

Opracowano na podstawie:

„Jak zbudować małą elektrownię wodną?” Przewodnik ESHA 2010 – tłumaczenie i redakcja wydania polskiego dr Janusz Steller + zespół

TECHNOLOGIE WSPÓŁCZEŚNIE STOSOWANE - TURBINY

Podstawowymi parametrami, które warunkują wybór turbiny dla elektrowni wodnej są:

1. spad,
2. przepływ,
3. równomierność przepływu.

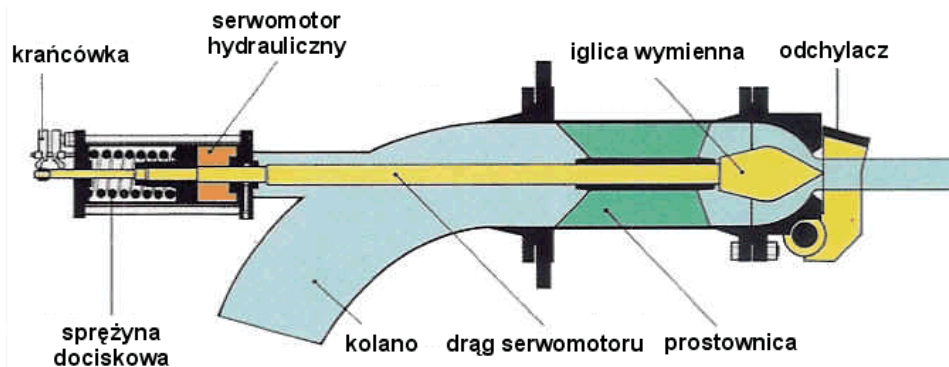
Zakłada się przy tym niezmiennosc spad, ponieważ duże fluktuacje w tym zakresie występują w ciekach o górskim charakterze przepływu, na których udaje się zazwyczaj osiągnąć stosunkowo wysokie spad, a więc zmiany rzędnej na odpływie, powstałe wskutek wahań przepływu, są relatywnie niewielkie. Na rzekach nizinnych, gdzie zmienność przepływu jest dużo niższa, wahania rzędnej dolnego stanowiska również są niewielkie.

Zadaniem turbiny wodnej jest przetwarzanie energii potencjalnej i kinetycznej przepływu wody w energię mechaniczną ruchu obrotowego. Podstawowym elementem turbiny wodnej jest jej wirnik, w którym dochodzi do przemiany energetycznej. W trakcie tej przemiany napływająca struga cieczy traci moment pędu liczony względem osi wirnika z szybkością zależną od masowego natężenia przepływu. Jest to cecha w istotny sposób odróżniająca turbiny wodne od maszyn grawitacyjnych stosowanych w małej energetyce wodnej – takich, jak np. koła wodne nasiębnierne, czy maszyna z wirnikiem śrubowym Archimedesesa (niepoprawnie nazywana czasem turbiną ślimakową).

Przekazywanie momentu pędu wody na wał turbiny odbywa się według jednego z następujących mechanizmów:

- Ciśnienie wody wywiera napór na łopatki wirnika. W miarę, jak struga wody przemieszcza się przez turbinę, ciśnienie maleje, a związana z nim energia ulega konwersji na energię mechaniczną ruchu obrotowego i jest przekazywana na generator przez wał napędowy. Wirnik turbiny jest całkowicie zanurzony, a jego konstrukcja musi wytrzymać bezpiecznie ciśnienie robocze wody. Turbiny działające w ten sposób, to turbiny reakcyjne. Do tej grupy zaliczają się turbiny Francisza i Kaplana.
- Energia ciśnienia wody jest zamieniana na energię kinetyczną zanim struga cieczy zetknie się z wirnikiem i przekaże mu swoją energię. Struga ta przenosi energię kinetyczną z wielką prędkością uderzając o czarki zamontowane na obwodzie wirnika. Turbiny, które działają w ten sposób, to turbiny akcyjne. Najczęściej spotykaną turbiną akcyjną jest turbina Peltona.

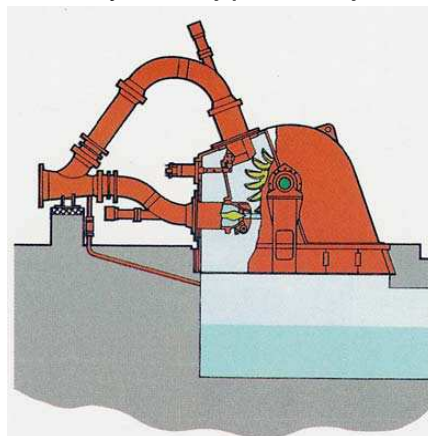
Turbiny Peltona



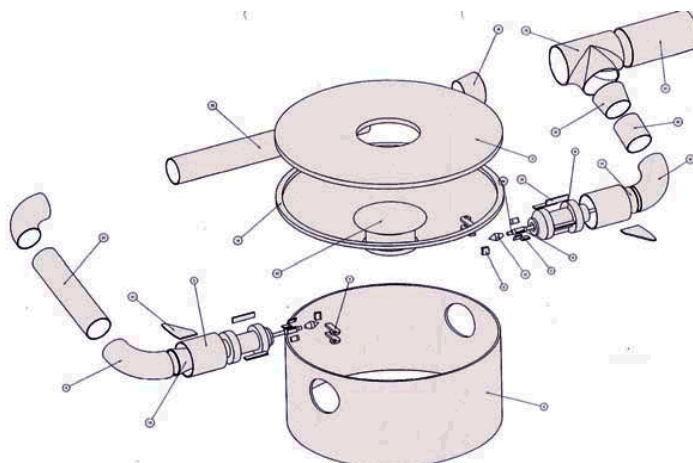
Turbiny Peltona są turbinami akcyjnymi, w których jedna lub więcej strug uderza z dużą prędkością w czarki osadzone na obwodzie tarczy wirnika. Każda struga formowana jest w dyszy wyposażonej w zawór iglicowy stanowiący organ regulacji przepływu. Turbiny te stosuje się do pracy przy wysokich spadach, od 60 do ponad 1000 m. Osie dysz znajdują się w płaszczyźnie wirnika. W razie konieczności awaryjnego zatrzymania turbiny (np. w przypadku zrzutu obciążenia), struga może zostać odchylona przez odchylacz tak, że nie uderza już w czarki i wirnik nie osiąga obrotów rozbiegowych. Pozwala to na powolne zamknięcie zaworu iglicowego, dzięki czemu unika się uderzenia hydraulicznego (wzrost ciśnienia w rurociągu utrzymywany jest w dopuszczalnych granicach, do $1,15 \times$ ciśnienie statyczne). Ponieważ cała energia kinetyczna wody opuszczającej wirnik jest tracona bezpowrotnie, czarki projektuje się tak, aby prędkość wylotowa wody była możliwie niska.

Jedno- lub dwudyszowe turbiny Peltona budowane są w układzie z osią pionową. Turbiny z trzema lub większą liczbą dysz buduje się zwykle w układzie z osią poziomą. Maksymalna liczba dysz wynosi 6. Układ taki występuje bardzo rzadko w małych elektrowniach wodnych.

Rys. Widok dwudyszowej poziomej turbiny Peltona



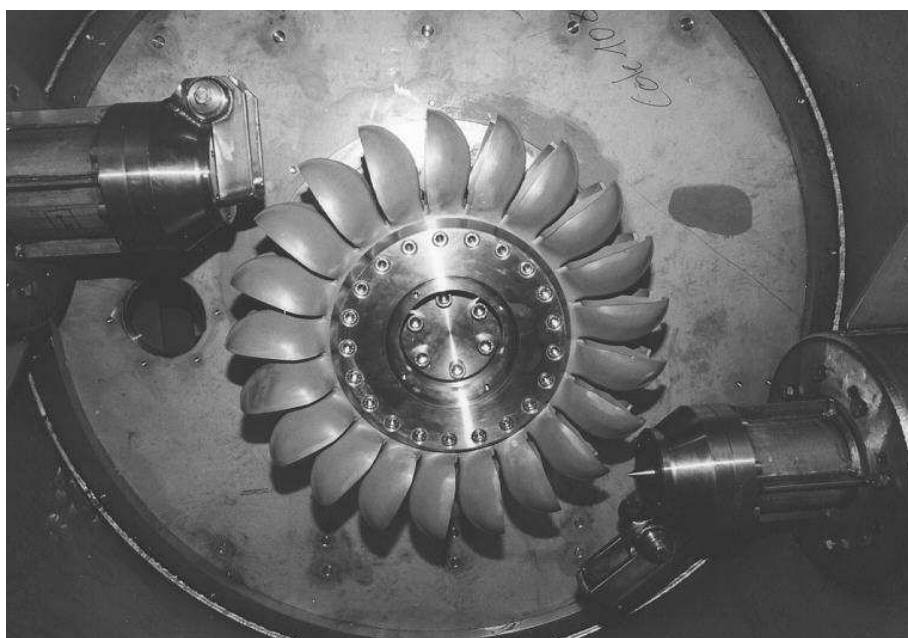
Rys. Rysunek rozstrzelony dwudyszowej pionowej turbiny Peltona



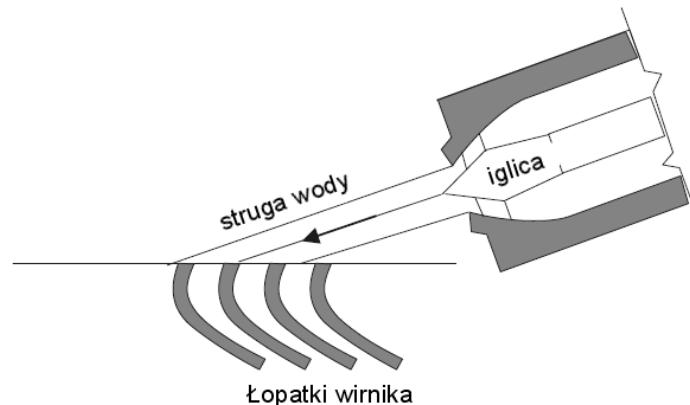
Wirnik turbin tego typu jest zwykle sprzęgnięty bezpośrednio z wałem generatora. Cały czas musi być utrzymywany nad zwierciadłem dolnej wody. Minimalną rzędą względną może podać tylko wytwórca turbiny.

Turbiny Peltona charakteryzują się dobrą sprawnością w zakresie 30 do 100 % pełnego przełyku w przypadku turbiny jednodyszowej i 10 do 100 % w przypadku turbiny z dwiema lub większą liczbą dysz.

Rys. Wirnik Peltona z dyszami zasilającymi



Turbiny Turgo



Zasada działania turbiny Turgo

Turbina Turgo może pracować przy spadach w zakresie od 50 do 250 m. Podobnie, jak turbina Peltona, jest to maszyna akcyjna, chociaż jej czarki są ukształtowane inaczej – woda uderza w płaszczyznę wirnika pod kątem 20°. Struga napływa na wirnik z jednej jego strony i opuszcza go drugiej strony. Turbina może pracować przy przepływie od 20 do 100 % maksymalnego przepływu obliczeniowego. Sprawność jest niższa niż przypadku turbin Peltona i Francisa.

W porównaniu z turbiną Peltona, turbina Turgo wykazuje wyższą szybkość obrotową przy tym samym przepływie i spadzie.

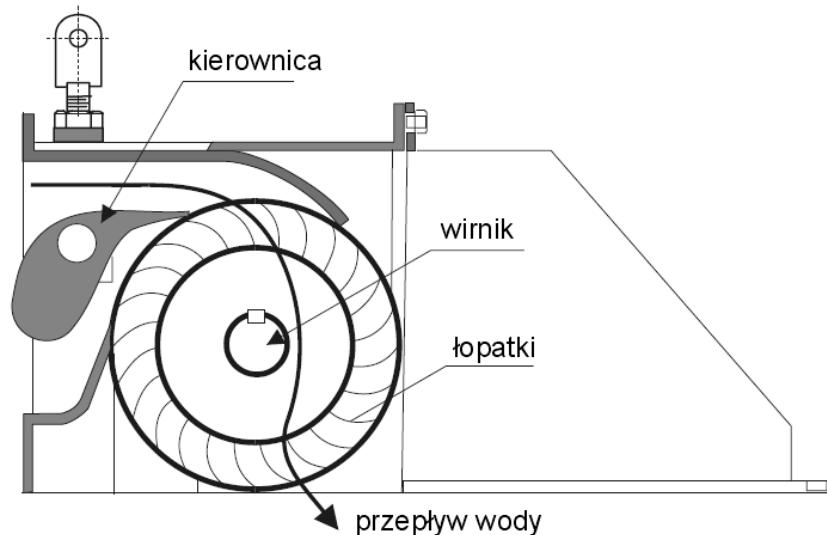
Turbina Turgo może być rozwiązaniem alternatywnym w stosunku do turbiny Francisa, gdy przepływ wykazuje dużą zmienność lub w przypadku długich rurociągów, gdyż odchylacz pozwala uniknąć rozbiegu w przypadku zrzutów obciążenia i uderzenia hydraulicznego, które mogłoby wystąpić w przypadku turbiny Francisa.

Turbina o przepływie poprzecznym

Turbiny tego typu bywają budowane zarówno w wersji akcyjnej (z komorą wirnikową częściowo wypełnioną powietrzem i wirnikiem umieszczonym nad powierzchnią dolnej wody), jak i reakcyjnej (z komorą wirnikową całkowicie wypełnioną wodą i z rurą ssącą).

Turbiny w wersji klasycznej, znane również jako turbiny Banki-Michella, a na obszarach niemieckojęzycznych, jako turbiny Ossbergera, są turbinami akcyjnymi. Stosuje się je w szerokim zakresie spadów (od 5 do 200 m), obejmującym zakres pracy turbin Kaplana, Francisa i Peltona.

Wirniki tych turbin przypominają cylinder z powierzchnią boczną zastąpioną kołową palisadą łopatkową. Woda napływa na wirnik przez kierownicę w kierunku poprzecznym do jego osi i dwukrotnie przecina palisadę. Funkcję kierownicy pełni zwykle ruchoma łopatką lub przesłona cylindryczna zakrywająca część obwodu wirnika. Elementy te współpracują z częścią korpusu turbiny, uformowaną w kształcie zakrzywionej dyszy.



Zasada działania turbiny o przepływie poprzecznym

Prosta konstrukcja turbiny sprawia, że jest ona tania i łatwa do naprawy, na przykład w przypadku wyłamania łopatek wskutek nadmiernych naprężeń.

Turbiny o przepływie poprzecznym wykazują niższą sprawność w porównaniu do innych turbin. W wersji akcyjnej należy liczyć się ze stratą spadku pomiędzy wirnikiem, a lustrem dolnej wody – istotną w przypadku spadów niskich i średnich. W przypadku wysokich spadów wirniki turbin narażone są na duże obciążenia mechaniczne. Niekiedy ulegają awarii z uwagi na uszkodzenia zmęczeniowe wywołane drganiami łopatek.

W reakcyjnych turbinach o przepływie poprzecznym, znanych głównie jako turbiny Cinka, organ regulacyjny wykonany jest najczęściej w formie przesłony cylindrycznej. Turbiny te mogą pracować przy niższych spadach. Brak strat spadku niwelacyjnego między wirnikiem, a powierzchnią dolnej wody okupiony jest podwyższonymi stratami brodenia.

Turbiny o przepływie poprzecznym stanowią interesującą alternatywę, gdy do dyspozycji jest wystarczająca ilość wody, zapotrzebowanie mocy jest ściśle określone, a możliwości inwestycyjne są niewielkie, na przykład w przypadku elektryfikacji terenów wiejskich.

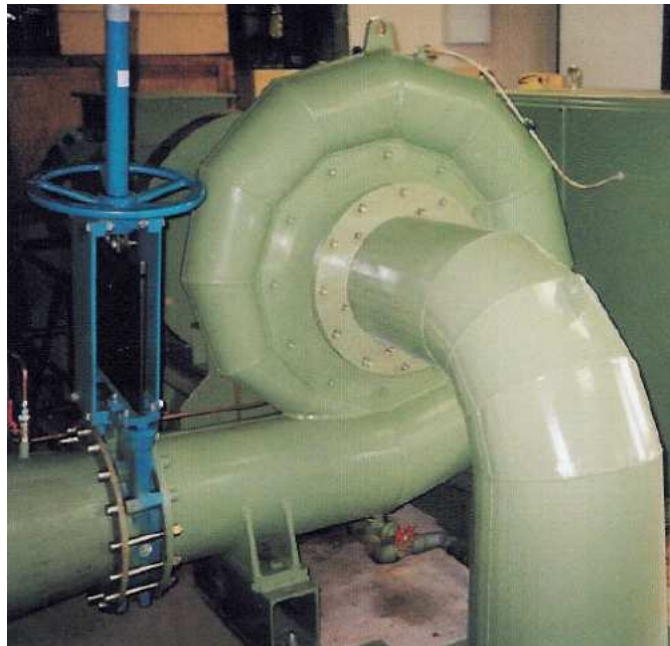
Turbiny reakcyjne

Turbiny Francisa

Turbiny Francisa są turbinami reakcyjnymi, ze stałymi łopatkami wirnika i nastawialnymi łopatkami kierownicy. Dopływ wody odbywa się zawsze w kierunku promieniowym, a odpływ – w kierunku osiowym. Turbiny te znajdują zastosowanie przy spadach średnich. Typowy zakres zastosowań obejmuje dzisiaj spady niwelacyjne od 25 do 350 m.

Podobnie, jak turbiny Peltona, turbiny Francisa mogą mieć oś zorientowaną pionowo lub poziomo. Ten ostatni układ jest najczęściej spotykany w małej energetyce wodnej. Na fotografii pokazano a turbinę Francisa o osi poziomej.

Rys. Turbina Francisa o osi poziomej

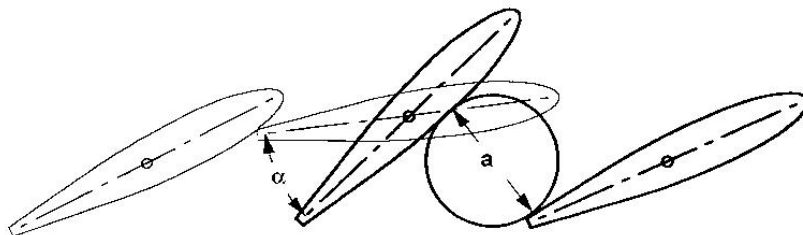


Turbiny Francisa mogą być zainstalowane w komorze otwartej lub zasilane z derywacji ciśnieniowej. W przypadku niewielkich spadów i mocy, w przeszłości powszechnie korzystano z komór otwartych, jednak dzisiaj turbina Kaplana stanowi w takich warunkach rozwiązanie znacznie lepsze zarówno pod względem technicznym, jak i ekonomicznym.

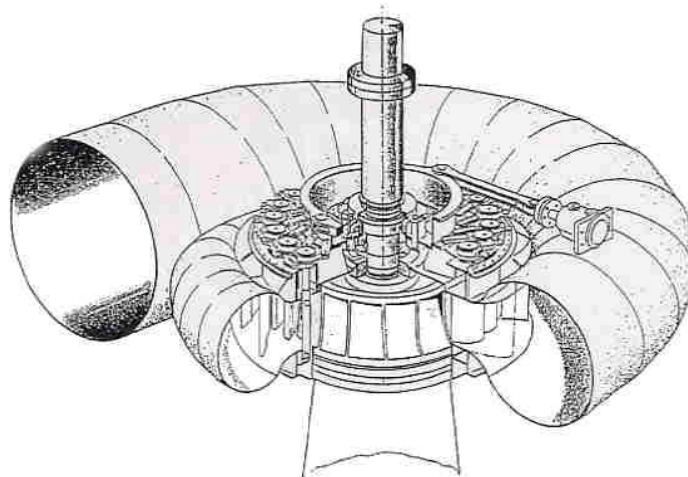
Dopływ wody do układów łopatkowych współczesnych turbin Francisa odbywa się poprzez komorę spiralną zaprojektowaną tak, aby utrzymywać stałą prędkość obwodową w kolejnych jej przekrojach i zasilać kierownicę równomiernie na jej obwodzie. Jak pokazano na rysunku, kierownica wyposażona jest w ruchome łopatki kierownicze, których zadaniem jest regulacja natężenia napływu wody na wirnik i dostosowanie kierunku tego napływu do warunków kinematycznych wynikających

z geometrii krawędzi natarcia łopatek wirnika oraz ich prędkości obwodowej. Łopatki kierownicy mogą się obracać wokół swojej osi dzięki układowi dźwigni i łączników osadzonych na pierścieniu powodującym ich synchroniczne przemieszczanie się. Chociaż łopatki kierownicy mogą być użyte do odcięcia przepływu w warunkach awaryjnych, na wlocie turbiny z reguły instaluje się zawór motylowy jako organ zabezpieczający. W wirniku dokonuje się przemiana energii hydraulicznej na energię mechaniczną ruchu obrotowego, po czym woda wypływa w kierunku osiowym do rury ssącej.

Rys. Palisada łopatek kierownicy



Rys. Widok turbiny Francisa

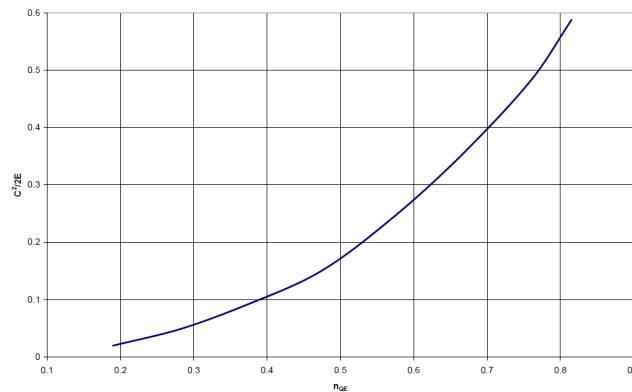


W przypadku turbin przeznaczonych dla małych elektrowni wodnych łopatki wirnika wykonuje się często z wytłaczanej blachy stalowej, a ich krawędzie umieszcza się w przestrzeni zalewanej staliwem w trakcie wykonywania odlewu piasty i wieńca (pierścienia zewnętrznego wirnika). Niektórzy wytwórcy stosują również odlewy z brązu aluminiowego. Praktykuje się też rozwiązania z łopatkami spawanymi do wieńca i piasty wirnika. Wirniki turbin Francisa w małych elektrowniach wodnych są z reguły osadzone bezpośrednio na wale generatora.

Rys. Mechanizm kierownicy turbiny Francisa o osi poziomej oraz wirnik Francisa



Rys. Energia kinetyczna wody na wylocie z wirnika



Zadaniem rury ssącej turbiny reakcyjnej jest odzysk części energii kinetycznej unoszonej z wodą opuszczającą wirnik. Rura ssąca umożliwia również posadowienie wirnika turbiny nad lustrem wody dolnej bez utraty spad. Ponieważ energia kinetyczna jest proporcjonalna do kwadratu prędkości przepływu, należy dążyć do obniżenia tej prędkości na wylocie z turbiny. Rura ssąca o wysokiej sprawności powinna mieć kształt stożkowy, lecz kąt rozwarcia nie może być zbyt wielki, gdyż grozi to zjawiskiem oderwania przepływu od ścianki. Optymalny kąt rozwarcia wynosi 7°, lecz celem skrócenia długości rury, a tym samym i obniżenia kosztów, kąt ten powiększa się czasami aż do 15°.

Im niższy jest spad, tym większej uwagi wymaga rura ssąca. Niski spad oznacza z reguły wysoki przeyłk znamionowy oraz istotne znaczenie energii kinetycznej na wylocie z turbiny. Jest oczywiste, że w przypadku wirnika o stałej średnicy prędkość wody rośnie z przepływem. Na rysunku pokazano energię kinetyczną na wylocie z wirnika w funkcji wyróżnika szybkobieżności.

Badania i projektowanie rur ssących o wysokiej sprawności jest zadaniem trudnym, wymagającym dużej wiedzy i doświadczenia.

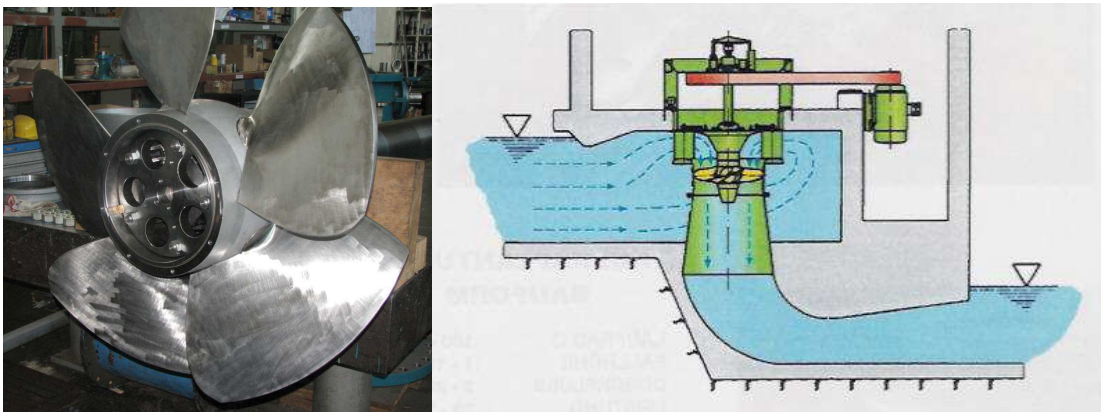
Turbiny Kaplana i śmigłowe

Turbiny Kaplana i turbiny śmigłowe są turbinami reakcyjnymi, w których przepływ przez wirnik ma kierunek osiowy. Powszechnie stosuje się je przy spadach od 2 do 40 m. Turbina Kaplana posiada nastawialne łopatki wirnika w przeciwieństwie do turbiny śmigłowej, która wyposażona jest w wirnik z łopatkami stałymi. Jeśli zarówno łopatki wirnika, jak i kierownicy są nastawialne, to mówi się o „podwójnej regulacji”. Jeśli łopatki kierownicy są nastawialne, to mówi się o „regulacji pojedynczej”. Turbiny tego rodzaju określa się często mianem turbin typu semi-Kaplan. Turbiny śmigłowe stosuje się głównie w warunkach praktycznie stałego przepływu i spadku, co zdarza się dość rzadko w małych elektrowniach wodnych. W niektórych lokalizacjach, wymagających instalacji większej liczby maszyn, kombinacja turbin śmigłowych i turbin Kaplana pozwala przystosować się do zmian natężenia przepływu przy jednoczesnym ograniczeniu kosztów inwestycji.

Podwójna regulacja turbin Kaplana pozwala dostosowywać w sposób ciągły nastawy łopatek wirnika i kierownicy do zmian przepływu i spadku. Prowadzi to do dużej elastyczności eksploatacyjnej, gdyż maszyny te mogą pracować przy przepływie zmieniającym się od 15 do 100 % przepływu znamionowego. Turbina typu semi-Kaplan dostosowuje się również dobrze do zmian natężenia przepływu, ale jest mniej elastyczna w przypadku zmiany spadku. Zwykle może ona pracować w zakresie od 30 do 100 % maksymalnego przepływu projektowego.

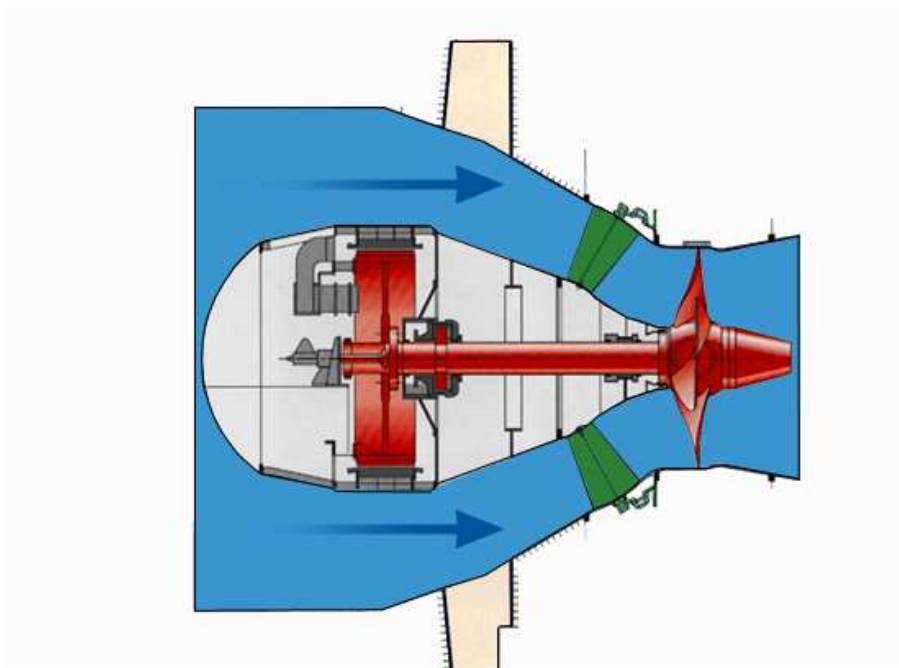
Pokazana na rysunku podwójnie regulowana turbina Kaplana jest maszyną o osi pionowej, zainstalowaną w komorze otwartej. Woda napływa promieniowo na kierownicę i zmienia kierunek pod kątem prostym zanim przepłynie przez wirnik. Układ sterowania jest zaprojektowany tak, aby zmiana kąta napływu na łopatki wirnika skutkowałą przestawieniem łopatek kierownicy w sposób zapewniający najlepszą sprawność w szerokim zakresie przepływów i spadków. Łopatki wirnika można przestawiać cały czas, również podczas ruchu turbiny, poprzez układ dźwigni połączonych z drążkiem regulacyjnym wewnątrz drążonego wału turbiny.

Rys. Wirnik turbiny Kaplana oraz Przekrój przez pionową turbinę Kaplana



Turbiny gruszkowe stanowią rozwinięcie turbin Kaplana. W hydrozespołach z tymi turbinami generator i multiplikator (jeśli występuje potrzeba jego zastosowania) umieszcza się w zanurzonej zamkniętej przestrzeni zwanej gruszką. Na rysunku 6.13 pokazano taki hydrozespół z generatorem chłodzonym sprężonym powietrzem. Poza gruszkę wyprowadzono jedynie odpowiednio zabezpieczone przewody elektryczne.

Rys. Przekrój przez gruszkową turbinę rurową o podwójnej regulacji



Turbiny Kaplana są maszynami, które można instalować w największej liczbie możliwych konfiguracji. Wybór odpowiedniego sposobu instalacji ma istotne znaczenie dla elektrowni niskospadowych. Praca przy dużych natężeniach przepływu jest warunkiem ich rentowności. W zakresie spadów od 2 do 5 m i przepływów od 10 do 100 m³/s, konieczne są wirniki o średnicy od 1,6 do 3,2 metrów, sprzęgnięte z generatorem przez multiplikator obrotów. Kanały przepływowe w ogólności, a ujęcia wody w szczególności, są bardzo duże i wymagają prac hydrotechnicznych na znaczną skalę oraz nakładów z reguły przekraczających koszty wyposażenia elektromechanicznego.

Celem ograniczenia kosztów całkowitych (prace budowlane plus wyposażenie), a przede wszystkim nakładów na prace hydrotechniczne, opracowano szereg rozwiązań, które dziś uważa się za klasyczne.

Kryteria doboru tych turbin są dobrze znane:

- Zakres natężeń przepływu
- Spad netto

- Geomorfologia terenu
- Wymagania środowiskowe (wizualne i akustyczne)
- Koszty robocizny

Konfiguracje te różnią się sposobem prowadzenia przepływu przez turbinę (osiowy, promieniowy lub mieszany), sposobem odcinania przepływu przez turbinę (zawór lub lewar) i rodzajem stosowanego multiplikatora obrotów (zębata do wałów równoległych, zębata stożkowe, pasowe).