

Česká zemědělská univerzita v Praze



Technická fakulta

**Možnosti využití hydroenergetického potenciálu
vodního toku Loděnice v Doksech u Kladna**

bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Martin Polák, Ph.D.

Autor: Karel Švancar, DiS.

PRAHA 2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Karel Švancar

Inženýrství údržby

Název práce

Možnosti využití hydroenergetického potenciálu vodního toku Loděnice v Doksech u Kladna

Název anglicky

The use of hydropower potential of watercourse Loděnice in Doksy near Kladno

Cíle práce

Zpracovat literární rešerši hydromotorů pro využití nízkopotenciálních vodních zdrojů. Analyzovat základní parametry hydroenergetického potenciálu vodního toku Loděnice v lokalitě bývalého mlýna v obci Doksy u Kladna. Vybrat vhodné hydromotory pro průtočné a akumulární uspořádání. Provést zhodnocení možnosti využití průtočným a akumulárním způsobem.

Metodika

Provést literární rešerši v oblasti hydromotorů. Stanovit využitelný spád a sestavit odtokovou křivku dané lokality. Zjistit akumulární schopnost přilehlého rybníka. Vybrat vhodný hydromotor pro průtočné a akumulární využití lokality. Porovnat míru využití hydroenergetického potenciálu u průtočného a akumulárního způsobu.

Doporučený rozsah práce

40 stran textu včetně obrázků, grafů a tabulek

Klíčová slova

hydroenergetika, malá vodní elektrárna, vodní turbína

Doporučené zdroje informací

Bednář, J.: Turbíny – malé vodní elektrárny, Nakladatelství Marcela Bednářová 2013, ISBN 978-80-905437-0-6

Melichar, J., Bláha, J., Brada, K.: Hydraulické stroje – konstrukce a provoz, ČVUT Praha 2002.

Melichar, J., Vojtek, J., Bláha, J.: Malé vodní turbíny – konstrukce a provoz, ČVUT Praha 1998.

Nechleba, M., Hušek, J.: Hydraulické stroje, SNTL Praha 1966.

Štoll, Č., Kratochvil, S., Holata, M.: Využití vodní energie, SNTL Praha 1977.

Předběžný termín obhajoby

2015/16 LS – TF

Vedoucí práce

doc. Ing. Martin Polák, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra mechaniky a strojnictví

Elektronicky schváleno dne 27. 11. 2015

doc. Ing. Pavel Neuberger, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 5. 1. 2016

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan

V Praze dne 26. 02. 2016

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: „Možnosti využití hydroenergetického potenciálu vodního toku Loděnice v Doksech u Kladna“ vypracoval samostatně za použití uvedených zdrojů.

V Tuchlovicích, dne 01.03.2016

.....

Poděkování:

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Martinu Polákovi, Ph.D. za konstruktivní připomínky a odborné vedení a ČHMÚ za poskytnutá hydrologická data dané lokality, což přispělo ke zdárnému dokončení práce.

Abstrakt:

Cílem této bakalářské práce je zpracovat literární rešerši v oblasti hydromotorů a provést analýzu základních parametrů hydroenergetického potenciálu vodního toku Loděnice v Doksech u Kladna. Na základě této analýzy následně navrhnout vhodný hydromotor pro využití dané lokality průtočným a akumulacním způsobem a porovnat míru využití u těchto dvou způsobů.

Klíčová slova:

hydroenergetika, vodní turbína, malá vodní elektrárny, spád, vodní energie

Summary

The aim of this thesis is to make a survey in fluid motors and to assess the possibilities of hydroelectric power potential of stream Loděnice in Doksy near Kladno. Based on this assessment then suggest proper fluid motor for flow and accumulative mode for use in the site and compare the use of those two methods.

Keywords:

hydropower engineering, fluid motor, small hydro power plant, gradient, hydraulic power

Obsah

1	Úvod	1
2	Zdroje energie.....	2
2.1	Neobnovitelné zdroje	2
2.2	Obnovitelné zdroje	2
2.2.1	Sluneční záření	2
2.2.2	Slapové účinky Měsíce a Slunce	3
2.2.3	Geotermální energie zemského jádra	3
2.3	Vodní energie	3
2.4	Zásoby vodní energie	4
2.4.1	Hydroenergetický potenciál vodního toku	5
2.4.2	Hydroenergetická díla pro využití vodní energie	7
2.4.3	Dělení vodních elektráren	7
3	Hydromotory	9
3.1	Rozdělení vodních turbín	10
3.1.1	Turbíny přetlakové a rovnotlaké	11
3.1.2	Dle průtoku vody oběžným kolem	11
3.1.3	Dle výkonu a měrné energie.....	12
3.2	Klasická koncepční řešení vodních turbín	12
3.2.1	Hlaví části turbín	13
3.2.2	Francisova turbína	13
3.2.3	Kaplanova turbína	14
3.2.4	Dériazova turbína	14
3.2.5	Peltonova turbína.....	15
4	Turbíny pro využití nízkopotenciálních vodních zdrojů	16
4.1	Turbíny odvozené z konstrukce Francisovy turbíny	16
4.1.1	Reiffensteinova a Kvjatkovského turbína	16
4.2	Turbíny odvozené z konstrukce Kaplanovy turbíny	17

4.2.1	Thomannova turbína.....	17
4.2.2	Propelerová turbína	18
4.2.3	Axiální turbíny se zjednodušenou regulací	18
4.2.4	Axiální neregulovatelná turbína	18
4.2.5	Ponorná axiální turbína	19
4.3	Přímoproudé turbíny	20
4.4	Vírová turbína	20
4.5	Bánkiho turbína	22
4.6	Bezlopatková miniturbína	24
4.7	Použití čerpadel v turbínovém režimu	25
4.7.1	Hydrostatická čerpadla	25
4.7.2	Hydrodynamická čerpadla.....	26
5	Určení hydroenergetických parametrů průtočného a akumulárního využití.....	27
6	Závěr.....	35
7	Použitá literatura.....	37
8	Seznam obrázků, tabulek a grafů.....	38
9	Seznam zkratk.....	40

1 Úvod

Využití vodní energie bylo jedním z předpokladů rozvoje technické úrovně civilizace a umožnilo zefektivnit mnoho oborů lidské činnosti. V dnešní době je snaha o opětovné využití nízkopotenciálních lokalit, motivována především snahou zvýšit podíl výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů v souvislosti se zhoršujícím se stavem životního prostředí používáním klasických zdrojů spalujících fosilní paliva.

Autorův záměr je zhodnotit možnost využití hydroenergetického potenciálu lokality potoka Loděnice v oblasti obce Doksy u Kladna, kde se v minulosti nacházel dnes již dávno zrušený vodní mlýn, při použití dnešních konstrukcí hydromotorů. Využití by mohl umožňovat v nedávné době vybudovaný rybník o rozloze 52650 m² nedaleko původního mlýna, u jehož hráze je nyní k dispozici zhruba dvojnásobný hrubý spád než v místě původního náhonu mlýna.

Za tím účelem se autor v rešeršní části práce zabývá problematikou obnovitelných zdrojů se zaměřením na vodní energii a principy jejího využití v podmínkách České republiky. Dále se poté zaměřuje na získání přehledu o vývoji konstrukce vodních motorů od jejich historických variant přes klasické koncepční řešení, až k současným variantám určeným svojí koncepcí zohledňující především snížení investičních nákladů pro využití nízkopotenciálních lokalit, které jsou klasickými koncepcemi využitelné jen problematičtě.

V analytické části práce se autor věnuje stanovení základních hydroenergetických charakteristik dané lokality a na základě získaných poznatků navržení možných alternativy vodních motorů pro vybranou lokalitu pro její využití průtočným a akumulacním způsobem a porovnáním míry využití hydroenergetického potenciálu lokality u těchto dvou způsobů.

2 Zdroje energie

Energie představuje limitující prvek pro tempo rozvoje v regionálním i globálním měřítku. Dostupnost jejích zdrojů a dosahovaná efektivita jejího využití, spjatá s úrovní technologické a technické vyspělosti, dělí současnou světovou společnost na dva základní regiony. Ekonomicky vyspělé regiony, které však často nedisponují největšími zásobami energetický zdrojů a ekonomicky nerozvinuté regiony, mající často na svém území dostatek energetický zásob, ale jimž chybí právě technická vyspělost nutná k jejich využití.

Zdroje energie lze rozdělit do třech základních kategorií s ohledem na jejich vyčerpatelnosti.

2.1 Neobnovitelné zdroje

Zahrnují především fosilní paliva zastoupená například uhlím, ropou a zemním plynem. Jejich vyčerpatelnost a environmentální problémy jako skleníkový efekt, znečištění ovzduší a další, stále více nutí lidskou populaci hledat možnosti využití dalších zdrojů méně zatěžujících životní prostředí.

Dále do této skupiny řadíme i jadernou energii ačkoliv z teoretického pohledu představuje téměř nevyčerpatelný zdroj. Tento zdroj má však závažná specifika svého využití a to především technickou náročnost, téměř katastrofální důsledky plynoucí z případného neovládnutí této technologie, jak se již lidstvo přesvědčilo například při výbuchu v jaderné elektrárně Černobyl, nebo při poškození jaderné elektrárny Fukušima přílivovou vlnou tsunami po zemětřesení. Je také diskutabilní otázka rozvoje využití jaderné energie v politicky nestabilních regionech v souvislosti s možností zneužití této technologie pro výrobu jaderných zbraní.

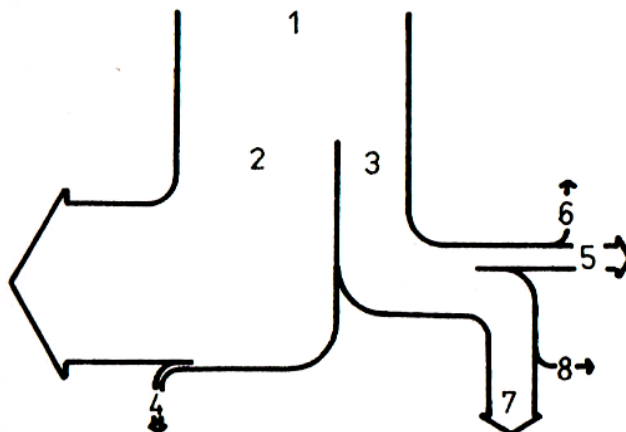
2.2 Obnovitelné zdroje

Tyto zdroje téměř nezatěžují životní prostředí a jejich „nevyčerpatelnost“ spočívá v jejich primárních zdrojích což je Slunce a zemské jádro. Ty z hlediska trvání lidské civilizace považujeme na časově stálé. K jejich omezujícím faktorům patří například nerovnoměrné rozložení a nízká účinnost využití některých jejich forem.

2.2.1 Sluneční záření

Jeho využití je dnes možné díky rozvoji technologií několika způsoby. Vyrábět přímo elektrickou energii lze využitím fotovoltaického jevu díky rozvoji výkonové

elektrotechniky, především fotovoltaických článků a střídačů. Dále lze využít jeho transformované formy v podobě biomasy, bioplynu, větru, vlnobítí, koloběhu vody v přírodě, tepelného záření (formou kolektorů, nebo zrcadel pro ohřev vody) a ohřátého zemského povrchu (nizkopotenciální zdroj) pro využití například tepelnými čerpadly. Bilanci dopadajícího slunečního záření zachycuje Sankeyův diagram na obrázku 1.



*1 – energie dopadající na Zemi 100%; 2 – ohřev atmosféry 70%; 3 – ohřev povrchu Země 30%
 4 – energie větru 2,5%; 5 – ohřev pevniny 9,9%; 6 – využití rostlinstvem 0,12%
 7 – ohřev vodních zásob 19,58%; 8 – vodní energie 0,4%*

Obr. 1 Bilance slunečního záření [1]

2.2.2 Slapové účinky Měsíce a Slunce

Ty způsobují vzdouvání světových oceánů, což se projevuje přílivem a odlivem, které v některých oblastech dosazují hodnot vhodných k energetickému využití.

2.2.3 Geotermální energie zemského jádra

Tu lze ve vhodných místech využít jako vysokopotenciální zdroj například k výrobě páry pro pohon parních turbín, nebo ohřev vody.

Výše vyjmenované druhy obnovitelných zdrojů se liší jak technickou náročností jejich využití, tak i stálostí jejich potenciálu, na jehož základě je lze rozdělit na zdroje s přibližně rovnoměrným a výrazně nerovnoměrným potenciálem. Všechny tyto faktory se v konečném důsledku promítají do rentabilnosti využití těchto zdrojů

2.3 Vodní energie

Vodní energie patří mezi obnovitelné zdroje a je jednou z forem transformované sluneční energie projevující se koloběhem vody v přírodě. Patří k nejdéle lidstvem využívanému zdroji obnovitelné energie s širokými znalostmi možností jejího využití

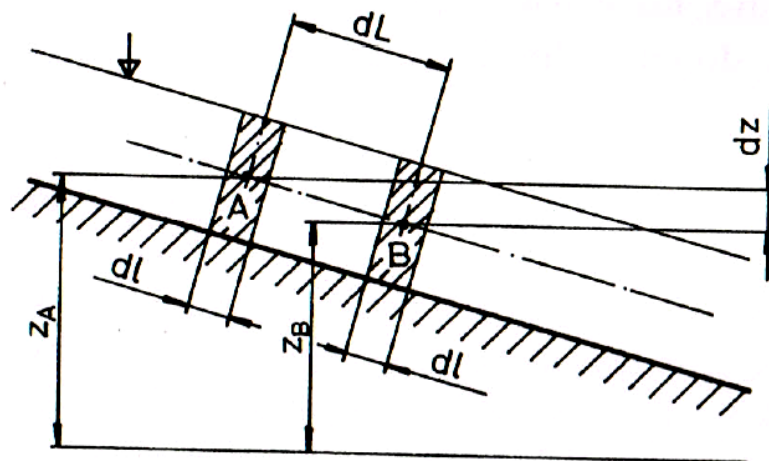
i dostupnými prostředky o vysoké technicko-ekonomické úrovni. Stálost jejího potenciálu je závislá na konkrétních podmínkách v místech využití zahrnující především akumulaci spádu a průtoku. Na jejich základě je poté danou lokalitu možno využít například jako stálý zdroj s malým kolísáním potenciálu, nebo jako špičkový zdroj pro vyrovnání odběrových špiček v energetické soustavě.

Vyskytuje se v podobě mechanické, tepelné a chemické, z nichž pro technické využití je nejvhodnější forma zastoupená především pohybem povrchových vod v korytech řek, kterého se podle [1] účastní pouze $5 \cdot 10^{13} \text{ m}^3$ vody z celkového ročního množství $5,2 \cdot 10^{14} \text{ m}^3$ odpařené vody na Zemi.

2.4 Zásoby vodní energie

Vodní energie se projevuje jako energie potenciální (polohová a tlaková) a jako energie kinetická. Určitý úsek vodního toku tak může poskytnout elementární výkon, který je určen především velikostí průtoku a spádu.

Na obrázku 2 je zachyceno určení potenciálního výkonu úseku vodního toku stálého průřezu a lineárního spádu na přesouvání elementárního objemu V z bodu A do bodu B působením tíhové síly.



Obr. 2 Potenciální výkon úseku vodního toku [1]

Výkon elementárního úseku vodního toku poté bude dán výrazem:

$$P_i = Q_{50\%} \cdot \rho \cdot g \cdot H_i \quad [W] \quad (1.1)$$

P_i výkon elementárního úseku toku [W]

$Q_{50\%}$ střední průtok [m^3/s]

H_i výškový rozdíl hladin ($Z_A - Z_B$) [m]

Součtem potenciaálních výkonů P_i jednotlivých úseků toku při průměrném středním průtoku $Q_{50\%}$ získáme teoretický výkon toku při jeho bezztrátovém využití a tím teoretická zásoba vodní energie, kterou tok za rok unáší je dána vztahem

$$N = 365 \cdot 24 \cdot 3600 \cdot \sum P_i \quad [Wh/rok] \quad (1.2)$$

Úplné využití teoretické zásoby vodní energie toku je však z praktického hlediska nemožné vzhledem k přítomnosti různých druhů ztrát (třecí, místní, ztráty průtoku, ztráty při transformaci vodní energie na jinou formu) a také vzhledem k omezením topografickým, geologickým a hydrologickým, které snižují teoretickou zásobu vodní energie toku na hodnotu označovanou jako technicky využitelný hydroenergetický potenciál.

Podle [1] je teoretický hydroenergetický potenciál vodních toků světa při středních průtocích $Q_{50\%}$ odhadován na $P = 3,75 \cdot 10^9$ kW.

V České republice byla podle [1] k roku 1976 využita většina ekonomicky vhodných lokalit poskytujících možnost výkonu $P > 10$ MW, kterých bylo zhruba 26% a zbylých 74% připadalo pro využití v malých vodních elektrárnách (dále MVE) a mikrozdrojích s výkonem $P < 10$ MW. To vytvořilo prostor pro rozvoj technologií směřujících k vývoji zařízení s ohledem na možnost ekonomického využití těchto zdrojů, které je v současné době podporováno i státní politikou ve formě výkupních cen a zelených bonusů, určených pro výrobu elektrické energie z ekologických a obnovitelných zdrojů.

2.4.1 Hydroenergetický potenciál vodního toku

Hydroenergetický potenciál vodního toku je dle [10] možno vnímat jako hydraulický příkon P_p [W] vstupující do hydromotoru, který je závislý na velikosti hrubého sádu H_b [m] a průtoku Q [m^3/s] a vypočte se dle rovnice:

$$P_p = Q \cdot \rho \cdot H_b \cdot g \quad [W] \quad (1.3)$$

Q průtok [m^3/s]

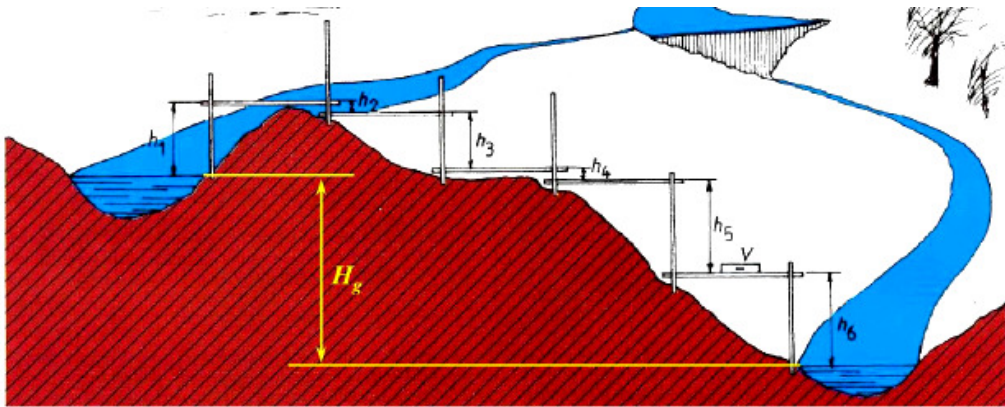
ρ měrná hustota [kg/m^3]

H_b hrubý spád [m]

g tíhové zrychlení [$g = 9,81 \text{ m/s}^2$]

Spád:

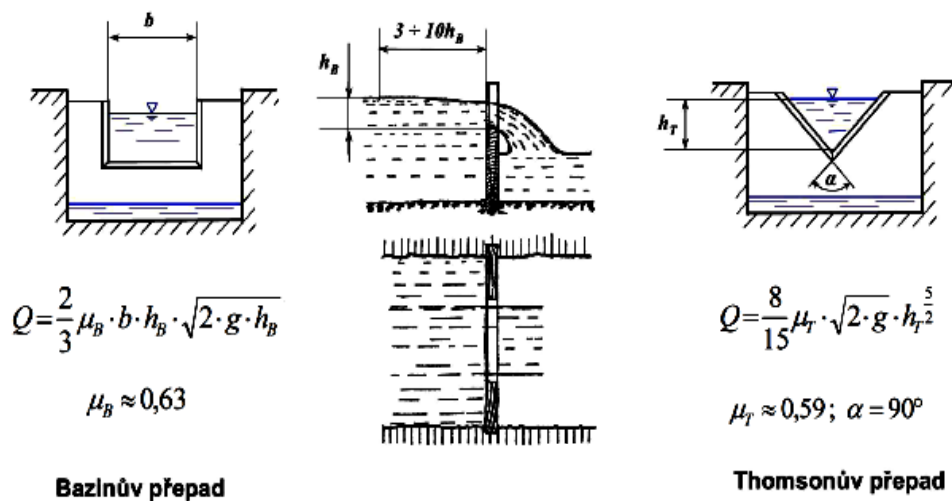
Výchozí hodnotou je hrubý spád H_b [m] udávající svislou vzdálenost horní a spodní hladiny dosažené na vodním díle. K jeho měření můžeme použít různé metody například pomocí hadicové vodováhy, teodolitu, nivelování nebo vážní latě. Při použití vážní latě spočívá princip měření v postupném odměřování dílčích svislých vzdáleností za pomoci rovné latě s upevněnou vodováhou a jejich následném algebraickém součtu (viz obr. 3).



Obr. 3 Určení geodetického spádu vážní latí [13]

Průtok:

Měření objemového průtoku Q [m^3/s] lze provést taktéž různými způsoby například měřením v Bazinově nebo Thomsonově přepadu (viz obr. 4), nebo hydrometrickou vrtulí. Tam kde je to možné, je výhodné použít data ČHMÚ, jejichž výhodou je dlouhodobé měření zachycující poměry lokality jak v „mokrých“ tak „suchých“ letech, které jsou sestaveny do tabulky M – denních průtoků.

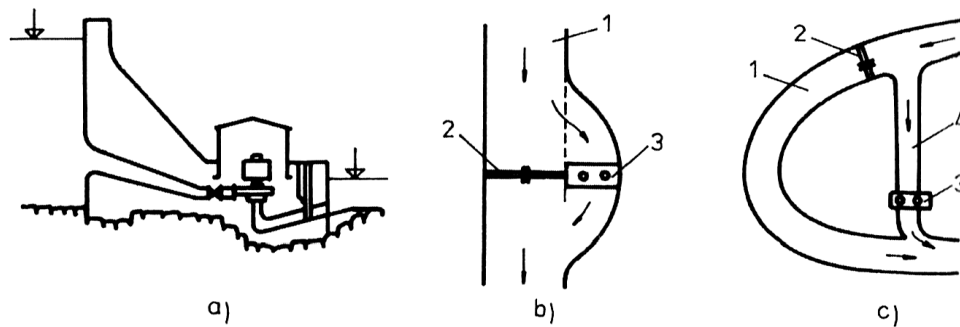


Obr. 4 Princip měření průtoku v Bazinově a Thomsonově přepadu [13]

2.4.2 Hydroenergetická díla pro využití vodní energie

Vodní tok je nositelem určitého hydroenergetického potenciálu, jehož velikost je závislá na velikosti spádu a průtoku. K jeho využití je potřeba na vhodném místě toku soustředit tyto dvě veličiny a to buď přirozeně, nebo uměle. Zde lze poté vybudovat vhodné vodní dílo (dále VD), odpovídající poměru těchto dvou veličin, což umožní efektivní využití daného potenciálu. Podle soustředění tohoto potenciálu se VD podle [1] dělí na několik základních typů, jejichž některé varianty jsou zachyceny na obrázku 5.

K základním typům patří VD **přehradní** (viz obr. 5a) používající k soustředění spádu přehradní hráz, VD **derivační** (viz obr. 5c) svádějící vodu pomocí vzdouvacího zařízení (jez) do přivaděče a VD **přečerpávací** umožňující akumulovat vodní energii. Podle koncepce projektu využití toku lze vodní díla dále rozdělit na **říční** (viz obr. 5a,b), kdy voda neopouští koryto řeky a na vodní díla **derivační** (viz obr. 5c).

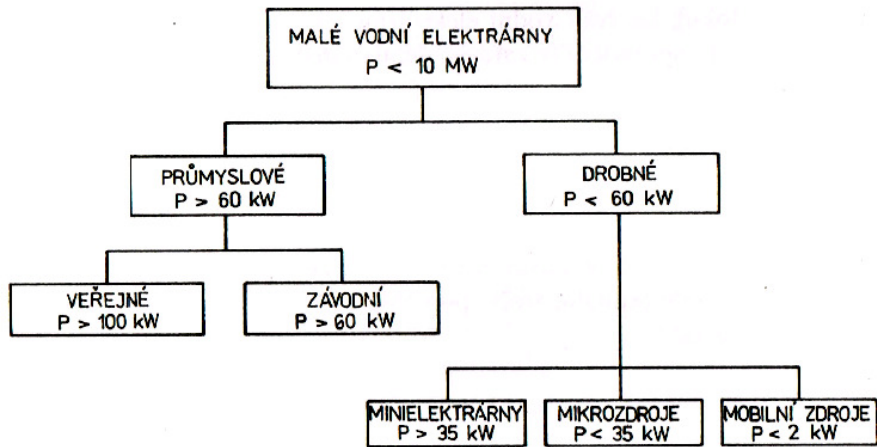


a) přehradní, b) jezové, c) derivační
1 – koryto řeky, 2 – vzdouvací zařízení, 3) – elektrárna, 4) – přivaděč

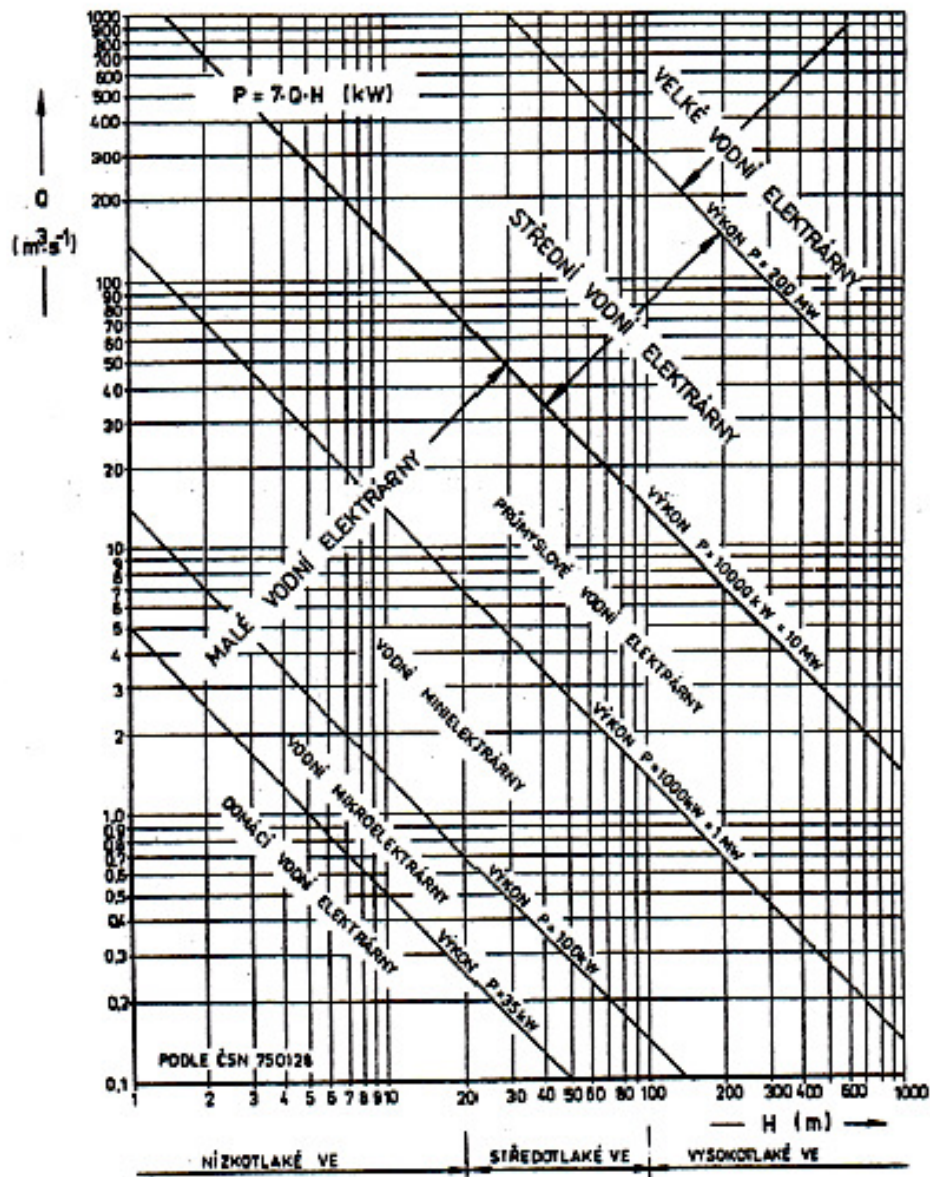
Obr. 5 Základní varianty hydrodynamických děl [1]

2.4.3 Dělení vodních elektráren

Ve vodní elektrárně dochází k transformaci vodní energie na mechanickou energii pomocí vodní turbíny a následně v elektrickém generátoru na energii elektrickou. Podle ČSN 75 0120 [5] dělíme vodní elektrárny z hledisek velikosti měrné energie E (vysokotlaké, středotlaké a nízkotlaké), způsobu provozu (průtočné, špičkové) a instalovaného výkonu (velké $E > 1000 \text{ Jkg}^{-1}$, střední $E < 1000 \text{ Jkg}^{-1}$, malé $E < 200 \text{ Jkg}^{-1}$). Bližší rozdělení malých vodních elektráren a elektráren dle instalovaného výkonu je zachyceno na obrázcích 6 a 7.



Obr. 6 Rozdělení malých vodních elektráren dle výkonu [1]

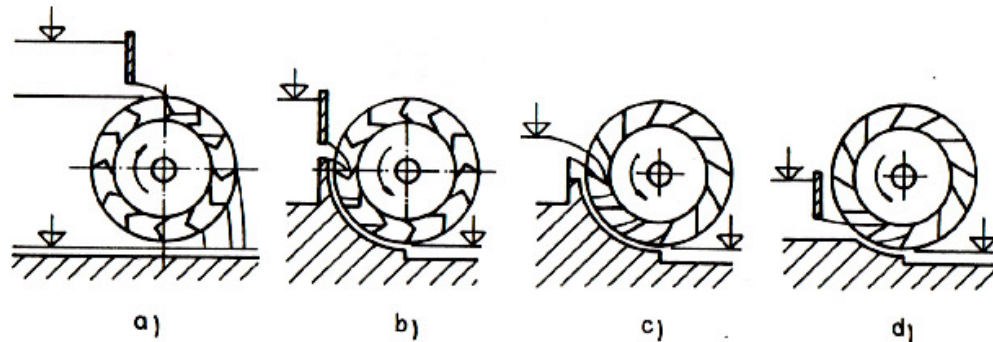


Obr. 7 Celkové rozdělení elektráren dle výkonu [2]

3 Hydromotory

K přeměně vodní energie na jiný druh vhodný k jejímu dalšímu využití je potřeba technické zařízení obecně označované jako hydromotor. Toto zařízení mění potenciální a kinetickou energii vody na mechanickou energii výstupního hřídele.

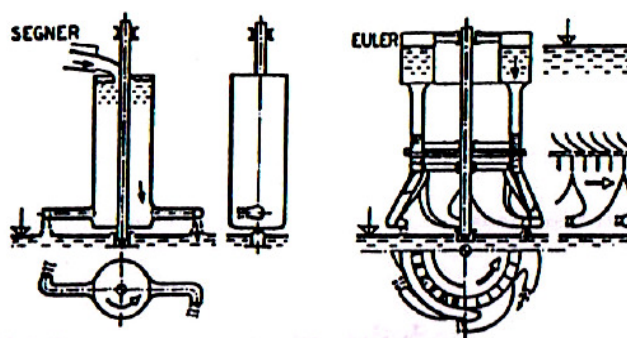
Jejich vývoj započal např. dle [6] již v 5. století př.n.l., kdy byla vyvinuta první vodní kola s vertikálním hřídelem pro pohon mlýnských kamenů. Vodní kolo se pak na dlouhou dobu stává základním prostředkem využití vodní energie a prodělává postupně etapy dalšího vývoje vedoucí k přechodu k typům s horizontálním hřídelem, který vedl k vývoji několika základním typům lopatkových a korečkových kol. Některé z těchto základních typů podle způsobu řešení nátoky vody zachycuje obrázek 8.



a) s horním nátokem, b) se středním nátokem s regulací kulisou, c) se středním nátokem s regulačním přelivem, d) se spodním nátokem

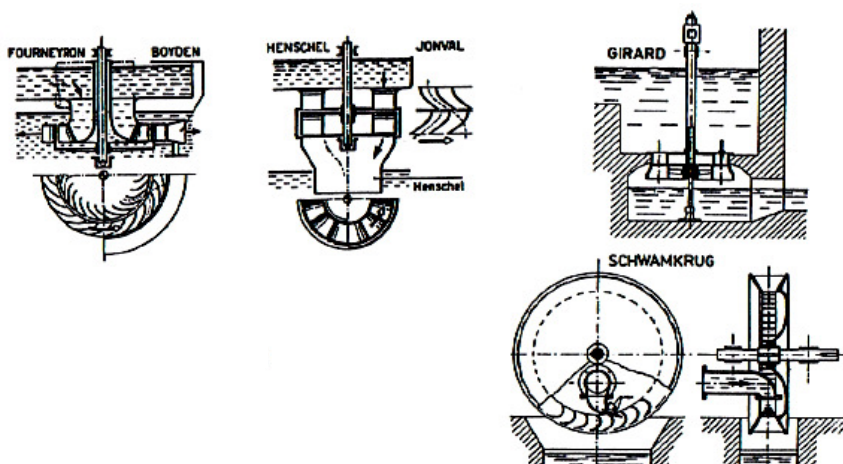
Obr. 8 Dělení vodních kol dle nátoky vody [1]

Vývoj vodních kol vrcholí na konci 18. století, kdy se objevují nová řešení, vycházející z poznatku reakčního působení proudu vody. Za objevitele tohoto reakčního působení je považován Johann Andreas Segner, který sestrojil tzv. Segnerovo kolo (viz obr. 9), pokládané za prvopočátek vývoje přetlakových vodních turbín. Teoretické práce Leonharda Eulera dále rozvinuly a zdokonalily poznatky o reakčním působení proudu vody a posléze vedly (r. 1754) k návrhu Eulerova stroje znázorněného na obrázku 9, který dosazoval účinnosti $\eta = 70\%$.



Obr. 9 Sengerovo kolo a Eulerův stroj [2]

V roce 1826 tento princip zdokonalil prof. Claude Burdin použitím olopatkování kola s použitím rozvaděče a dále toto řešení v roce 1827 zdokonalil Benoit Fourneyron, a sestrojil tak první provozuschopnou přetlakovou turbínu (viz obr. 10), která se prakticky uplatnila až do výkonů $P = 40\text{kW}$ a která k regulaci používala válcový uzávěr. Následný vývoj pokračoval přes turbínu Janvalovu, Girardovu a Schwamkrugovu (viz obr. 10)



Obr. 10 Turbína Fourneyronova, Janvalova a Girardova a Schwamkurgova[2]

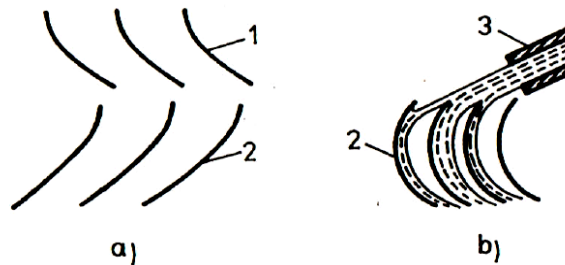
a vedl k několika základním typům moderních turbín, které jsou základem pro dnes používané moderní stroje zastoupené především turbínami Francisovou (cca 1848), Peltonovou (cca 1882) a Kaplanovou (cca 1914).

3.1 Rozdělení vodních turbín

Vodní turbíny lze dělit podle většího počtu hledisek, která odrážejí specifika a podmínky míst instalace a jejich různé hydrologické poměry. Z těchto skutečností vychází poměrně široký sortiment vodních turbín a jejich variant

3.1.1 Turbíny přetlakové a rovnotlaké

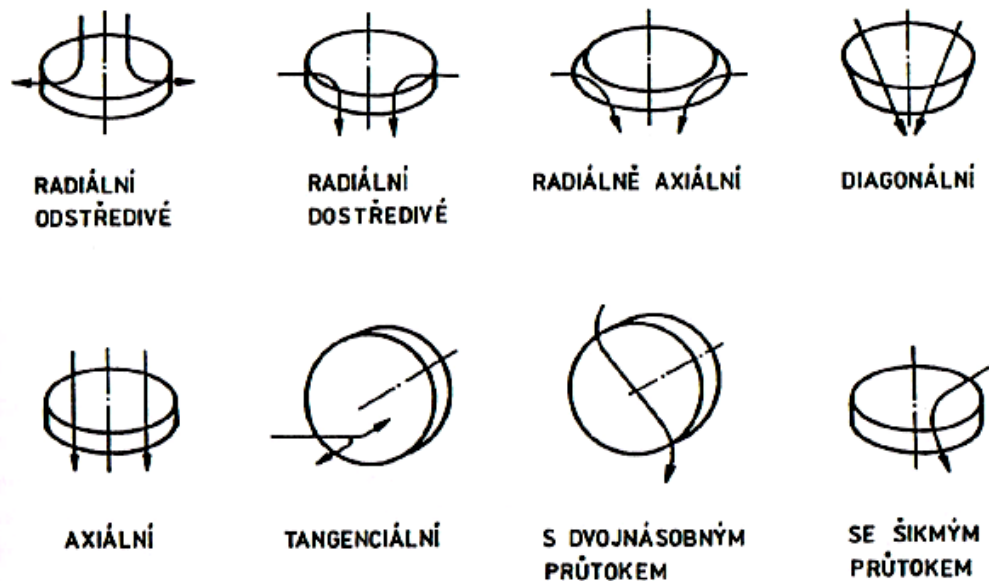
Jedná se o rozdělení turbín dle charakteru přenosu energie vody v rozváděcím zařízení a oběžném kole turbíny. Označení přetlaková turbína zachycuje skutečnost, že průtok vody oběžným kolem probíhá za působení přetlaku na vstupu do oběžného kola. U rovnotlaké turbíny je naopak veškerá tlakové energie vody přeměněna na kinetickou v rozváděči. Na vstupu i výstupu z oběžného kola je tlak stejný. Průtočné kanály oběžného kola zde nejsou zcela zaplněny vodou a oběžné kolo nemůže být při atmosférickém tlaku vzduchu umístěno pod hladinou vody, která by vnikala do průtočných kanálů, narušovala proudění a zhoršovala celkovou účinnost turbíny. Na obrázku 11 je znázorněn tvar rozváděcího zařízení a kanálů oběžného kola rovnotlakých a přetlakových turbín.



Obr. 11 Tvar kanálů rozváděče a kola turbín přetlakových a), rovnotlakých b) [1]

3.1.2 Dle průtoku vody oběžným kolem

Toto členění je nezávislé na konstrukčním řešení turbíny jako celku a je charakterizováno orientací proudu vody v oběžném kole (viz obr. 12).



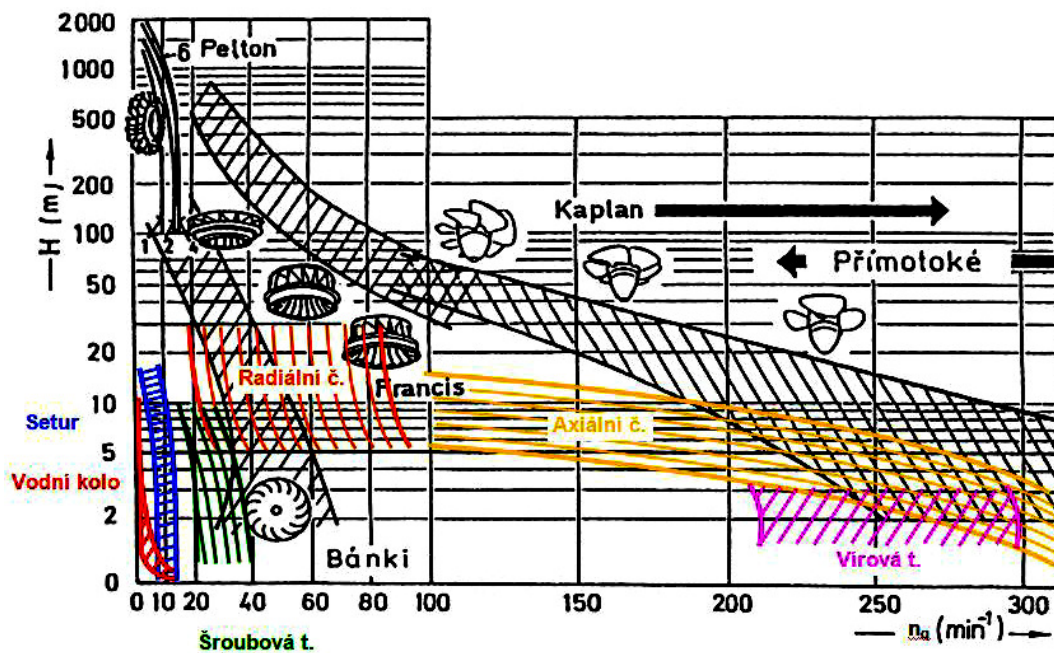
Obr. 12 Rozdělení turbín dle směru průtoku [2]

3.1.3 Dle výkonu a měrné energie

Rozdělení dle výkonu dělí turbíny na **velké** ($P > 100$ MW), **střední** ($P < 100$ MW), **malé** ($P < 10$ MW), **drobné** ($P < 1$ MW), **mikroturbíny** ($P < 60$ kW).

Rozdělení dle měrné energie poté na **nízkotlaké** ($E < 200$ Jkg⁻¹), **středotlaké** ($E < 1000$ Jkg⁻¹) a **vysokotlaké** ($E > 1000$ Jkg⁻¹).

Rozdělení z hlediska měrné energie zároveň vymezuje typické oblasti použití jednotlivých druhů turbín, což zachycuje oblastní diagram na obrázku č. 13.



Obr. 13 Optimální oblast použití turbín a čerpadel v turbínovém provozu [8]

Tento diagram vyjadřuje závislost čistého spádu H , který představuje využitelnou hodnotu hrubého spádu dosaženého na vodním díle po odečtení o ztráty vznikající při dopravě vody k turbíně a jejího odtoku z turbíny a měrných otáček N_q , viz rovnice (5.8), určujících tzv. rychloběžnost turbíny, která představuje závislost skutečných otáček turbíny N na spádu H , a průtoku Q . Rozsahy použitelnosti jednotlivých typů se částečně překrývají, což v některých případech umožňuje volbu více typů pro konkrétní podmínky.

3.2 Klasická koncepční řešení vodních turbín

Klasická koncepční řešení vychází ze 4 základních typů turbín (Francisova, Kaplanova, Dériazova a Peltonova), které v oblastním diagramu (viz obr 13) pokrývají jen část oblasti měrné energie. Jsou také charakteristické svými hlavními částmi popsanými v kapitole 3.2.1.

3.2.1 Hlaví části turbín

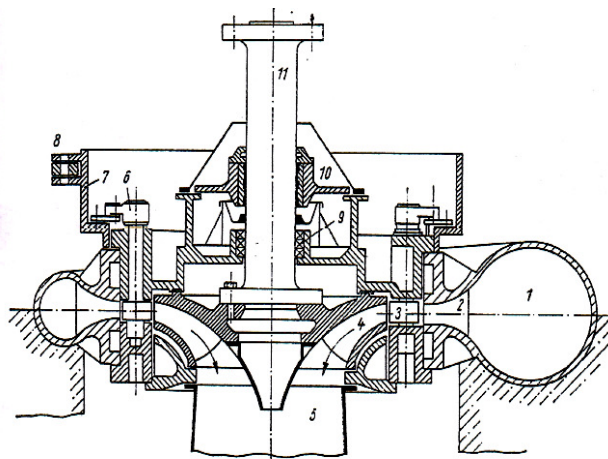
Vodní turbína se ve své podstatě skládá z 3 hlavních částí, které odrážejí 3 základní požadavky na dopravu vody a přeměnu vodní energie na mechanickou energii.

- **Zařízení pro přívod vody k oběžnému kolu** přivádí vodu ke vstupu do oběžného kola ve správném směru a probíhá v něm částečná nebo úplná přeměna tlakové měrné energie vody na kinetickou.
- **Oběžné kolo** představuje pracovní část turbíny, kde dochází k přeměně vodní energie na mechanickou energii
- **Zařízení pro odvod vody z oběžného kola** u přetlakové turbíny, je tvořeno savkou, která umožňuje zvýšit celkovou účinnost stroje. U turbíny rovnotlaké je nejčastěji řešeno jak skříň s účelem odvést vodu odpadající z kola a tvořící rám stroje.

3.2.2 Francisova turbína

Její vynálezcem je původem anglický inženýr James Bicheno Francis, který postavil první turbínu tohoto typu v roce 1849 pro přádelnu v Lowellu [1].

Jedná se o přetlakovou turbínu, jejíž podstatou je oběžné kolo s radiálně axiálním průtokem s pevnými lopatkami a rozváděč s natáčivými lopatkami (Finkova regulace) čímž ji lze do určité míry regulovat vzhledem k měnícímu se průtoku. Nejčastější použití nachází v oblastech střední měrné energie $E = (400 - 8000) \text{ Jkg}^{-1}$, kdy může být situována v horizontální i vertikální poloze. Klasické uspořádání je zachyceno na obrázku 14.



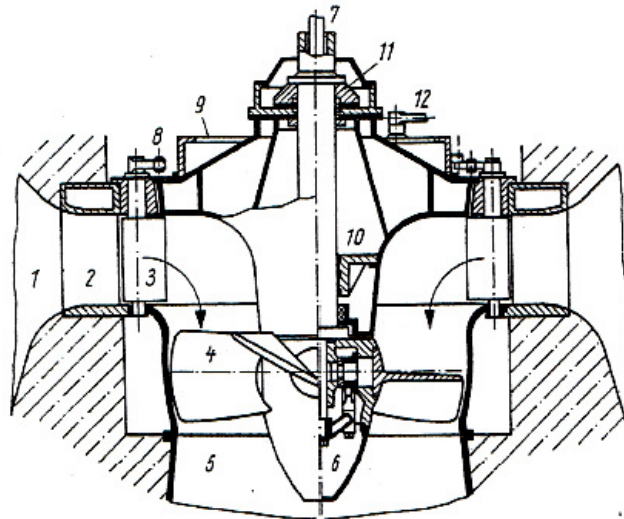
1) spirální skříň, 2) rozpěrné lopatky, 3) Rozváděcí lopatky, 4) Oběžné lopatky, 5) sací trouba, 6) páka přestavování rozváděcích lopatek, 7) regulační prstenec, 8) kloub připojení páky hydraulického servomotoru, 9) těsnění hřídele, 10) vodící ložisko, 11) hřídel se spojovací přírubou

Obr. 14 Francisova turbína [7]

3.2.3 Kaplanova turbína

K jejímu návrhu dospěl profesor brněnské techniky Viktor Kaplan během studia možností zlepšit vlastnosti oběžných kol Francisovy turbíny v letech 1910 až 1913. Její první prototyp byl vyroben v roce 1919 firmou Ignác Storek.

Jedná se o přetlakovou turbínu s axiálním průtokem oběžným kolem používanou pro měrné energie $E = (10 - 800) \text{ Jkg}^{-1}$ a spád od 1 do 70,5m, jejíž klasické uspořádání ve vertikální poloze je zachyceno na obrázku 15. Její předností je možnost natáčení lopatek oběžného kola současně s natáčením lopatek rozváděče, což se odráží v ploché křivce účinnosti, která dosahuje hodnot $\eta = 0,88$ až 0,9. Rozváděč může být řešen jako radiální, diagonální i axiální, kdy tato možnost otvírá cestu ke konstrukci přímoproudých axiálních turbín mnoha typů.

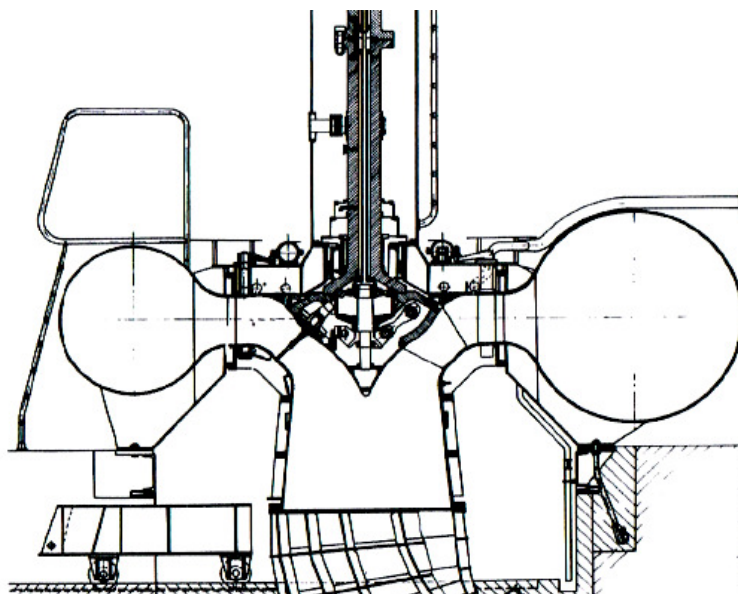


1) spirální skříň, 2) rozpěrné lopatky, 3) Rozváděcí lopatky, 4) Oběžné lopatky, 5) sací trouba, 6) náboj, 7) stavěcí tyč, 8) páka přestavování rozváděcích lopatek, 9) regulační prstenec, 10) vodící ložisko, 11) axiální ložisko, 12) kloub připojení páky servomotoru

Obr. 15 Kaplanova turbína [7]

3.2.4 Dériazova turbína

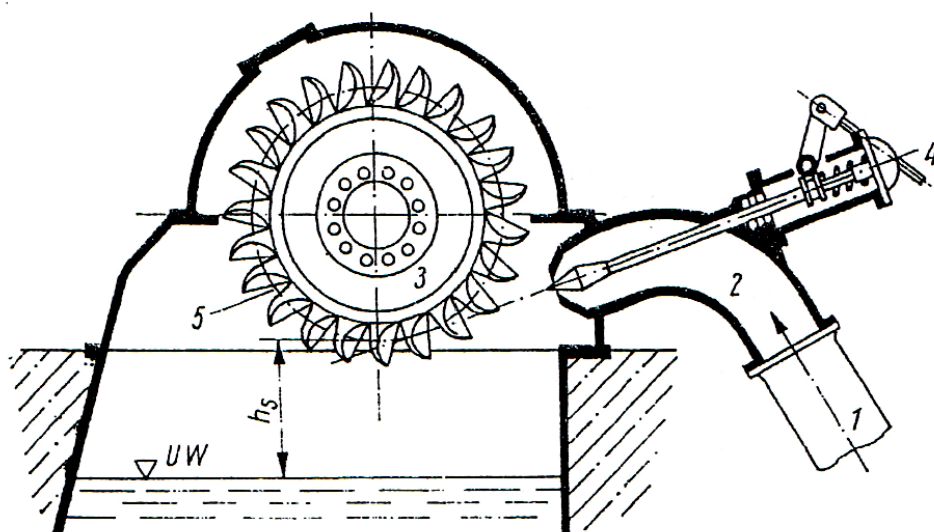
Byla vyvinuta se snahou o ekonomičtější řešení oproti Kaplanově turbíně především v oblasti středních měrných energií. Konstrukční řešení této turbíny vychází z turbíny Kaplanovy, s rozdílem v konstrukci oběžného kola, které je řešeno s diagonálním průtokem a u kterého je zachováno natáčení oběžných lopatek. Její klasické uspořádání je zachyceno na obrázku 16. Používá se pro hodnoty měrné energie $E = (300 - 2000) \text{ Jkg}^{-1}$ závisící na sklonu oběžných lopatek. Výhodou je také její možnost čerpadlového pracovního režimu, čímž si nachází uplatnění v přečerpávacích elektrárnách.



Obr. 16 Dériazova turbína [1]

3.2.5 Peltonova turbína

Byla vynalezena americkým technikem Lesterem Allenem Peltonem roku 1880. Jedná se o rovnotlakou turbínu s tangenciálním vstupem vody do oběžného kola, které tvoří 12 až 40 oběžných lopatek břitem rozdělených na stejné poloviny. Rozváděcí zařízení je nahrazeno 1 až 6 dýzami, kde dochází k přeměně potenciální měrné energie na kinetickou. Typické použití pro vysoké hodnoty měrné energie $E = (4000 - 20000) \text{ Jkg}^{-1}$. Regulace je prováděna změnou průřezu vodního paprsku, zasouváním regulační jehly v dýze a pro rychlé snížení výkonu odkloněním vodního paprsku deflektorem. Uspořádání může být vertikální vhodné pro větší počet dýz, nebo horizontální (viz obr. 17).



1) přivaděč, 2) dýza s regulační jehlou, 3) oběžné kolo, 4) regulační tyč, 5) věnec oběžných lopatek

Obr. 17 Peltonova turbína [7]

4 Turbíny pro využití nízkopotenciálních vodních zdrojů

Jak bylo uvedeno v kapitole 2.4 v České republice, jsou v současnosti de facto vyčerpány lokality poskytující možnosti instalace výkonu $P > 10 \text{ MW}$ a nynější instalační možnosti připadají na lokality poskytující výkon $P < 10 \text{ MW}$, čili dle ČSN 75 0120 [5] vhodné pro zřizování MVE, vhodných pro využití těchto nízkopotenciálních zdrojů.

Realizace MVE, vzhledem k charakteru využívaných zdrojů, jako je například nízký spád, značené kolísání průtoku a spádu během roku, vyžaduje řešení některých specifických především v oblasti investičních nákladů. To se týká jak zemního díla, které tvoří podstatnou část investičních nákladů, někdy převyšující náklady na strojní vybavení, tak i samotných hydromotorů, aby bylo dosaženo ekonomické návratnosti investice. Problém se ve své podstatě redukuje na snížení pořizovacích nákladů na straně jedné a dosažení přiměřené účinnosti, která by umožnila využití dosažitelné vodní energie alespoň natolik efektivně, aby realizace MVE byla ekonomicky výhodná.

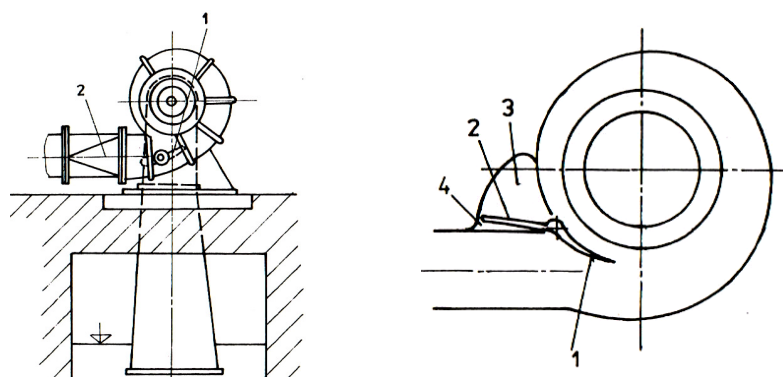
Hydromotory pro nízkopotenciální zdroje lze poté rozdělit na ty, které jsou odvozeny ze základních koncepčních řešení, probraných v předešlých kapitolách a jejichž konstrukce je zjednodušena tak, aby bylo dosaženo uvedených požadavků, a na hydromotory netradičních řešení, případně na čerpadla v turbínovém provozu. Hlavní představitelé těchto skupin budou probrány v následujících kapitolách.

4.1 Turbíny odvozené z konstrukce Francisovy turbíny

Tyto turbíny koncepčně vycházejí ze základního řešení Francisovy turbíny. Jedná se buď o zjednodušené varianty Francisovy turbíny, jejichž konstrukce je přizpůsobena využití nízkopotenciálních zdrojů buď zmenšením zástavbových rozměrů, případně složitostí rozváděcího ústrojí, nebo o koncepční řešení Francisově turbíně podobná.

4.1.1 Reiffensteinova a Kvjatkovského turbína

Tyto turbíny ve snaze snížení investičních nákladů na turbínu řeší podmínku osově symetrického přívodu vody k oběžnému kolu pomocí vhodně upravené spirální skříně, čehož je možno dosáhnout při menších rychlostí proudění vody. Odpadá tak konstrukčně a finančně náročný rozvaděč a k regulaci je použita otočná lopatka nebo ostruha (viz obr. 18). Rozšíření těchto typů turbín v současných MVE však není velké



1) regulační klapka,
2) přechodový kus

1) ostruha, 2) vyvažovací lopatka,
3) nízký tlak, 4) zvýšený tlak

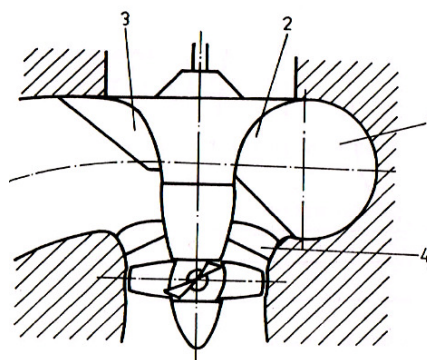
Obr. 18 Reiffensteinova a Kvjatkovského turbína

4.2 Turbíny odvozené z konstrukce Kaplanovy turbíny

Jedná se o turbíny odvozené ze základní konstrukce Kaplanovy turbíny a zjednodušené především v oblasti složitosti regulace tohoto klasického řešení. Tím klesají jejich pořizovací náklady.

4.2.1 Thomannova turbína

Podstatou této modifikace Kaplanovy turbíny je použití pevného rozváděče a regulovatelného oběžného kola. Toto uspořádání zajišťuje stále příznivý průběh účinnosti v oblasti blízké optimální hodnotě měrné energie a dává možnost několika variantám zástavby. Z nich pro MVE je výhodnější použití axiálního rozváděče spolu se zástavbou do kašny. Další zlepšení lze dosáhnout použitím vtokového tělesa před rozváděčem případně použitím vtokového tělesa ve tvaru části anuloidu, které umožňuje dosáhnout menších rozměrů zástavby a je znázorněno na obrázku č. 19. Nevýhody Thomannovy turbíny spočívají v značném prodloužení doby uzavírání oběžného kola a nemožnost úplného uzavření průtoku, čímž musí být doplněna o rychlouzávěr v přívodním potrubí.



1) vtokové těleso, 2) dělicí žebro, 3) usměrňovací žebro, 4) rozváděč

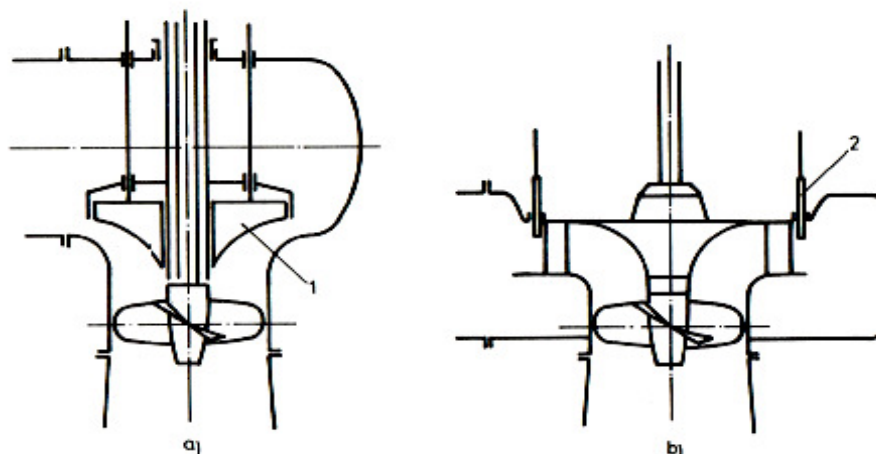
Obr. 19 Thomannova turbína s vtokem ve tvaru anuloidu [1]

4.2.2 Propelerová turbína

Podstata této turbíny spočívá v neregulovatelném oběžném kole s axiálním průtokem při použití regulovatelného rozváděče. Oběžné kolo je řešeno jako celistvý odlitek, případně s lopatkami uchycenými šrouby s možností jejich ručního přenastavení za klidu stroje. Její základní nevýhoda je strmost průběhu charakteristiky, což se negativně projevuje na šířce pásma efektivně využitelného průtoku.

4.2.3 Axiální turbíny se zjednodušenou regulací

Jedná se o řešení, která mají uplatnění především v oblasti využití lokalit spadajících do mikrozdvořů a mobilních zdrojů, kde nelze efektivně uplatnit systémy regulace odvozené od regulace Kaplanovy turbíny. Řešení pomocí osového ventilu a válcového uzávěru je názorně zobrazeno na obrázku 20. Řešení s válcovým uzávěrem na vstupu do pevného rozváděče zároveň zkracuje čas uzavření průtoku.

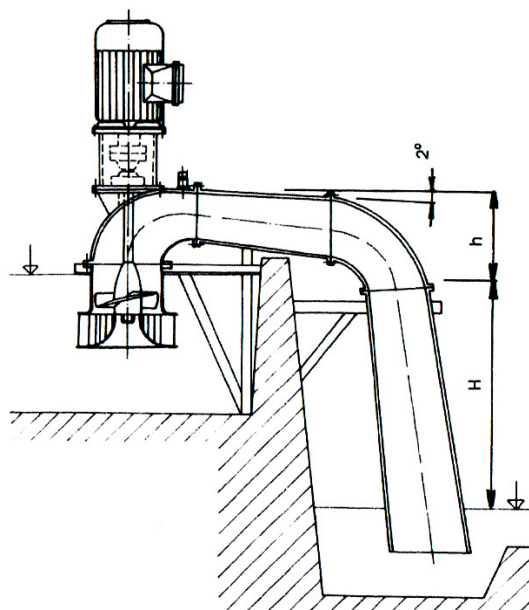


a) osově posuvný ventil, b) osově posuvný válcový uzávěr, 1) ventil, 4) válcový uzávěr

Obr. 20 Zjednodušená regulace axiálních turbín [1]

4.2.4 Axiální neregulovatelná turbína

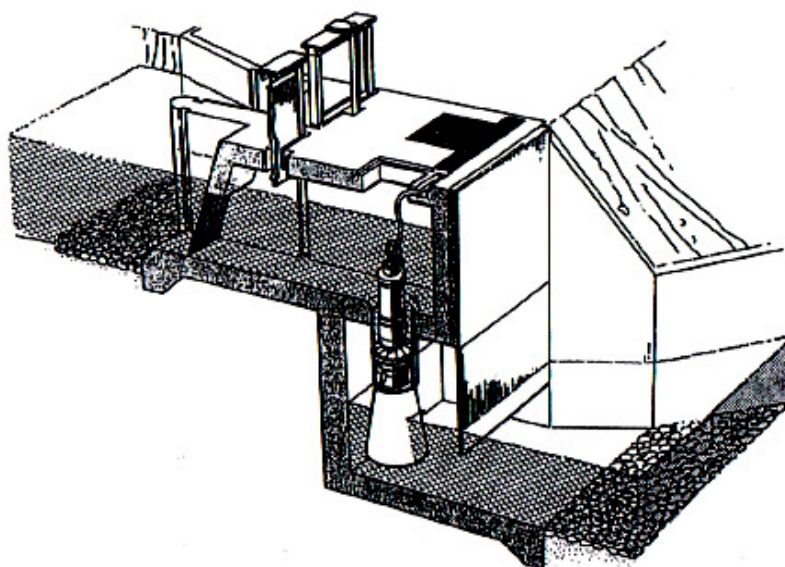
Jedná se o velmi jednoduchou axiální turbínu s pevnými lopatkami oběžného kola i rozváděče, tedy bez možnosti její regulace. To umožňuje dosažení minimálních investičních nákladů, kdy se zároveň jednoduchost řešení pozitivně odráží ve spolehlivosti a dlouhé životnosti stroje. Nevýhodou je nemožnost přizpůsobit provozní režim turbíny aktuálním hydrologickým poměrům, proto se používá tam, kde je dosahováno konstantního průtoku i spádu, případně v kombinaci s paralelním provozem více turbín. Vertikální násoskové uspořádání je znázorněno na obrázku 21.



Obr. 21 Axiální neregulovatelná turbína s násoskou [1]

4.2.5 Ponorná axiální turbína

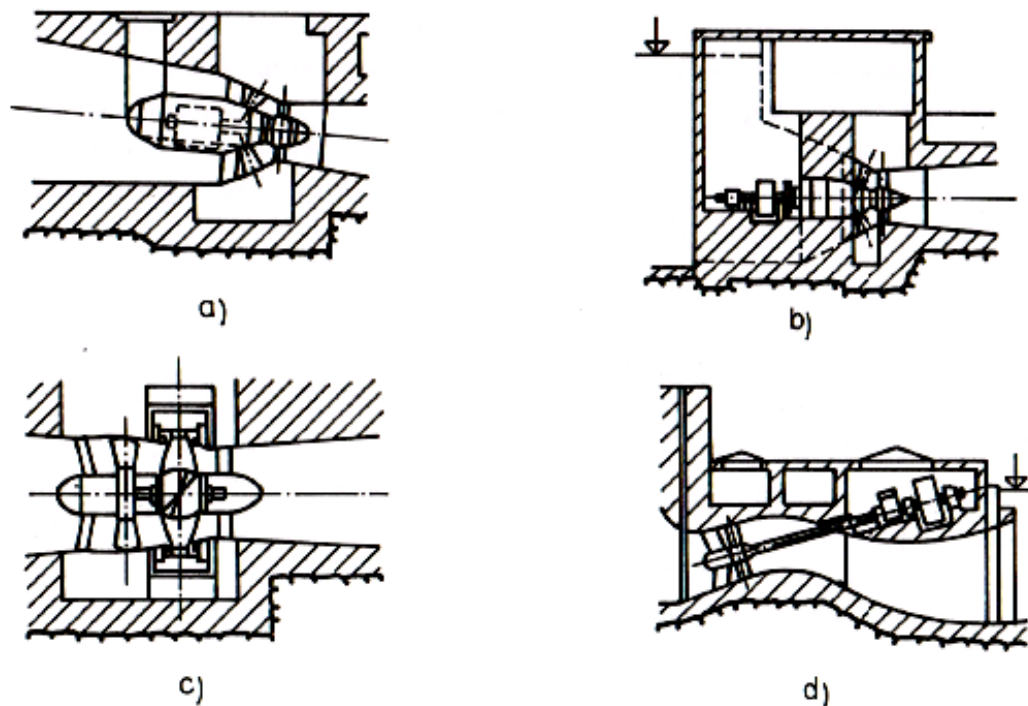
Princip neregulovatelné axiální turbíny se využívá také v oblasti ponorných monobloků vhodných pro využití mikrozdrojů a dále snižujících investiční náklady na soustrojí i na stavební část MVE, kde není potřeba strojovna. Soustrojí je řešeno jako monoblok turbínové části a vodotěsně zapouzdřeného generátoru, někdy doplněno planetovou převodovkou. Přizpůsobení konkrétním hydrologickým podmínkám díla je prováděno volbou vhodného oběžného kola (4 až 5 lopatek) u některých typů ručně přestavitelnými a vhodným rozváděčem z nabídky výrobce. Uspořádání MVE s tímto soustrojím s přívodním potrubím a přívodním kanálem je znázorněno na obrázku 22.



Obr. 22 Ponorný monoblok s axiální turbínou [2]

4.3 Přímoproudé turbíny

Řešení těchto typů turbín vychází z axiální koncepce průtoku oběžným kolem za použití axiálního nebo diagonálního rozváděče (viz obr. č. 23). Turbína v spojení s generátorem tvoří kompaktní celek umístěný osově ve směru průtoku vody. Tyto koncepce jsou vhodné pro lokality ve spodních úsecích toků s malým spádem a velkými průtoky, tedy například u jezových elektráren. Tato řešení podstatně snižují stavební náročnost i celkové investiční náklady. Dovolují umístění většího počtu soustrojí na jednotku plochy a díky přímějšímu vstupu i výstupu vody snížení hydraulických ztrát, což se opět pozitivně promítá do ekonomiky řešení MVE.



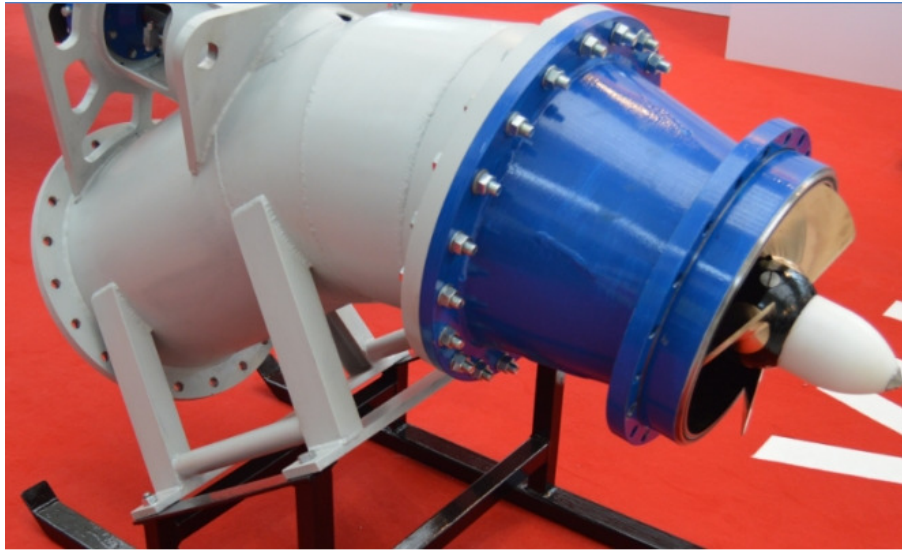
a) s obtékaným generátorem, b) s generátorem v šachtě, c) s protékaným generátorem, d) s vnějším generátorem

Obr. 23 Schémata řešení přímoproudých turbín [1]

4.4 Vírová turbína

Tato turbína byla vyvinuta v roce 2000 na VUT v Brně, týmem vedeným prof. Františkem Pochylým. Jedná se o axiální turbínu, která nepoužívá rozváděč a je přímo projektovaná pro nízkopotenciální lokality do spádu 3m, kde dosahuje účinnosti okolo 86% [13]. Oběžné kolo je tvořeno 2 až 3 lopatkami tvaru zborcených šroubových ploch. Voda vstupuje do kola bez rotace a za oběžným kolem odchází jako rotující proud, což je

základní rozdíl oproti principu činnosti klasických typů přetlakových turbín. Instalace je možná ve variantě násoskové, nebo přímoproudé, která je zachycena na obrázku 24.



Obr. 24 Vírová turbína přímoproudé uspořádání [14]

Absence rozváděče příznivě ovlivňuje investiční náročnost. Díky jejím specifickým otáčkám 950 - 1150 1/min ve většině případů není nutno mezi turbínu a generátor zařazovat převodovku.

V současnosti byla představena modifikovaná vírová turbína pracující v kaskádovém uspořádání, která je vhodná pro lokality až do spádu 6 m s vyššími průtoky, při zachování výhod původního řešení. Vyobrazení oběžného kola kaskádového a klasického uspořádání je zachyceno na obrázku 25.

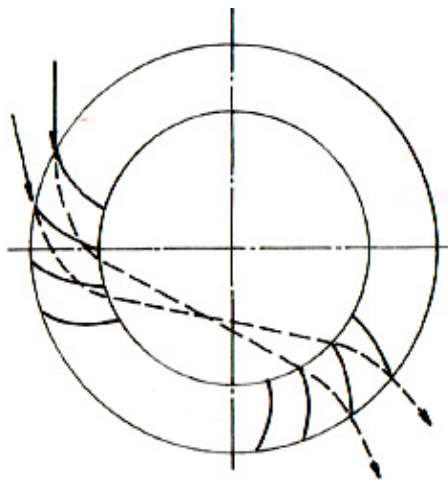


Obr. 25 Oběžná kola kaskádového a klasického uspořádání vírové turbíny [15]

4.5 Bánkiho turbína

Teoretické řešení vypracoval roku 1903 A. G. M. Mitchel využitím teorie Ponceletova vodního kola. Profesor. D. Bánki v letech 1912 – 1919 dokončil vstupní těleso a celkovou teorii jejího řešení. Toto řešení patří k nejjednodušším konstrukčním, technologickým i hydraulickým řešení turbíny pro MVE.

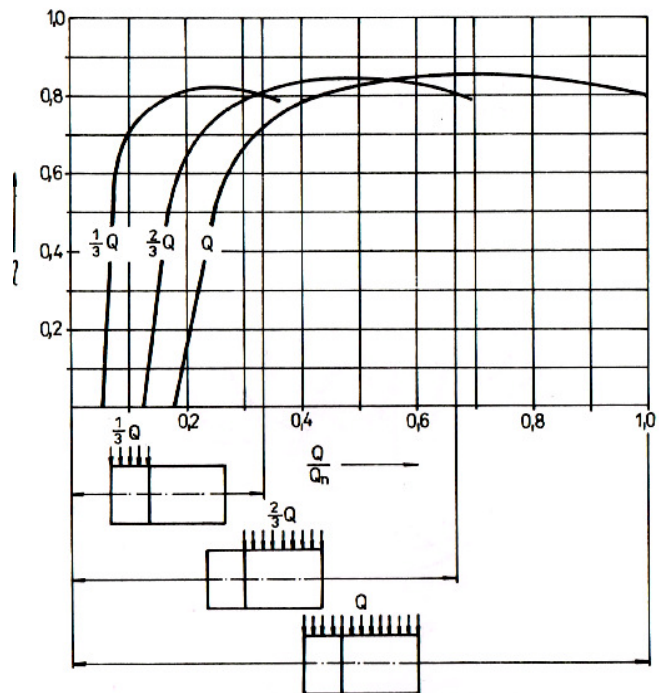
Základem konstrukce je oběžné kolo tvořené věncem lopatek nejčastěji kruhového profilu s dvojnásobným průtokem (viz obr. 26). Pro využití celé hodnoty měrné energie vodního díla ji lze doplnit při dodržení některých zásad i savkou navazující na skříň turbíny.



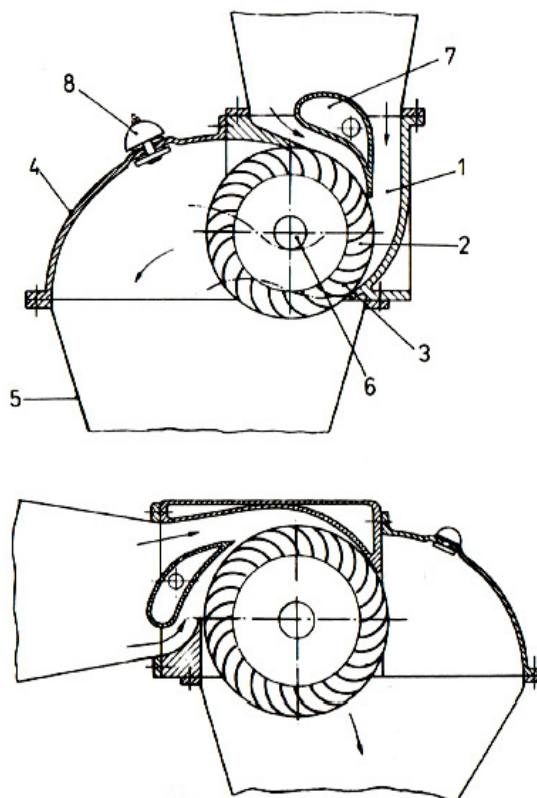
Obr. 26 Proudění oběžným kolem Bánkiho turbíny [1]

Regulace je realizována buď posuvným segmentem, nebo otočnou klapkou. Ve spojení s možností dělení vodního kola i regulačních orgánů v podélném směru (nejčastěji v poměrech 1/3 ku 2/3) lze dosáhnout výrazně ploché křivky účinnosti v širokém rozsahu průtoků (viz obr. 27). Tyto vlastnosti ji předurčují k nasazení v místech extrémních hydrologických podmínek.

Provedení Bánkiho turbíny je možné ve vertikálním i horizontálním provedení, jejichž schéma zachycuje obrázek 28.



Obr. 27 Průběh účinnosti vícesekční Bánkiho turbíny [1]

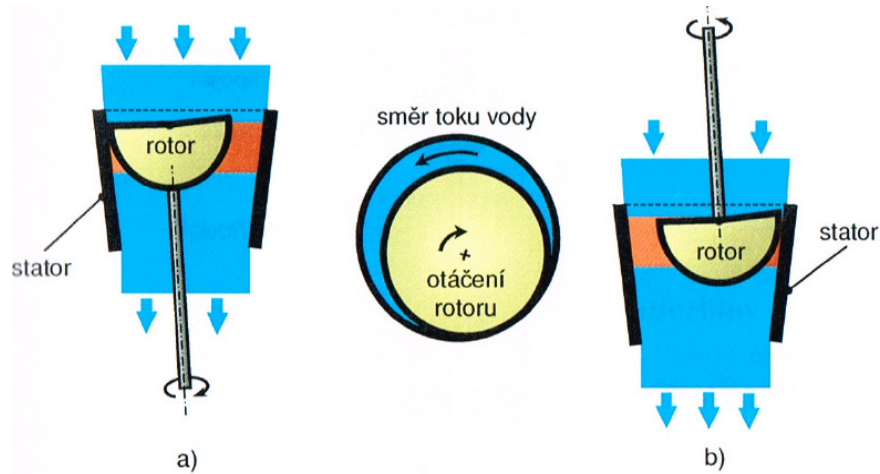


1) vstupní těleso, 2) oběžné kolo, 3) lopatka oběžného kola, 4) těleso turbíny, 5) savka, 6) hřídel, 7) regulační lopatka, 8) zavzdušňovací ventil

Obr. 28 Varianty uspořádání Bánkiho turbíny [1]

4.6 Bezlopatková miniturbína

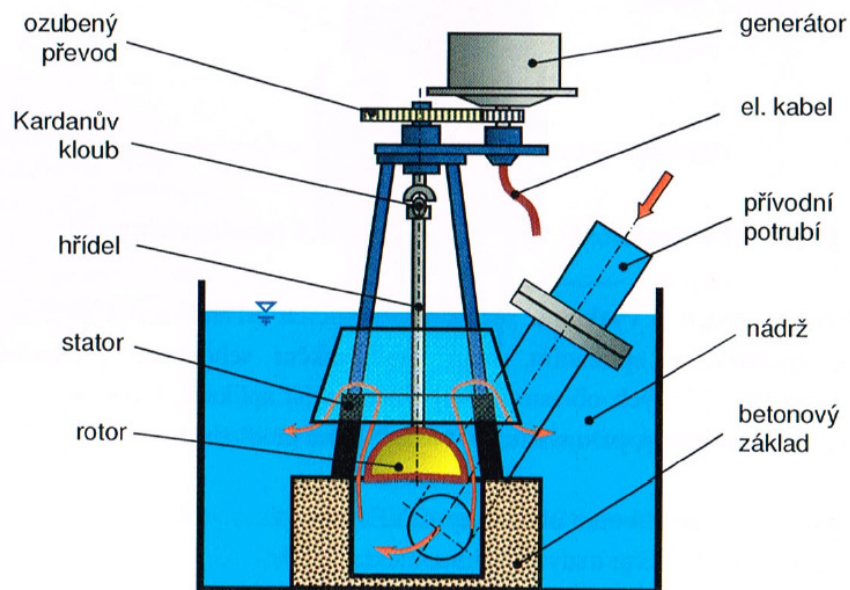
Jedná se o turbínu založenou na principu průtoku vody štěrbinou mezi rotorem a státorem v jehož důsledku dojde k vychýlení rotoru ke stěně statoru a jeho odvalování po této stěně. Zároveň tak dochází k otáčení hřídele, na které je rotor upevněn a tím k transformaci vodní energie na mechanickou. Jsou možné dvě základní varianty uspořádání a to s podepřeným a zavěšeným rotorem zachycené na obrázku 29.



a) s podepřeným rotorem, b) se zavěšeným rotorem

Obr. 29 Bezlopatková miniturbína [9]

Představitelem je dle [9] komerčně vyráběna jednotka DVE 120 schopná pracovat se spádem $H = (3 - 20)$ m a průtokem $Q = (1 - 20)$ l/s, kde dosahuje elektrického výkonu $P_e = (35 - 1000)$ W. Konstrukční schéma této domácí vodní elektrárny (viz obr. 30).



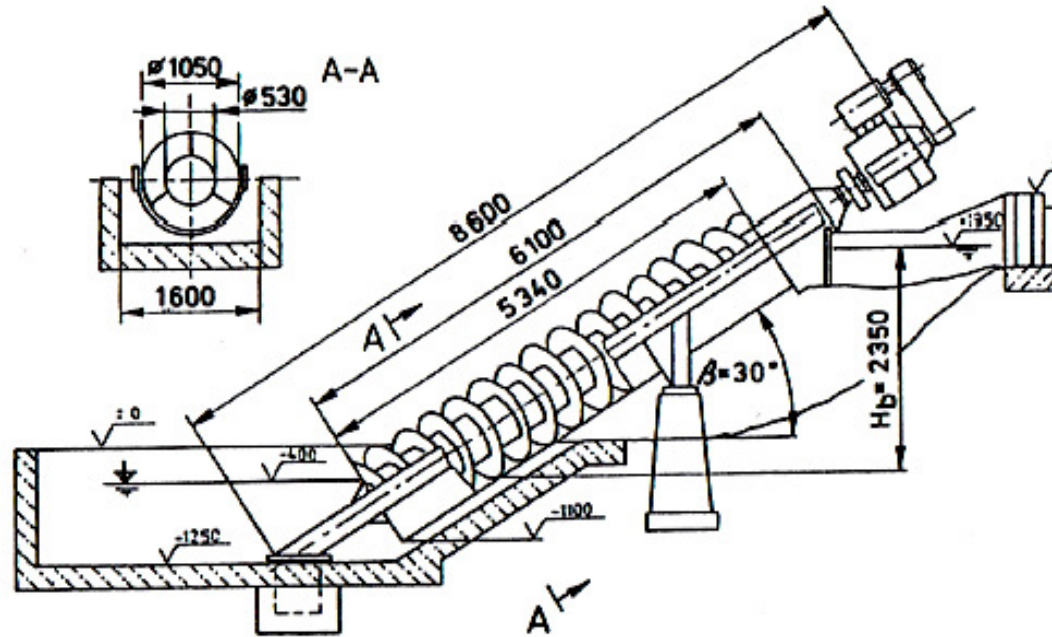
Obr. 30 Jednotka DVE 120 [9]

4.7 Použití čerpadel v turbínovém režimu

Použití čerpadel v turbínovém režimu vyplývá z podstaty Eulerovy energetické rovnice, která má obecnou platnost pro proudění tekutiny rotujícím kanálem, z čehož vyplývá reverzibilita přeměny energie v hydraulických strojích a tím možnost použít čerpadla v turbínovém režimu. Příznivě se projevuje i skutečnost víceméně stejné, někdy i vyšší dosahované účinnosti čerpadla při použití v turbínovém režimu a finanční dostupnost těchto jednotek vzhledem k širokému spektru typizovaných výrobních řad. Nevýhodou představuje pevný rozváděč, který omezuje efektivní provoz na úzkou oblast průtoku. V případě použití diagonálních a axiálních čerpadel je tuto nevýhodu možno kompenzovat použitím regulovatelného oběžného kola, kdy se toto uspořádání blíží vlastnostem Thomannovy turbíny. Výše uvedené vlastnosti proto použití čerpadel v turbínovém chodu předurčují k využití i v některých specifických případech, například v okruzích chladicí vody, olejových okruzích turbosoustrojí, praní plynů za vysokých tlaků apod., ale také v aplikaci MVE.

4.7.1 Hydrostatická čerpadla

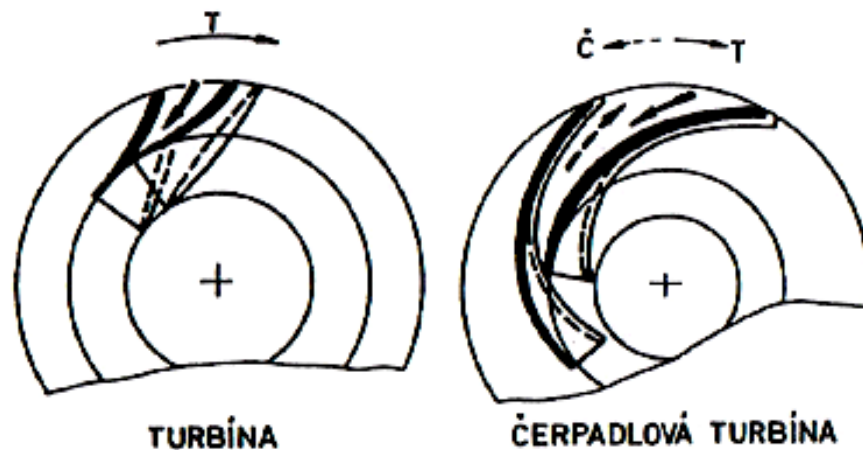
Z hydrostatických čerpadel je možno použít především šroubové čerpadlo jako vhodnou alternativu Bánkiho turbíny, turbín axiálních a vodních kol pro využití lokalit s malým spádem a proměnlivým průtokem, jak zachycuje oblastní diagram na obrázku č. 13. K jeho přednostem patří technologická a konstrukční jednoduchost a z ní vyplývající nízká pořizovací cena. Účinnost okolo 80%, která se jen málo mění s velikostí stroje a především se změnou průtoku, i možnost použití pro znečištěnou vodu a jednoduchost instalace z něho dělají vhodnou alternativu vodních kol při obnově bývalých vodních děl. K jeho nevýhodám lze přiřadit nutnost převodu do rychla a nižší výkon na jednotku hmotnosti. Na obrázku 31 je schematicky zachyceno použití šroubového čerpadla při využití nízkospádového zdroje vodní energie.



Obr. 31 Šroubové čerpadlo ve funkci turbíny [2]

4.7.2 Hydrodynamická čerpadla

K transformaci hydraulické energie lze použít také hydrodynamická čerpadla. Možnost dosažení vysoké účinnosti při jejich turbínovém chodu je důsledkem vhodného geometrického tvaru kanálů oběžných kol čerpadel. Ty mají v turbínovém chodu tvar konfuzoru, kdy se kapalina neodpoutá od jejich stěn, a ztráty jsou minimální. Klasická turbína s konfuzorovými kanály oběžného kola použita v čerpadlovém režimu, kdy se tyto kanály změjí na difuzorové (viz obr. 32), má jev právě opačný což je příčinou špatné účinnosti turbín v čerpadlovém režimu.



Obr. 32 Kanály oběžných kol turbíny a čerpadla [2]

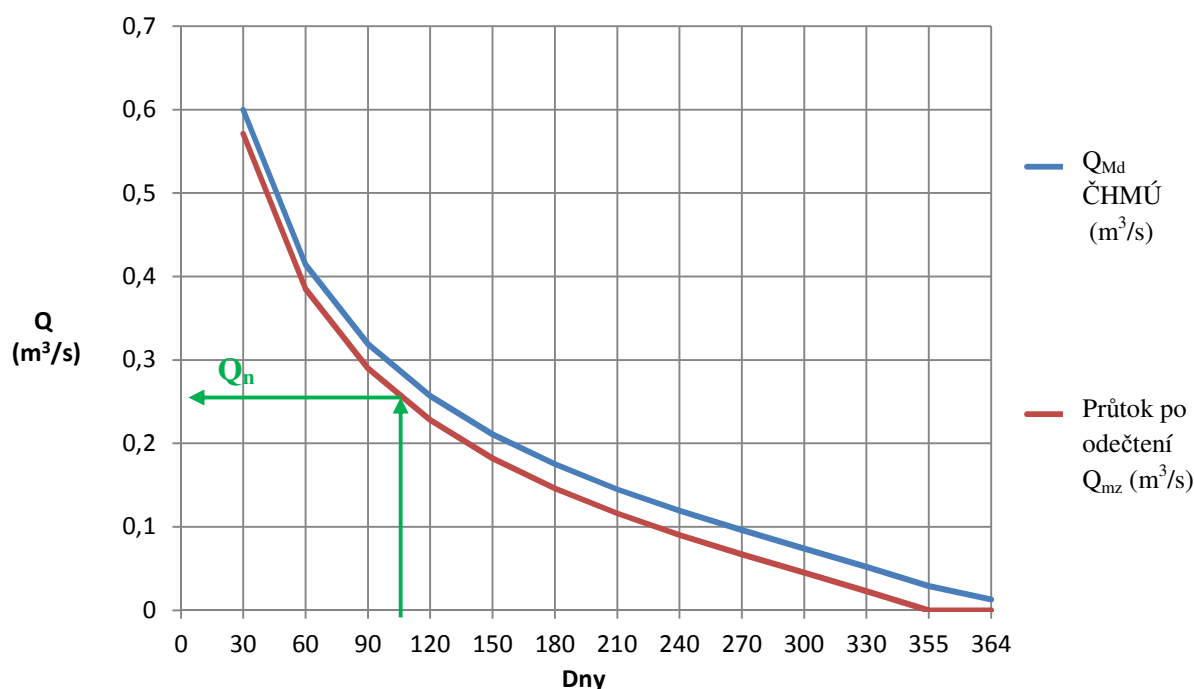
5 Určení hydroenergetických parametrů průtočného a akumulčního využití

Pro analýzu základních hydrologických parametrů vodního toku Loděnice v obci Doksy u Kladna bylo nezbytné získat data o průtocích toku v dané lokalitě a velikosti hrubého spádu v místě uvažované instalace. Pro stanovení průtokových poměrů byla využita data o M denních průtocích poskytnutá ČHMÚ, která zachycují dlouhodobou hydrologickou situaci dané lokality viz. tabulka 1 [11].

Tabulka 1 Lokalita vodního toku

Vodní tok	Loděnice
Číslo hydrologického pořadí	1-11-05-0110
Profil	Doksy u Kladna, dle vyznačení situace
Plocha povodí A	104,41 km ²
Dlouhodobý průměrný průtok Q _a	257 l/s Třída III

Poskytnuté údaje byly využity pro sestavení křivky překročení M denních průtoků. Ta je základním podkladem pro určení návrhového průtoku turbíny Q_n a lze na jejím základě stanovit přibližnou roční výrobu elektrické energie. Dále je poté možno v souvislosti s výkupní cenou odhadnout roční výnos, který je pokladem k hodnocení doby návratnosti uvažované investice. Pro využití konkrétní lokality je dále zapotřebí zohlednit povinnost zachování minimálního zůstatkového průtoku původním korytem toku Q_{mz}, danou §36, zák.254/2001 [12], který je obvykle stanoven na úrovni Q₃₅₅, což v daném případě dopovídá hodnotě 0,029 m³/s. V grafu č. 1 je zachycena křivka překročení M denních průtoků bez a po odečtení minimálního zůstatkového průtoku.



Graf 1 Křivka překročení M denních průtoků

V podmínkách České republiky se v odborné literatuře např. [1] doporučuje stanovit návrhový průtok turbíny Q_n v rozmezí průtoků $Q_{120} - Q_{90}$ a odkud byla stanovena hodnota návrhového průtoku: $Q_n = 0,25 \text{ m}^3/\text{s}$

Dále bylo přímo na místě provedeno měření hrubého spádu H_b , který se určí jako výškový rozdíl vrchní a spodní hladiny vody v místě uvažovaného VD. Měření bylo provedeno jednoduchým způsobem pomocí vážní latě, jak bylo popsáno v kapitole 2.4.1 a to opakovaně, s cílem alespoň částečně eliminovat vliv proměnlivosti hrubého spádu v závislosti na okamžitém průtoku. Jako průměrná hodnota hrubého spádu byla stanovena hodnota: $H_b = 3,2 \text{ m}$

Ze zjištěných údajů je z diagramu na obrázku č. 7 zřejmé, že případně realizovaná MVE by spadala do kategorie domácích vodních elektráren a proto další návrh bude zaměřen na co nejjednodušší provedení jak z hlediska zemního díla, tak strojního vybavení zahrnující jen jedno soustrojí.

Průtočné využití:

Průtočné využití předpokládá uspořádání VD a výběr turbíny tak, aby byl za pomoci širokého regulačního rozsahu stroje zpracován co největší objem ročního průtoku a zajištěna její činnost po co nejdelší dobu. Pro možnost určit z oblastního diagramu konkrétní typ hydromotoru je nejprve nutno určit čistý spád H a měrné otáčky N_q . Provedení VD se předběžně předpokládá s tlakovým přivaděčem kruhového průřezu. Z místních terénních podmínek je předběžně odhadnuta délka tohoto přivaděče na 5 m s jedním kolenem 90° . Vstup vody do přivaděče je volen standardně přes jemné česle a předpokládá se použití savky za turbínou pro využití celého spádu. Dále byly zvoleny další potřebné hodnoty z doporučených tabulkových rozsahů. Výpočet čistého spádu H a měrných otáček N_q je proveden dle [7].

Dáno: hrubý spád $H_b = 3,2$ m; návrhový průtok $Q_n = 0,25$ m³/s; délka přivaděče $L = 5$ m; návrhová účinnost přivaděče $\eta_p = 0,97$; třecí součinitel ocelové korodované potrubí $\lambda = 0,03$; součinitel místního odporu vtokový díl $\xi_v = 2,5$ a kolena 90° $\xi_k = 0,4$

Průměr přivaděče:

$$d \geq \sqrt[5]{\frac{8 \cdot \lambda \cdot L \cdot Q_n^2}{\pi^2 \cdot g \cdot H_b \cdot (1 - \eta_p)}} \geq \sqrt[5]{\frac{8 \cdot 0,03 \cdot 5 \cdot 0,25^2}{\pi^2 \cdot g \cdot 3,2 \cdot (1 - 0,97)}} \geq 0,38 \text{ [m]} \quad (5.1)$$

Volen nejbližší větší normalizovaný průměr 0,4 m.

Rychlost vody v přivaděči:

$$v = \frac{4 \cdot Q_n}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 0,25}{\pi \cdot 0,4^2} = 1,99 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad (5.2)$$

Součinitel odporu přivaděče:

$$\xi_p = \lambda \frac{L}{d} + \xi_v + \xi_k = 0,03 \cdot \frac{5}{0,4} + 2,5 + 0,4 = 3,275 \text{ [1]} \quad (5.3)$$

Ztrátová výška:

$$H_z = \frac{v^2}{2 \cdot g} \cdot \xi_p = \frac{1,99^2}{2 \cdot g} \cdot 3,275 = 0,66 \text{ [m]} \quad (5.4)$$

Čistý spád:

$$H = H_b - H_z = 3,2 - 0,66 = 2,54 \text{ [m]} \quad (5.5)$$

Hodnota čistého spádu pro další výpočty zaokrouhlena na 2,5 m.

Skutečná účinnost přivaděče:

$$\eta_{ps} = \frac{H}{H_b} = \frac{2,5}{3,2} = 0,78 \text{ [1]} \quad (5.6)$$

Skutečná účinnost přivaděče je stále větší než uvažovaná účinnost turbíny, viz dále.

Hodnotě čistého spádu $H = 2,5$ m odpovídá v oblastním diagramu na obrázku č. 13 použití několika typů hydromotorů. Vzhledem k záměru průtočného využití a potřebě širokého regulačního rozsahu při zachování ploché křivky účinnosti lze zvolit například Bánkiho turbínu s rotorem děleným na dvě sekce v poměru 1/3 ku 2/3 (viz obr. č. 26 – 28). Vzhledem k malé velikosti stroje volím dle [2] účinnost u spodní hranice doporučeného rozsahu $\eta_t = 0,65$, čtyř pólový elektrický generátor $p = 4$ s účinností $\eta_G = 0,75$ a převodovku $i = 0,1333$ o účinnosti $\eta_{př} = 0,9$.

Otáčky turbíny:

$$N = \frac{3000}{\frac{p}{2}} \cdot i = \frac{3000}{\frac{4}{2}} \cdot 0,1333 = 200 \text{ [1/min]} \quad (5.7)$$

Měrné otáčky:

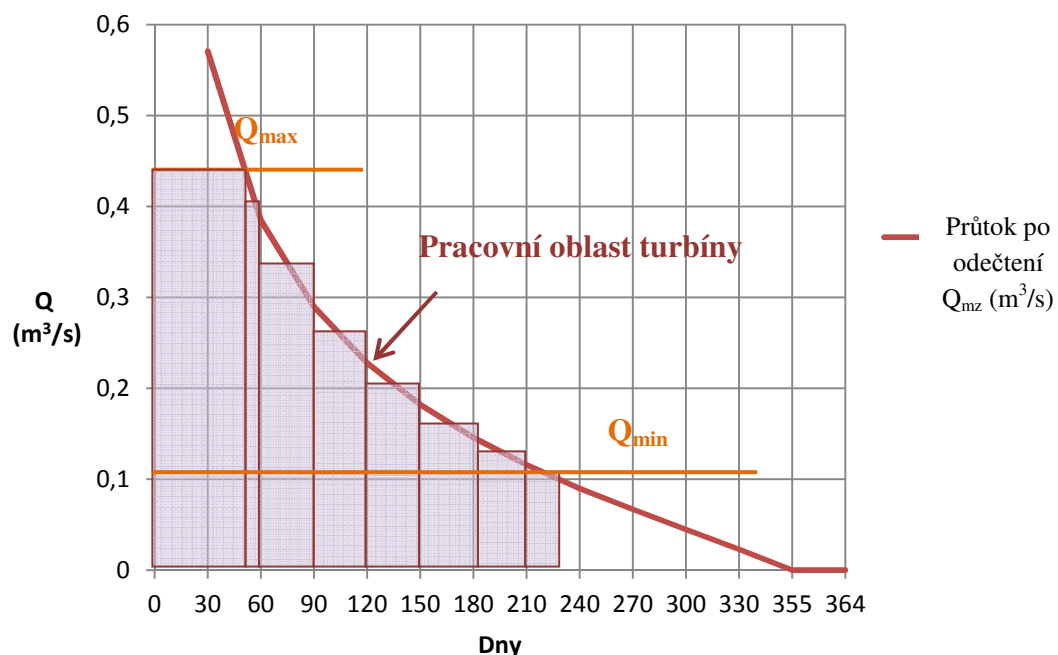
$$Nq = N \cdot \frac{Qn^{0,5}}{H^{0,75}} = 200 \cdot \frac{0,25^{0,5}}{2,5^{0,75}} = 50,3 \text{ [1/min]} \quad (5.8)$$

Odpovídá použití Bánkiho turbíny

Určení přibližné roční výroby elektrické energie

Z diagramu průběhu charakteristiky vybraného typu turbíny na obrázku č. 27 byl odhadnut její regulační rozsah v rozmezí:

$$Q_{\max} = 1,8 \cdot Q_n = 0,45 \text{ m}^3/\text{s} \quad Q_{\min} = 0,4 \cdot Q_n = 0,1 \text{ m}^3/\text{s}$$



Graf 2 Pracovní oblast Bánkiho turbíny

Po zanesení Q_{\max} a Q_{\min} do diagramu překročení M denních průtoků viz graf č. 2 je vidět, že pracovní oblast turbíny je poměrně velká a turbína by mohla pracovat zhruba 225 dní v roce. Ze získaných dat je v tabulce 2 podle [2] proveden výpočet přibližné roční výroby elektrické energie pro výše zavedené parametry při předpokladu jejich neměnnosti během provozu.

Tabulka 2 Výpočet orientační výroby elektrické energie

Dny [d]	50	10	30	30	30	30	30	15
Q_{vi}[m³/s]	0,45	0,43	0,34	0,26	0,21	0,16	0,13	0,11
P_{ei} [kW]	4,8	4,6	3,7	2,8	2,3	1,7	1,4	1,2
N_i[kW/h]	5811	1110	2634	2014	1627	1240	1007	426
ΣN	15869 kW/h							

$$P_{ei} = Q_{vi} \cdot H \cdot \rho \cdot g \cdot \eta_t \cdot \eta_{př} \cdot \eta_G \text{ [kW]} \quad (5.9)$$

$$N_i = P_{ei} \cdot t \text{ [kW/h]} \quad (5.10)$$

Dny počet dnů zaručujících daný průtok [d]

t.....doba provozu turbíny [h]

Q_{vi} dílčí využitelný průtok [m³/s], viz graf 2

P_e elektrický výkon generátoru pro daný dílčí průtok [kW]

N_i dílčí objem vyrobené elektrické energie [kW/h]

ΣNcelkový objem vyrobené elektrické energie za rok [kW/h]

Dosažený výkon a celkové množství elektrické energie vyrobené za rok odpovídá zařazení případně realizované MVE do kategorie domácích elektráren.

Akumulační využití:

U akumulčního způsobu využití je zamýšleno využití rybníka jako akumulční nádrže a provozem turbíny v cyklickém chodu zpracovat celý využitelný roční průtok při kolísání hladiny v rybníce. Akumulační schopnost rybníka je funkcí plochy $S = 52650 \text{ m}^2$ a uvažovaného kolísání hladiny v rozmezí $H_k = 0,2 \text{ m}$.

Akumulační schopnost:

$$V_a = S \cdot H_k = 52\,650 \cdot 0,2 = 10530 \text{ [m}^3\text{]} \quad (5.11)$$

Pro co nejjednodušší provedení vodního díla se předpokládá použití soustrojí s neregulovanou turbínou v násoskovém uspořádání (viz obr. č. 21). To zároveň umožní bezobslužné spouštění a zastavení turbíny v závislosti na stavu hladiny v rybníce. Stanovení návrhového průtoku turbíny se odvíjí od požadavku zajistit i při maximálním

přítoku $0,571 \text{ m}^3/\text{s}$ stav, aby při spuštění turbíny po dosažení maximální výšky hladiny v rybníce docházelo k jejímu postupnému poklesu a turbína pracovala v cyklickém provozu. Návrhový průtok Q_n byl stanoven na hodnotu:

$$Q_n = 0,6 \text{ m}^3/\text{s}$$

Upravení hrubého spádu v tomto případě závisí na zamýšlené velikosti kolísání vodní hladiny v rybníce, která je předběžně zvolena $0,2 \text{ m}$, tedy rozmezí hodnot $3,2 - 3 \text{ m}$. Hrubý spád je proto zvolen jako střední hodnota:

$$H_b = 3,1 \text{ m}$$

Výpočet je proveden stejným způsobem jako v případě průtočného uspořádání s rozdílem že je uvažováno v přivaděči druhé koleno 90° a délka přivaděče odhadnuta na $L = 6 \text{ m}$.

Dáno: hrubý spád $H_b = 3,1 \text{ m}$; návrhový průtok $Q_n = 0,6 \text{ m}^3/\text{s}$; součinitel místního odporu vtokový díl $\xi_v = 2,5$; 2x koleno $\xi_k = 0,4$

Průměr přivaděče:

$$d \geq \sqrt[5]{\frac{8 \cdot \lambda \cdot L \cdot Q_n^2}{\pi^2 \cdot g \cdot H_b \cdot (1 - \eta_p)}} \geq \sqrt[5]{\frac{8 \cdot 0,03 \cdot 6 \cdot 0,6^2}{\pi^2 \cdot g \cdot 3,1 \cdot (1 - 0,97)}} \geq 0,55 \text{ [m]} \quad (5.1)$$

Volen nejbližší větší normalizovaný průměr $0,6 \text{ m}$.

Rychlost vody v přivaděči:

$$v = \frac{4 \cdot Q_n}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 0,6}{\pi \cdot 0,6^2} = 2,12 \text{ [m/s]} \quad (5.2)$$

Součinitel odporu přivaděče:

$$\xi_p = \lambda \frac{L}{d} + \xi_v + 2\xi_k = 0,03 \cdot \frac{6}{0,6} + 2,5 + 0,8 = 3,6 \text{ [1]} \quad (5.3)$$

Ztrátová výška:

$$H_z = \frac{v^2}{2 \cdot g} \cdot \xi_p = \frac{2,12^2}{2 \cdot g} \cdot 3,6 = 0,82 \text{ [m]} \quad (5.4)$$

Čistý spád:

$$H = H_b - H_z = 3,1 - 0,82 = 2,28 \text{ [m]} \quad (5.5)$$

Hodnota čistého spádu pro další výpočty zaokrouhlena na $2,25 \text{ m}$.

Skutečná účinnost přivaděče:

$$\eta_{ps} = \frac{H}{H_b} = \frac{2,25}{3,1} = 0,73 \text{ [1]} \quad (5.6)$$

Skutečná účinnost přivaděče je stále větší než uvažovaná účinnost turbíny, viz dále.

Hodnotě čistého spádu $H = 2,25$ m odpovídá v oblastním diagramu na obrázku č. 13 opět použití několika typů hydromotorů. Vzhledem k záměru cyklického provozu bez nutnosti použít průtokovou regulaci turbíny volím hydromotor z oblasti axiálních vrtulových strojů s pevným oběžným kolem i rozváděčem, případně bez rozváděče, což jsou například vírová turbína, axiální čerpadlo v turbínovém provozu, axiální neregulovaná turbína apod. Jelikož turbína bude pracovat v optimálním režimu, volím její účinnost mírně vyšší $\eta_t = 0,7$ v provedení s přímým spojením s 10 pólovým generátorem $p = 10$ a účinností generátoru $\eta_G = 0,8$.

Otáčky turbíny:

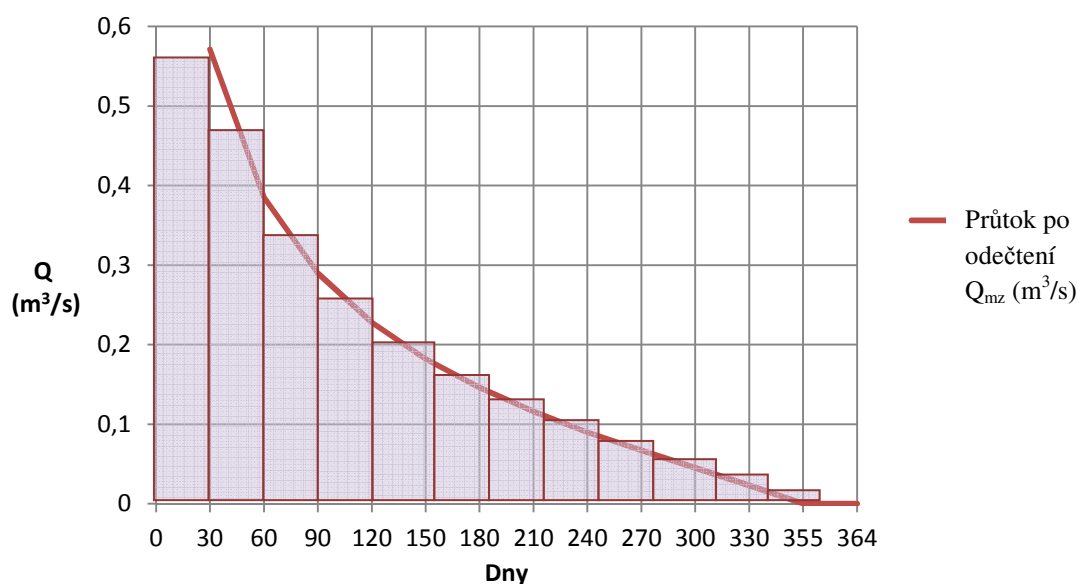
$$N = \frac{3000}{\frac{p}{2}} = \frac{3000}{\frac{10}{2}} = 600 \text{ [1/min]} \quad (5.7)$$

Měrné otáčky:

$$N_q = N \cdot \frac{Qn^{0,5}}{H^{0,75}} = 600 \cdot \frac{0,6^{0,5}}{2,25^{0,75}} = 253 \text{ [1/min]} \text{ odpovídá dané oblasti} \quad (5.8)$$

Určení přibližné roční výroby elektrické energie

Pro určení přibližné roční výroby elektrické energie při uvažovaném způsobu provozu je zapotřebí určit roční objem vody, který je možno akumulovat pro práci turbíny. Jeho určení opět vychází z křivky překročení M denních průtoků po odečtení minimálního zůstatkového průtoku (viz graf č. 3).



Graf 3 Roční objem vody pro akumulaci

Výpočet ročního objemu vody pro akumulaci je z podkladů získaných v grafu č. 3 proveden v tabulce č. 3.

Tabulka 3 Výpočet roční objemu vody pro akumulaci

Dny[d]	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	25
Q_{vi}[m³/s]	0,57	0,48	0,34	0,27	0,2	0,17	0,14	0,1	0,06	0,04	0,02
V_i [m³]	1477440	1244160	881280	699840	518400	440640	362880	259600	155520	103680	21600
Σ V	6 164 640 m³										

$$V_i = Q_{vi} \cdot t \text{ [m}^3\text{]} \quad (5.12)$$

Dny počet dnů zaručujících daný průtok [d]

t..... doba provozu turbíny [s]

Q_{vi} dílčí využitelný průtok [m³/s], viz graf 3

V_i..... dílčí objem vody pro daný dílčí průtok [m³]

Σ V celkový objem vody za rok pro akumulaci [m³]

Doba provozu turbíny:

$$t = \frac{\Sigma V}{Q_n} = \frac{6164640}{0,6} = 2854 \text{ [h]} \quad (5.13)$$

Výkon elektrický:

$$P_e = Q_n \cdot H \cdot \rho \cdot g \cdot \eta_t \cdot \eta_G = 0,6 \cdot 2,25 \cdot 1000 \cdot g \cdot 0,7 \cdot 0,8 = 7,4 \text{ [kW]} \quad (5.14)$$

Přibližná roční výroba elektrické energie:

$$N = P_e \cdot t = 7,4 \cdot 2854 = 21\,120 \text{ [kW/h]} \quad (5.15)$$

Dosažený výkon a celkové množství elektrické energie vyrobené za rok opět odpovídá zařazení případně realizované MVE do kategorie domácích elektráren.

6 Závěr

Ze zjištěných dat je jednoznačně patrné, že případně realizovaná MVE na toku Loděnice v oblasti Doksy u Kladna by svým výkonem spadala do kategorie domácích vodních elektráren.

V případě využití průtočným způsobem by byl provoz možný zhruba 225 dnů v roce, což je umožněno volbou Bánkiho turbíny s dvousekčním rotorem, která se vyznačuje širokým regulačním rozsahem s plochým průběhem účinnosti. Roční objem vyrobené elektrické energie při tomto využití činí 15869 kW/h. V případě využití akumulacním způsobem roční objem vyrobené elektrické energie činí 21 120 kW/h což představuje zvýšení využití hydroenergetického potenciálu o 33% čehož je dosaženo využitím celého využitelného ročního objemu vody a provozem turbíny v těsné blízkosti maximální účinnosti. V obou případech je však potřeba počítat s tím, že skutečná roční výroba elektrické energie by se lišila od vypočtené zejména proto, že při výpočtech byly některé vstupní proměnné, například účinnost turbíny a generátoru voleny z obvyklých rozsahů a tudíž v případě skutečného zařízení by se lišily. Zároveň byla předpokládána neměnnost všech zavedených parametrů, což by v reálném provozu také neplatilo. V případě návrhu reálné MVE by bylo tedy nutné vycházet z hodnot konkrétních zařízení získaných od jejich výrobců a uvažovat proměnnost příslušných parametrů.

V případě realizace by výběr vhodné varianty MVE zahrnoval získání cenových nabídek na několik alternativ strojního vybavení a zemního díla, jejichž cena se může pro každý případ významně lišit. Pro každou variantu by dle konkrétních parametrů zařízení a VD bylo nutno přesněji spočítat předpokládané roční množství vyprodukované elektřiny a z výkupní ceny by se následně určil předpokládaný roční zisk. Na jeho základě by mohlo být provedeno hodnocení doby návratnosti investice některou z dynamických metod, např. diskontovaná doba návratnosti, čistá současná hodnota, vnitřní výnosové procento a vybrána nejvhodnější varianta k realizaci.

V obou případech by bylo k realizaci MVE v dané lokalitě nutné také získat svolení Českého rybářského svazu, který rybník provozuje jako sportovní rybářský

revír a který by se pravděpodobně zabýval otázkou velikosti kolísání vodní hladiny při akumulacním využití v souvislosti s chovem ryb.

V obou případech využití je také nutné, oproti současnému stavu, přeměřovat do rybníka veškerý využitelný průtok, aby se mohl využít spád dosažený u jeho hráze. To by způsobovalo především při přívalových deštích a vyšších průtocích přinášení většího množství kalu do rybníka a jeho zvýšenou sedimentaci. Toto by byla další okolnost, o kterou by se Český rybářský svaz zajímal, protože tento stav by postupně vedl k zanesení rybníka a tím omezení jeho využití jako sportovního revíru. V případě udělení souhlasu s podmínkou budoucího odbahnění by tento závazek představoval další významné náklady, které by se negativně promítly do dlouhodobé ekonomické efektivity záměru.

Celkově se tedy možnost realizace MVE v dané lokalitě jeví jako nejistá a to především z hlediska získání potřebného souhlasu Českého rybářského svazu jakož i z hlediska návratnosti vynaložené investice především pokud by se zvolila varianta s dražším strojním vybavením a budováním rozsáhlejšího zemního díla a zvláště při nutnosti budoucího odbahnění rybníka.

7 Použitá literatura

- [1] BEDNÁŘ, Josef. *Turbíny: (malé vodní elektrárny)*. Českovice: Marcela Bednářová, c2013, 357 s. ISBN 978-80-905437-0-6.
- [2] MELICHAR, Jan, Jan VOJTEK a Jaroslav BLÁHA. *Malé vodní turbíny: konstrukce a provoz*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1998, 299 s. ISBN 80-01-01808-3.
- [3] MELICHAR, Jan, Jaroslav BLÁHA a Karel BRADA. *Hydraulické stroje: konstrukce a provoz*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002, 378 s. ISBN 80-01-02657-4.
- [4] ŠTOLL, Čestmír, Stanislav KRATOCHVÍL a Miroslav HOLATA. *Využití vodní energie*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1977, 612 s.
- [5] *Vodní hospodářství - Terminologie hydrotechniky: ČSN 75 0120*. Praha: Český normalizační institut, 2009, 166 s.
- [6] ZEITHAMMER, Karel. *Vývoj techniky*. 2. přepracované vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1997, 315 s. ISBN 80-01-01725-7.
- [7] ULRYCH, Emil. *Aplikovaná hydromechanika I.: (základy hydroenergetiky)*. Vyd. 1. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2007, 126 s. ISBN 978-80-213-1609-6.
- [8] POLÁK, Martin. *Problematika energetického využití nízkopotenciálních vodních zdrojů*. Praha, 2013. Habilitační práce. ČZU v Praze, Technická fakulta.
- [9] POLÁK, Martin. *Bezlopatková miniturbína: cesta k energetickému využití nejmenších vodních zdrojů*. 1. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2013, 166 s. ISBN 978-80-01-05233-4.
- [10] POLÁK, Martin. *Hydraulické stroje: (Úvod do teorie a konstrukce)*. 1. vyd. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2013, 154 s. ISBN 978-80-213-2367-4.
- [11] Hydrologická data ČHMÚ, Pobočka Praha: *Vodní tok Loděnice, Profil Doksy u Kladna*
- [12] PUNČOCHÁŘ, Pavel. *Zákon o vodách č. 254/2001 Sb. v úplném znění k 23.lednu 2004 s rozšířeným komentářem*. 3. vyd. se změnami. Praha: Sondy, 2004, 392 s. ISBN 80-86846-00-8.
- [13] <http://www.3pol.cz/cz/rubriky/obnovitelne-zdroje/986-virova-turbina>
- [14] <http://www.spolupracesvut.cz/cz/vysledky/fakulta-strojního-inženýrství/item/191-virova-turbina/191-virova-turbina>
- [15] <http://brnensky.denik.cz/galerie/kkaskadova-virova-turbina-brno.html?mm=4570253>

8 Seznam obrázků, tabulek a grafů

Obr. 1 Bilance slunečního záření [1]	3
Obr. 2 Potenciální výkon úseku vodního toku [1]	4
Obr. 3 Určení geodetického spádu vážní latí [13]	6
Obr. 4 Princip měření průtoku v Bazinově a Thomsnově přepadu [13]	6
Obr. 5 Základní varianty hydrodynamických děl [1].....	7
Obr. 6 Rozdělení malých vodních elektráren dle výkonu [1]	8
Obr. 7 Celkové rozdělení elektráren dle výkonu [2].....	8
Obr. 8 Dělení vodních kol dle nátoky vody [1]	9
Obr. 9 Sengerovo kolo a Eulerův stroj [2]	10
Obr. 10 Turbína Fourneyronova, Janvalova a Girardova a Schwamkurgova[2]	10
Obr. 11 Tvar kanálů rozváděče a kola turbín přetlakových a), rovnotlakých b) [1]	11
Obr. 12 Rozdělení turbín dle směru průtoku [2].....	11
Obr. 13 Optimální oblast použití turbín a čerpadel v turbínovém provozu [8]	12
Obr. 14 Francisova turbína [7].....	13
Obr. 15 Kaplanova turbína [7]	14
Obr. 16 Dériazova turbína [1]	15
Obr. 17 Peltonova turbína [7]	15
Obr. 18 Reiffensteinova a Kvjatkovského turbína.....	17
Obr. 19 Thomannova turbína s vtokem ve tvaru anuloidu [1].....	17
Obr. 20 Zjednodušená regulace axiálních turbín [1].....	18
Obr. 21 Axiální neregulovatelná turbína snásoskou [1]	19
Obr. 22 Ponorný monoblok s axiální turbínou [2]	19
Obr. 23 Schémata řešení přímoproudých turbín [1]	20
Obr. 24 Vírová turbína přímoproudé uspořádání [14]	21

Obr. 25 Oběžná kola kaskádového a klasického uspořádání vírové turbíny [15]....	21
Obr. 26 Proudění oběžným kolem Bánkiho turbíny [1].....	22
Obr. 27 Průběh účinnosti vícesekční Bánkiho turbíny [1].....	23
Obr. 28 Varianty uspořádání Bánkiho turbíny [1]	23
Obr. 29 Bezlopatková miniturbína [9]	24
Obr. 30 Jednotka DVE 120 [9]	24
Obr. 31 Šroubové čerpadlo ve funkci turbíny [2]	26
Obr. 32 Kanály oběžných kol turbíny a čerpadla [2]	26
Tabulka 1 Lokalita toku	27
Tabulka 2 Výpočet orientační výroby elektrické energie	31
Tabulka 3 Výpočet roční objemu vody pro akumulaci.....	34
Graf 1 Křivka překročení M denních průtoků	28
Graf 2 Pracovní oblast Bánkiho turbíny	30
Graf 3 Roční objem vody pro akumulaci.....	33

9 Seznam zkratek

MVE – malá vodní elektrárna

ČHMÚ – Český hydrometeorologický ústav

VD – vodní dílo