnej działalności gospodarczej,
- korzystny klimat dla prywatnej działalności gospodarczej,

Obecnie możliwe jest uruchomienie nawet kilkumegawatowej elektrowni wyposażonej całkowicie w urządzenia krajowej produkcji. Obserwuje się także powstawanie elektrowni o coraz wyższym poziomie technicznym.

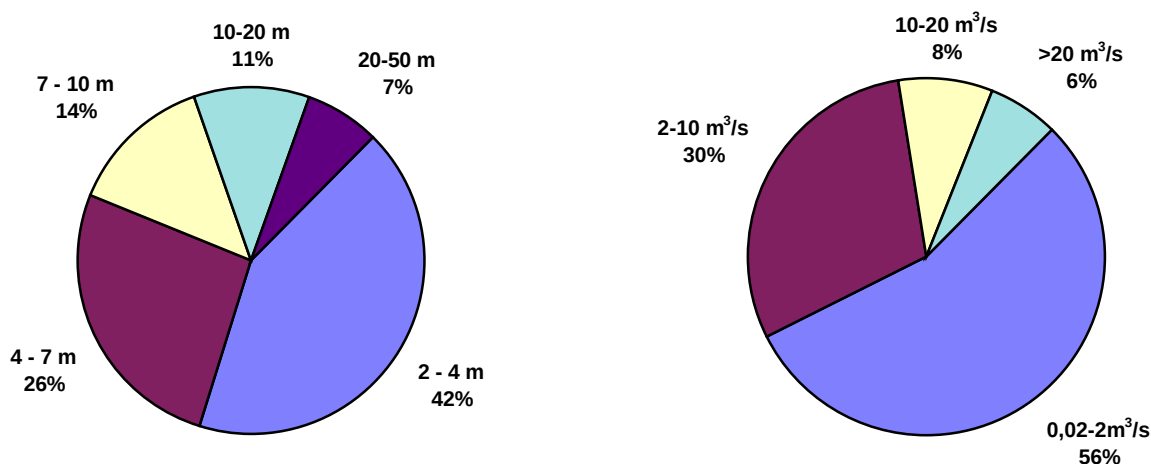
Sygnalizując wymienione wyżej korzystne tendencje, nie sposób nie zauważyć, że praktycznie żaden z krajowych dostawców turbozespołów wodnych nie dysponuje zapleczem badawczo-rozwojowym umożliwiającym mu skutecznie podnosić parametry techniczne oferowanych turbin. Co więcej, z uwagi na brak odpowiednich środków, w przypadku większości turbin dostarczanych przez drobnych producentów nie przeprowadzono nigdy badań energetycznych modelu lub prototypu, zaś stosowane technologie dają podstawy wątpić o należytej powtarzalności uzyskiwanych parametrów pracy. Z wielu względów utrwalanie takiego stanu rzeczy należy uznać za wysoce niepożądane.

Wydaje się, że w chwili obecnej rozwiązaniem najbardziej racjonalnym jest współpraca z wyspecjalizowanymi placówkami posiadającymi wieloletnie doświadczenie w pracach badawczo-rozwojowych na rzecz małej energetyki wodnej i możliwość pozyskania części niezbędnych na ich kontynuację środków z Komitetu Badań Naukowych, w ramach tzw. grantów celowych. Jak wiadomo, system takiego wspierania przedsiębiorstw małej i średniej wielkości został zapożyczony z krajów Europy Zachodniej, gdzie od lat z powodzeniem funkcjonuje. Do placówek przygotowanych do tego rodzaju współpracy należą m.in.: Instytut Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk, Politechnika Gdańska oraz Instytut Energetyki O/Gdańsk. Wszystkie te placówki uczestniczyły w latach osiemdziesiątych w cyklu prac badawczo-rozwojowych w ramach programów PR-8 i CPBR 5.1, a w latach 1991-94 realizowały wspólnie pakiet projektów badawczych KBN pn. *Rozwój małej energetyki wodnej*. Wyniki tych prac, w postaci opracowanych dokumentacji maszyn i urządzeń (w tym turbozespołów wodnych), są dostępne dla inwestorów oraz producentów na zasadzie umowy licencyjnej - mogą być również przedmiotem dalszych prac rozwojowych na zasadzie umowy między zainteresowanymi stronami. Rezultaty odnoszące się do turbozespołów wodnych scharakteryzowano krótko w następnych rozdziałach.

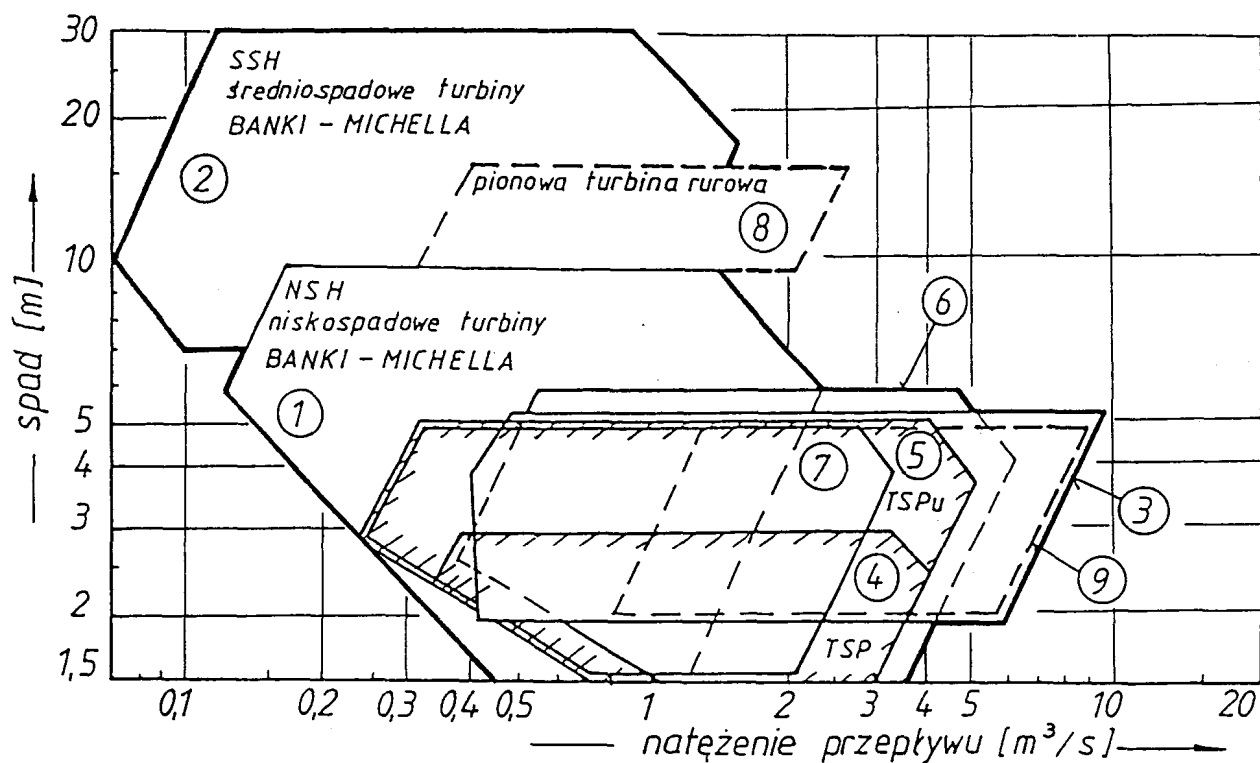
2. TURBINY WODNE MAŁEJ MOCY

2.1 Obszar zastosowań

Wymieniony wyżej cykl prac badawczo-rozwojowych poprzedzony został dokonaniem przez GBPSiE ENERGOPROJEKT rozpoznaniem istniejących i przewidywanych piętrzeń [10]. Z rozpoznania tego wynikało, że ponad 40 % piętrzeń charakteryzuje się spadem poniżej 4 m, a ponad 80 % - spadem



Rys.4 Rozkład piętrzeń dla obiektów MEW ze względu na zakres spadów niwelacyjnych i przepływów



Rys.5 Zakresy stosowania turbin wodnych opracowanych w ramach programów badawczo-rozwojowych i projektów badawczych koordynowanych przez IMP PAN: 1,2 - nisko- i średniospadowe turbiny Banki-Michella (NSH, SSH, SSV), 3 - turbiny rurowe poziome z pojedynczą regulacją (TR), 4,5 - turbiny śmigłowe poziome w układzie lewarowym (TSP) i z napływem (TSPu), 6 - turbiny śmigłowe zunifikowane (TZun), 7 - turbiny kielichowe (TK), 8 - pionowe turbiny rurowe z pojedynczą i podwójną regulacją, 9 - poziome turbiny rurowe z podwójną regulacją; 1,2,4÷7,9 - konstrukcje IMP PAN; 3,8 - konstrukcje Politechniki Gdańskiej

poniżej 10 m. Natężenie przepływu w większości istniejących i przewidywanych do budowy obiektów nie przekracza $2 \text{ m}^3/\text{s}$ (rys.4). Istniejący zakres potrzeb zdecydowano się pokryć typoszeregami turbin Banki-Michella oraz turbin śmigłowych i turbin Kaplana w układzie rurowym (rys.5). Dla piętrzeń o najmniejszych przepływach przewidziano zastosowanie pomp w pracy turbinowej [11]

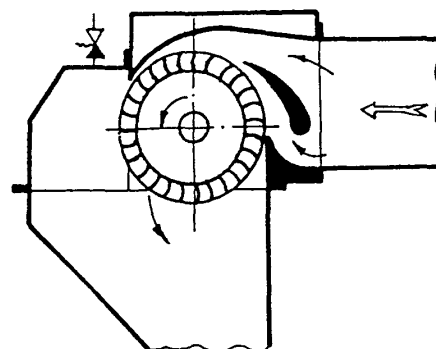
2.2. Turbiny Banki-Michella

Turbiny Banki-Michella są dwustopniowymi maszynami akcyjnymi o poprzecznym przepływie wody przez wirnik. Zasadę ich funkcjonowania wyjaśnia rys.6. Zasadniczym powodem zainteresowania zastosowaniem tych turbin dla potrzeb krajowej energetyki wodnej była ich prosta konstrukcja, duża niezawodność ruchu oraz nieskomplikowana obsługa i konserwacja.

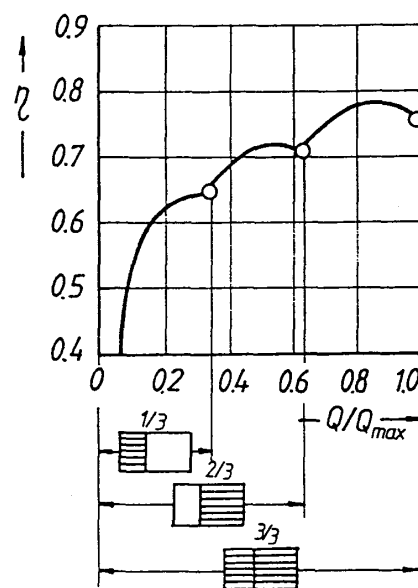
Wirnik może być wykonany jako konstrukcja spawana, składająca się z wału, tarcz bocznych z wyfrezowanymi nacięciami i łopatek wykonanych z fragmentów rur stalowych. Chociaż frezowanie nacięć i spawanie łopatek należą do operacji pracochłonnych, można je z reguły wykonać w dobrze wyposażonym warsztacie mechanicznym.

Do ważnych zalet turbin Banki-Michella należy łatwa regulacja przepływu przy użyciu pojedynczej łopatki kierowniczej. Dodatkową możliwość regulacji stwarza podział wirnika na nierówne, osobno zasilane sekcje. Pozwala to na spłaszczenie krzywej sprawności w szerokim zakresie przepływów (rys.7). Sprawność turbiny Banki-Michella w optymalnym punkcie pracy mieści się zwykle w przedziale $70 \div 75 \%$. Jak wykazały badania przeprowadzone w laboratorium IMP PAN, a następnie w warunkach eksploatacyjnych, po usunięciu wału z przestrzeni przepływowej wirnika, turbina osiąga sprawność przekraczającą 80% [12].

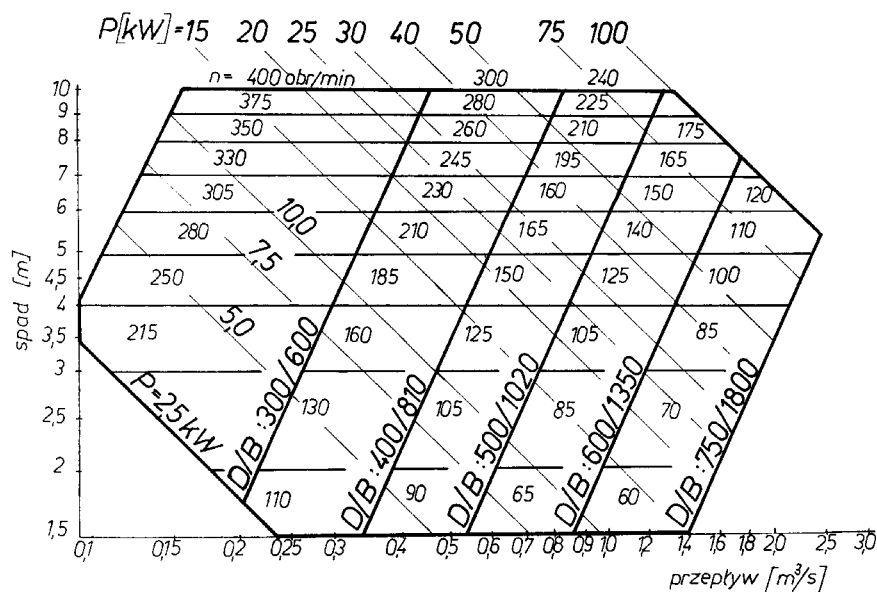
Turbina stwarza niewielkie możliwości odzysku energii w ruchu ssącej, zaś zbyt duże podciśnienie na ssaniu grozi uszkodzeniami kawitacyjnymi. Z kolei, ze względu na straty brodenia, wirnik musi być posadowiony odpowiednio wysoko nad dolną wodą. Z tego tytułu nie zaleca się jej stosowania do najniższych spadów.



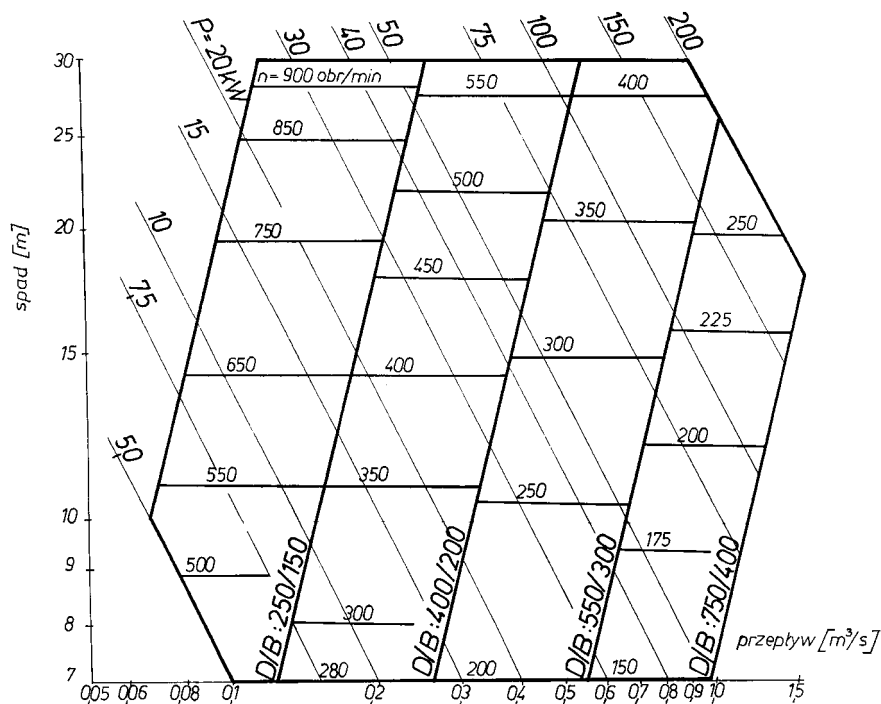
Rys. 6 Zasada działania turbiny Banki-Michella



Rys.7 Krzywa sprawności turbiny Banki-Michella z dzielonym wirnikiem



Nomogram średnispadowego typoszeregu turbin Banki-Michella



Rys.8 Nomogramy nisko- i średnispadowego typoszeregu turbin Banki-Michella

Turbiny Banki-Michella są od lat produkowane przez szereg firm zagranicznych działających na rzecz małej energetyki wodnej [13]. W sytuacji, gdy w kraju od ćwierćwiecza brak było profesjonalnego producenta turbin wodnych¹, udostępnienie inwestorom i zainteresowanym jednostkom gospodarczym dokumentacji turbin Banki-Michella uznano za rozwiązanie optymalne.

W latach osiemdziesiątych opracowano w IMP PAN i w OBR Górnictwa Surowców Chemicznych CHEMKOP dokumentację dwóch typoszeregów turbin Banki-Michella, przystosowanych odpowiednio do pracy przy spadzie do 10 i do 30 m². Parametry ruchowe poszczególnych typów wielkości można odczytać z nomogramów (rys.8). Charakterystyczne wymiary geometryczne wirników oznaczono tu symbolami D (średnica) i B (szerokość).

Prototypowe turbiny niskospadowe zostały zainstalowane w

roku 1985 elektrowniach pilotowych Osowo Lęborskie i Smokowo, a turbiny średnispadowe - w MEW Rytro (1985) i Wisła Czarne (1988). Doświadczenia z eksploatacji wskazują, że przy poprawnym posadowieniu i doborze turbin, maszyny te pracują niezawodnie, zaś zastosowane rozwiązania łożyskowania

¹ Produkcję turbin Francisa w Radomsku zatrzymano w latach pięćdziesiątych. W późniejszym okresie turbiny Kapłana konstruacji Katedry Turbin Wodnych i Pomp Politechniki Gdańskiej wykonywała okazjonalnie Stocznia Marynarki Wojennej.

wirnika i kierownicy zapewniają bezawaryjną pracę tych elementów. Turbiny osiągają również założone parametry ruchowe, a sprawność w większości przypadków przekracza wartości gwarantowane. Stwierdzono poprawną współpracę z układami regulacji od poziomu górnej wody oraz automatycznej synchronizacji generatorów.

2.3. Turbiny śmigłowe

Zainteresowanie szybkobieżnymi turbinami śmigłowymi wynikało z dużego udziału piętrzeń poniżej 5 m wśród obiektów hydrotechnicznych przewidywanych do wykorzystania energetycznego (rys.4). Szczególna atrakcyjność zabudowy lewarowej (rys.9) związana jest z możliwością obniżenia ta drogą kosztów prac budowlanych. W Instytucie Maszyn Przepływowych PAN prowadzone były prace nad turbinami lewarowymi o pionowej i poziomej osi wirnika. Te ostatnie prace doprowadziły do opracowania



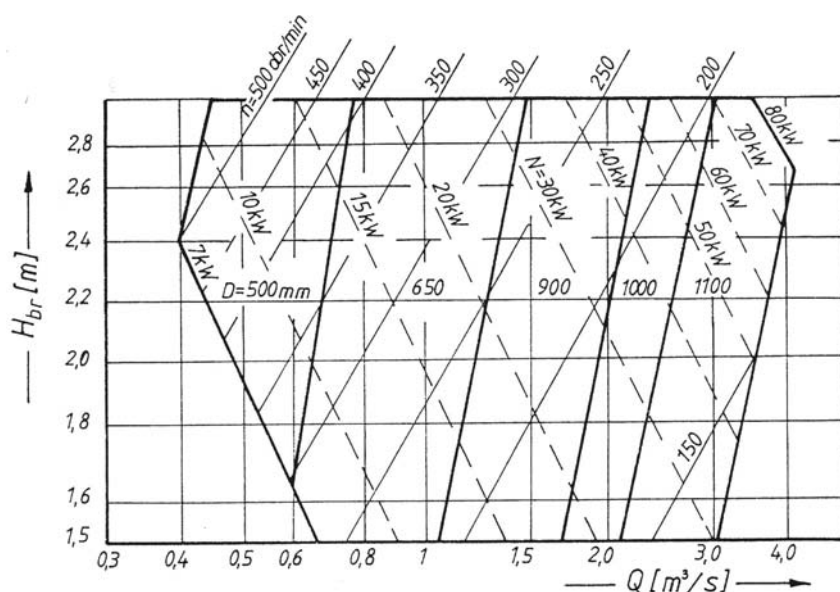
Rys.9 Turbozespół z turbiną lewarową TSP1000 w MEW Jaracz k/Rogoźna (woj. poznańskie): spad $H = 2,4$ m, moc elektryczna $P = 47$ kW

typoszeregu turbin TSP o szybko-
bieżności $n_{sQ} = 180$. Na układ
przepływowy turbin TSP składa
się kolanowy króciec wlotowy,
kierownica z 7 łopatkami stałymi
wykonanymi z wygiętej w po-
wierzchnię stożkową blachy sta-
lowej, wirnik czterołopatkowy i
kolanowa rura ssąca. Przetawia-
nie łopatek odbywa się na posto-
ju, po otwarciu komory wirnika.
Z uwagi na sposób zabudowy i
bezpieczeństwo kavitacyjne (σ_{dop}

$= 1,75$), turbiny są przeznaczone do pracy przy spadzie niwelacyjnym nie przekraczającym 3 m.

Turbiny TSP, w których wlotowy króciec kolanowy zastąpiono krótkim króćcem prostoosiowym łączącym turbinę z zaworem motylowym tworzą typoszereg TSPu. Z uwagi na mniejsze straty wlotowe turbiny te charakteryzuje większy wyróżnik szybkobieżności ($n_{sQ} = 215$) i wyższa sprawność ($\eta = 86\%$) niż turbiny TSP. Turbiny TSPu przeznaczone są do pracy przy spadzie do 5 m.

² Uwaga: Spad niwelacyjny, podobnie jak w turbinie Peltona, liczony jest od zwierciadła górnej wody do dolnej krawędzi wirnika.



Rys.10 Nomogram typoszeregu śmigłowych turbin lewarowych TSP

W roku 1992 w elektrowni pilotowej Łebień II (ZE Słupsk) przeprowadzono badania własności energetycznych prototypowej turbiny TSP przy zmiennej prędkości obrotowej [14]. Badania stały się podstawą do określenia charakterystyk uniwersalnych oraz nomogramów typoszeregów TSP i TSPu [15], (rys.10). Doświadczenia z eksploatacji turbin prototypowych zainstalowanych w MEW Łebień II i Radawa [16] zaowocowały udoskonaloną konstrukcją turbiny zainstalowanej w lutym 1995 roku w MEW Jaracz w województwie poznańskim (rys.9). Turbozespół posadowiono bezpośrednio na jazie, poza budynkiem elektrowni, w którym umieszczono tylko szafy rozdzielcze i sterownicze.

Obecnie turbiny TSP cieszą się rosnącym zainteresowaniem wśród inwestorów małej energetyki wodnej. Ich instalację planuje się w kolejnych obiektach MEW na terenie Wielkopolski. W najbliższej przyszłości przewiduje się również wprowadzenie do jednostek o średnicach ponad 650 mm hydraulicznego układu przedstawiania łopatek wirnika, co powinno zdecydowanie poprawić ich walory funkcjonalne.

Potrzeba prowadzenia prac nad turbinami śmigłowymi o wlocie kielichowym powstała z zapotrzebowania na maszyny hydroenergetyczne przystosowane do pracy w komorach otwartych, w których niegdyś zainstalowane były niskospadowe turbiny Francisa. Komory takie znajdują się w szeregu zdewastowanych elektrowni i siłowni wodnych. Instalacja nowej turbiny Francisa jest zwykle niecelowa z uwagi na wysokie koszty oraz stosunkowo niską szybkobieżność i przepływność tych maszyn. Rozwiązaniem racjonalnym okazuje się nato-

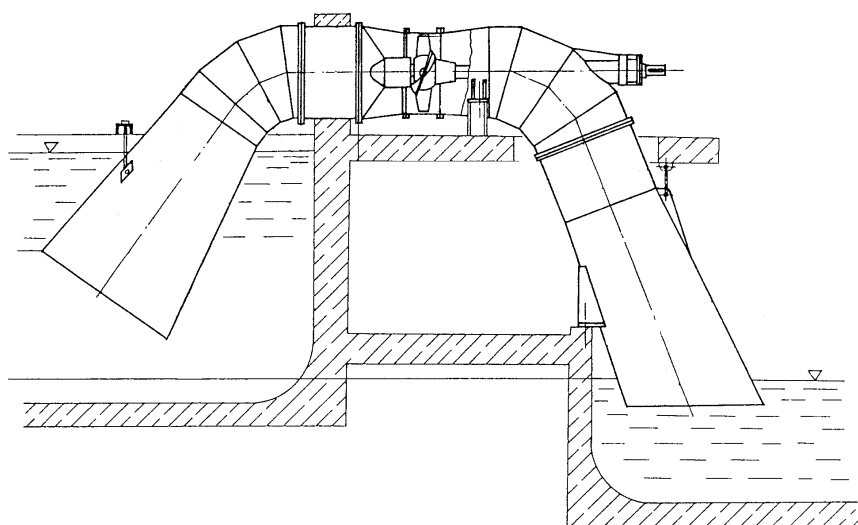


Rys.11 Turbina kielichowa z układem łopatkowym TSP350 przewidziana do instalacji w MEW Jasło

miast zainstalowanie nowoczesnej turbiny o wirniku osiowym - np. turbiny Kaplana wyposażonej w regulowaną lub nieregulowaną kierownicę promieniową (tzw. semi-Kaplan). Zdecydowanie najtańszym rozwiązaniem jest instalacja turbiny śmigłowej z wlotem kielichowym i łopatkami wirnika nastawianymi na postoju. W przypadku niewielkich mocy rozwiązanie to bywa chętnie akceptowane przez drobnych inwestorów.

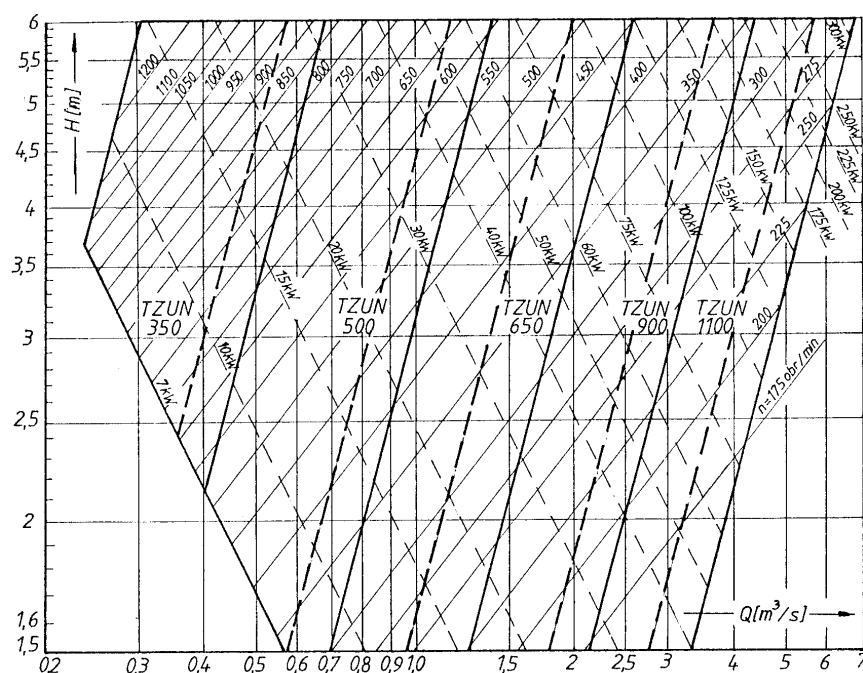
W roku 1995 w IMP PAN skonstruowano model użytkowy turbiny wyposażony w układ łopatkowy typu TSP350 (rys.11). Model zostanie zainstalowany w małej elektrowni wodnej w pobliżu Jasła. W latach następnych gromadzone będą doświadczenia eksploatacyjne.

Punktem wyjścia do budowy typoszeregu turbin śmigłowych zunifikowanych, TZun, były opisane wcze-



Rys.12 Turbiny śmigłowe zunifikowane w zabudowie lewarowej poziomej oraz kolanowej i kielichowej pionowej

śniej typoszeregi turbin TSP i TSPu. Duże zapotrzebowanie na turbiny śmigłowe o wysokiej szybkoobrotowości, instalowane poziomo i pionowo, z wałem po stronie ssania i napływu, a także w układzie kielichowym, sprawiło, że zdecydowano się na prace nad unifikacją zmierzającą do obniżenia kosztów seryjnej budowy turbin, a tym samym i nakładów inwestycyjnych na budowę elektrowni poprzez: modułową konstrukcję turbiny polegającą na tym, że kierownica, wirnik i obudowa wirnika są elementami stałymi dla każdego wykonania. Dzięki możliwości wyprowadzenia wału od strony napływu lub wypływu oraz zastosowania różnych elementów dolotowych i wylotowych, turbinę można instalować w różnorodnych układach zabudowy. Niektóre z nich pokazano na rys.12.



Rys.13 Nomogram typoszeregu turbin zunifikowanych TZun w zabudowie poziomej z napływem.

Prototypowa turbina zunifikowana w układzie poziomym z napływem była przedmiotem badań w MEW Ruś k/Olszyna [17]. Badania te stały się podstawą do konstrukcji nomogramu przedstawionego na rys.13.

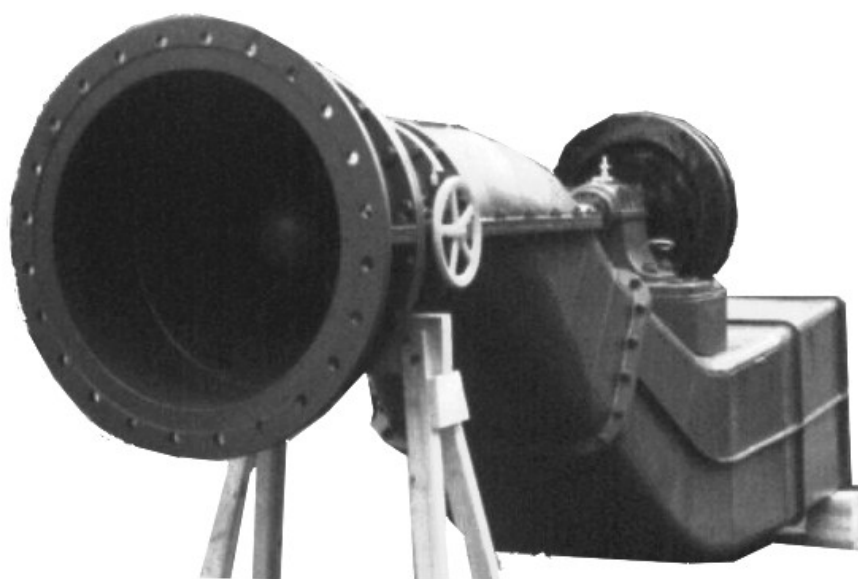
2.4. Turbiny rurowe z pojedynczą i podwójną regulacją

Celem prac nad turbinami rurowymi o pojedynczej i podwójnej regulacji było uzyskanie wysoko-sprawnych konstrukcji umożliwiających dobre wykorzystanie energii surowej w szerokim zakresie przepływów. Przewidziano, że regulacja turbin odbywać się będzie w ruchu. Z natury rzeczy chodziło więc o rozwiązanie droższe niż w przypadku wcześniej opisanych turbin śmigłowych.

Turbiny z pojedynczą regulacją, opracowane w latach osiemdziesiątych w Katedrze Turbin Wod-

nym i Pomp Politechniki Gdańskiej, charakteryzują się staranym wyprofilowaniem całego kanału przepływowego. Wypo-sażone są w wirnik czterołopatkowy i kierownicę z łopatkami cienkimi lub powłokowymi (pro-filowanymi).

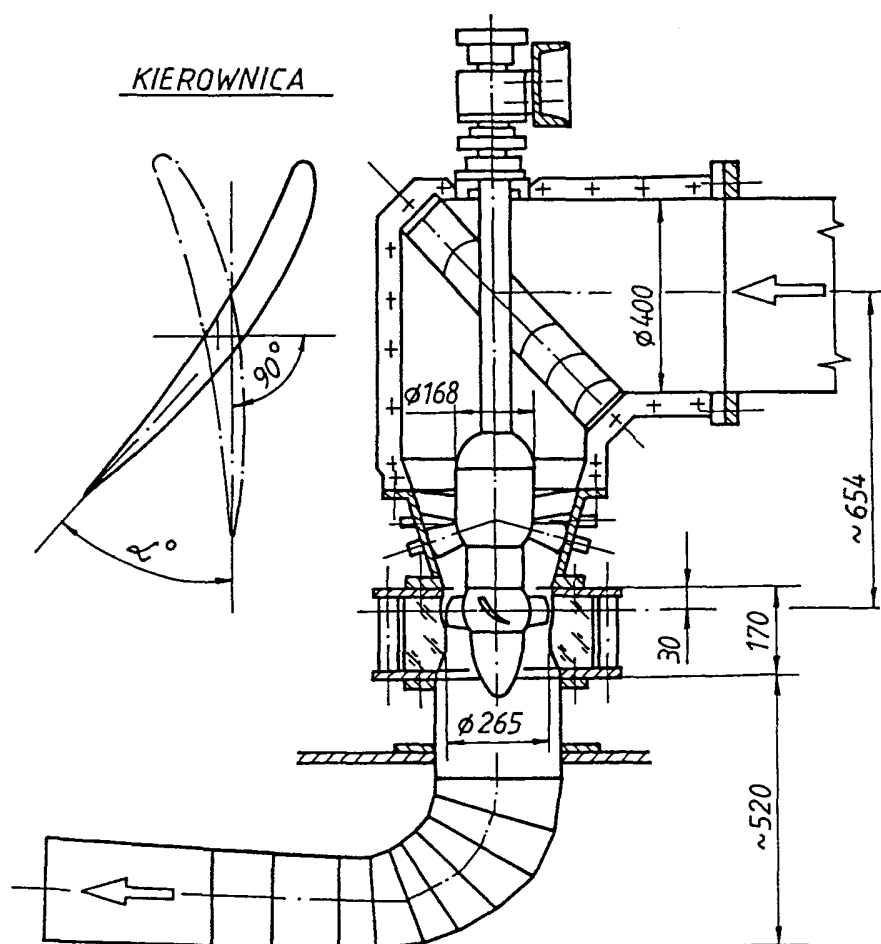
Szczególną uwagę zwróco-no na kształt rury ssącej - zarówno w wersji jedno-, jak i dwuko-lanowej (rys.14). Badania proto-typów przeprowadzone w MEW Świąte i MEW Rawa Mazowiec-



Rys.14 Pozioma turbina rurowa o pojedynczej regulacji przed instalacją w MEW Biesowice; średnica wirnika: 500 mm, moc: 50 kW

ka [18] potwierdziły dobre własności eksploatacyjne turbiny. Sprawność w obu przypadkach okazała się być zbliżona do 84 %. Wymiary charakterystyczne poszczególnych typów wielkości oraz charakterystyki uniwersalne i nomogramy typoszeregów znaleźć można w informatorze [2].

W latach dziewięćdziesiątych wysiłki skoncentrowano na opracowaniu turbin rurowych pionowych o pojedynczej i podwójnej regulacji (Politechnika Gdańska) oraz turbin poziomych o regulacji podwójnej (IMP PAN). Turbiny pionowe przewidziane są do pracy przy spadach $10 \div 14$ m, turbiny poziome do pracy przy spadach nie przekraczających $6 \div 8$ m. Zakłada się, że typoszeregi turbin obejmą jednostki o mocach do kilkuset kW.



Prace prowadzone na Politechnice Gdańskiej doprowadziły do opracowania turbiny z 6-łopatkowym wirnikiem i 12-łopatkową kierownicą [19]. Podobnie, jak poprzednio, uwagę zwraca staranne wyprofilowanie całego kanału przepływowego, a zwłaszcza kolanowego wlotu na kierownicę (rys.15). Zadbano o odpowiednio duży przekrój kolana oraz umieszczono w nim palisadę łopatek porządkujących przepływ. Przewiduje się, że prototyp turbiny w wersji ze stałymi łopatkami kierownicy zostanie zainstalowany w MEW Chańcza.

Prace nad turbiną poziomą o podwójnej regulacji zakończyły

Rys.15 Schemat modelowej pionowej turbiny rurowej. Laboratorium Katedry Mechaniki Płynów i Maszyn Wirnikowych Politechniki Gdańskiej się na razie na etapie badań modelowych [20]. Model turbiny wyposażony jest w czterołopatkowy wirnik i 14-łopatkową kierownicę. W trakcie badań osiągnięto zadowalającą sprawność (86 %). W przypadku pozyskania stosownych środków zamierza się doprowadzić do zwiększenia szybkobieżności turbiny oraz przystąpić do opracowania dokumentacji i budowy prototypu.

3. GENERATORY I PRZEKŁADNIE MECHANICZNE

Przystępując do prac badawczo rozwojowych zakładano [10], że przynajmniej część elektrowni będzie musiała być przystosowana do pracy na sieć wydzieloną. Wiązało się to z utrzymującym się w drugiej połowie lat siedemdziesiątych permanentnym kryzysem energetycznym prowadzącym do częstych wyłączeń i zaników napięcia, co miało katastrofalne skutki dla specjalistycznych gospodarstw wiejskich, ferm drobiarskich i ogrodnictw szklarniowych. Z uwagi na fakt, że w programie produkcji hydrogeneratorów Dolmelu Wrocław (dziś ABB Dolmel Ltd) brak było jednostek o mocach poniżej 300 kVA, Instytut Elektrotechniki wspólnie z Instytutem Energetyki, EMITem Żychlin, ZRE Gdańsk oraz Zakładem Badawczo-Wdrożeniowym ATEX opracowały typoszereg generatorów synchronicznych o szybkości obrotowej 500 obr/min i mocach w zakresie 30 ÷ 100 kVA oraz statycznym, tyrystorowym układzie wzbu-

dzenia. Ponadto firma EMIT Żychlin przystąpiła do przygotowania produkcji seryjnej generatora typu Gce 400-L12 o mocy 125 kVA, a Instytut Energetyki opracował serię przystosowanych do współpracy z generatorami synchronicznymi regulatorów typu RTBS (turbozespół z turbiną Banki-Michella) i RTRS (turbozespół z turbiną rurową).

Spadek zapotrzebowania na energię i wywołana nim zdecydowana poprawa niezawodności zasilania przez sieć ogólnopństwową w latach dziewięćdziesiątych sprawiły, że rozwiązanie to nie znalazło przewidywanego zastosowania z uwagi na stosunkowo wysoką cenę i złożoność układu regulacji. Ostatecznie prototypowy generator synchroniczny o mocy 125 kVA zainstalowano jedynie w elektrowni pilotowej Wisła-Czarne, gdzie współpracuje on z średniosпадową turbiną Banki-Michella. Instalację kolejnego egzemplarza przewiduje się w bieżącym roku w małej elektrowni wodnej przy schronisku PTTK w Dolinie Chochołowskiej.

W tej sytuacji, dla większości obiektów MEW preferuje się stosowanie generatorów asynchronicznych. Funkcję takich generatorów z powodzeniem spełniają niskoobrotowe indukcyjne silniki klatkowe produkowane seryjnie przez firmy TAMEL Tarnów, INDUKTA Bielsko-Biała, CELMA Cieszyn i EMIT Żychlin. Przy doborze silnika do pracy prądnicowej należy zwrócić uwagę m.in. na odporność wirnika na awaryjny wzrost szybkości obrotowej podczas rozbiegu turbiny oraz na fakt, że - znamionowa szybkość obrotowa w pracy prądnicowej jest nieco większa od szybkości synchronicznej. Szczegółowe informacje na temat doboru indukcyjnych silników klatkowych produkcji krajowej do pracy prądnicowej znaleźć można w poświęconym temu zagadnieniu informatorze CPBR 5.1 [4].

Z uwagi na fakt, że szybkość obrotowa wszystkich wymienionych w [4] silników indukcyjnych przekracza w pracy prądnicowej 500 obr/min, tylko w wyjątkowych przypadkach (turbina o małej średnicy pracująca pod stosunkowo wysokim spadem) można liczyć na możliwość bezpośredniego sprzęgnięcia wałów turbiny i generatora. W tej sytuacji konieczne jest stosowanie przekładni mechanicznych zwiększających liczbę obrotów (multiplikatorów).

Przewiduje się stosowanie zarówno przekładni pasowych wykorzystujących pasy klinowe lub płaskie, jak i przekładni zębatych produkowanych seryjnie jako reduktory. W ramach prac objętych programem PR-8 i CPBR 5.1 dokonano szczegółowego rozpoznania możliwości wykorzystania produkcji przemysłu krajowego dla potrzeb MEW. Szczegółowe informacje dotyczące zasad doboru wraz z danymi katalogowymi wybranych firm przedstawiono w informatorze [7].

4. REGULATORY ELEKTROHYDRAULICZNE

Regulację parametrów pracy w trakcie ruchu turbozespołu przewidziano w przypadku turbin Banki-Michella i turbin rurowych poziomych i pionowych. W przypadku turbin śmigłowych sterowanie pracą maszyny dotyczy jedynie procesów rozruchu i zatrzymywania. Opracowania wszystkich tych układów podjął się Instytut Energetyki, który dziś jest już liczącym się dostawcą regulatorów dla krajowej energetyki wodnej.

Regulatory dla turbin Banki i turbin rurowych o pojedynczej regulacji skonstruowano w oparciu o opracowany w Instytucie Energetyki analogowy, elektroniczny system modułowy. Zakres ich stosowania podano w tabeli, natomiast szczegółowe informacje dotyczące zasad funkcjonowania znaleźć można w [6]. W ramach tego samego pakietu opracowano również regulator do sterowania ruchem turbozespołu z pionową turbiną rurową o podwójnej regulacji oraz regulator wyposażenia w mechanizm przestawiania łopatek wirnika.

Tablica 1

regulator	turbina	generator
RTBA 11	średniospadowe turbiny Banki-Michella	asynchroniczny
RTBA 21	niskospadowe turbiny Banki-Michella typu NSH 400/810 600/1350 i 750/1800	asynchroniczny
RTBA 21E	nisko - i średniospadowe turbiny Banki-Michella	asynchroniczny
RTBS 11	średniospadowe turbiny Banki-Michella	synchroniczny
RTBS 21	niskospadowe turbiny Banki-Michella	synchroniczny
RTRA - ESL	poziome turbiny rurowe o pojedynczej regulacji	asynchroniczny
RTRA - SEH	poziome turbiny rurowe o pojedynczej regulacji	synchroniczny
układ automatyki i rozruchu turbiny lewarowej	turbina lewarowa	asynchroniczny
RTSA - K	turbiny śmigłowa w układzie kolanowym	asynchroniczny

5. WNIOSKI

1. Budowa i eksploatacja obiektów MEW tworzy korzystne warunki dla poprawy stanu gospodarki wodnej w szczególności: dla nawadniania i utrzymywania poziomów wód gruntowych, tworzenie nowych obiektów tzw. małej retencji, hodowli ryb i leśnictwa.

Godnym podkreślenia jest fakt, że małe elektrownie wodne przy ich właściwym rozwiązaniu oddziałują pozytywnie krajobrazowo i nie mają ujemnego wpływu na otoczenie, bowiem eksploatacja ich wiąże się z koniecznością utrzymania w czystości i odpowiednim stanie technicznym cieku i urządzeń hydrotechnicznych. Należy również wspomnieć o tworzeniu przez małe elektrownie wodne nowych miejsc pracy a także o aktywizacji często zaniedbanych gospodarczo terenów.

2. W warunkach krajowych małe elektrownie wodne (do 5 MW) wnoszą zauważalny wkład w produkcję energii ze źródeł odnawialnych.
3. Uwzględniając fakt, że energetyka wodna, w tym również małe elektrownie wodne, łączą ze sobą dwie bardzo istotne dziedziny życia gospodarczego kraju, tj. gospodarką energetyczną i gospodarkę wodną, należy stwierdzić, że działalność w tym zakresie nie może zależeć wyłącznie od spraw rynkowych. Trzeba również uwzględnić, że tego typu inwestycje są inwestycjami kapitałochłonnymi o długim okresie amortyzacji, natomiast okres ich eksploatacji trwa wiele dziesiątek lat. Dlatego też w kształtującym się nowym systemie gospodarczym konieczne jest opracowanie perspektywicznego programu rozwoju MEW, odpowiednie oddziaływanie Państwa na zagadnienia formalno-prawne dotyczące budownictwa i eksploatacji elektrowni oraz na warunki ekonomiczne z tym związane. Istnieje więc potrzeba szybkiego podjęcia szeregu decyzji administracyjnych i ustawodawczych, uwzględniających kilka najistotniejszych problemów związanych z rozwojem małej energetyki wodnej.

W szczególności powinny one dotyczyć:

- określenia warunków przyłączenia MEW do wspólnej sieci elektroenergetycznej,
 - zaliczenie realizacji MEW do inwestycji proekologicznych oraz utworzenie funduszu wspierającego ich rozwój,
 - uregulowania statusu terenów przejętych przez Lasy Państwowe po zdewastowanych zbiornikach wodnych,
 - stworzenie podstaw prawnych dla udostępnienia państwowych obiektów hydrotechnicznych oraz do prywatyzacji małych elektrowni wodnych będących w gestii Zakładów Energetycznych i jednostek budżetowych,
 - przeszkolenia pracowników administracji państwowej w zakresie współpracy z inwestorami MEW.
4. Produkcja wyposażenia dla MEW jest w kraju rozproszona a jej poziom techniczny w wielu przypadkach nie odpowiada standardom europejskim. Z tego tytułu za pożądane uznać należy wspieranie prac badawczo-rozwojowych zmierzających do poprawy istniejącego stanu rzeczy. Za obiecującą uznać należy współpracę producentów z placówkami badawczymi w ramach tzw. grantów celowych.

LITERATURA

1. Uchwała Rady Ministrów nr 192 z dnia 7 września 1981. Monitor Polski nr 24, 25 września 1981
2. KRZYŻANOWSKI W., SKORUPA W., JAKUBEK A., IWAN J., ŻOCHOWSKI K., KSIĄŻKIEWICZ A.: Turbiny rurowe o uproszczonej konstrukcji. Cechy konstrukcyjno-funkcjonalne turbin wodnych rurowych o uproszczonej konstrukcji. Centralny Program Badawczo-Rozwojowy pn. „Kompleksowy Rozwój Energetyki”. Informator, seria „Mała Energetyka Wodna”, Gdańsk 1990
3. GAŁKA E.: Turbiny Banki-Michella. Cechy konstrukcyjno-funkcjonalne turbin wodnych Banki-Michella niskospadowych i średnispadowych. *ibid.*

4. ZAWADA T.: Prądnice asynchroniczne. Materiały informacyjne dotyczące stosowania seryjnie produkowanych silników indukcyjnych jako generatorów asynchronicznych. *ibid*
5. GRABOWSKI A., MŚCIWOJEWSKI E., TEPCHYŃSKI W., BONIN J., RACZUNAS W.: Prądnice synchroniczne. Generatory synchroniczne dla małych elektrowni wodnych. *ibid*.
6. BINIEK L., JAŚKOWIAK K., KOSIEK J., ŁUKASZUK J., PIATKOWSKA L., PRZYCHODZIŃ L., STEFAŃSKI S.: Regulatory elektrohydrauliczne. *ibid*.
7. MINKIEWICZ H.: Przekładnie mechaniczne dla małych elektrowni wodnych. (Materiały informacyjne). *ibid*.
8. MINKIEWICZ H.: Urządzenia pomocnicze. Zawory, zamknięcia awaryjno-remontowe, kraty wraz z czyszczarkami dla małych elektrowni wodnych. *ibid*.
9. HOFFMANN M. (red.): Małe elektrownie wodne. Poradnik. Nabba Sp. z O.O. , Warszawa 1991
10. HOFFMANN M.: Podstawowe założenia dla rozwoju małej energetyki wodnej i wynikające z nich wytyczne do standaryzacji turbozespołów dla tych elektrowni. *Prace IMP z. 83-84, 1983, s.61-71*
11. STELLER K.: Pompy wirowe jako turbiny wodne. *Zesz. Nauk. IMP PAN nr 297/1262/90*
12. REYMANN Z.: Turbiny Banki-Michella konstrukcji IMP PAN. Doświadczenia z badań modeli i prototypów. *Zesz. Nauk. IMP PAN nr 400/1363/93*
13. Small, Mini & Micro Hydropower. Product Guide. Modern Power Systems, July 1992, pp.37-51
14. REYMANN Z.: Badanie charakterystyki uniwersalnej prototypu turbiny lewarowej w EW Łebień II. *Opr. IMP PAN nr 68/93*
15. HENKE A., REYMANN Z., STELLER J.: Analiza własności energetycznych niskospadowych typoszeręgów turbin śmigłowych TSP i TSPu na podstawie badań turbiny prototypowej zainstalowanej w EW Łebień. *Opr. IMP PAN nr 347/94*
16. HENKE A., REYMANN Z., STELLER J.: Doświadczenia z eksploatacji prototypowych turbin rurowych oraz turbin śmigłowych lewarowych opracowanych w ramach Centralnego Programu Badawczo-Rozwojowego nr 5.1. Część II: Turbiny lewarowe. *HYDROFORUM'94. „Maszyny wirnikowe i urządzenia hydrauliczne w energetyce wodnej. Materiały Konf. Nauk.-Techn., Straszyn, wrzesień 1994; Wydawnictwo IMP PAN, Gdańsk 1994, s.197-216*
17. REYMANN Z.: Własności energetyczne śmigłowych turbin zunifikowanych na podstawie badań prototypu zainstalowanego w EW Ruś. *Opr. IMP PAN nr 324/94*
18. HENKE A., WASILEWSKI J.: Doświadczenia z eksploatacji prototypowych turbin rurowych oraz turbin śmigłowych lewarowych opracowanych w ramach Centralnego Programu Badawczo-Rozwojowego nr 5.1. Część I: Turbiny rurowe. *HYDROFORUM'94. „Maszyny wirnikowe i urządzenia hydrauliczne w energetyce wodnej. Materiały Konf. Nauk.-Techn. Straszyn wrzesień 1994; Wydawnictwo IMP PAN, Gdańsk 1994, s.187-196*
19. KRZYŻANOWSKI W.: Pionowa rurowa turbina wodna pracująca z kierownicą o przestawialnych łopatkach i wirnikiem 6-łopatkowym. [w:] „Wirnikowe maszyny przepływowe”, KBN, Instytut Maszyn Przepływowych Politechniki Łódzkiej, Łódź, 1993-12-03, s.32-35
20. REYMANN Z.: Badania modelowej turbiny rurowej o podwójnej regulacji. *Opr. IMP PAN nr 279/94*