

Česká zemědělská univerzita v Praze

TECHNICKÁ FAKULTA

Katedra mechaniky a strojnictví



Bakalářská práce

Malé vodní elektrárny – obnovitelný zdroj energie

Miroslav Pressler

© 2019 ČZU V PRAZE

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Miroslav Pressler

Inženýrství údržby

Název práce

Malé vodní elektrárny – obnovitelný zdroj energie

Název anglicky

Small hydropower – renewable energy source

Cíle práce

Na základě literární rešerše zmapovat historický vývoj, současný stav a výhledy ve využívání malých vodních toků pro účely hydroenergetiky. Provést technicko-ekonomické zhodnocení vybrané instalace.

Metodika

- zpracovat literární rešerši
- popsat a zhodnotit vybranou malou vodní elektrárnu

Pozn.:

- práce by měla být strukturována do těchto oddílů: Úvod, Materiál a metody, Výsledky, Diskuse, Závěr. V pracích rešeršního charakteru lze sloučit kapitolu Materiál a metody s kapitolou Výsledky a stejně tak Diskusi se Závěrem.
- jednotlivé kapitoly a podkapitoly práce, rovnice, tabulky a obrázky je nutno číselně označovat a na toto značení se v textu odkazovat. Nedílnou součástí práce je Obsah, Abstrakt, Seznam použitých zkratk a symbolů, obrázků, tabulek a Seznam použité literatury.
- je nezbytné respektovat citační pravidla dle ČSN ISO 690:2011
- vedoucího práce je nutno čtvrtletně seznamovat s postupem zpracování zadaného tématu

Doporučený rozsah práce

40 stran textu včetně obrázků, grafů a tabulek

Klíčová slova

hydroenergetika, malá vodní elektrárna, vodní motor, turbína

Doporučené zdroje informací

Bednář, J.: Turbíny [malé vodní elektrárny], Nakladatelství Marcela Bednářová, Blansko

Melichar, J.: Hydraulické a pneumatické stroje, část vodní turbíny, ČVUT Praha 2013.

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

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



Předběžný termín obhajoby

2018/19 LS – TF

Vedoucí práce

doc. Ing. Martin Polák, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra mechaniky a strojnictví

Elektronicky schváleno dne 16. 2. 2018

doc. Ing. Pavel Neuberger, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 9. 3. 2018

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 29. 03. 2019

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Malé vodní elektrárny – obnovitelný zdroj energie vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že s odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jsem si vědom, že moje bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí.

Jsem si vědom, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o autorském právu, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

V Praze dne

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval panu doc. Ing. Martinu Polákovi Ph.D. za cenné připomínky a odborné rady, kterými přispěl k vypracování této bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval panu Přemyslu Jiroutovi a panu Jaroslavu Drozdíkovi z malé vodní elektrárny Želina za jejich ochotu a vstřícnost při získávání informací a dat malé vodní elektrárny.

Malé vodní elektrárny – obnovitelný zdroj energie

Abstrakt

Úvodní část této práce je věnována přírodním zdrojům energie se zaměřením na hydroenergetiku. Je popsán historický vývoj týkající se využití vodní energie na území České republiky až do současné doby. Pozornost je zaměřena na základní rozdělení a popis jednotlivých částí vodní elektrárny, a také na nejvyužívanější typy vodních turbín v současnosti. Další část práce popisuje malou vodní elektrárnu Želina nacházející se na řece Ohři. Důležitým bodem je popis základních částí, hydrotechnických podmínek a technologického vybavení elektrárny. V závěru práce je provedeno technicko-ekonomické hodnocení nově instalovaných vírových turbín a také posouzení příčin dosahování nízkého výkonu původních Francisových turbín.

Klíčová slova

obnovitelný zdroj energie, malá vodní elektrárna, hydroenergetika, vodní turbína, Želina

Small hydro-power plants – renewable energy source

Abstract

The introductory chapter of this thesis is dedicated to natural resources of energy with an emphasis on hydroenergetics. It describes a historical overview of hydroelectric power usage in the Czech Republic. Attention is focused on the basic typology, description of parts of a hydroelectric powerplant, currently most used hydroelectric turbines will be introduced. The following chapter is dedicated to description of the Želina Hydroelectric power plant, which is located by the Ohře River. A key part is a specification of the basic components, hydroelectrical conditions and technical equipment of this power plant. The conclusion is contain the technological and economical evaluation of the swirl turbines, as well as an appraisal of cause of Francis' Turbines low output.

Keywords

renewable energy source, small hydro-power plant, hydropower engineering, water turbine, Želina

Obsah

1. Úvod.....	1
2. Přírodní zdroje energie.....	2
2.1. Historie využití obnovitelných zdrojů energie.....	3
2.2. Vodní energie a její druhy	4
3. Uplatnění malých vodních elektráren na území České republiky.....	5
3.1. Současný stav a budoucnost vodní energetiky	6
4. Vodní elektrárna	8
4.1. Malé vodní elektrárny	8
4.2. Rozdělení MVE	9
4.3. Hlavní části malé vodní elektrárny	10
5. Vodní motory	13
5.1. Historie vodních motorů	13
5.2. Princip činnosti	14
5.3. Současné typy vodních motorů.....	15
5.3.1. Francisova turbína	15
5.3.2. Kaplanova turbína.....	16
5.3.3. Peltonova turbína.....	17
5.3.4. Bánkiho turbína	18
5.3.5. Vírová turbína.....	19
6. Malá vodní elektrárna Želina.....	22
6.1. Historie MVE Želina	23
6.2. Hlavní části MVE Želina	24
6.2.1. Vzduvací zařízení	24
6.2.2. Příváděcí zařízení	25
6.2.3. Česle	26
6.2.4. Strojovna.....	27
6.2.5. Vírové turbíny	28
7. Technické zhodnocení instalace vírových turbín	29
7.1. Teoretický výkon vodní elektrárny.....	29
7.2. Množství vyrobené elektrické energie	32
7.3. Stabilita výroby.....	32
7.4. Posouzení průtoku.....	34
8. Ekonomické zhodnocení MVE Želina	35

8.1. Ekonomické zhodnocení instalace vírových turbín	36
8.2. Posouzení příčin nízkého výkonu Francisových turbín	37
9. Závěr.....	39
10. Seznam citovaných zdrojů.....	40
11. Seznam obrázků	41
12. Přílohy	42

1. Úvod

Využití potenciálu vodní energie lze nalézt již v dávné minulosti, a to v mnoha odvětvích nejrůznějších řemesel jako např. kovárny, mlýny, pily apod. Mechanická energie byla však využitelná pouze v bezprostřední blízkosti jejího zdroje. Na počátku 20. století došlo k výraznému pokroku v oblasti elektrických točivých strojů a mechanická energie mohla být přeměňována na energii elektrickou. Díky rozvodové soustavě bylo možné vyrobenou elektrickou energii využít na mnohem vzdálenějších místech než do té doby.

Ačkoliv se vodní elektrárny výrazně podílejí na množství vyrobené elektrické energie, tak mezi hlavní výrobce však patří elektrárny tepelné a jaderné. Vodní elektrárny mají ovšem mnoho nesporných výhod, mezi které lze zařadit například nižší provozní náklady na rozdíl od jiných typů elektráren, jejich rychlé spouštění a zastavení, plynulá regulace, schopnost vyrovnávat energetické extrémy elektrické sítě či minimální zatížení životního prostředí. Díky neustálému výzkumu je dosaženo vysokých účinností a je možné efektivně využívat i nízkopotencionální toky. Problematika vodních elektráren je poměrně rozsáhlá. Pro dosažení vysoké účinnosti a správného chodu je nutno brát v úvahu jedinečnost každé z lokalit. Správný návrh vede k získání obnovitelné energie, dnes tolik nutné pro potřeby každodenního dne.

2. Přírodní zdroje energie

Energie vyskytující se v přírodě bez ohledu na to, zdali je možné ji zcela a přímo zužítkovat, bývá označována jako energie surová. Na naší planetě ji lze nalézt na mnoha místech a v mnoha rozmanitých formách, z nichž pouze některé typy dokázal člověk využívat pro svůj prospěch. Využitelnou energii, kterou lze získat přeměnou surové energie, označujeme jako užítkovou nebo také zušlechtěnou. Všechny primární zdroje, z nichž získáváme energii, ať už v jakékoliv formě, nazýváme přírodními zdroji energie. (Dušička, 2003; Mastný, 2011)

Dělení přírodních zdrojů energie:

- Zdroje vyčerpátné: Patří sem především fosilní paliva vyskytující se ve třech skupenstvích. Jsou jimi například rašelina, uhlí, ropa, zemní plyn. Jejich zásoby jsou značně omezené.
- Zdroje stále se obnovující: Jejich zásoby jsou omezeny přírodními podmínkami. Hlavní složku tvoří rostlinná paliva: dřevo, biomasa.
- Zdroje nevyčerpátné: Jedná se o neomezené zdroje biosféry, které není možné vyčerpá co do množství a změnit co do kvality. Nevyčerpátnými energetickými zdroji jsou například sluneční záření, tepelná energie Země, vodní energie toků, energie mořského přílivu a odlivu, větrná energie.
- Energie jaderná: K jejímu vzniku dochází při řízeném rozpadu atomových jader v reaktoru. (Dušička, 2003)

Z přírodních zdrojů je v současné době uspokojivě technicky zvládnuto zejména využití paliv tuhých, tekutých, plynných, biopaliv, vodní energie toků a jaderné energie. Tato energie se nejčastěji používá ve formě energie mechanické, tepelné, chemické a především elektrické.

Je nutné podotknout, že mnoho přírodních zdrojů pochází ve skutečnosti pouze z energie sluneční a jaderné. Množství této energie je obrovské a její hustota se pohybuje řádově kolem $1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$. Právě díky ní vznikly mnohé významné energetické zdroje. Za pomoci fotosyntézy došlo k nahromadění sluneční energie za tisíciletí uložené ve formě fosilních paliv. Taktéž odpar vody a její následný oběh je způsoben sluneční energií a mnohé další. (Dušička, 2003)

2.1. Historie využití obnovitelných zdrojů energie

Vodní energie patří mezi nejdéle využívané obnovitelné zdroje energie. První využívání vodní síly sahá k roku 600 př. n. l., kdy Chaldejci stavěli vodní kanály, díky nimž, za pomoci vodních kol, dokázali využít vodní energii k čerpání vody k zavlažování. Na území České republiky byl již v roce 718 jako první v Evropě vybudován mlýn nedaleko města Žatec na řece Ohři, který byl poháněn prostřednictvím vodní energie. Síla vody je tedy využívána, z hlediska historie, již dlouhé období. (Pažout, 1987)

Je nutné podotknout, že ačkoliv voda patří mezi nejdéle využívané zdroje energie, tak v minulosti nebyl kladen přílišný důraz na zlepšení vlastností mechanismů využívajících vodní energii. A to i přes mnohé snahy o zvětšování vodních kol za účelem zvýšení jejich efektivnosti. Z hlediska historie je tedy síla vody využívána již dlouhé období.

Vrchol v počátečním využívání vodní energie představuje přelom 18. století, tedy doba, kdy bylo mnoho lokalit využito pro výstavbu vodních mlýnů v mezích technické dosažitelnosti a převodu mechanické energie. Na počátku průmyslové revoluce byla veškerá pozornost soustředěna na energii tepelnou. A to díky využití parních strojů, které předstihly o více než sto let sestrojení takových vodních motorů, které by byly parním strojům konkurenceschopné. Ke zrychlení vývoje hydroenergetiky došlo v důsledku zdokonalení vodních motorů, zejména turbín, a to ve druhé polovině 19. století. Dominantními státy byly především Francie, USA, Švýcarsko a Německo. V praxi tedy došlo k odsunu využití vodní energie až do doby, kdy byla sestrojena první přetlaková turbína.

K sestrojení první přetlakové turbíny (Burdinova přetlaková turbína) došlo v roce 1827, francouzským profesorem Claude Burdinem. Posléze byly sestrojeny také další typy turbín – Francisova turbína roku 1847, Peltonova turbína roku 1880, turbína Kaplanova roku 1913. Ovšem vodní síla byla využívána především jako mechanický pohon v továrnách s malými strojovými jednotkami. Mezi další důvody pro pozdní nástup hydroenergetiky patří skutečnost, že přenos elektrické energie na větší vzdálenost byl realizovatelný až v posledním desetiletí 19. století. K prvnímu přenosu elektrické energie došlo v roce 1891 z Lauffenu do Frankfurtu nad Mohanem, a to na vzdálenost 177 km. (Pažout, 1987)

Zásadní význam pro rozvoj hydroenergetiky měl tedy zejména vývoj elektrizační soustavy, která umožňuje rovnoměrné využití elektrické energie vyrobené jak ve velkých zdrojích, tak i v malých. Díky tomuto pokroku došlo k vyřešení jednoho z hlavních problémů – tím byla stabilita dodávky elektrické energie z rozvodové sítě. Výroba elektrické energie v malých vodních elektrárnách je výrazně závislá na energetickém potenciálu řeky v dané lokalitě a mnohdy také na změnách vodnosti toků v jednotlivých ročních obdobích. Zásadou rozvinuté elektrizační soustavy je možné využití rychlého najetí hydrogenerátorů pro pokrytí vysokého odběru během energetických špiček. Pro krytí převážně základního zatížení je využívána energie z průtočných elektráren. K propojení izolovaně pracujících elektrizačních soustav na území Československa došlo v padesátých letech 20. století. Teprve v osmdesátých letech 20. století nastalo efektivní využívání malých vodních energetických zdrojů, a to převážně díky moderním turbínám a rozvinuté elektrizační soustavě umožňující spolehlivý přenos energie od zdroje až ke spotřebiteli. (Pažout, 1987)

2.2. Vodní energie a její druhy

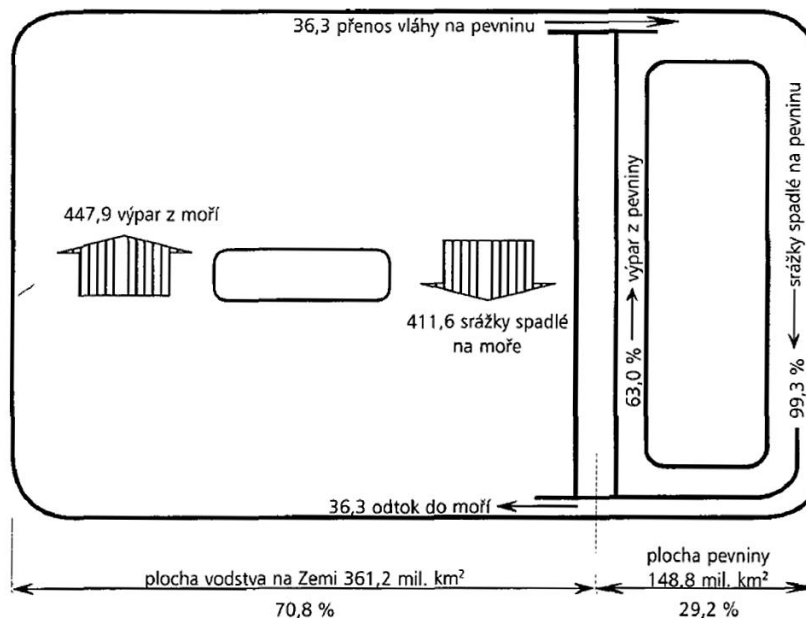
Vodní energie je nejdéle technicky využívanou formou energie v přírodě. Již od dávných dob docházelo k jejímu využívání k mnoha druhům práce jako například mletí obilí, řezání dříví, roztloukání rudy, valchování sukna, k výrobě střelného prachu, k drcení sádry nebo pohonu měchů u kovářských či hutnických výhní. Vodní energie je zdrojem relativně dostupným, čistým a především obnovitelným. Obnovitelnost tohoto zdroje je podmíněna působením slunečního záření a také gravitací. Vlivem těchto dvou dominantních faktorů dochází k odparu vody a k její následné kondenzaci zpět na povrch Země. Voda je v přírodě nositelem energie chemické, tepelné a mechanické. Vodní energie patří v současné době mezi nejvýznamnější zdroje obnovitelné energetiky. Tato energie v přírodě zahrnuje:

- mechanickou energii vodních srážek
- mechanickou energii ledovců
- mechanickou energii moří (projevuje se ve formě vlnění, proudů, přílivu a odlivu)
- mechanickou energii vodních toků

Energie vodních toků je tedy pouze jednou z forem energie vody projevující se jako energie potenciální (dána polohou), anebo energie kinetická (rychlostní). Z technického hlediska je energie vodních toků nejlépe využitelná, jelikož se jedná o stále se obnovující koloběh vody, který lze označit za nevyčerpatelný, bezodpadový a relativně stálý zdroj energie v přírodě. Na obr. 3 lze vidět přirozený koloběh vody a průměrné množství jejího ročního

oběhu (uvedeno v 1000 m³). Mezi zásadní výhody patří využitelnost této energie, a to díky již zvládnutým strojně-technologickým zařízením. Pomocí těchto zařízení lze, s poměrně vysokou účinností, transformovat energii mechanickou, vzniklou na vodním motoru, na energii elektrickou pomocí generátoru. (Melichar, 2013)

Obr. 1 Přírozený koloběh vody na Zemi (průměrné roční hodnoty uvedeny v 1000 km³); (Dušička, 2003)



3. Uplatnění malých vodních elektráren na území České republiky

Ve 30. letech 20. století existovalo na území tehdejšího Československa 15 638 lokalit využívajících vodní energii. Tato energie měla však zpravidla pouze lokální význam a byla využívána převážně k pohonu hamrů, mlýnů, pil apod. Drtivá většina těchto lokalit byla v 50. letech zrušena vládním nařízením. V provozu zůstalo pouhých 5 470 lokalit a mnoho dalších vodních děl bylo postupem času rušeno jako neefektivní. Na přelomu 80. let nastal rozvoj malých vodních elektráren a po roce 1987 bylo takových zařízení v provozu 570. Po roce 1989 bylo zrušeno omezení stavby malých vodních elektráren. Restituce a možnost soukromého podnikání výrazně dopomohly k obnově zchátralých a nevyužitých vodních zdrojů. K roku 2013 bylo již na území České republiky dle statistik Energetického regulačního úřadu (ERÚ), 1 451 malých vodních elektráren.

V dnešní době je možné v ČR nalézt okolo 1 500 MVE. Většina z nich je doposud osazena původní starou technologií, která dosahuje průměrné účinnosti jen okolo 70 %. Proto se v současné době rozvoj vodní energetiky soustředí především na zvýšení účinnosti. Některé

publikace tvrdí, že vodní potenciál na území ČR je z velké části nevyužitý. Skutečnost je však poněkud složitější. Většina výhodných míst je již energeticky využívána a celkový hydroenergetický potenciál se postupně na mnoha místech mění. To je zapříčiněno změnou hydrologických podmínek, zejména klesající hladinou v korytech řek. Díky tomu se využitelný hydroenergetický potenciál na některých lokalitách mohl teoreticky snížit až o 20 % využitelného potenciálu. (Moltlík, 2007)

Vzhledem k ekonomickému a investičnímu hledisku je zájem především o obnovu a o rekonstrukci v lokalitách, kde již dříve zařízení využívající vodní energii pracovalo. Zájem o výstavbu nových MVE je dosud nižší, ovšem využití MVE je i do budoucna smysluplné, vzhledem k velikosti dosud nevyužitého hydroenergetického potenciálu. Trend rozvoje MVE znázorňuje tabulka 1, z ní je patrný vzestupný trend výstavby MVE po roce 1990. Výrazným problémem je mimo jiné i to, že značný počet lokalit, které by mohly být efektivně využity, zasahují do chráněných krajinných oblastí. (Beranovský, 2004; Melichar, 1998)

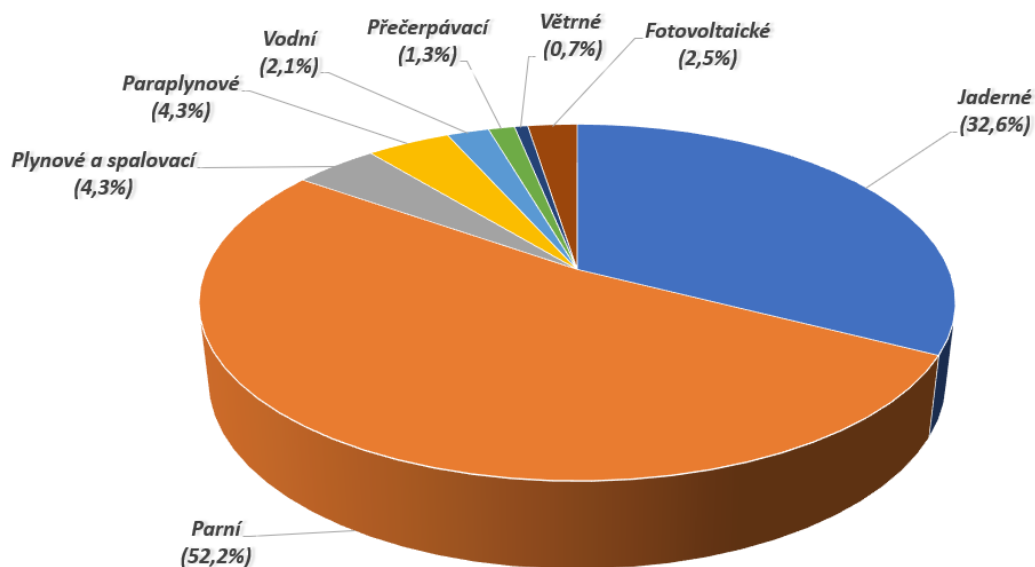
Tab. 1 Vývoj výstavby MVE v ČR, tabulka vlastní, data: (Beranovský, 2004)

Rok	Počet	Instalovaný výkon [MWh]	Roční výroba [MWh]
do 1930	11000	150	200 000
1950	135	10	30 000
1985	250	20	80 000
1990	900	65	170 000
1995	1200	200	500 000
2000	1352	268	660 000
2001	1380	275	710 000

3.1. Současný stav a budoucnost vodní energetiky

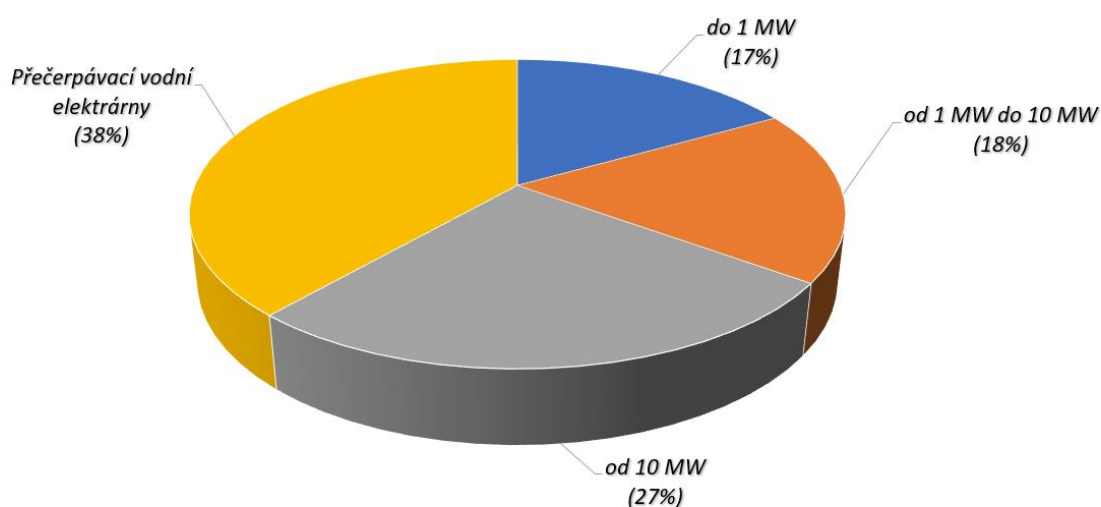
V současné době je vodní energie na území České republiky pouze doplňkovým, přesto velmi cenným zdrojem energie. Dle Energetického regulačního úřadu z roku 2017 se vodní elektrárny, společně s přečerpávacími vodními elektrárnami, podílely 3,4 % na celkové výrobě elektrické energie v ČR, viz obr. 2. Vodní elektrárny též výrazně přispívají ke stabilizaci energetické sítě v dobách energetických špiček.

Obr. 2 Výroba elektrické energie v ČR v roce 2017 data: (Roční zpráva o provozu ES ČR, 2018)



V současné době je možné nalézt na území České republiky velké množství malých vodních elektráren, s celou řadou odlišných konstrukčních řešení. Mezi energeticky nejvyužívanější řeky patří Vltava, především kvůli Vltavské kaskádě. Další významná díla jsou Dalešice na řece Jihlavě a Dlouhé stráně na Divoké Desné. Četné je pak využívání nízkopotenciální vodní energie v malých vodních elektrárnách. Na obr. 3 lze vidět využití vodní energie v roce 2017 k výrobě elektrické energie, anebo její akumulaci pomocí přečerpávacích vodních elektráren.

Obr. 3 Využití vodní energie v ČR v roce 2017 data: (Roční zpráva o provozu ES ČR, 2018)

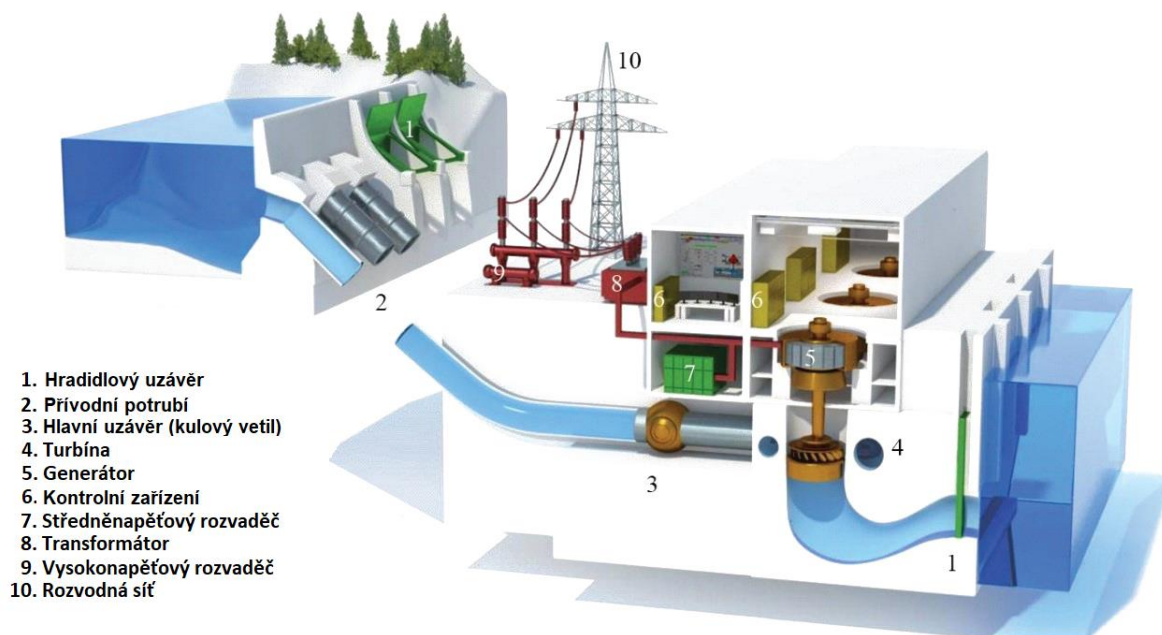


4. Vodní elektrárna

Existuje mnoho druhů vodních elektráren a lze je třídit podle několika hledisek, které se vzájemně prolínají. Princip, kterým je získávána elektrická energie, zůstává ovšem velmi podobný viz obr. 4. Rozdělení vodních elektráren podle (ČSN 75 0120, 2009)

- velké s instalovaným výkonem nad 200 MW
- střední s instalovaným výkonem od 10 MW do 200 MW
- malé s instalovaným výkonem do 10 MW

Obr. 4 Obecné schéma vodní elektrárny; (Typical Layout of a Hydro Power Plant, 2015) upraveno autorem



4.1. Malé vodní elektrárny

Mezi malé vodní elektrárny (MVE) řadíme elektrárny zpravidla takové, jejichž výkon nepřesahuje hodnotu 10 MW. Vyrobenou energii lze dodávat do rozvodové sítě, avšak také k průmyslovým účelům nebo k účelům osobním. Velmi často jsou malé vodní elektrárny, díky vlastnosti rychlého najeť, využívány jako záložní zdroje energie během energetických špiček. Narozdíl od velkých vodní elektráren, stavba MVE nezasahuje výrazně do krajiny. Je nutné však zmínit i podstatně nižší množství vyrobené elektrické energie oproti elektrárnám středním nebo velkým. Avšak ani malé vodní elektrárny se neobejdou bez základních úprav vodního toku a okolí.

4.2. Rozdělení MVE

Malé vodní elektrárny (MVE) se rozlišují podle mnoha různých faktorů, a proto bude pro účely této práce uvedeno pouze rozdělení dle instalovaného výkonu, velikosti využívaného spádu a pracovního režimu. Dále se MVE dělí podle: zapojení, umístění strojovny, uspořádání strojovny, řízení provozu, provozovatele. Každá realizovaná elektrárna je kombinací mnoha technických, výrobních řešení a stává se tak unikátem.

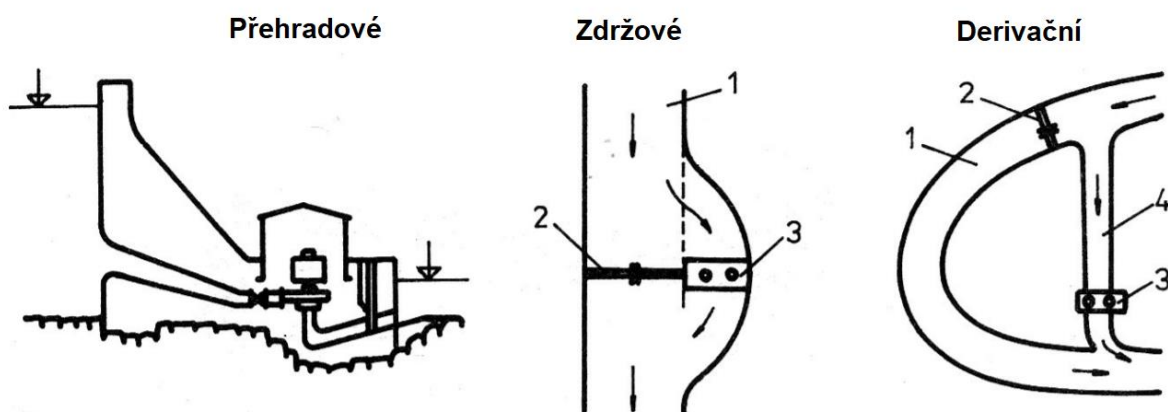
Dělení MVE podle instalovaného výkonu (ČSN 75 0120, 2009)

- domácí s instalovaným výkonem do 35 kW
- mikroelektrárny s instalovaným výkonem od 35 kW do 100 kW
- minielektrárny s instalovaným výkonem od 100 kW do 1000 kW
- průmyslové s instalovaným výkonem od 1 MW do 10 MW

Podle získaného spádu

- přehradové (spád vytvořen přehradou)
- zdržové (jezové, spád vytvořen jezem)
- derivační (využívá umělé vedení vody mimo vodní tok pomocí beztlakového nebo tlakového derivačního přivaděče (kanál, štola, potrubí))
- bez vzdouvací stavby (Melichar, 1998)

Obr. 5 Dělení podle spádu (Škorpil, 2000)

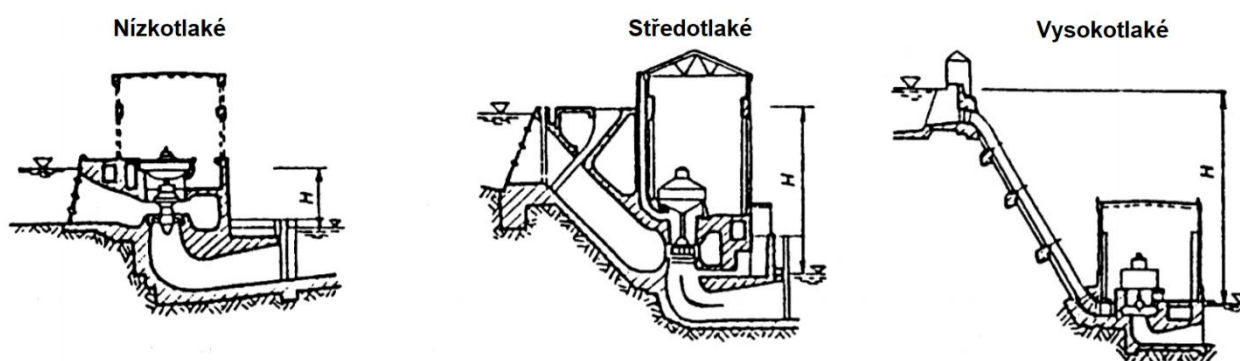


Podle velikosti využívaného spádu

Toto dělení je významné z hlediska použití vhodného typu vodního motoru (turbíny).

- nízkotlaké využívající spád do 20 m
- středotlaké využívající spád od 20 m do 100 m
- vysokotlaké využívající spád nad 100 m (Melichar, 1998)

Obr. 6 Dělení podle využívaného spádu; (Gabriel, 1998) upraveno autorem



4.3. Hlavní části malé vodní elektrárny

Vzdouvací zařízení

Zařízení sloužící k usměrnění vodního toku do přivaděče a vzduť vodní hladiny. Mezi tato zařízení patří přehradní hráze a jezy. Hráze se vyznačují obvykle větší výškou vzduť, větším objemem zadržené vody a plochou zaplavovaného území. Stavba nových hrází za účelem provozování malé vodní elektrárny bývá zpravidla ekologicky a ekonomicky neúnosná. Naopak opětovné využití starých hrází bývá ekonomicky velmi výhodné.

Jezy mívají oproti hrázím nižší výšku vzduť a podstatně menší objem zadržené vody. Náklady na jejich výstavbu rostou s jejich šířkou. U toků s větší šířkou je nutné využít speciální mechanizace, což navyšuje investice. U toků nížinných bývá nutnou podmínkou jez zachovalý z minulosti nebo jez nově postavený. (Mastný, 2011; Beranovský, 2004)

Přiváděcí zařízení

Přiváděcí zařízení (přivaděč) koncentruje spád do místa instalace vodní turbíny. Beztlakové přivaděče, kterými jsou náhony a přiváděcí kanály, se budují převážně výkopem v terénu. Náklady na výstavbu závisí na délce, příčné svažitosti terénu, typu zeminy a s tím související druh opevnění stěn koryta. Nejvýhodnější bývá oprava původního náhonu nebo také volba stejné trasy z důvodu snadnějšího získání a zaměření pozemku. Tlakové přivaděče jsou nejčastěji zhotoveny z ocelových trubek, případně ze železobetonu. Náklady na jejich výstavbu jsou vyšší než u přivaděčů beztlakových. Využívány jsou zejména u toků podhorských a horských. Z ekonomického hlediska bývají tlakové přivaděče výhodnější jen v případě velkého podélného spádu toku, proto bývají realizovány co nejkratší. Často dochází ke kombinaci obou typů přivaděčů s cílem dosažení maximálního spádu a minimálních nákladů. (Beranovský, 2004)

Česle

Zařízení sloužící k odstranění mechanických nečistot, které jsou unášeny vodou, a zamezení jejich vniknutí do sání vodní turbíny. Bývají zhotovené většinou jako mříž z ocelové pásoviny. Často se setkáme u MVE nejméně se dvěma typy česlí (hrubé, jemné), které se liší dle druhu a velikosti zachycovaných nečistot.

Vodní motor

Vodní motor neboli turbína je zařízení sloužící k přeměně vodní energie na mechanickou práci. Existuje celá řada konstrukcí vodních turbín. Je třeba podotknout, že každý typ má své specifické vlastnosti a je vhodný jen pro určité podmínky. Je tedy nutné před samotnou výstavbou pečlivě zhodnotit veškeré faktory v dané lokalitě, které mohou ovlivnit samotný výkon a chod turbíny. Mezi nejběžnější typy turbín patří: Kaplanova, Francisova, Bánkiho a Peltonova turbína. Ovšem v současné době je možné se shledat s alternativními typy vodních turbín jakými jsou například vírová turbína, VLT turbína, bezlopatková turbína, Archimédův šroub v turbínovém provozu a mnohé další typy, včetně čerpadel pracujících v turbínovém režimu.

Generátor

Zařízení přeměňující energii mechanickou z vodního motoru na energii elektrickou, která je následně transformována a distribuována do elektrické sítě. Ke generování elektrické energie je využito dynama (stejnoseměrný proud) nebo alternátoru (střídavý proud). Oba typy těchto generátorů zároveň mohou pracovat v režimu motoru, čehož se v praxi často využívá například u vírových turbín z důvodu primárního nasátí vody, nebo u některých typů přečerpávacích elektráren. V současné době je nejběžnějším typem generátoru alternátor, tedy zdroj střídavého proudu.

Jalový přepad

Prostor, ve kterém dochází k odtoku přebytečné vody před prostorem vodního motoru. Jedná se o ochranu vodní elektrárny před velkou vodou. Jalový přepad se významně podílí na udržení stálé velikosti spádu, a tak i na správném chodu vodních motorů. Slouží také jako uklidňující a usazovací prostor mezi tunelovým přivaděčem a vtokem do vodní elektrárny. Jalový přepad bývá umístěn na odkalovací jímce elektrárny a v mnoha případech je osazen odkalovacími stavidly. Tato stavidla umožňují celkové vypuštění odkalovací jímky a její následné vyčištění od usazenin.

Odpadní kanál

Odpadní kanály slouží k vracení vody do svého přirozeného koryta. V praxi je možné také nalézt případ, kdy MVE pracuje zároveň jako primární čištění vody. Pokud je MVE takto využívána, část vody prošlá turbínou je odváděna samostatným kanálem. Jelikož se jedná o vodu zbavenou hrubých nečistot, je odčerpávána pro další využití například do chladících věží tepelných elektráren, nebo k běžným účelům jako je užitková voda, např. pro zavlažování. Odpadní kanály bývají poměrně krátké, jejich náročnost výstavby a náklady jsou vůči ostatním částem elektrárny velmi malé. (Beranovský, 2004)

5. Vodní motory

5.1. Historie vodních motorů

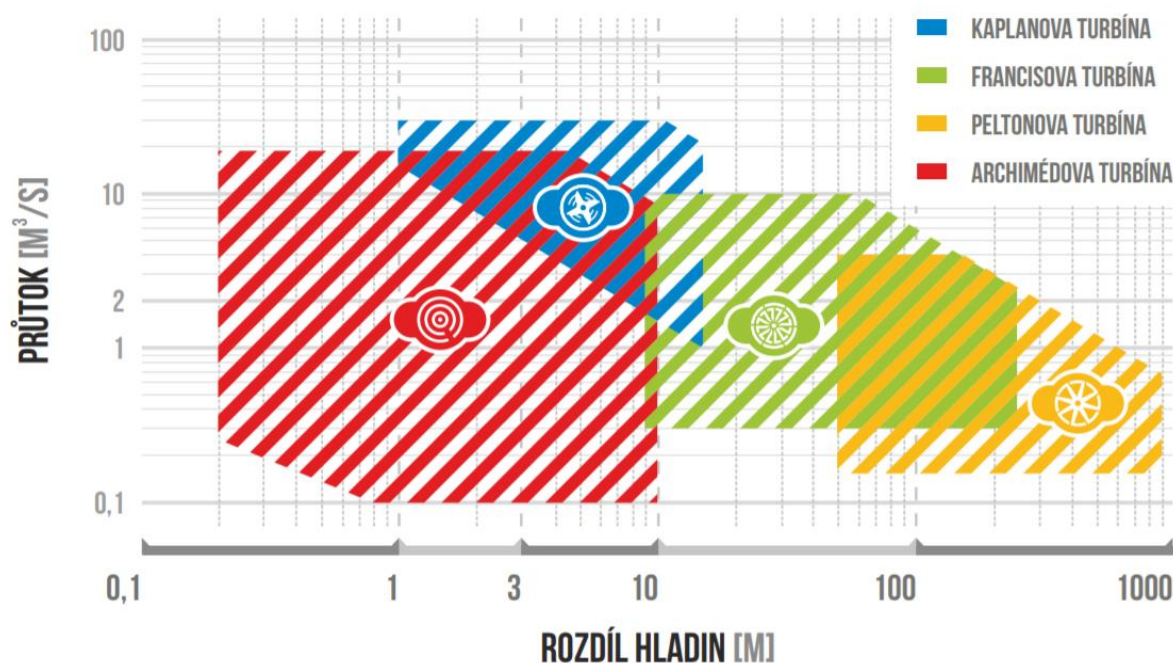
Vývoj vodních motorů je možné pozorovat déle než dva tisíce let. Již ve 2. století před naším letopočtem jsou v Ilýrii poprvé konstruována vodní kola s vertikální hřídelí pro pohon mlýnských kamenů. Jde tak o první použití přírodní síly. Lepší způsob využívání vodního kola s horizontální osou a přenosem otáčení na vertikálně uspořádané mlýnské kameny pochází z 1. století a je spojováno se jménem římského stavitele Virtuvia Pollia. Ovšem s úpadkem moci Říma se vodní energie začíná v širší míře využívat k ulehčení lidské práce. Vodní kolo tak neslouží pouze k mletí obilí, ale obecně jako energetický stroj k mnoha účelům. Již v roce 1046 byla na Jadranu využívána vodní kola poháněná přílivem a odlivem. Ve 14. století se objevují takzvané korečníky, tj. vodní kola s vrchním nátokem, která měla oproti ostatním vodním kolům vyšší účinnost. V 16. století se používala kola o průměru až 12 m a výkonu až 7,5 kW. Přenos této síly byl nejčastěji realizován za pomoci řetězových transmisí a na delší vzdálenosti pomocí pákových mechanismů. V 17. století se kromě klasických vodních kol používají i vodní kola využívající dynamický účinek vodního paprsku, což lze pokládat za určitou před-etapu vývoje rovnotlakých turbín.

Teprve v 18. století je empirie při realizaci vodních kol podložena teoretickým a experimentálním zkoumáním. Konec tohoto století tak jistě představuje vyvrcholení vývoje vodního kola, a zároveň se objevují nová řešení vodních motorů pracujících na reakčním principu, vedoucí k vývoji vodních turbín. Teprve v roce 1826 navrhuje prof. Claude Burdin řešení vodního motoru, nazvaného jako „turbines“ (víry tvořící), který se stal skutečným předobrazem současných přetlakových turbín. Po roce 1840 začalo vznikat mnoho vynálezů, jak lépe využít vodní energii, které směřovaly ke zlepšení účinnosti, zvětšení rozmezí provozních parametrů a zdokonalení regulace při současném zlepšování technologičnosti vodních motorů. (Bednář, 1989)

5.2. Princip činnosti

Vodní motory neboli turbíny provozované ve vodních elektrárnách jsou rotační hydraulické stroje. Princip činnosti vodního motoru spočívá v přeměně tlakové a kinetické energie na mechanickou práci. Voda protékající přes lopatky roztáčí turbínu, která je spojena s hřídelem. Hřídel turbíny je spojen s rotorem generátoru, který mění mechanickou energii na energii elektrickou. V přečerpávacích vodních elektrárnách se často setkáme s turbínou, čerpadlem, nebo reverzibilní turbínou. Turbína je zařízení konstruované pro maximální využití energie vody a k přeměně této energie na mechanickou práci. Naopak u čerpadla dochází k přeměně mechanické práce čerpadla na energii kinetickou a polohovou, která je dodávána vodě. U reverzibilní turbíny se jedná o konstrukci, která je schopna nejen získávat mechanickou práci z energie vody, ale také dodávat tuto energii zpět. Toto využití je možné díky generátorům, které mohou zároveň pracovat v režimu motoru. Samotný typ turbín, jejich počet a velikost, které lze do vodní elektrárny instalovat, se odvíjí především od podmínek lokality a dalších požadavků. Vhodný typ turbíny pro danou lokalitu lze určit např. pomocí diagramu na obr. 7. Vícestrojové uspořádání dává možnost lepšího využití vodního toku a je typické pro střední a velké vodní elektrárny. Pro malé vodní elektrárny je častější použití pouze jednoho soustrojí. Ve středních a velkých vodních elektrárnách se volí minimálně dvě stejná nebo různě veliká soustrojí. (Škorpil, 2000; Melichar, 2013)

Obr. 7 Rozsah funkčnosti turbín v závislosti na průtoku a spádu (Mavel a.s., 2015)

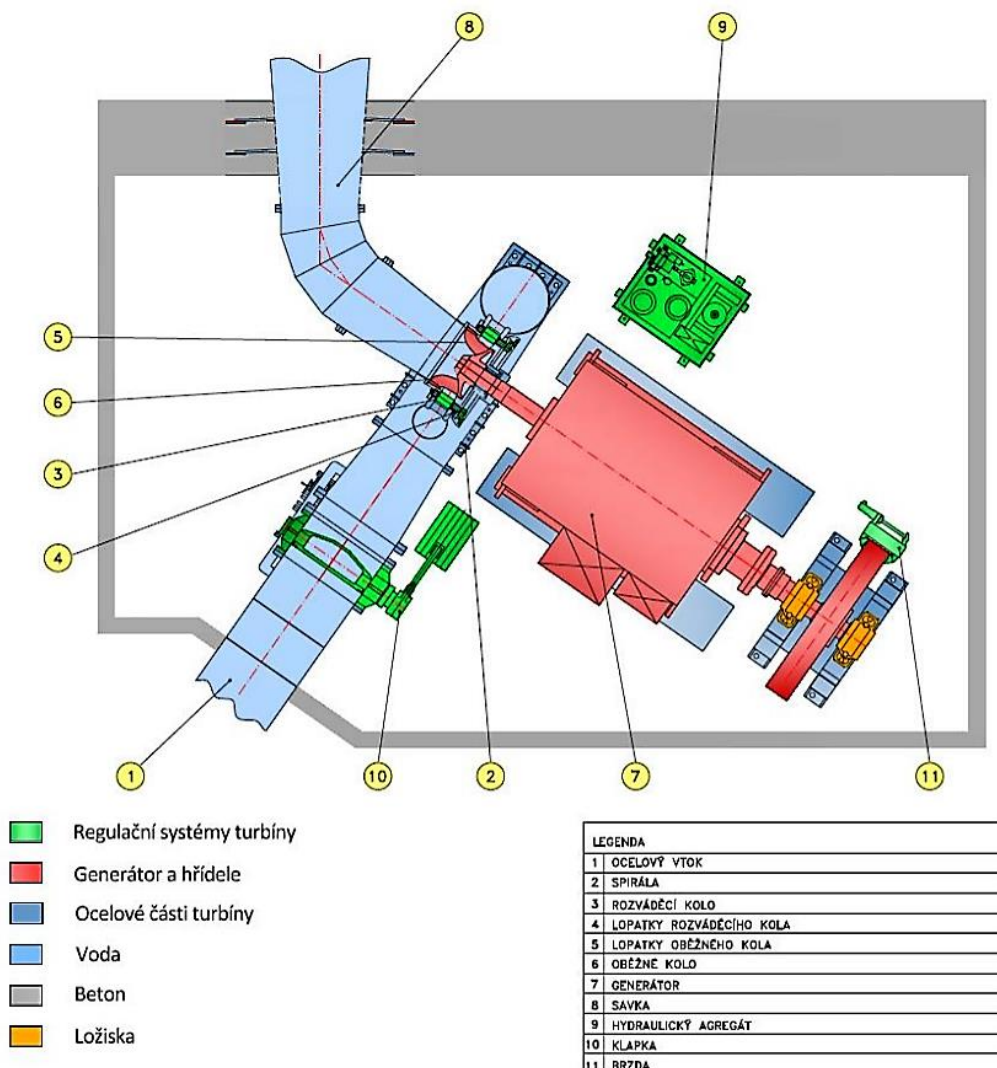


5.3. Současné typy vodních motorů

5.3.1. Francisova turbína

Francisova turbína je nejdéle používaným typem moderních turbín. Původcem řešení je J. B. Francis (1849). Jedná se o turbínu přetlakovou radiálně – axiální. Její oběžné kolo je pevné a lopatky jsou spojeny s věncem a kotoučem kola. Jako regulační orgán slouží rozvaděč s natáčivými rozváděcími lopatkami, které byly navrženy v roce 1868 J. Finkem. Lopatky jsou ovládány regulátorem, jehož prostřednictvím lze regulovat nebo zcela uzavřít přívod vody na oběžné kolo. Uspořádání je horizontální nebo vertikální. Přívod vody bývá nejčastěji řešen spirální skříní, či kotlem nebo u menších výkonů pomocí kašny. Výstup vody z oběžného kola zajišťuje sací potrubí. Francisovy turbíny lze také použít jako stroje reverzibilní (čerpadlové turbíny). Příklad jednoho z konstrukčních řešení vidíme na obrázku 8. (Škorpil, 2000)

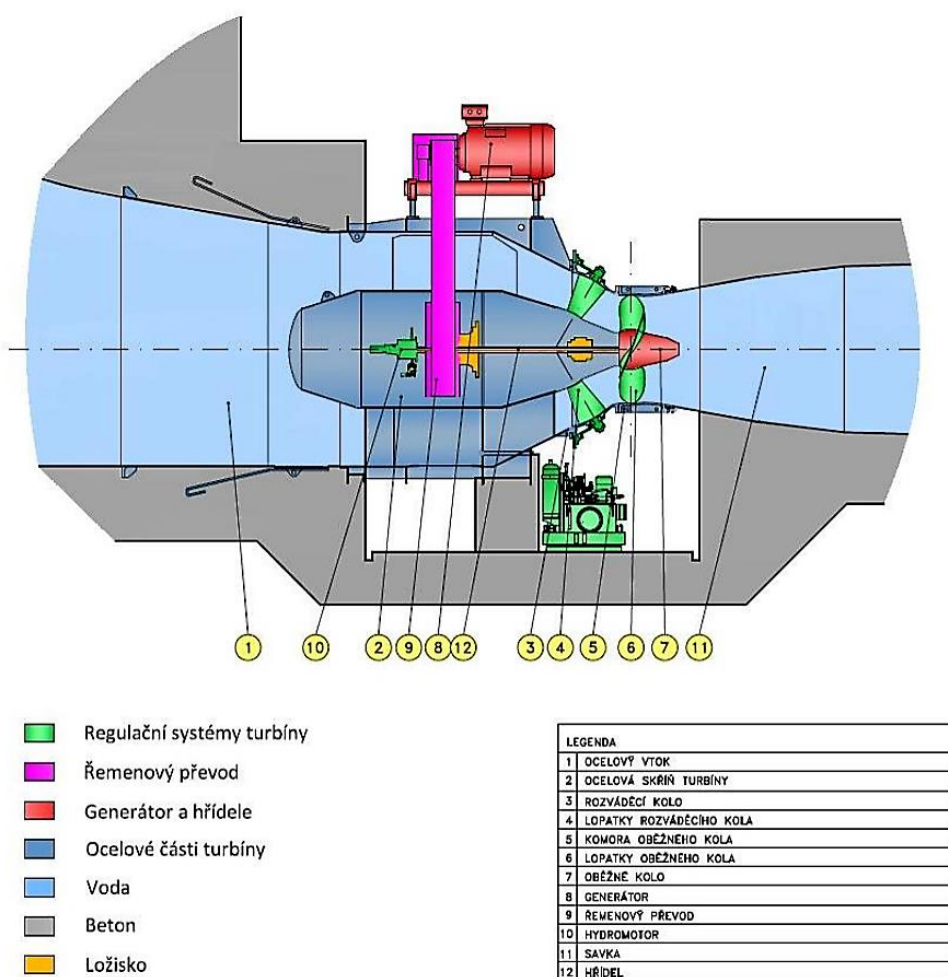
Obr. 8 Francisova turbína (Mavel a.s., 2015); upraveno autorem



5.3.2. Kaplanova turbína

Kaplanova turbína je přetlaková axiální turbína, která vznikla z požadavku na zdokonalení Francisových turbín pracujících na nízkých a kolísajících spádech. Její vylepšení spočívá v tom, že se současně s regulací turbíny natáčejí rozváděcí i oběžné lopatky. Díky tomu lze dosáhnout vysoké účinnosti v širokém rozmezí průtokových poměrů. Kaplanova turbína je konstrukčně náročnější než turbína Francisova. Oběžné kolo u Kaplanovy turbíny má lopatky řešeny tak, že prostřednictvím čepů jsou otočně upevněny na náboji konce hřídele. Osa čepů lopatky s osou náboje svírá úhel 90° . V náboji je umístěno zařízení pro natáčení lopatek poháněné hydraulicky, u menších strojů je možné se setkat i s mechanickým řešením (šroubový převod). Uspořádání bývá u větších strojů vertikální, u menších horizontální nebo se šikmou osou, což je výhodou pro stavební uspořádání. Příklad jednoho z mnoha možných konstrukčních řešení vidíme na obr. 9. (Škorpil, 2000)

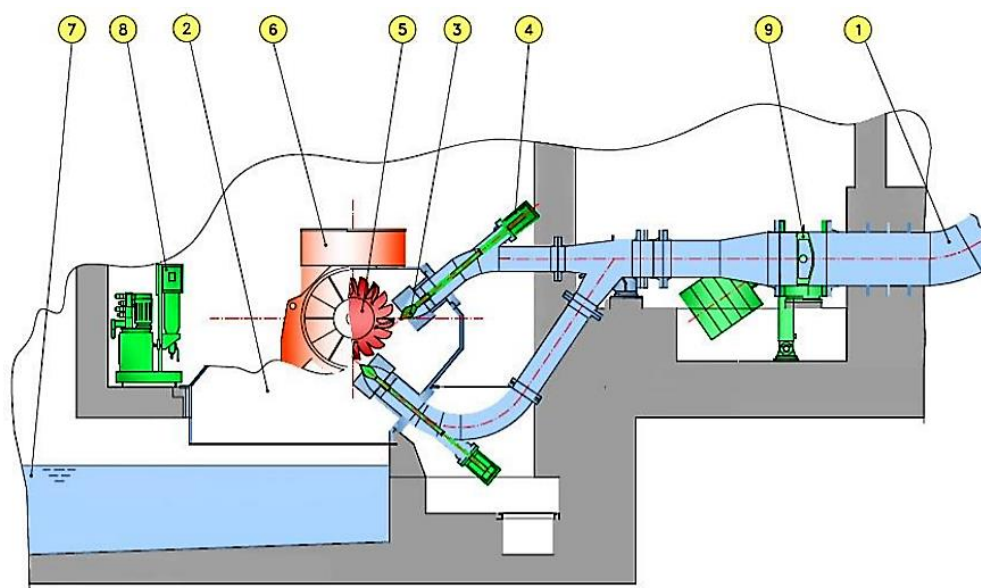
Obr. 9 Kaplanova přímotoká turbína (Mavel a.s., 2015); upraveno autorem



5.3.3. Peltonova turbína

Peltonova turbína (viz obr. 10) a její konstrukční řešení pochází z roku 1880. Jedná se o turbínu rovnotlakou, která má tangenciální vstup do vody na oběžné kolo prostřednictvím jedné nebo více dýz. V těchto dýzách dochází k přeměně tlakové energie vody na kinetickou energii vodního paprsku. Tento paprsek o vysoké rychlosti naráží na oběžné lopatky ve tvaru korečku s dělicím břitem. Z oběžného kola je paprsek vody odváděn do odpadního kanálu. Regulace výkonu se provádí zavíráním nebo otevíráním otvoru dýzy pohybem regulační jehly. Při potřebě rychlého odstavení turbíny lze využít možnost odklonu vodního paprsku (deviátor) nebo odřezávání vodního paprsku (deflektor) současně s pohybem regulační jehly. Nejčastější bývá horizontální uspořádání turbíny. Peltonova turbína je ovšem efektivně využitelná pouze u lokalit s vysokým spádem, z důvodu potřebného tlaku před dýzou. Těchto lokalit v ČR není mnoho, a proto v našich podmínkách není příliš rozšířena. (Škorpil, 2000)

Obr. 10 Peltonova turbína (Mavel a.s., 2015); upraveno autorem



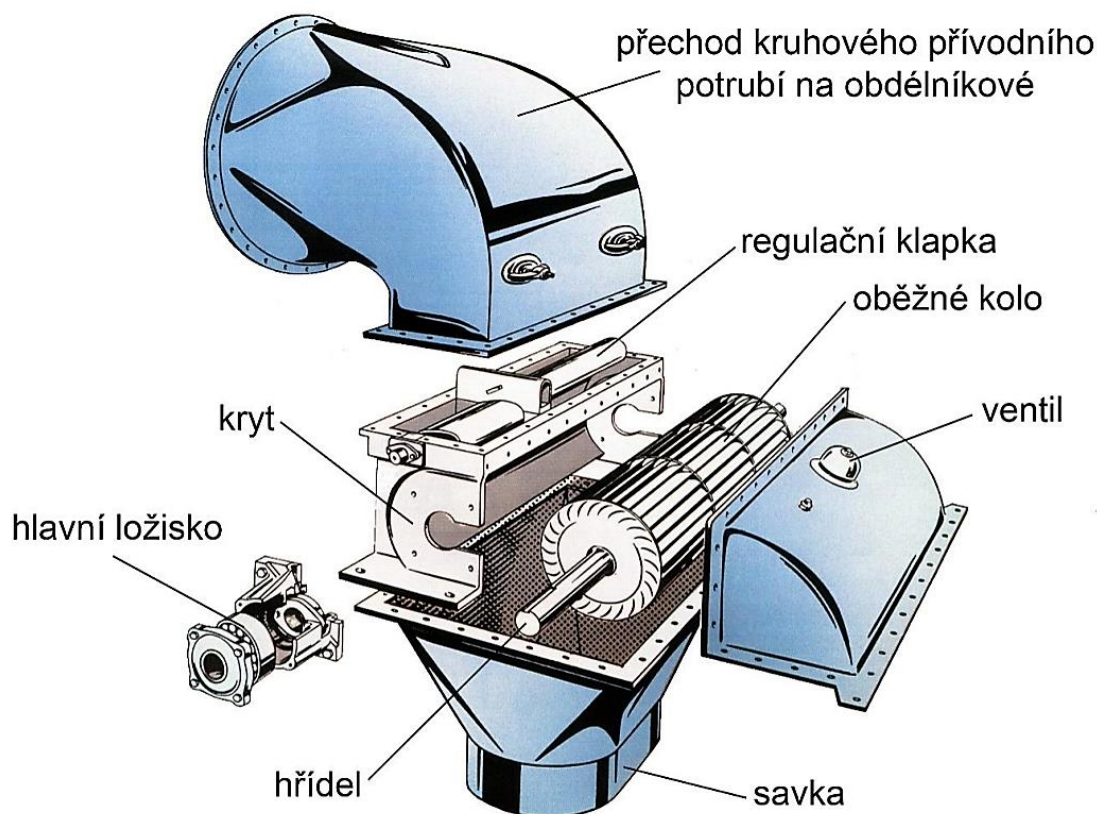
- Regulační systémy turbíny
- Generátor a hřídele
- Ocelové části turbíny
- Voda
- Beton

LEGENDA	
1	OCELOVÝ VŤOK
2	SKŘÍŇ TURBÍNY
3	DÝZA
4	OVLÁDÁNÍ DÝZY
5	OBĚŽNE KOLO
6	GENERÁTOR
7	ODPADNÍ KANÁL
8	HYDRAULICKÝ AGREGÁT
9	KLAPKA

5.3.4. Bánkiho turbína

Bánkiho turbína, viz obr. 11 je specifickým typem rovnotlakých turbín. Konstrukční řešení pochází z roku 1903 od australského inženýra A. G. M. Mitchela. V letech 1912 až 1919 pak vypracoval teorii řešení prof. Bánki z Maďarska. Bánkiho turbína je řešena tak, že oběžné kolo s horizontální osou má pevné lopatky vytvořené z kruhově prohnutých desek. Tyto desky jsou odděleny paralelními kotouči. Průtok vody oběžným kolem je dvojnásobný. Nejprve ze vstupního tělesa přes oběžné lopatky do středu oběžného kola, a poté znovu přes oběžné lopatky do výstupní části turbíny. Jedná se tedy o dvojnásobný průtok oběžným kolem. Oba průtoky jsou pro teoretické řešení brány jako rovnotlaké. K regulaci dochází pomocí klapky nebo segmentu na vtokovém tělese. Někteří výrobci používají pro lepší využití spádu na výstupu savku, ve které ovšem proudí směs vody a vzduchu. (Škorpil, 2000)

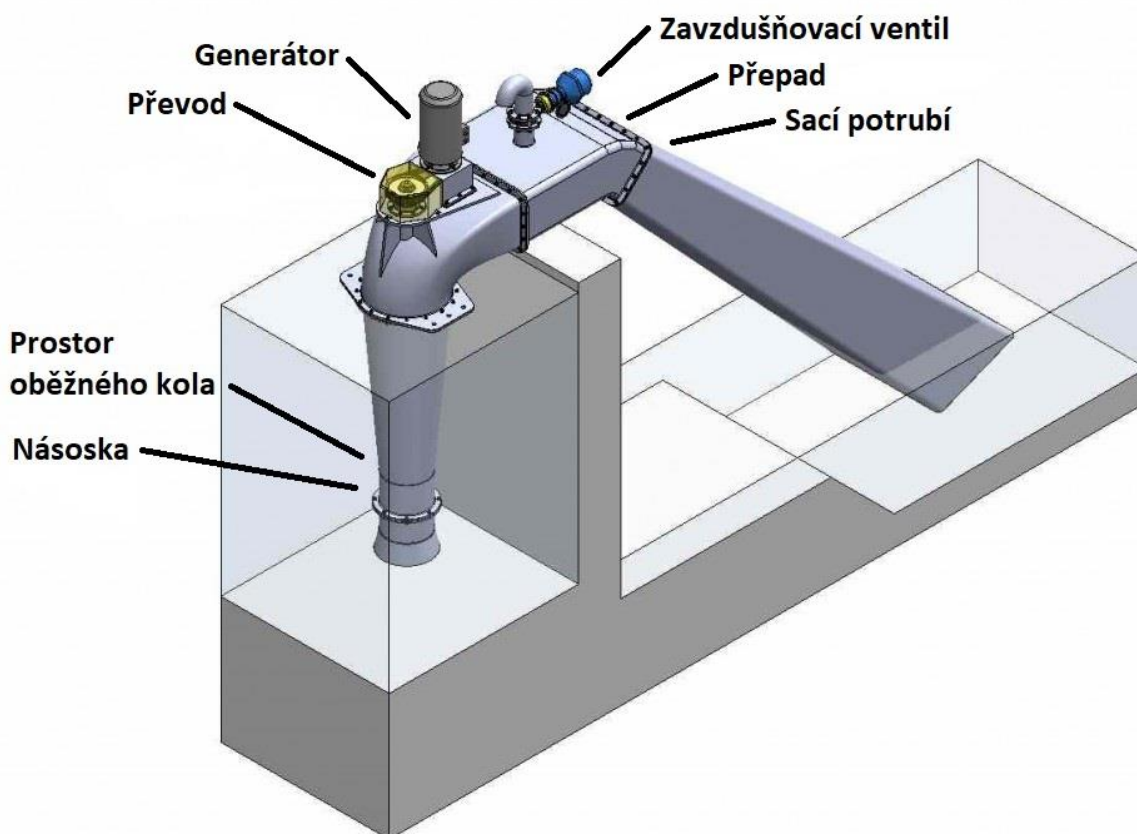
Obr. 11 Bánkiho turbína (Ossberger turbine, 2001)



5.3.5. Vírová turbína

Vírová turbína, viz obr. 12, v současné době nepatří mezi běžně užívané turbíny. Patentována byla v roce 2002 prof. Ing. Františkem Pochylým, CSc., Ing. Miloslavem Haluzou CSc. a kolektivem. Turbína byla vyvinuta především pro potřeby provozovatelů malých vodních elektráren. Míst pro jejich instalaci je ovšem mnoho, například rekonstrukce starých malých vodních elektráren, jezy nebo náhony starých mlýnů. Podstatou vynálezu je jednoduchá konstrukce, která umožňuje výrazné snížení výrobních nákladů, snížení nároků na obsluhu a vysokou účinnost. Realizace a vývoj vírových turbín je doposud ryze českou záležitostí. Tato kapitola slouží jako úvod do problematiky vírových turbín, kterou se bude tato práce v následujících kapitolách zabývat. Z tohoto důvodu je rozšířena o popis různých typů konstrukčních řešení, které byly v současné době realizovány.

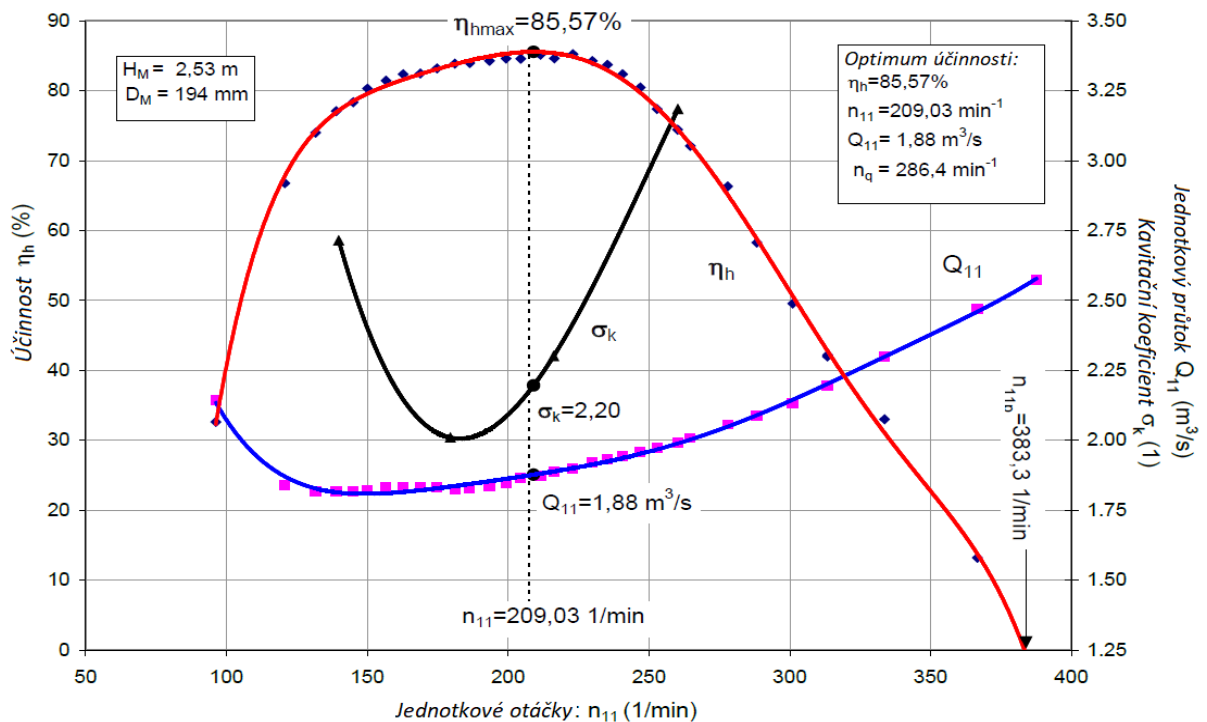
Obr. 12 Vírová turbína; (Energie 21, 2016)



Základní princip vírové turbíny je opačný než u turbíny Kaplanovy. Kaplanova turbína používá na vstupu rozváděcí lopatky, které udělí proudu vody rotaci. Naopak vírová turbína nepoužívá rozváděcí kolo, proud vstupuje axiálně a po průchodu lopatkami vírové turbíny vychází rotující proud vody. Na středovém náboji turbíny jsou umístěny minimálně dvě oběžné lopatky tvaru zborčené šroubové plochy. Maximální rozdíl mezi vstupním a výstupním úhlem lopatky je menší než 25. Specifický tvar lopatek umožňuje rychloběžný provoz turbíny. Vzhledem k rychloběžnosti oběžného kola je možné přímé napojení rotoru generátoru na hřídel turbíny bez nutnosti použití převodovky. Tato turbína je určena pro nízké a extrémně nízké spády 1 až 5 m při relativně vysokém průtoku. Při uvedených spádech je hydraulická účinnost Kaplanovy turbíny kolem 70 %. U vírové turbíny byla dosažena účinnost 85 %. Navržena je tak, aby zajistila velice plochou charakteristiku účinností pro široký rozsah otáček a průtoků kapalin viz obr. 13. Měrné (specifické) otáčky oběžného kola se pohybují v rozmezí 950 až 1150 $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$. Kapalina vstupuje do oběžného kola axiálně, z tohoto důvodu není nutné, aby turbína byla vybavena rozváděcími lopatkami. Tento fakt výrazně zjednodušuje a zlevňuje její výrobu. Turbínu lze realizovat v mnoha variantách uspořádání: přímoproudá, násosková a další, jako například varianta s prstencovým motorem, s diskovým motorem. (Vírová turbína, 2000; IOPscience, 2012)

Obr. 13 Charakteristika účinnosti vírové turbíny

(Jednotkové otáčky n_{11} a jednotkový průtok Q_{11} vysvětleny na str. 21.)



$$n_{11} = \frac{n \cdot D}{\sqrt{H}}; Q_{11} = \frac{Q}{D^2 \cdot \sqrt{H}} \quad (1;2)$$

Aby bylo možné porovnat parametry vodních turbín různých rozměrů a provedení pracujících za různých podmínek, je nutné zavést jednotkové veličiny. Využijeme tedy přepočtové vztahy vzhledem k hydraulickému stroji, který pracuje při spádu $H = 1$ m a průměr jeho oběžného kola činí $D = 1$ m.

D – průměr oběžného kola [m]

H – spád na turbínu [m]

n – otáčky turbíny [min^{-1}]

Q – průtok turbínou [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

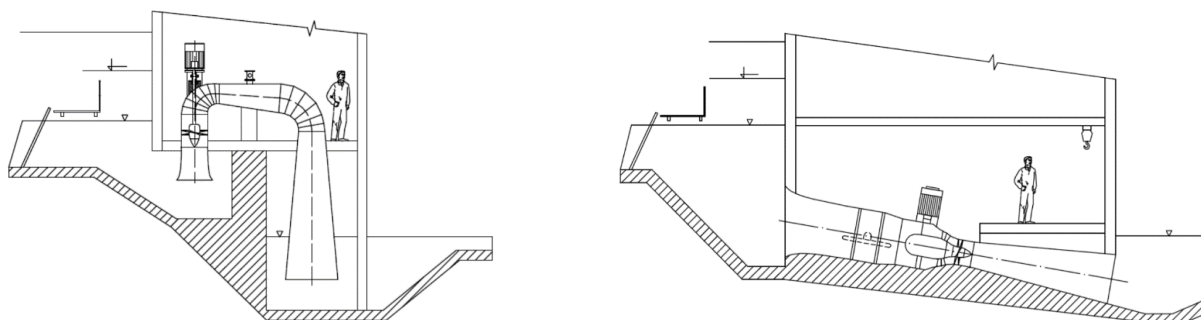
Násosková varianta

V případě násoskového provedení lze turbínu instalovat bez složitých úprav jezů. Tato konfigurace je charakteristická spojením horní a dolní hladiny toku. Do horní hladiny nádrže je přivedeno ústí potrubí, které vede vzhůru ke hraně nádrže. Mezi hranou nádrže a ústím potrubí je umístěno oběžné kolo, které je spojeno hřídelí s generátorem. Přes hranu nádrže potrubí přechází k dolní hladině, kde je výtokový systém umístěn pod hladinou. Rozběh soustrojí zajišťuje motorický režim generátoru (vytvoření sacího efektu turbíny). Rozběh turbíny se odvíjí od její velikosti a trvá přibližně 30 sekund. Tato varianta nevyžaduje téměř žádné stavební úpravy na stávajících hrázích a je vhodná pro toky se stabilním průtokem.

Přímoproudá varianta

Tento typ konfigurace je taktéž vhodný pro nízké spády. Voda je hnána od horní hladiny potrubím instalovaným skrze hráz, ve které je umístěna strojovna s turbínou, generátorem a ostatním elektrotechnickým zařízením. Odpadní voda je odváděna skrze hráz do úrovně dolní hladiny toku. Přímoproudá varianta vyžaduje více prostoru a výrazně složitější stavební úpravy.

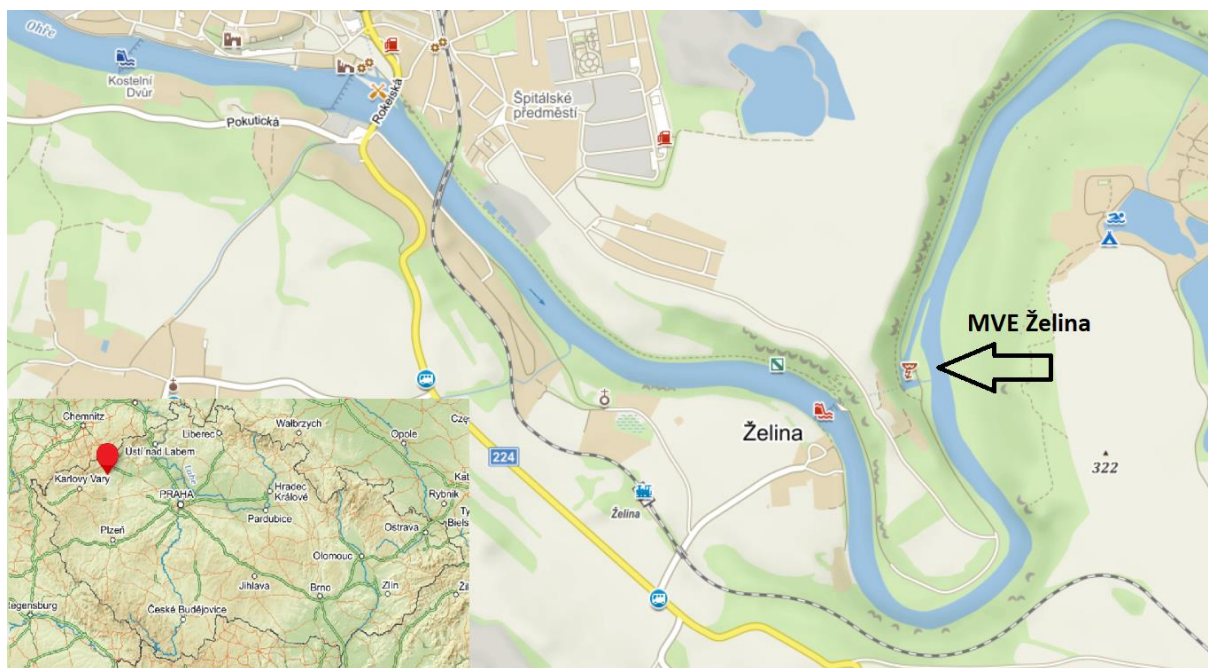
Obr. 14 Vírová turbína násosková (vlevo), přímoproudá (vpravo); (Vosáhlo, 2013)



6. Malá vodní elektrárna Želina

Malá vodní elektrárna Želina je zrekonstruovaná moderní elektrárna v severozápadních Čechách na řece Ohři, nedaleko města Kadaně viz obr. 14 využívající čtyři Francisovy turbíny. V současné době je jejím provozovatelem společnost ČEZ, která distribuuje vyrobenou elektrickou energii do veřejné rozvodové sítě. Tato MVE zároveň slouží jako primární čištění vody pro elektrárnu Tušimice, která tuto vodu využívá jako chladicí médium. Jedná se o vodní elektrárnu využívající nízký spád 4,5 m. Přivaděčem je možné přivádět až $23,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}$. V roce 2016 došlo k instalaci dvou nových vírových turbín, které ovšem využívají spád nižší než turbíny Francisovy, a to 2,05 m. Původní elektrárna každoročně vyrobila okolo 1,679 GWh elektřiny, v současné době je možné díky vírovým turbínám vyrobit dalších 200 MWh. Množství vyrobené energie je významně ovlivněno přírodními vlivy, přičemž je nutné zajistit stálou dodávku vody pro elektrárnu Tušimice.

Obr. 15 Umístění MVE Želina (Mapy.cz, 2019); upraveno autorem



6.1. Historie MVE Želina

Malá vodní elektrárna Želina byla vybudována městem Kadaň a zprovozněna dne 6. dubna 1908. Uvnitř se nacházely dvě kašny, v nichž byly umístěny dvojité horizontální Francisovy vodní turbíny, každá s výkonem 294 kW. Voda k samotným turbínám byla přiváděna pomocí 166 metrů dlouhého tunelu od Želinského jezu. Ovšem velmi brzy tato elektrárna nedokázala uspokojit vzrůstající požadavky města Kadaň a okolních obcí na odběr elektrické energie. Ačkoliv elektrárna každoročně přinášela slušný zisk, brzy se začalo uvažovat o vybudování nové vodní elektrárny v nedalekých Lomazicích. Ke zprovoznění této nové a mnohem výkonnější elektrárny došlo v roce 1925. Želinská elektrárna tak přestala sloužit svému účelu a stala se jen jakýmsi čistícím a vstupním objektem pro Lomazickou elektrárnu. K nové elektrárně vedl od MVE Želina vodní kanál dlouhý 7 kilometrů. Lomazická elektrárna již v současné době neexistuje, jelikož musela v roce 1965 ustoupit stavbě Nechranické přehrady.

Malá vodní elektrárna na Želině mezitím rychle chátrala, jelikož bylo veškeré její technické vybavení, i samotná stavba, ponecháno vlastnímu osudu. K jejímu znovuzrození došlo v roce 1991, kdy bylo rozhodnuto o jejím obnovení. Znovuzprovoznění nebylo snadné z důvodu rekonstrukce nejen celé vodní elektrárny, ale také z rekonstrukce jezu Želina. Do opětovného provozu se tak dostala v roce 1995. Obě původní dvojité Francisovy turbíny musely být zrepasovány. Celkové náklady vynaložené na stavbu nového jezu, jezové klapky, stavidel na vtok do kanálu a rekonstrukci vlastní elektrárny, včetně jejího vybavení, činily přibližně 55 milionů korun. Původně městskou elektrárnu vlastnily Severočeské rozvodné závody Děčín, zanedlouho poté Elektrárny SSM Tušimice a následně opět město Kadaň. Malá vodní elektrárna Želina byla nakonec městem svěřena do trvalého užívání Elektrárnám Tušimice. Skupina ČEZ je tak v dnešní době vlastníkem jedné z technicko-historických památek na vodních tocích v Česku. (Vodní elektrárna Želina, 2012)

6.2. Hlavní části MVE Želina

6.2.1. Vzdouvací zařízení

Vzdouvacím zařízením pro MVE Želina je jez ležící na 123. kilometru řeky Ohře viz obr. 16. Jez byl v roce 1991 kompletně zrekonstruován, včetně jezové klapky a stavidel na vtoku. Tato rekonstrukce probíhala současně s rozsáhlou rekonstrukcí stavby vodní elektrárny Želina. Propust jezu je možné nalézt na levém břehu řeky. Součástí náhonu jsou také stavidla, která umožňují celkové uzavření prostoru vtokové části kanálu. V současné době jsou stavidla na vtoku, společně s jezovou klapkou plně automatizována a kontrolována v řídicí místnosti sloužícím pracovníkem. Za hrubými česlemi u vtokové části lze nalézt zařízení určené k plašení ryb. Toto zařízení je založeno na principu vysílání elektrických impulzů, pomocí vodičů ponořených do vody, a brání tak rybám vplout přes přiváděcí zařízení až k jemným česlům. Prostor vodního jezu a náhonu je neustále monitorován kamerovým systémem, který je umístěn na jedné z železobetonových částí jezové klapky.

Obr. 16 Vzdouvací zařízení pro MVE Želina; vlastní zdroj



6.2.2. Přiváděcí zařízení

Jako přiváděcí zařízení vody byl v roce 1908 vybudován kanál dlouhý 166 m. Tento kanál byl uměle vyhlouben ve skalním masivu a zpevněn betonovou vložkou o vnitřních rozměrech 4,3 m šíře a výškou 3,6 m. Právě díky tomuto kanálu je možné využít spádu řeky Ohře (necelých 5 m) v místě nejužší části Želinského meandru, který je v samotném korytu řeky dlouhý přibližně 1,5 km. Před vtokem do kanálu (viz obr. 17) se nacházejí stavidla umožňující regulaci množství vody přitékající do odkalovací jímky před vodní elektrárnou. Tato stavidla jsou řízena nejen v závislosti na množství potřebné vody pro efektivní využití 4 turbín nacházejících se v malé vodní elektrárně, ale také k zajištění dodávky vody pro elektrárnu Tušimice.

Obr. 17 Vtok MVE Želina; vlastní zdroj



6.2.3. Česle

Malá vodní elektrárna Želina je opatřena třemi česly. První česle nalezneme na začátku přiváděcího zařízení, tedy v místě, kde dochází ke vtoku surové vody do přiváděcího kanálu. Tyto česle jsou hrubé a jsou vyrobeny z kolejnic, které jsou svařeny s rámem. Jejich úkolem je zajistit, aby se do přiváděcího kanálu nedostaly nečistoty velkých rozměrů, jakými mohou být například kusy dřeva nebo nejrůznější druhy odpadů. Tyto česle nejsou opatřeny žádným automatickým čistícím systémem. Jejich čištění je tedy možné pouze manuálně. Druhé, jemné Česle se nacházejí již za odkalovací jímkou, jejichž funkcí je zabránit vstupu nečistot k samotné turbíně. Mezi nejčastější typy nečistot zachycených v těchto česlích bývají různé druhy plastů, větve a listí. Tyto česle jsou opatřeny mechanickým čištěním, které je spouštěno vždy v případě nadměrného znečištění česlí. Nejproblematictější období na znečištění vody je zpravidla podzim a jaro, kdy dochází ke zdvihnutí vodní hladiny a ta s sebou unáší mnoho hrubých nečistot a kalu. Poslední česle se nacházejí před vstupem do Lomazického kanálu. Voda, která je přiváděna do tohoto kanálu, je zčásti přečištěna díky sání vírových turbín. Ovšem v případě, kdy je nutné přivádět větší množství vody, než protéká skrz vírové turbíny, dojde k pootevření automatického stavidla pro tento kanál. Zdrojem je voda v odkalovací jímce – voda je vyčištěna pouze hrubými česly, a proto musí dojít k jejímu přečištění před vstupem do Lomazického kanálu viz obr. 18.

Obr. 18 Jemné česle Lomazického kanálu; vlastní zdroj



6.2.4. Strojovna

Strojovnu malé vodní elektrárny Želina je možné nalézt ve spodní části budovy. Tento prostor je navržen tak, aby nedošlo ke vniknutí vody do těchto míst při vylití řeky z jejího přirozeného koryta. Hlavní část strojovny je tvořena dvěma generátory značky Siemens viz obr. 19. Tyto generátory jsou osmipólové asynchronní motory s kotvou nakrátko o výkonu 315 kW, jmenovité otáčky motoru jsou 741 min^{-1} . Generátory jsou spojeny s oběma turbínami moderní jednostupňovou převodovkou SEW-EURODRIVE M1PSF90 s čelním šikmým ozubením. Tyto převodovky zvyšují otáčky turbínového hřídele ze 130 min^{-1} na otáčky generátoru 757 min^{-1} . Hřídel turbíny je provedena jako výkovek o celkové délce 5970 mm a jmenovitém průměru 246 mm. Vodním motorem jsou dvojité Francisovy turbíny (výrobce J. M. Voith, Heidenheim 1901), které byly poprvé uvedeny do provozu v roce 1908. Obě turbíny jsou opatřeny 16 oběžnými lopatkami které jsou opracované a čistě hlazené. Průměr oběžných kol turbín je 1050 mm. Hltnost se pohybuje v rozmezí od $3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ do $8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Renovace těchto turbín provedla v roce 1992 firma WKA Brno a Dragon Praha. Díky této renovaci došlo nejen ke zvýšení hltnosti těchto turbín, ale také ke zvýšení jejich účinnosti. Jmenovitý výkon generátoru je 315 kW, avšak toho výkonu zpravidla nebývá dosaženo – a to vlivem nedostatečného průtoku a měnícímu se spádu díky napouštění a vypouštění Nechranické přehrady. Těmto faktorům budou věnovány následující kapitoly této práce. Maximální dosažitelný výkon je tedy 250 kW.

Obr. 19 Strojovna s generátory značky Siemens; vlastní zdroj



6.2.5. Vírové turbíny

Malá vodní elektrárna Želina je, kromě dvou kašnových Francisových turbín, osazena od roku 2016 dalším typem turbín. Jedná se o vertikální násoskové vírové turbíny viz obr. 20, které využívají do té doby nevyužitý potenciál vody na jalové propusti pro Lomazický kanál dlouhý přibližně 2 km. Tyto turbíny byly realizovány díky týmu pana prof. Ing. Fr. Pochylého, Csc. a společnosti ČEZ, která na tento projekt přispěla částkou necelých 3 milionů korun. Vývoj a samotná realizace pro MVE Želina trvaly 4 roky. Turbíny byly navrženy pro plně automatický provoz s občasným dohledem a kontrolou. Jejich provoz je řízen podle momentálního průtoku vody na řece Ohři. Při nedostatku vody dojde k odstavení jedné ze dvou vírových turbín. Je nutné zajistit, aby přes jednu z turbín proudilo alespoň minimální množství vody do Lomazického kanálu pro elektrárnu Tušimice. Během normálního provozu jsou turbíny řízeny systémem, který kontroluje nejen samotný chod turbíny, ale také její případné poruchy. V případě výpadku elektrické energie v síti nebo při poruše, dojde k okamžitému odstavení turbíny prostřednictvím zavzdušňovacích ventilů. Současně dochází k automatickému otevření stavidla pro přívod vody do Lomazického kanálu, čímž je zajištěn požadovaný průtok pro elektrárnu Tušimice.

Obr. 20 Vírové turbíny MVE Želina; vlastní zdroj



Každá z turbín o účinnosti 85 % je navržena na průtok $1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a její pracovní spád je od 2,05 m až 2,2 m. Průměr oběžného kola činí 620 mm a dosahuje jmenovitých otáček $505 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ v nezátíženém stavu až $970 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$. Maximální výkon turbíny je 13,7 kW. Po instalaci dosahovala turbína vyšších hodnot, a proto bylo nutné spád uměle snížit, aby nedošlo k poškození turbíny a generátoru. Oběžné kolo turbíny je hřídelí pevně spojeno s generátorem. Jako generátor slouží třífázový asynchronní motor s kotvou na krátko (AVG4 – 280 - 12N04) o maximálním výkonu 15 kW. Turbíny byly zpočátku osazeny vodokružnou vývěvou, která zajišťovala nasátí vody přes přepad a její následné uvedení do pracujícího stavu. Generátory, kterými jsou turbíny osazeny, mohou pracovat v režimu motoru. Proto v dnešní době není při spouštění voda nasávána do násosky vodokružnou vývěvou, ale turbínou, který po roztočení motorem začne fungovat jako čerpadlo. Došlo tak ke zvýšení spolehlivosti a ke zjednodušení celého systému vodní turbíny. Otáčky oběžného kola jsou navrženy právě tak, aby odpovídaly optimálním otáčkám generátoru. Z tohoto důvodu nemusí být mezi oběžným kolem a generátorem převodovka. Povrch násosky turbíny je opatřen mohutným žebrováním, kvůli vysokému podtlaku během provozu v ní. Je tak zabráněno nadměrnému namáhání a deformaci části turbíny.

7. Technické zhodnocení instalace vírových turbín

7.1. Teoretický výkon vodní elektrárny

Směrodatné hodnoty pro určení teoretického hrubého výkonu vodní elektrárny jsou spád a průtok. Při znalosti hydrotechnického potenciálu je možné se dále zabývat technickým řešením při návrhu stavby vodní elektrárny. Teoretický hrubý výkon lze vypočítat dle vzorce:

$$P = Q \cdot H \cdot \rho \cdot g \text{ [W]} \quad (3)$$

H – hrubý spád [m]

Q – průtok turbínou [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

ρ – hustota vody [$1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

g – gravitační zrychlení [$9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$]

(Bednář, 1989)

V místě Francisových turbín na MVE Želině platí hodnoty spádu $H = 4,3$ m a průtoku $Q = 16 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Po zadání příslušných hodnot do rovnice získáme hrubý výkon elektrárny v oblasti Francisových turbín podle vztahu:

$$P_{ft} = Q \cdot H \cdot \rho \cdot g \cdot \eta_{ft} \cdot \eta_g \cdot \eta_p \cdot \eta_e = 16 \cdot 4,3 \cdot 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,9 \cdot 0,956 \cdot 0,96 \cdot 0,99 = 551\,905 \text{ [W]} \quad (4)$$

V místě vírových turbín na MVE Želina platí hodnoty spádu $H = 2,1$ m a průtoku $Q = 1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Po zadání příslušných hodnot do rovnice získáme hrubý výkon v místě vírových turbín podle vztahu:

$$P_{vt} = Q \cdot H \cdot \rho \cdot g \cdot \eta_{vt} \cdot \eta_g \cdot \eta_e = 1 \cdot 2,1 \cdot 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,85 \cdot 0,956 \cdot 0,99 = 16\,573 \text{ [W]} \quad (5)$$

Pro zjištění skutečného výkonu elektrárny je nutné do výpočtu zahrnout i účinnosti jednotlivých částí technologie přeměny hydraulické energie na elektrickou. Vzhledem k tomu, že turbíny prošly v roce 2016 rekonstrukcí, lze očekávat velmi dobrou účinnost:

- Francisova turbína $\eta_{ft} = 0,9$
- Vírová turbína $\eta_{vt} = 0,85$
- Generátor $\eta_g = 0,956$
- Převodovka $\eta_p = 0,96$
- Transformátor $\eta_e = 0,99$

$$P_{celk.} = P_{ft} + P_{vt} = 568\,478 \text{ [W]} \quad (6)$$

Vyrobenou elektrickou energii vypočítáme ze vztahu:

$$E_s = P_{celk.} \cdot t \cdot 24 = 568\,478 \cdot 30 \cdot 24 = 409\,304 \text{ [kWh]} \quad (7)$$

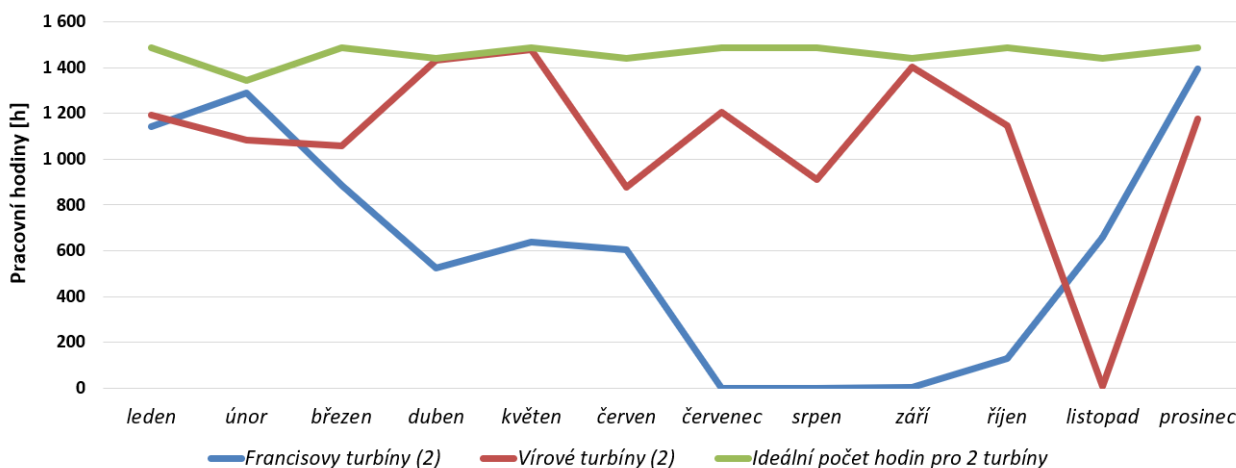
t – počet dní chodu

24 – počet hodin chodu

Této hodnoty ovšem MVE Želina není schopna dosáhnout, a to z několika důvodů. Při stavbě budovy malé vodní elektrárny, nebyl dodržen navrhovaný projekt. Projekt byl vytvořen tak, aby sklon odpadního kanálu nepřekročil 1 ‰ směrem od MVE. Stejně tak nebyl dodržen navrhovaný průtočný profil kanálu, zejména v oblasti před zaústěním do řeky (dno se zvedá a koryto se zužuje). Tyto odlišnosti se významně podílejí na velikosti využitelného spádu.

Další neméně významnou komplikací je úbytek vody v povrchových tocích. Tento faktor omezuje výrobu elektrické energie převážně v letních měsících. Z důvodu nedostatku vody musí dojít k odstavení jedné nebo více turbín. Jelikož je nutné přivádět vodu Lomazickým kanálem pro Elektrárnu Tušimice (ETU), častěji se setkáme s odstavením Francisových turbín. Tyto turbíny jsou ovšem schopny vyrobit několikanásobně větší množství energie než turbíny vírové. Ze zjištěných informací o provozních hodinách jednotlivých turbín lze tvrdit, viz obr. 21, že nedostatek vody zásadně snižuje možnost nepřetržitého provozu turbín. S čímž je neodmyslitelně spojeno množství vyrobené elektrické energie. Za rok 2018 tak bylo v průměru měsíčně vyrobeno pouhých 101 146 [kWh]. Data poskytla společnost ČEZ a byla zpracována pomocí MS Excel.

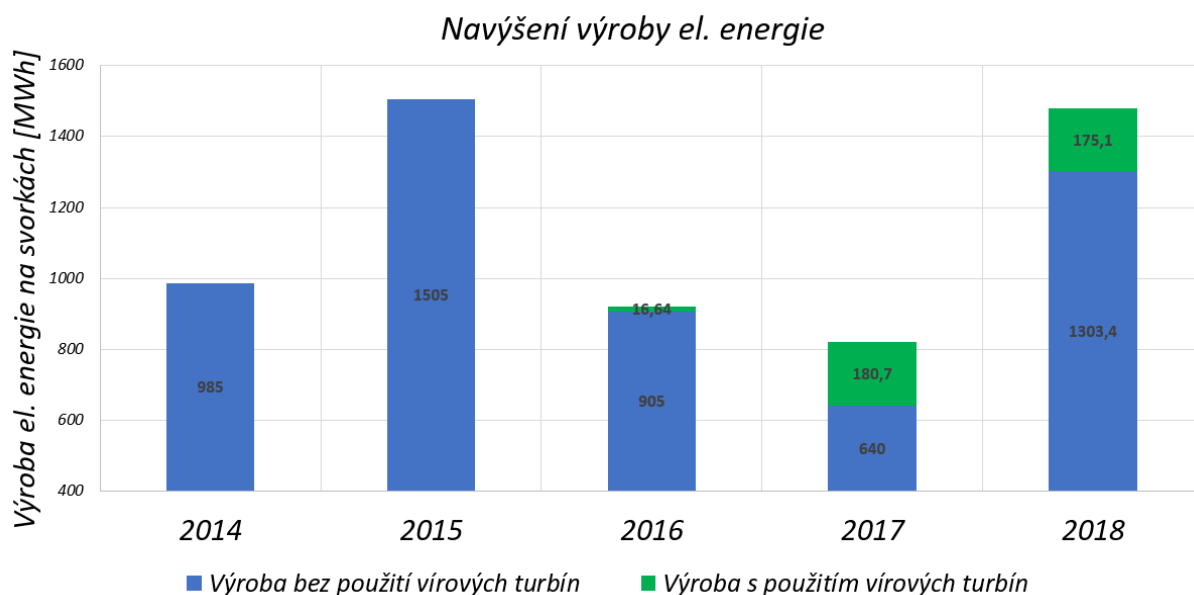
Obr. 21 Množství pracovních hodin za rok 2018; data poskytl Skupina ČEZ



7.2. Množství vyrobené elektrické energie

V průběhu roku 2016 a 2017 byly na MVE Želina instalovány nové vírové turbíny. Účelem bylo využít doposud nevyužívanou energii vody takovým způsobem, aby při najetí a samotném provozu nedocházelo ke snížení výkonu na Francisových turbínách. Do plného provozu byly turbíny uvedeny v březnu roku 2017 a v současné době jsou efektivně využívány. V případě, že jsou v provozu obě vírové turbíny, je dodávka vody zcela dostačující pro potřeby ETU. Pokud dojde k odstavení jedné nebo obou instalovaných turbín, automatický systém vypočte míru otevření stavidla a zajistí tak potřebný průtok vody. Na obr. 22 je možné vidět rapidní snížení množství vyrobené elektrické energie v letech 2016 a 2017. Tento pokles byl způsoben několikaměsíční rekonstrukcí Francisových turbín a současně probíhající instalací vírových turbín. Od spuštění vírových turbín lze naopak pozorovat výrazný nárůst vyrobené energie, a to v průměru o 14,44 MWh měsíčně. Data byla zpracována pomocí MS Excel.

Obr. 22 Množství vyrobené energie s použitím vírových turbín; data poskytla Skupina ČEZ



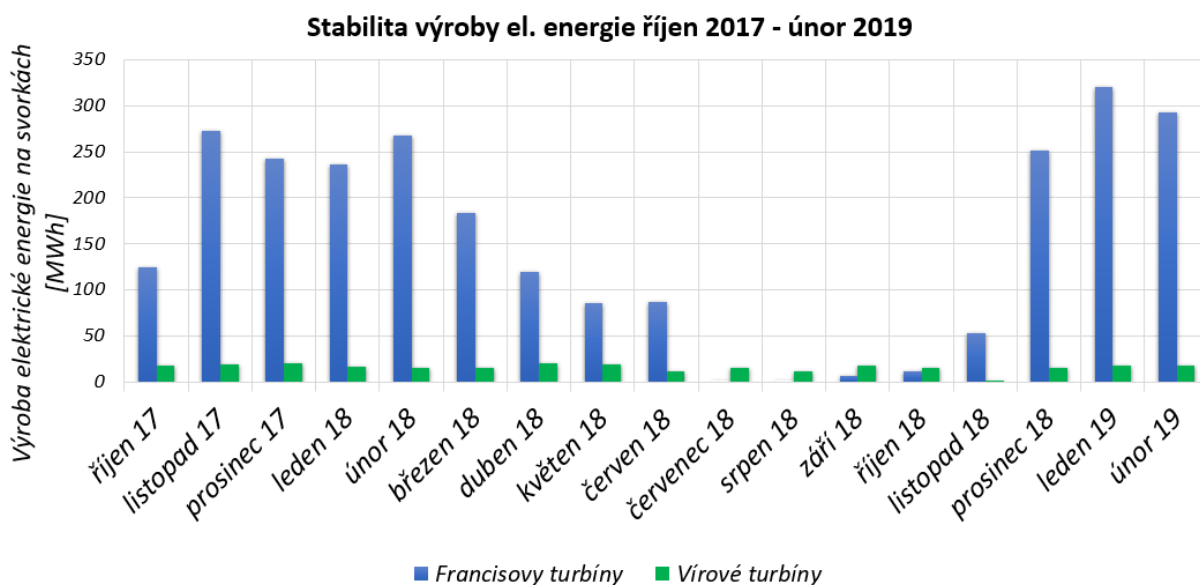
7.3. Stabilita výroby

Jedna z hlavních výhod při použití vírových turbín spočívá v jejich ploché charakteristice účinnosti, která je uvedena na str. 20. V několika posledních letech je možné se setkat s postupným úbytkem vody v povrchových tocích, kterým je postižena nejen Česká republika. V průběhu roku musí být v řekách na vodních dílech dodržen sanační průtok, který zajistí zachování základní vodohospodářské a ekologické funkce vodních toků v úseku pod vodohospodářskými díly a pod odběry vody. Sanační průtok je chápán jako průtok, který

zůstane v toku v daném úseku po jednom či více odběrech vod. V případě výrazného snížení průtoku dochází k odstavení některých turbín. Tento případ je patrný z obr. 21 v červenci a srpnu roku 2018, kdy k takovéto situaci došlo a Francisovy turbíny musely být zastaveny. Za pozornost stojí fakt, že vírové turbíny musely zůstat v provozu z důvodu zásobování ETU. K výraznému omezení vírových turbín došlo v listopadu roku 2018, kdy se poprvé vyskytl problém se zanesením savky. Samotná savka je sice opatřena sacím košem, který má za úkol bránit vniknutí hrubých nečistot, ale nedokáže nahradit jemné česle, které před savkou umístěny nejsou. V listopadu, kdy je ve vodě obsaženo velké množství spadaneho listí a jiných nečistot, docházelo velmi často k zanášení savky. Systém je vybaven režimem vyplachování, ovšem voda byla natolik znečištěna, že muselo dojít k odstavení obou turbín.

Ačkoliv je průtok skrze vírové turbíny upřednostňován z důvodu již zmiňované potřeby vody pro ETU, tak díky ploché charakteristice vírových turbín, viz obr. 23, je patrné, že tyto turbíny jsou v porovnání s Francisovými turbínami daleko méně náchylné na změny průtoku a spádu. Tyto změny jsou nejčastěji zapříčiněny úbytkem vody v povrchových tocích nebo manipulací výšky vodní hladiny v Nechanické přehradě.

Obr. 23 Porovnání výroby el. energie odlišnými typy turbín; data poskytl Skupina ČEZ



7.4. Posouzení průtoku

Malá vodní elektrárna Želina se, stejně jako většina malých vodních elektráren v České republice, potýká s problémy týkajícími se nedostatku vody. Tyto nedostatky se objevují především v letních měsících, kdy výška hladiny řek, oproti jiným částem roku, významně klesá. Následkem těchto poklesů jsou elektrárny omezovány množstvím přiváděné vody z důvodu dodržení sanačních průtoků v korytech řek. V současné době je možné se setkat s novými koncepty turbín pro MVE, které často pracují s malými průtoky a nejsou natolik náchylné k jejich změnám. Avšak z důvodu nízkého množství vyrobené energie se tyto turbíny hodí především jako „doplňkové“ ke konvenčnímu typu turbín. Pokud je do vodní elektrárny přiváděno minimální množství vody, je vhodné ponechat v činnosti pouze turbínu pracující při nízkém průtoku a o vysoké účinnosti. Naopak turbína s nedostatečným průtokem pracuje s velmi nízkou účinností a nevyužívá tak dostatečně energetický potenciál vody. Na obrázku 24 je možné vidět průměrný měsíční průtok Francisovými turbínami od roku 2014 do roku 2018. Z uvedeného grafu je patrná rekonstrukce v roce 2016–2017. Data průtoků během této rekonstrukce nejsou v grafu zahrnuta, aby nedošlo ke zkreslení výsledků. Z těchto výsledků lze vidět vytvořený lineární trend vývoje průtoku, který se v našem případě nepatrně zvyšuje. Ovšem nelze popřít fakt, který z grafu též vyplývá, že během letních měsíců je MVE Želina nucena pracovat jen s velmi nízkým průtokem. Tento nízký průtok je umocněn množstvím dováděné vody pro ETU Lomazickým kanálem.

Průměrný průtok za jednotlivé měsíce vypočten dle vzorce:

$$Q = \frac{\left(\frac{E_S}{t}\right)}{H \cdot \rho \cdot g} \quad (8)$$

Výpočet může být zatížen chybou související s měnící se účinností při změně průtoku.

E_S – vyrobená elektrická energie [kWh]; data poskytnuta společností ČEZ

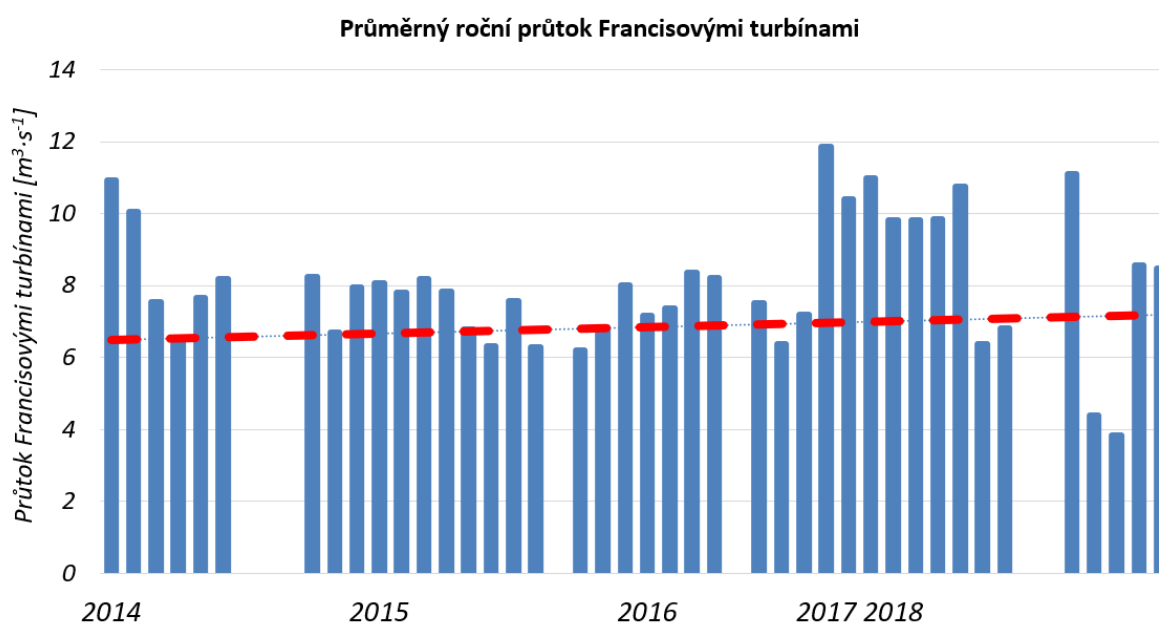
t – počet hodin provozu [h]; data poskytnuta společností ČEZ

H – výška spádu [4,3 m]

ρ – hustota vody [$1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

g – gravitační zrychlení [$9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$]

Obr. 24 Průtok Francisových turbín; data poskytl Skupina ČEZ



8. Ekonomické zhodnocení MVE Želina

Energetický regulační úřad (dále ERÚ) každoročně od roku 2002 určuje výkupní ceny energií z obnovitelných i neobnovitelných zdrojů. Do roku 2002 byla tedy energie vykupována za cenu, která byla sjednána mezi poskytovatelem a dodavatelem. Provozovatelem MVE Želina a zároveň distributorem vyrobené elektrické energie je společnost ČEZ. Tato vodní elektrárna nemá nárok na čerpání zelených bonusů, které jsou v platnosti od roku 2006. V případě, že by MVE Želina tyto bonusy mohla čerpat, byly by účtovány stejným způsobem jako při výkupu elektřiny (Kč/MWh). Tato cena je však ve srovnání s výkupní cenou výrazně nižší.

Reálné ceny nákladů na výrobu a prodej elektrické energie MVE Želina nejsou veřejně dostupné. Z tohoto důvodu budou výpočty vycházet z cen určených ERÚ. K dokončení rekonstrukce MVE Želina a jejímu opětovnému spuštění došlo v roce 1995. Dle zveřejněného cenového rozhodnutí ERÚ (ERÚ 2018), které nabylo účinnosti dnem 1. 1. 2018, spadá tato rekonstrukce do období od doby neurčité do 31. 12. 2004. Stanovená výkupní cena tedy činí 2195 Kč/MWh. Rekonstrukce jezu, jezové klapky a dalšího zařízení vyšla na 55 milionů korun.

Data ohledně množství vyrobené energie byla pro účely práce poskytnuta jen od roku 2014 do roku 2018. Stejně jako v minulých kapitolách, tak i zde je možné vidět, viz tab. 2 viditelný úbytek množství vyrobené energie z důvodu rekonstrukce a instalace nových turbín. Naopak v roce 2018 po instalaci nových vírových turbín byly již, po několika úspěšných testech, plně funkční. V tabulce lze tedy vidět skokový nárůst v množství vyrobené energie a vyšší tržby.

Tab. 2 Tržby MVE Želina 2014-2018; data poskytl Skupina ČEZ

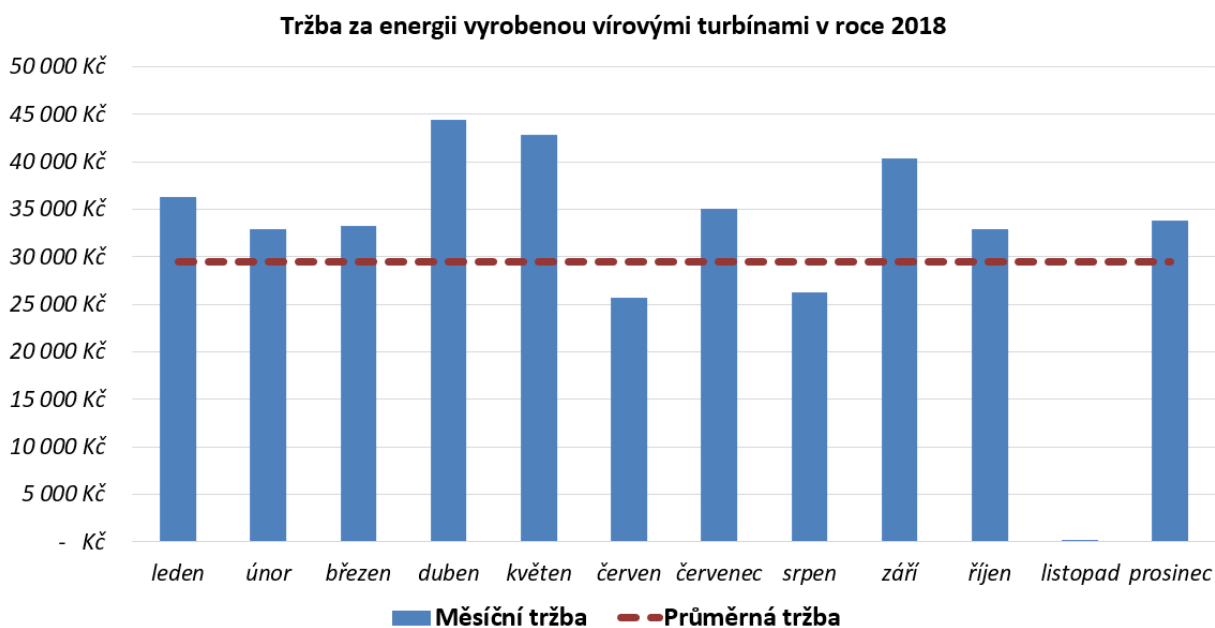
Rok	Výkupní cena v Kč za [MWh]	Vyrobena energie [MWh]	Tržby
2014	2028	937	1 900 236 Kč
2015	2069	1448	2 995 912 Kč
2016	2110	899	1 896 890 Kč
2017	2152	779	1 676 408 Kč
2018	2195	1420	3 116 900 Kč

8.1. Ekonomické zhodnocení instalace vírových turbín

Společnost ČEZ vynaložila na vývoj vírových turbín částku 3 miliony korun. Informace týkající se nákladů na realizaci bohužel nebyly pro účely této práce poskytnuty. Není tak možné zjistit dobu návratnosti této investice ani její rentabilitu. Známé je ovšem množství elektrické energie vyrobené těmito turbínami. Pokud budou tedy použity výkupní ceny stanovené ERÚ, viz předchozí kapitola, bude možné získat výši tržeb díky vírovým turbínám za určité období. Jako příklad je možné uvést rok 2018, který již nebyl ovlivněn instalací a zkušebním provozem těchto turbín. Na obrázku 25 lze vidět průměrnou měsíční výši tržby za rok 2018, která činí necelých 30 000 Kč. V měsících s dostatkem využitelné vody se měsíční tržby vyšplhaly až na necelých 45 000 Kč. Naopak v listopadu, kdy musely být turbíny odstaveny v důsledku zanášení savek, byla měsíční tržba 700 Kč. Problém s ucpáváním savek vlivem velkého množství nečistot ve vodě bude vyřešen do podzimu 2019 (ústní sdělení Drozdík). Ačkoli společnost ČEZ nezveřejnila náklady spojené s instalací tohoto nového typu turbín, tak z technického hlediska lze usoudit, že náklady na pořízení této technologie budou znatelně nižší než u běžně používaných typů. A to v důsledku jednoduché koncepce, která je ušetřena o některé prvky, jakými jsou například rozváděcí lopatky nebo převodovka.

Za rok 2018, dle cenového rozhodnutí ERÚ, tržba za množství vyrobené elektrické energie pomocí nově instalovaných vírových turbín dosáhla výše 354 288 Kč.

Obr. 25 Tržby za rok 2018; data poskytl Skupina ČEZ



8.2. Posouzení příčin nízkého výkonu Francisových turbín

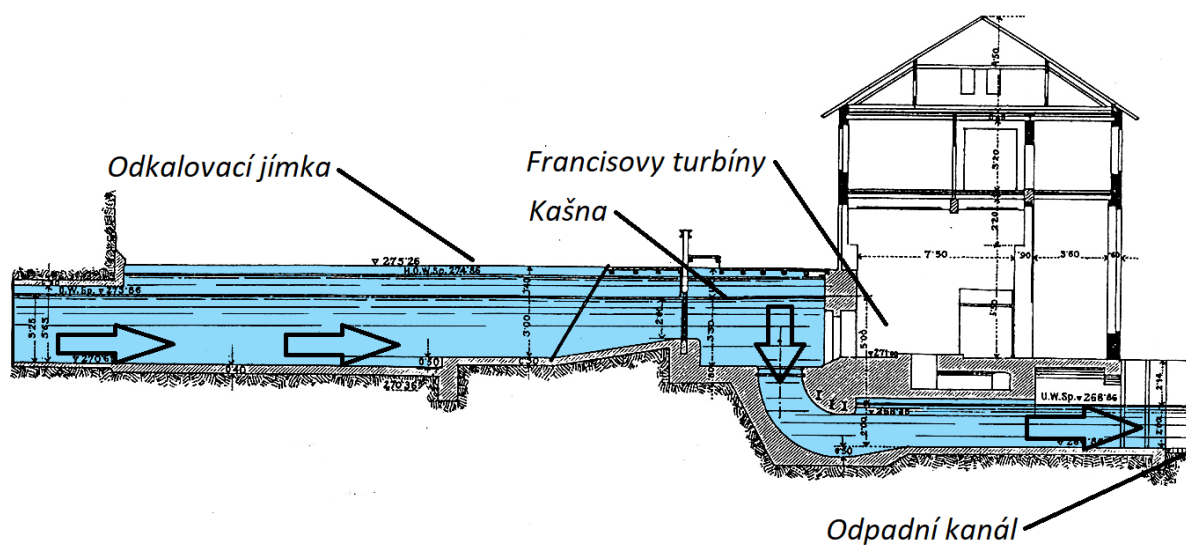
Při prohlídce MVE Želina je zcela zřejmé výrazné vzednutí hladiny v odpadním kanále v porovnání s přirozenou hladinou řeky. Toto vzednutí je způsobeno nedodržením plánovaného spádu odpadního kanálu, viz obr. 26, a širší průtočných profilů. Tyto odlišnosti se negativně podílejí na velikosti využitelného spádu a na maximálním průtoku. Francisovy turbíny jsou navrženy na spád 4,3 m. Ovšem z pravidelných měření vyplývá, že při nárazovém zvýšení spádu až na hodnotu 5,2 m jsou generátory schopny vyrábět 470 kW. Tyto podmínky jsou však značně ovlivněny hladinou nedaleké Nechranické přehrady. Z křivky průtoků, viz str. 34, je patrné, že ačkoliv hltnost každé z turbín je od $3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ do $8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, vyšších hodnot než průtoků $4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ bývá dosaženo jen velmi málo.

Nízký výkon turbín je možné zvýšit:

- Upravením odpadního kanálu omezující výši využitelného spádu a průtoku.
- Zvýšením spádu udržováním maximální úrovně hladiny v kašně.
- Zajištěním jiného zdroje surové vody pro ETU

Je nutné podotknout, že v minulosti k MVE Želina nebyl přiveden Lomazický kanál – tímto kanálem odtéká dle potřeb ETU až $3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Právě toto množství vody by zásadním způsobem zvýšilo výkon turbín, a tedy i celkové množství vyrobené energie. A to měsíčně o 74 507 [kWh].

Obr. 26 Podélný řez MVE Želina; Skupina ČEZ



9. Závěr

V současné době je kladen důraz na výrobu ekologicky čisté energie z obnovitelných zdrojů, a to nejen na území České republiky. Tento fakt podporuje rozvoj vodní energetiky, která má na našem území dlouholetou tradici a vede k obnovení zájmu o znovuzprovoznění mnoha v minulosti využívaných vodních děl.

Úkolem projektu instalace vírových turbín v lokalitě malé vodní elektrárny Želina bylo zvýšit množství vyráběné elektrické energie. A to především díky doposud nevyužitému množství vody v odkalovací jímce, které bylo jalově odváděno pro potřeby elektrárny Tušimice. Současně s touto instalací proběhla také rekonstrukce stávajících Francisových turbín, včetně elektrotechnického zařízení strojovny.

Použití vírových turbín je vhodné především jako doplňkový zdroj energie ke konvenčním typům turbín. Zejména z důvodu ploché charakteristiky účinnosti, která umožňuje efektivní provoz v letních měsících při nedostatku vody. Prostřednictvím vírových turbín došlo za rok 2018 k navýšení tržeb o 354 288 Kč. Dále bylo zjištěno, že nízký výkon Francisových turbín není způsoben původně předpokládanými ztrátami na převodovce, ale nedodržením průtočného profilu a spádu odpadního kanálu. Nízký výkon je umocněn nízkým průtokem z odkalovací jímky vodní elektrárny. Z tohoto důvodu je k Francisovým turbínám přiváděno výrazně nižší množství vody, než je původně projektovaná optimální hltlost samotných turbín. Skutečné měsíční množství vyrobené elektrické energie v roce 2018 je v průměru 101 146 [kWh] oproti vypočteným 409 304 [kWh].

Ačkoliv malá vodní elektrárna Želina nedosahuje tak vysokého výkonu, který je umožněn hydroenergetickým potenciálem dané lokality, je instalace vírových turbín smysluplným příspěvkem Skupiny ČEZ k výrobě obnovitelné elektrické energie. V následujících letech jsou plánovány další rozsáhlé úpravy vedoucí k opětovnému navýšení vyrobené energie.

10. Seznam citovaných zdrojů

- BEDNÁŘ, Josef, 1989.** *Malé vodní elektrárny: Ekonomika, předpisy.* Praha: SNTL, 237 s.
- BERANOVSKÝ, Jiří a Jan TRUXA, 2004.** *Alternativní energie pro váš dům. 2., aktualiz.* vyd. Brno: EkoWATT. Edice 21. století. ISBN 80-86517-89-6.
- ČSN 75 0120, 2009.** : 750120 *Vodní hospodářství - Terminologie hydrotechniky.* Praha: Úřad pro technickou normalizaci.
- DUŠIČKA, Peter, Pavel GABRIEL, Pavel HODÁK, Tomáš ČIHÁK a František ŠULEK, 2003.** *Malé vodní elektrárny.* 1. vyd. Bratislava: Jaga. ISBN 80-88905-45-1.
- Energie 21: Projekt unikátní vírové turbíny** [online], 2016. Brno: Moravio [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: <https://energie21.cz/projekt-unikatni-virove-turbiny/>
- GABRIEL, Pavel, Petr KALANDRA a František ČIHÁK, 1998.** *Malé vodní elektrárny.* Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické. ISBN 80-01-01812-1.
- IOPscience: The swirl turbine, 2012. 26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems** [online]. 26, 8 [cit. 2019-03-20]. DOI: 10.1088/1755-1315/15/4/042034. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/15/4/042034/meta>
- Mapy.cz** [online], 2019. Seznam.cz, a.s. [cit. 2019-03-09].
- MASTNÝ, Petr, 2011.** *Obnovitelné zdroje elektrické energie.* Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze. ISBN 978-80-01-04937-2.
- Mavel a.s.: Mavel downloads** [online], 2015. [cit. 2019-03-04]. Dostupné z: <https://mavel.cz/downloads/>
- MELICHAR, Jan, 2013.** *Hydraulické a pneumatické stroje, část vodní turbíny.* 1. vyd. V Praze: České vysoké učení technické. ISBN 978-80-01-05283-9.
- MELICHAR, Jan, Jaroslav BLÁHA a Jan VOJTEK, 1998.** *Malé vodní turbíny: konstrukce a provoz.* Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické. ISBN 80-01-01808-0.
- MOLTLÍK, Jan, Libor ŠRÁMEK, Josef ŠTEKL a Tomáš PAŘÍZEK, 2007.** *Obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich uplatnění v ČR* [online]. 184 [cit. 2019-02-27]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/obnovitelne_zdoje_energie_a_moznosti_jejich_vyuziti_pro_cr.pdf
- Ossberger turbine, 2001.** In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2019-03-04]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7977920&uselang=cs>
- PAŽOUT, František, 1987.** *Malé vodní elektrárny: Ekonomika, předpisy.* 1. Praha: SNTL, 504 s.
- Vírová turbína, 2000.** Česká republika. 292 197. Uděleno 12.06.2003. Zapsáno 18.12.2000.
- Roční zpráva o provozu ES ČR** [online], 2018. In: . Praha, s. 40 [cit. 2019-03-09].

ŠKORPIL, Jan, 2000. *Obnovitelné zdroje energie*. 2. vyd. přeprac. Plzeň: Západočeská univerzita. ISBN 80-7082-675-4.

Typical Layout of a Hydro Power Plant, 2015. In: *Non-Stop Engineering* [online]. [cit. 2019-03-04]. Dostupné z: <https://nonstopengineering.blogspot.com/2015/12/typical-layout-of-hydro-power-plant.html?m=1>

Vodní elektrárna Želina, 2012. *Skupina ČEZ* [online]. [cit. 2019-03-09]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/voda/zelina.html>

VOSÁHLO, David, 2013. *Návrh vírových turbín pro MVE Vrchlabí*. Brno, 100 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Doc. Ing. Miloslav Haluza, CSc.

11. Seznam obrázků

Obr. 1 Přirozený koloběh vody na Zemi	5
Obr. 2 Výroba elektrické energie v ČR v roce 2017	7
Obr. 3 Využití vodní energie v ČR v roce 2017	7
Obr. 4 Obecné schéma vodní elektrárny	8
Obr. 5 Dělení podle spádu	9
Obr. 6 Dělení podle využívaného spádu.....	10
Obr. 7 Rozsah funkčnosti turbín v závislosti na průtoku a spádu	14
Obr. 8 Francisova turbína	15
Obr. 9 Kaplanova přímotoká turbína	16
Obr. 10 Peltonova turbína.....	17
Obr. 11 Bánkiho turbína	18
Obr. 12 Vírová turbína	19
Obr. 13 Charakteristika účinnosti vírové turbíny	20
Obr. 14 Vírová turbína násosková, přímoproudá	21
Obr. 15 Umístění MVE Želina	22
Obr. 16 Vzdouvací zařízení pro MVE Želina.....	24
Obr. 17 Vtok MVE Želina.....	25
Obr. 18 Jemné česle Lomazického kanálu	26
Obr. 19 Strojovna s generátory značky Siemens	27
Obr. 20 Vírové turbíny MVE Želina	28
Obr. 21 Množství pracovních hodin za rok 2018	31
Obr. 22 Množství vyrobené energie s použitím vírových turbín.....	32
Obr. 23 Porovnání výroby el. energie odlišnými typy turbín.....	33
Obr. 24 Průtok Francisových turbín	35
Obr. 25 Tržby za rok 2018.....	37
Obr. 26 Podélný řez MVE Želina.....	38

12. Přílohy

Příloha 1 Objekt MVE Želina



Příloha 2 Vtok do Lomazického kanálu



Příloha 3 Odpadní kanál MVE Želina



Příloha 4 Automatické stavidlo Lomazického kanálu

