



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

ŠNEKOVÁ TURBÍNA PRO MVE

SCREW TURBINE FOR SMALL HYDRO-POWER PLANT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

VÍT SKLENÁŘ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ POSPÍŠIL, Ph.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2012/13

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Vít Sklenář

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Energetika, procesy a ekologie (3904R030)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Šneková turbína pro MVE

v anglickém jazyce:

Screw turbine form small hydro-power plant

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Tématem práce je problematika malých vodních elektráren. Detailní pozornost je věnována šnekové vodní turbíně využitelné ve vodních elektrárnách velmi malých výkonů. Téma zahrnuje jak obecné pojednání a rešeršní zpracování uvedené problematiky, tak i praktický návrh šnekové turbíny pro konkrétní aplikaci.

Cíle bakalářské práce:

1. Uveďte základní rozdělení malých vodních elektráren a přehled používaných turbín.
2. Detailně představte šnekovou vodní turbínu a uveďte dohledatelné aplikace.
3. Pro konkrétní aplikaci proveďte návrh šnekové turbíny (hlavní rozměry) a související technicko-ekonomické zhodnocení jejího nasazení.

Seznam odborné literatury:

Kokeš, Petr, Návrh malé vodní elektrárny, 2012

Kříž, Tomáš, Malá vodní elektrárna, 2007

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/13.

V Brně, dne 20.11.2012



doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je řešerše malých vodních elektráren, návrh hlavních konstrukčních rozměrů šnekové turbíny pro malou vodní elektrárnu a následné zhodnocení ekonomiky její výroby. Tato bakalářská práce je rozdělena do čtyř hlavních částí. První část práce se zabývá obecnými informacemi o malých vodních elektrárnách. Ve druhé části je podrobně představena šneková turbína a její příslušenství. Ve třetí části je šneková turbína navržena pro konkrétní lokalitu. Čtvrtá část porovnává jednotlivé možnosti výroby šnekové turbíny.

Klíčová slova

šneková turbína, malá vodní elektrárna, turbína, energetika

Abstract

The aim of this work is the research of small hydro power plants, design of main structural dimensions of screw turbines for small hydroelectric power plant and the subsequent evaluation of the economics of production. The thesis is divided into four main parts. The first part deals with general information about small hydropower plants. In the second part the screw turbine and its accessories are introduced in details. In the third part the screw turbine is designed for a specific location. The fourth section compares the possibilities of manufacturing hydrodynamic screw.

Keywords

hydrodynamic screw, small hydropower plant, turbine, energetics

Bibliografická citace

SKLENÁŘ, V. *Šneková turbína pro MVE*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 69 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Jiřího Pospíšila Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 24. Května 2013

.....

Vít Sklenář

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat doc. Ing. Jiřímu Pospíšilovi, Ph.D. za odborné vedení mé bakalářské práce. Svým rodičům, rodině a přítelkyni, kteří mě po celou dobu studia podporovali a byli pro mě velikou oporou.

Obsah

Obsah	13
Úvod.....	17
1. Malé vodní elektrárny	18
1.1. Historie mve	18
1.2. Princip vodních elektráren	18
1.3. Legislativa provozu mve	19
1.4. Ekonomika provozu mve	20
1.5. Uspořádání vodních elektráren	20
1.5.1. Jezové (říční) malé vodní elektrárny	20
1.5.2. Derivační vodní elektrárny	21
1.6. Rozdělení mve podle instalovaného výkonu.....	22
1.7. Historie, rozdělení a typy turbín pro mve	23
1.7.1. Historie vodních turbín	23
1.7.2. Výběr vhodné turbíny	23
1.7.3. Rozdělení podle směru proudění	24
1.7.4. Rozdělení podle polohy osy hřídele.....	24
1.7.5. Rozdělení podle tlaku před oběžným kolem a za ním	24
1.7.6. Bánkiho turbína.....	25
1.7.7. Francisova turbína.....	25
1.7.8. Kaplanova turbína.....	26
1.8. Problematika ekologie výstavby a provozu mve	27
2. Šneková turbína pro mve	29
2.1. Historie archimedova šroubu v energetice.....	30
2.2. Princip činnosti šnekových turbín	31
2.2.1. Výhody šnekových turbín	31
2.2.2. Nevýhody šnekových turbín	32
2.3. Hluk šnekových turbín	32
2.4. Šnekové turbíny a životní prostředí	32
2.5. Části šnekových turbín	35

2.5.1.	Rotor	35
2.5.2.	Převodovka	36
2.5.3.	Ložiska.....	36
2.5.4.	Generátor	36
2.5.5.	Frekvenční měnič.....	37
2.6.	Konstrukční provedení žlabu pro šnekovou turbínu	37
2.6.1.	S betonovým žlabem.....	37
2.6.2.	Se zabetonovaným ocelovým žlabem.....	37
2.6.3.	Se samonosným ocelovým žlabem – tzv. kompaktní provedení	38
2.7.	možnosti řešení elektráren se šnekovou turbínou	39
2.8.	Příklady použití šnekových turbín	41
2.9.	Výrobci šnekových turbín.....	41
3.	Lokalita pro mve.....	42
3.1.	Popis lokality pro mve	42
3.2.	Hydrologické údaje o toku	43
4.	Návrh šnekové turbíny.....	45
4.1.	Vstupní údaje pro výpočet šnekové turbíny.....	45
4.2.	Rozměrový výpočet šnekové turbíny.....	46
4.3.	Výpočet výkonu a mechanických vlastností šnekové turbíny	51
4.4.	Dimenzování pohonu a součástí šnekové turbíny.....	53
4.5.	Hrubé česle.....	55
4.6.	Maximální a minimální průtok turbínou.....	56
4.7.	Shrnutí výsledků	57
5.	Technicko-ekonomické zhodnocení	61
5.1.	Ceny MVE	61
5.2.	Vlastní výroba	61
5.3.	Srovnání jednotlivých možností.....	62
6.	Závěr	63
7.	Použité informační zdroje.....	64
	Seznam obrázků.....	66
	Seznam grafů	67

Seznam tabulek	68
Seznam použitých zkratek	69

Úvod

Potřeba hledat nové, alternativní energetické zdroje a zdokonalovat obnovitelné zdroje již známé je stále naléhavější. Neustále se obnovujícím zdrojem energie je koloběh vody v přírodě. Nejběžnější způsob využívání je její přeměna v energii elektrickou. Právě takto získaná energie se jeví jako ekonomicky nejvýhodnější, když způsob její výroby je navíc ekologicky čistý. Dvacáté století poznamenalo nevratně tvář země velkými vodními díly, jejichž realizace jak dnes víme nebyly ve všech případech nutné. Nyní se s ohledem na životní prostředí vracíme zpátky k „malým vodám“. Malé vodní elektrárny se zaručeným výkonem a vyráběnou energií, představují v souhrnu velký energetický zdroj a mohou tak ušetřit mnoho tuhých, plyných a kapalných paliv, která navíc škodí životnímu prostředí. [1]

Téma této bakalářské práce bylo vybráno na základě možnosti skutečné proveditelnosti v praxi. Práce bude pojednávat o malých vodních elektrárnách, zejména potom o šnekové turbíně, která by se měla na základě této práce zkonstruovat. Tato turbína byla pro lokalitu Mokřinky vyhodnocena jako nejvhodnější, protože na této lokalitě je poměrně malý spád a tato turbína jej dovede efektivně zpracovat. Další výhodou této turbíny je její jednoduchá instalace na vybranou lokalitu a možnost provozovat turbínu s proměnlivým průtokem bez výrazné změny v její účinnosti.

Hlavním cílem práce je rozměrový výpočet šnekové turbíny pro lokalitu Mokřinky a zhodnocení ekonomiky její výroby.

Pro zpracování této práce byla hlavním zdrojem informací kniha německého autora Dirk Michael Nuernbergk s názvem Wasserkraftschnecken – Berechnung und optimale Entwurf von archimedischen Schnecken als Wasserkraftmaschine. Tato kniha vyšla na podzim 2012 a shrnuje poznatky o šnekové turbíně od různých autorů.

1. Malé vodní elektrárny

Definice malé vodní elektrárny dle normy ČSN 75 2601 zní: MVE je elektrárna s instalovaným výkonem do 10MW, využívající pro výrobu elektrické energie hydroenergetického potenciálu povrchové vody. [2]

Z celkové produkce elektřiny v ČR se v roce 2008 vyrobilo 2,8 % ve vodních elektrárnách, tj. 2,4 mil. MWh. Z toho připadá asi čtvrtina na MVE s instalovaným výkonem do 1 MW a zhruba stejné množství na MVE s výkonem od 1 do 10 MW. [3]

Tím, že jsou MVE rozptýleny po celé republice, se snižují ztráty přenosem v rozvodech – elektřinu není třeba daleko transportovat. To nám snižuje zatížení přenosové soustavy. Případný výpadek některé z elektráren je z hlediska sítě, na rozdíl od výpadku velkého centrálního zdroje, nevýznamný. [3]

1.1. Historie mve

Využití vodní energie má u nás dlouhou tradici. Ještě v roce 1930 bylo v tehdejším Československu evidováno téměř 17 tisíc elektráren, mlýnů, pil, hamrů a dalších zařízení využívajících vodní energii. V padesátých letech minulého století byla však většina z nich cíleně zlikvidována, protože představovaly konkurenci centrálně řízenému socialistickému hospodářství. Počátkem osmdesátých let bylo v ČR pouze asi 135 malých vodních elektráren (MVE), během deseti let vzrostl tento počet zhruba na 900. V roce 2009 je v ČR evidováno 1354 malých vodních elektráren s výkonem do 1 MW. [3]

1.2. Princip vodních elektráren

Vodní elektrárny jsou založeny na principu přeměny potenciální a kinetické energie vody na energii elektrickou. Maximální získatelná energie vody pak závisí na spádu a průtoku. Přeměněná energie vody na mechanickou energii vodní turbíny poté závisí na účinnosti turbíny.

Energie vody:

$$P = h \cdot Q \cdot \rho \cdot g [W] \quad (1.1)$$

Teoretický výkon vodní turbíny je snížen o účinnost turbíny:

$$P_t = P \cdot \eta_t [W] \quad (1.2)$$

Ztráty v turbíně lze rozdělit na:

- Objemové
- Hydraulické
- Mechanické

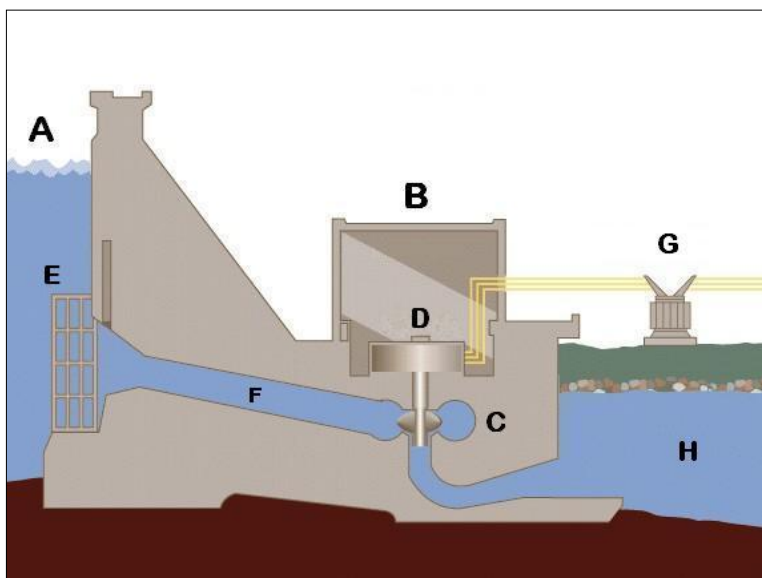
Účinnost turbíny je potom možné vyjádřit pomocí objemové, hydraulické a mechanické účinnosti:

$$\eta_t = \eta_o \cdot \eta_H \cdot \eta_M \quad (1.3)$$

Turbína předává mechanickou energii přes převodovku generátoru, který vyrábí elektrickou energii, která se přes transformátor dodává do distribuční sítě. Při této přeměně energie opět dochází ke ztrátám jak v převodovce, tak v generátoru. [4]

Celkovou účinnost přeměny hydraulické energie vody na elektrickou energii lze vyjádřit součinem jednotlivých účinností. U velkých elektráren v případě optimálního turbínového průtoku bývá hodnota η_{celk} v rozmezí 0,80 – 0,85. [4]

Obr. 1- Vodní elektrárna [5]



Voda je přivedena přes česle (E) na oběžné kolo turbíny (C), předá mu svoji energii (potenciální a kinetickou) a roztočí ho. Oběžné kolo je spojeno hřídelí s generátorem elektrické energie (D). Turbína a generátor tvoří tzv. turbogenerátor. Mechanická energie turbíny se v generátoru mění na energii elektrickou. Děje se tak na základě elektromagnetické indukce.

Elektrická energie je transformována transformátorem na vyšší elektrické napětí (G) a odváděna do míst spotřeby. Elektrická energie se transformuje na vyšší napětí kvůli ztrátám v distribučním vedení.

1.3. Legislativa provozu mve

Pro provoz MVE je nutno získat licenci pro podnikání v energetice (živnostenský list se nevydává). Pokud nemá provozovatel vzdělání v oboru, musí absolvovat rekvalifikační kurz (pro MVE do 1 MW). [3]

Současný vodní zákon a další předpisy vyžadují, aby provozovatel MVE zachovával tzv. minimální zůstatkový průtok v toku. To znamená, že se nikdy nesmí veškerá voda použít pro turbínu, ale část je nutno nechat protékat původním tokem, např. přes jez. Zůstatkový průtok se stanovuje obvykle jako množství vody, které protéká korytem nejméně 355 dní v roce, u menších toků dokonce 330 dní. Průtok stanovuje vodoprávní úřad individuálně pro každou MVE zvlášť. Někteří provozovatelé tento průtok nedodržují, aby zvýšili výrobu elektřiny. Nedodržování minimálního průtoku může být pokutováno nebo dokonce sankcionováno odebráním povolení pro nakládání s vodami, což znamená konec provozu MVE. [3]

MVE se obvykle dimenzují na 90-ti až 180-ti denní průměrný průtok, podle technické úrovně technologie – zejména schopnosti turbíny přizpůsobit se regulací změnám průtoku. Tento průtok je nutno vždy snížit o předepsaný zůstatkový průtok. [3]

Je nutné zabránit vnikání ryb do turbíny, k tomu slouží jemné česle (mezera mezi pruty česlí může být široká max. 2 cm) a elektronický odpuzovač na vtoku do náhonu. [3]

Často se zdůrazňuje, že MVE okysličují vodu, a tak zvyšují její samočisticí schopnost. Je třeba zdůraznit, že voda se okysličuje jen v některých turbínách (Peltonova, Bánkiho). U jiných naopak může docházet ke snížení obsahu vzduchu ve vodě. Významným prvkem pro okysličení vody je jez, kde se voda provzdušňuje při přepadu. Aby ovšem jez mohl vodu okysličovat, musí přes něj protékat voda. I proto je důležité dodržovat předepsaný minimální průtok. Vodu mohou okysličovat i některé typy rybích přechodů. [3]

Další povinností provozovatelů MVE je odstraňování naplavenin přinesených vodou. Listí, dřevo, plastové lahve a předměty zachycené na česlích je zakázáno pouštět zpět do toku. [3]

V současnosti se při stavbě nebo rekonstrukci MVE obvykle vyžaduje vybudování tzv. rybích přechodů. Je důležité, aby MVE nevytvořila na toku překážku nepřekonatelnou pro vodní živočichy. Rybí přechod znamená zvýšení nákladů na stavbu i údržbu MVE. [3]

1.4. Ekonomika provozu mve

Výkupní ceny elektřiny stanovuje pro každý rok Energetický regulační úřad (www.eru.cz) v cenovém rozhodnutí, kterým se stanovuje subvence pro podporované zdroje energie. Je garantováno, že tato cena se nezmění po dobu 30 let od uvedení MVE do provozu (resp. od její rekonstrukce). U MVE lze dodávat do sítě celý den za jednotnou cenu nebo jsou možné i jiné varianty prodeje elektrické energie. Například, je-li MVE součástí průmyslového areálu, je obvykle výhodnější elektřinu spotřebovat pro vlastní spotřebu a uplatnit tzv. zelené bonusy. Ty vyplácí lokální distributor elektřiny (ČEZ, e.on), stejně jako výkupní ceny. Zelené bonusy lze uplatnit i v případě, že majitel MVE vyrobenou elektřinu spotřebuje v jiném svém objektu, musí však zaplatit za distribuci elektřiny veřejnou sítí. Existuje i možnost prodat elektřinu z MVE třetí osobě. [3]

1.5. Uspořádání vodních elektráren

U MVE se téměř výhradně používají pouze dvě koncepce.

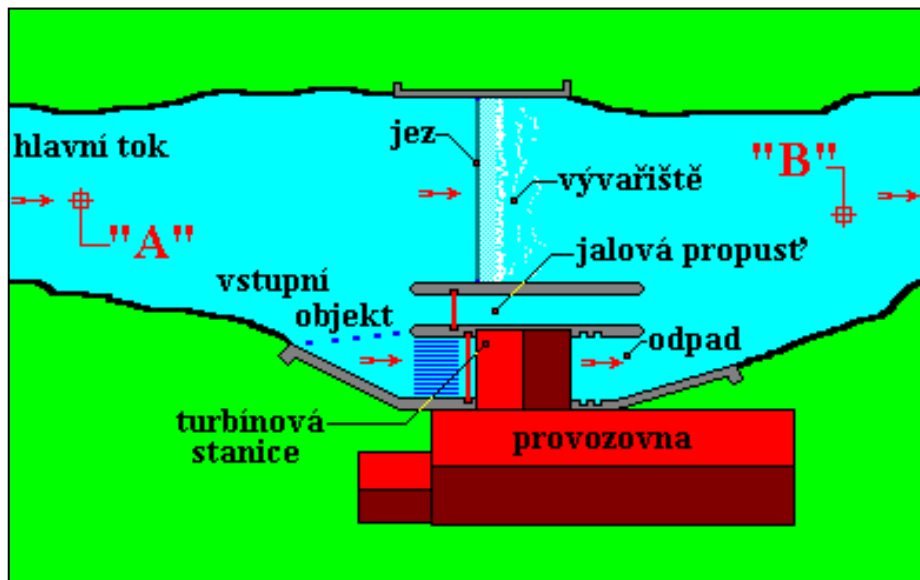
1.5.1. Jezové (říční) malé vodní elektrárny

Vodní dílo využívá rozdíl hladin mezi profily A – B. Celý spád se získá vzduutím vody na jezu. Strojovna u tohoto typu elektrárny je buď jezová, nebo pilířová a je v kontaktu s jezem. Voda je odebírána hned na jezu a zpět se vrací za jeho vývařiště. Odpadá dlouhý náhon i odpadní kanál. Oproti derivačnímu vodnímu dílu jsou zde malé nároky na plochu zastavěných pozemků. Provozovny jsou stavebně jednodušší, jsou však více ohroženy povodněmi. Stavbu i opravy je nutno realizovat při trvalém průtoku vody řekou. [6]

Elektrárna tohoto typu klade zvýšené nároky na konstrukci jezu:

- Stavbou vodního díla se nesmí omezit vodní průtokový profil koryta.
- Jez by měl být ovladatelný tak, aby v případě velké vody nezpůsobil zvednutí hladiny a tím vylití vody.
- Jez musí mít bezpečnostní zařízení pro případ velké vody.

Obr. 2- Jezová vodní elektrárna [6]



Existuje několik variant dispozičního uspořádání jezové elektrárny:

- Oboustranné vybrání břehu s elektrárnou na jedné straně.
- Oboustranné vybrání břehu s elektrárnami na obou stranách
- Jednostranné vybrání břehu s elektrárnou
- V pilíři hráze
- V krátkém kanále u jezu

1.5.2. Derivační vodní elektrárny

Tato koncepce vodního díla se nejvíc uplatňuje na takovém místě vodního toku, kde vzhledem k jeho tvaru vychází relativně krátká délka přívodního - derivačního kanálu jako spojnice profilů A – B a přitom je zabezpečený dostatečný výškový rozdíl (spád). Strojovna elektrárny stojí mimo hlavní tok. Voda je k ní přiváděna přívodním – derivačním kanálem. Abychom mohli vodu dovést k objektu turbíny, musí být vodní tok v místě odběru vody (bod A) přehrazený vzdouvacím a odběrným objektem - jezem. Vtok do derivačního kanálu musí být upravený tak, aby se do něj nedostávaly nečistoty z řečiště. Derivační kanál má ještě před vtokem do malé vodní elektrárny jemné česle. Před jemnými česlemi je vhodné vybudovat tzv. jalový přepad. Tím odchází voda při zvýšené hladině v přívodním kanálu. Voda z turbíny odtéká odpadním kanálem do spodního řečiště v místě B. [6]

Limitujícím faktorem návrhu derivační MVE je délka a typ přivaděče. Náklady na jeho výstavbu mohou být finančně neúnosné a elektrárna se stane nenávratnou investicí.

Nevýhodou derivační elektrárny je potřeba zajistit sanační průtok korytem řeky. A také nutnost údržby dlouhého náhonu.

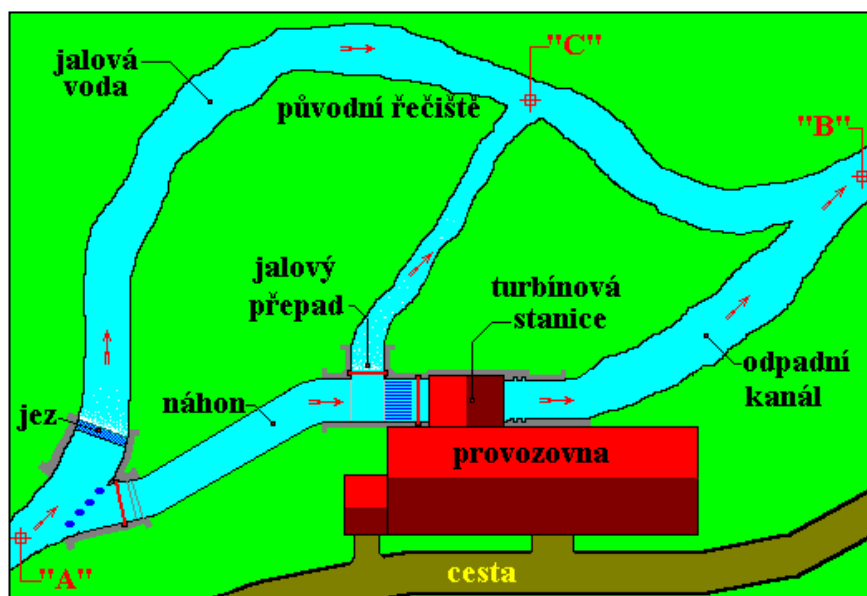
Určitou výhodou naopak je větší ochrana proti zvýšené vodní hladině.

Přívodní – derivační kanál musí být správně navržen tak, aby se minimalizovaly ztráty na spádu průtokem vody. V závislosti na konstrukci přívodního - derivačního kanálu je nutné navrhnout vhodnou průtokovou rychlost vody a správný profil přívodního kanálu. Aby ztráty v přivaděči byly minimální, je vhodné volit malé rychlosti průtoku vody.

Varianty dispozičního uspořádání derivační elektrárny:

- S přívodním kanálem s volnou hladinou
- S tlakovým přivaděčem
- Kombinací předchozích variant

Obr. 3- Derivační vodní elektrárna s beztlakovým přivaděčem [6]



1.6. Rozdělení mve podle instalovaného výkonu

Základní rozdělení MVE vychází z normy ČSN 75 2601. MVE se třídí dle instalovaného výkonu do tří kategorií:

Tab. 1- Třídění MVE podle instalovaného výkonu [2]

Kategorie MVE	Výkon MVE
I	1 až 10 MW včetně
II	100kW až 1MW včetně
III	do 100kW včetně

1.7. Historie, rozdělení a typy turbín pro mve

Vodní turbíny patří mezi technicky nejdokonalější mechanické motory vůbec. Turbína je točivý mechanický stroj, který přeměňuje energii vody (kinetickou a tlakovou) na mechanickou energii (rotační pohyb hřídele). Moderní turbíny dosahují účinnosti okolo 90% (velké turbíny až 94%). [6]

1.7.1. Historie vodních turbín

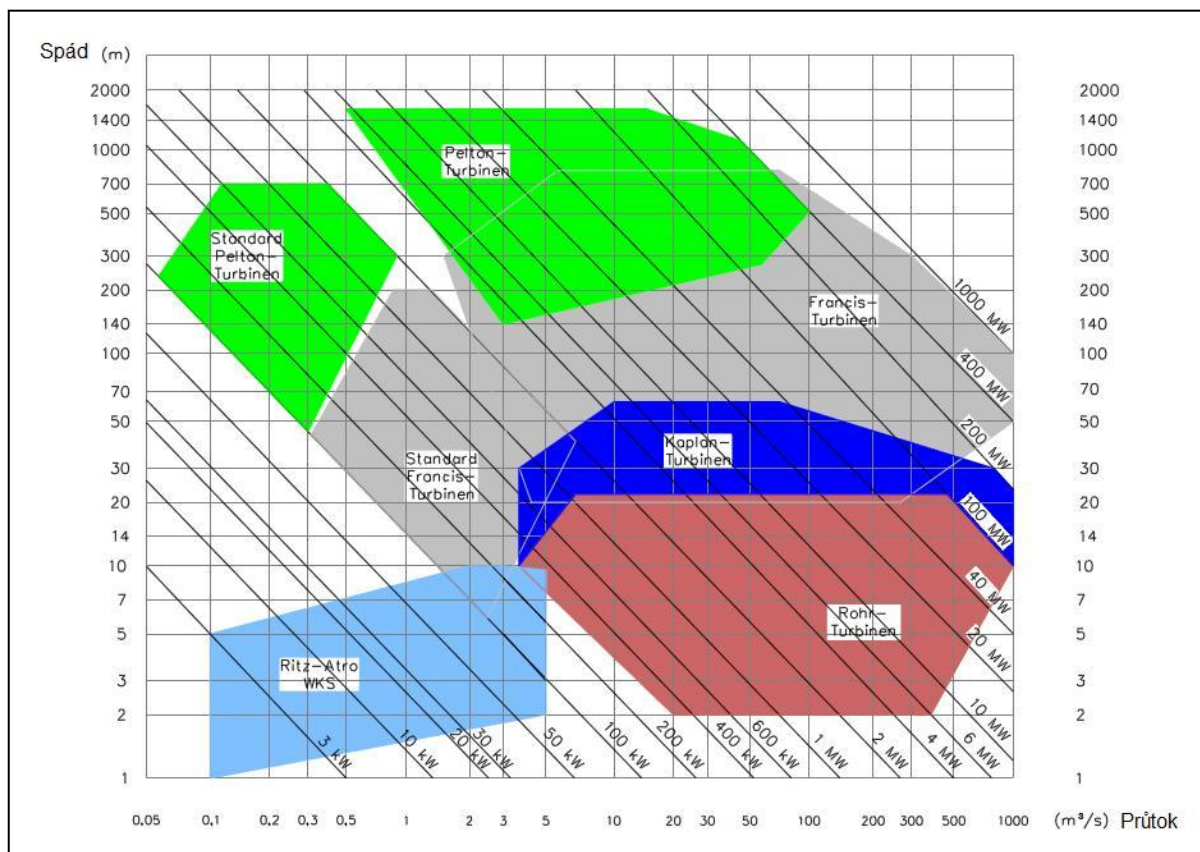
Nejstaršími vodními motory v historii lidstva se stala dřevěná vodní kola, tj. vodorovné hřídele opatřené na obvodu lopatkami. Už v antice je používali Řekové a později i Římané. Od římského architekta a "inženýra" Vitruvia, žijícího v 1. stol. př. n. l., známe první popis takového kola. Z popisu je zřejmé, že se jednalo o vodní kolo na spodní pohon, tzn. že nápor tekoucí vody působil jen na několik spodních lopatek. Účinnost tohoto druhu vodního kola byla velmi nízká, takže se jeho výstupní výkon pohyboval kolem 0,37 kW (což odpovídá výkonu ruční elektrické vrtačky). [6]

V 19. stol. se podařilo zvýšit efektivitu turbín tak, že dokázaly soupeřit s parním strojem.

1.7.2. Výběr vhodné turbíny

Na obrázku 4 je vidět diagram pro orientační výběr vhodné turbíny pro určitou lokalitu. Výběr se provádí na základě známého spádu a průtoku. Tento obrázek je pouze orientační, výběr turbíny by měl laik nechat na odborníkovi, který se touto problematikou zabývá. Modrá oblast znázorňuje možnost použití šnekové turbíny.

Obr. 4- Oblast použití turbín pro MVE [7]



1.7.3. Rozdělení podle směru proudění

- **Axiální turbíny** – směr proudění rovnoběžný s hřídelí oběžného kola turbíny (Kaplanova turbína, Propelerova turbína)
- **Radiální turbíny** – směr proudění v oběžném kole kolmý na osu hřídele oběžného kola (Francisova turbína)
- **Tangenciální turbíny** – směr proudění tečný k hřídeli oběžného kola (Peltonova turbína)
- **Diagonální turbíny** – směr proudění vzhledem k hřídeli oběžného kola šikmý
- **Radiálněaxiální** – směr proudění se v oběžném kole mění z radiálního na axiální (rychl oběžná Francisova turbína)

1.7.4. Rozdělení podle polohy osy hřídele

- Vertikální
- Horizontální
- Se šikmým hřídelem

1.7.5. Rozdělení podle tlaku před oběžným kolem a za ním

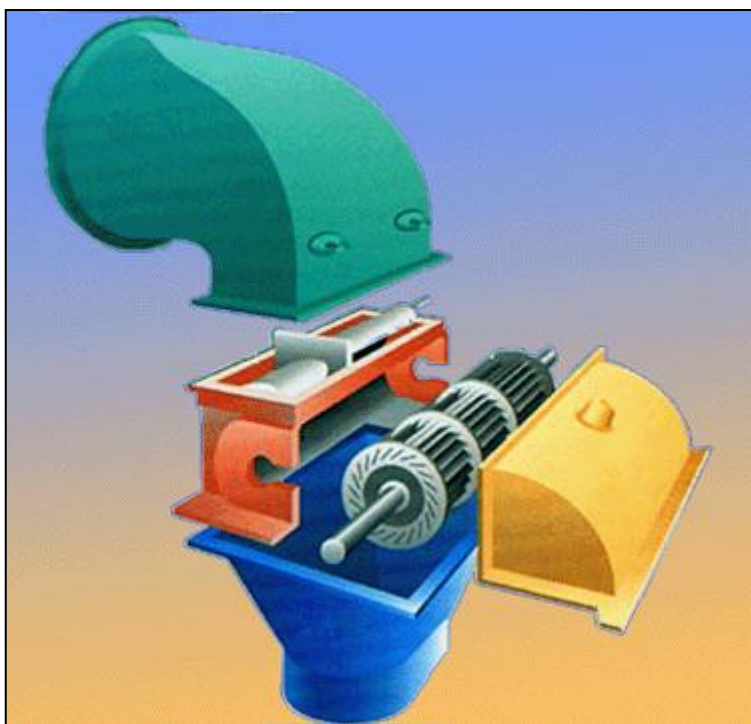
- a) **Rovnotlaké (akční) turbíny** – jedná se o turbíny, u nichž se přetlak rovná nule. Celý užitečný spád se přemění již v rozváděcím kole v rychlost vodního proudu, který vystupuje z rozvodného kola. Tento proud pak v oběžném kole mění jen svůj směr, přičemž velikost relativní rychlosti zůstává stejná. Velikost absolutní rychlosti C , zvláště pak její složka obvodová C_u , se zmenšují. Čili tlak kapaliny před oběžným kolem i za ním je stejný. Tlak kapaliny se nemění ani během cesty oběžným kanálem. Dosáhneme toho tím, že dáme kapalině proudit oběžným kanálem tak, aby její hladina byla stále volná, tedy tak aby kapalina nevyplňovala kanál úplně. Nesmí docházet k brodění oběžného kola při zvýšené spodní hladině, protože nám to snižuje účinnost. Příkladem je turbína Peltonova u níž volný paprsek dopadá na lžičkovité lopatky a protéká jimi rovněž s volnou hladinou. Patří sem například i Bánkiho turbína, atd. [8]
- b) **Přetlakové (reakční) turbíny** – jedná se o turbíny, u nichž je tlak kapaliny na začátku oběžného kanálu větší než na jeho konci. V rozváděcím kole se přemění jen část užitečného spádu v rychlost, jíž kapalina vstupuje do oběžného kola, část spádu působí ještě jako tlak kapaliny, s níž kapalina vstupuje do oběžného kola. Tento zbytek tlaku se mění na rychlost až v oběžném kole, takže relativní rychlost, jíž voda protéká kanálem, směrem k výtoku vzrůstá. V oběžných kanálech je přetlak, a proto jsou zcela zaplněny vodou. Z tohoto důvodu také nevádí je-li oběžné kolo umístěno pod hladinou spodní vody. K přetlakovým turbínám patří např. Francisova a Kaplanova turbína. [8]

1.7.6. Bánkiho turbína

Bánkiho turbína je radiální rovnotlaká turbína s tangenciálním ostřikem a horizontální hřídelí. Její návrh je nenáročný, výroba jednoduchá. Turbína má robustní konstrukci. Je vhodná pro malé výkony s kolísajícím průtokem vody a spády většími než 2m.

Voda je na turbínu přiváděna potrubím. Před turbínou dochází ke změně průřezu z kruhového na obdélníkový. Zde je také umístěn regulační člen turbíny - klapka. Poté voda vstupuje tangenciálně do oběžného kola. Oběžné kolo je tvořeno podélnými lopatkami. Voda vhodně prochází okolo středu oběžného kola a podruhé prochází oběžným kolem. Poté voda volně odtéká pod oběžným kolem. Při prvním průchodu vody oběžným kolem předá voda oběžnému kolu přibližně 4/5 své energie. Při druhém průchodu zbytek.

Obr. 5- Bánkiho turbína [9]



1.7.7. Francisova turbína

Francisovu turbínu vynalezl Američan James B. Francis (1815-1892) v roce 1848. Tato turbína vznikla zdokonalením předchozích typů turbín. Jeho hlavní inspirací se stala Fourneryonova turbína, která v té době dosahovala vysoké účinnosti 80%, avšak měla i některé nedostatky. Francis v podstatě tuto turbínu otočil. Voda vstupovala do turbíny věncem rozváděcích lopatek zvenčí do oběžného kola, které se otáčelo uvnitř. Voda z turbíny vycházela ve směru osy. Ke správnému zakřivení lopatek dospěl Francis po dlouhém testování na modelech. Evropa zpočátku tuto turbínu odmítala, protože její konstrukci dlouho nebyl nikdo schopen ověřit výpočtem. Uznávaná začala být až po mnoha vylepšeních a hlavně poté, co německý profesor R. Fink u ní roku 1878 použil natáčivé rozváděcí lopatky. Tím umožnil regulaci průtoku vody oběžným kolem. Po této přelomové události už nic nebránilo Francisově turbíně, aby se rozšířila do celého světa. [10]

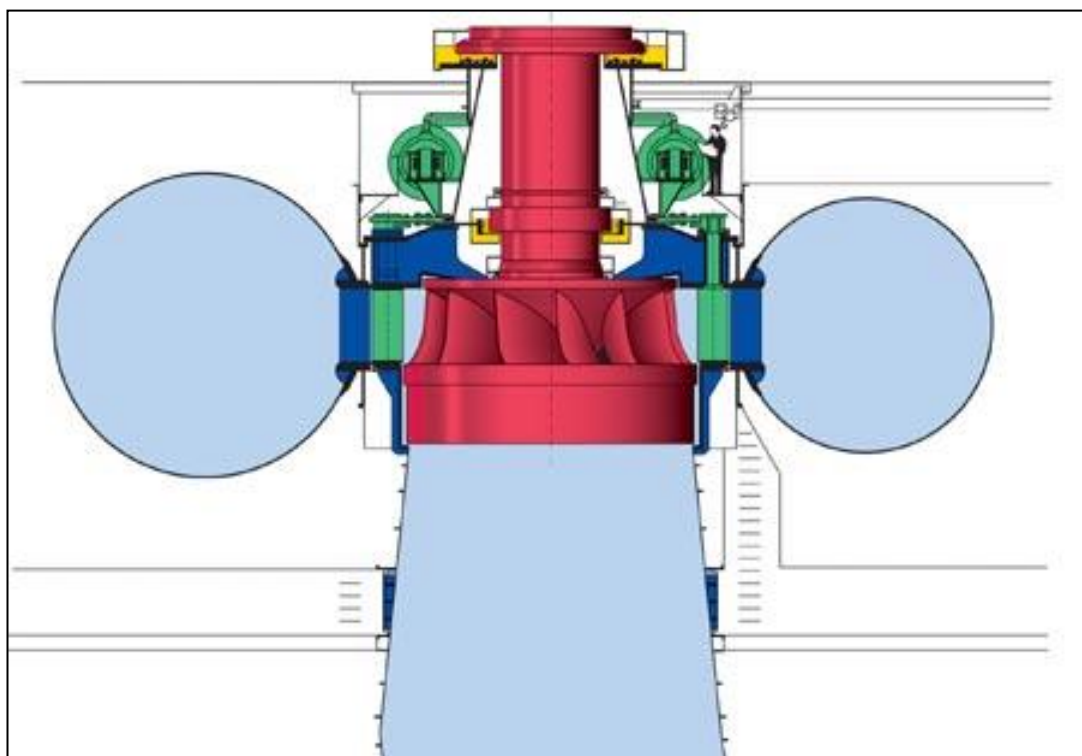
V dnešní době je nejpoužívanější vodní turbínou. Jedná se o přetlakovou (akční) turbínu. Používá se od spádu cca 3m do 650m. Velké Francisovi turbíny dosahují účinnosti až okolo 94%.

Turbínu lze rozdělit podle uložení hřídele na horizontální a vertikální. Dále pak na kašnové a spirální. Kašnové turbíny byly využívány hlavně v minulosti.

Voda přitéká přivaděčem do spirální skříně. Ve spirále je voda usměřována rozváděcími lopatkami na oběžné kolo turbíny. Oběžné kolo je svařeno z lopatek, které mají velice složitý tvar. Voda vychází z turbíny v axiálním směru do savky.

Regulace turbíny se provádí rozváděcími lopatkami.

Obr. 6- Francisova turbína [11]



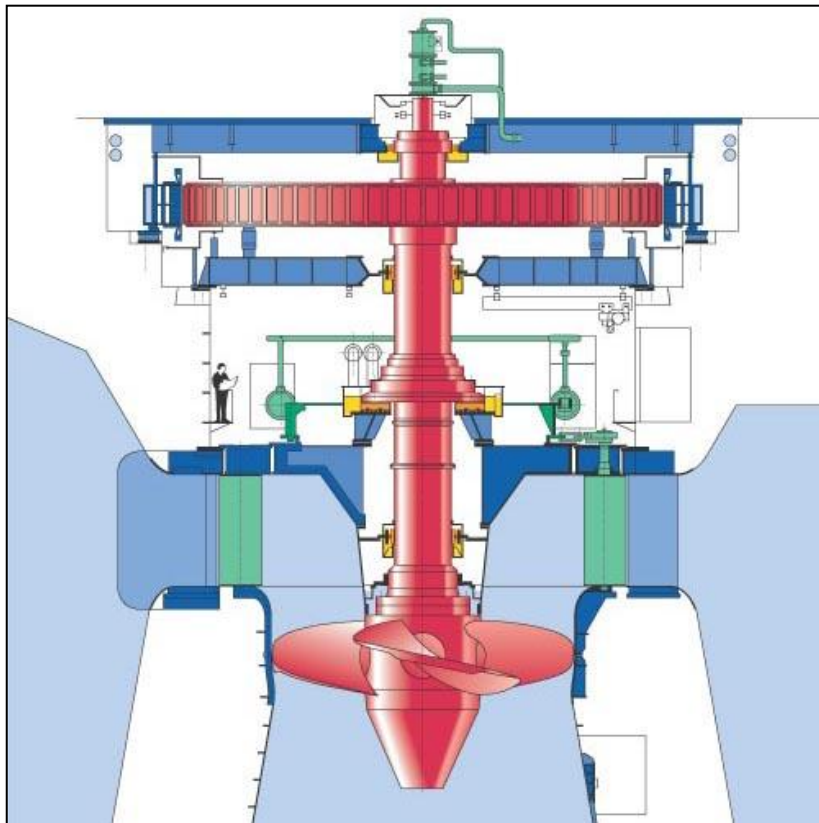
1.7.8. Kaplanova turbína

Kaplanovu turbínu vynalezl profesor Vysokého učení technického v Brně Viktor Kaplan. Turbína se používá pro spády 3 – 70m. Má vysokou účinnost. A to díky možnosti regulace jak rozváděcích lopatek, tak regulací lopatek oběžného kola. Tato dvojitá regulace umožňuje chod turbíny v širokém spektru provozních režimů bez výrazné ztráty účinnosti. Používá se hlavně na menších spádech s velkým a proměnlivým průtokem.

Určitou nevýhodou Kaplanových turbín je náchylnost ke kavitačnímu poškození. Z tohoto důvodu musí být použit na oběžné lopatky vhodný materiál a také vhodné umístění oběžného kola (tak aby byla dodržena vhodná sací výška).

Počet lopatek oběžného kola se pohybuje v rozmezí 3 – 10. Výhodou dvojité regulace je také zlepšení průtokových poměrů, snížení tlakových pulzací a zlepšení dynamického chování turbíny.

Obr. 7- Kaplanova turbína [12]



1.8. Problematika ekologie výstavby a provozu mve

Vodní elektrárny představují čistý zdroj elektrické energie, neboť: [1]

- neznečišťují ovzduší kouřem, oxidy síry a dusíku,
- těžkými kovy, atp., nedevastují a neznečišťují krajinu (těžba uhlí, uranu, jejich doprava),
- neznečišťují povrchové ani podzemní vody (těžba uranu, uhlí),
- jsou bezodpadové (popílek, radioaktivní odpad), jsou nezávislé na importu surovin ze zahraničí (ropa, plyn, uhlí, obohacený uran),
- jsou vysoce bezpečné,
- neničí trvale přírodní prostředí (trvalý zábor půdy), pouze jej transformují (vytvářením vodních ploch),
- pružným pokrýváním spotřeby a schopností akumulace energie zvyšují efektivnost elektrizační soustavy,
- vysokým stupněm automatizace přispívají k vyrovnávání změn na tocích a do určité míry napomáhají i při odvádění velkých vod,
- vytvářejí nové možnosti pro revitalizaci dotčeného prostředí – prokysličováním vodního toku.

Za hlavní pozitivní, ekologický aspekt vodních elektráren lze označit skutečnost, že každá kilowatthodina vyrobená v této elektrárně ušetří přibližně 1 kg uhlí v tepelné elektrárně. Vodní elektrárny nám v tom smyslu ročně nahrazují asi 3 mil. tun hnědého energetického uhlí, přičemž toto množství by mohlo být při plném využití hydroenergetického potenciálu téměř dvojnásobné. [1]

Vodní elektrárny – negativní dopad na životní prostředí:

- velké hydroelektrárny s akumulací nádrží značně ovlivňují krajinný ráz dané lokality. Mohou znehodnotit nebo úplně zničit ekosystém řeky, je možnost i narušení geodetických, hydrologických a klimatických podmínek v okolí elektrárny.
- negativní dopad na přírodu během výstavby
- znečištění vody ropnými produkty
- možnost snížení kyslíku ve vodě

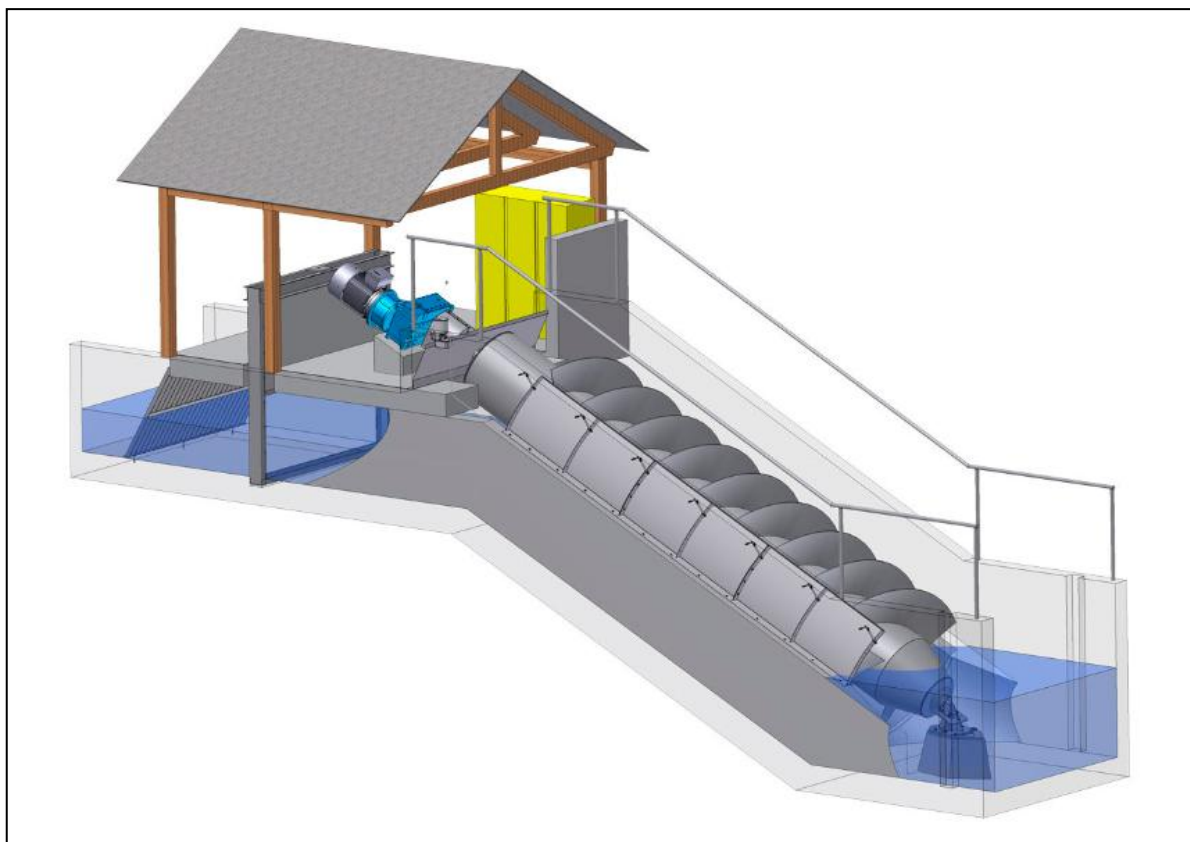
MVE se však některé negativní vlivy dopadu na životní prostředí netýkají: [1]

- jsou navrhovány a využívány vesměs jako průtočné bez akumulací nádrží, takže nenarušují říční regiony, o jejichž zachování usilují ekologové zejména v chráněných krajinných oblastech,
- navrhují a budují se u stávajících jezů, které byly postaveny v minulosti a dnes již tvoří nedílnou součást přírodního nebo urbanizovaného prostředí,
- přednostně se instalují v lokalitách zrušených mlýnů a elektráren, kde se nejedná o zásah do životního prostředí, ale naopak o obnovu původního krajinného rázu,
- energeticky využívají průtoky a odběry vody pro zásobování vodou, popřípadě jiné vodohospodářské účely,
- navrhují a budují se na výpustných zařízeních rybníků, z nichž dosud odtékala voda nevyužitá.

Zkušenosti nás tedy opravňují k závěru, že pokud je MVE správně provozována podle příslušných směrnic a zákonů, nemůže škodit, naopak prospívá životnímu prostředí nejen výrobou čisté energie, ale i tím, že čistí a provzdušňuje vodu a často napomáhá k celkové revitalizaci lokality. [1]

2. Šneková turbína pro mve

Obr. 8- Šneková turbína [13]



Typické použití šnekové turbíny je pro průtoky $Q=0,25 \dots 6,5 \text{ m}^3/\text{s}$ a spády $H=1 \dots 6,5 \text{ m}$. Šneková turbína má při návrhu tři hlavní omezení: [14]

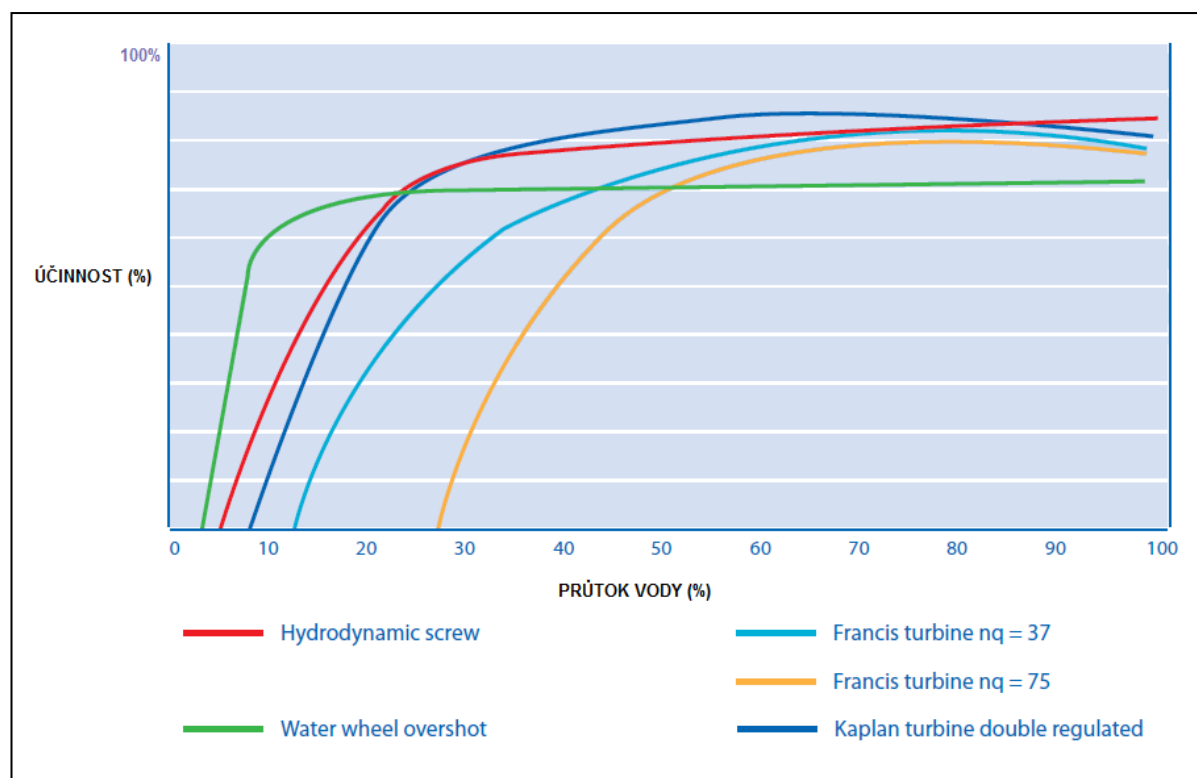
- Při spádu menším než 1m dochází k nedostatečnému vyplňování šnekovnice vodou
- Při spádu větším než 6,5m je problém délka centrální trubky → průhyb
- Při průtoku menším jak $0,25 \text{ m}^3/\text{s}$ je malá hydraulická účinnost

Šneková turbína se dovede vyrovnávat s velmi proměnlivým průtokem a spádem. Až do 30% hlnosti má turbína téměř konstantní účinnost. Tím je například vhodná pro lokality, kde je na jaře velký průtok a na podzim malý.

Hltnost turbíny roste s klesajícím sklonem β . Počet chodů šnekovnice bývá obvykle 3-5. Při počtu chodů menším než 3 má šnekovnice nízkou absorpční kapacitu. Při počtu chodů větším než 5 je šnekovnice nákladná na výrobu a také obtížně vyrobitelná. Z těchto důvodů se jiné počty chodů než 3, 4 a 5 téměř nepoužívají. Čím více chodů šnekovnice má, tím hladší a tišší je chod šnekové turbíny. Větší počet chodů také snižuje ztrátu svodovými proudy mezi rotorem a žlabem. Naopak menší počet chodů podstatně snižuje ztrátu třením na listech šnekovnice. Tato ztráta je u šnekových turbín tou největší hydraulickou ztrátou. Turbína nijak neškodí fauně a flóře vodního toku.

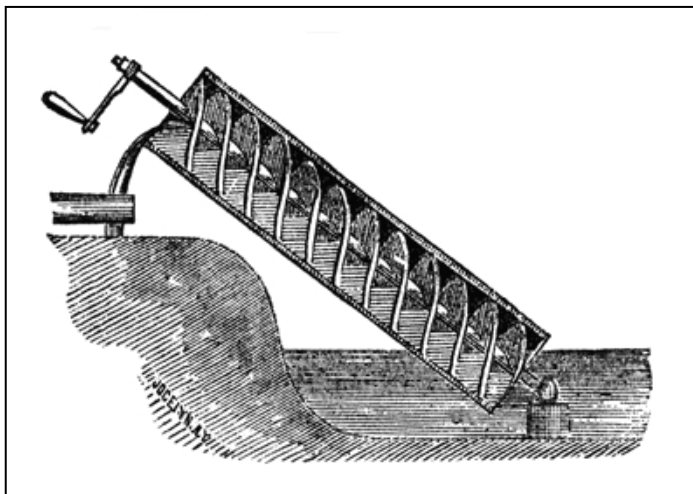
Hlavním problémem šnekových turbín je hluk, který produkují. Tento problém je řešen v jedné z následujících kapitol (2.3.).

Obr. 9 - Účinnost šnekové turbíny [15]



2.1. Historie archimedova šroubu v energetice

Archimedův šroub (šnekové čerpadlo) je jedno z nejstarších známých čerpadel (cca 287-212 př.nl.). Tento princip čerpadla poprvé popsal Archimedes, který toto zařízení viděl při svých cestách po Egyptě. Archimedes ze Syrakus byl řecký matematik, fyzik, filozof, vynálezce a astronom. Je považován za jednoho z nejvýznamnějších vědců klasického starověku, za největšího matematika své epochy a jednoho z největších matematiků vůbec. Navrhl mnoho vynálezů, sloužících pro potřeby jeho rodného města Syrakus. Jedním z těchto vynálezů je právě šnekové čerpadlo. To, jak popisuje řecký spisovatel Ahenaeus z Naucratis, vyrobil Archimedes pro obří luxusní loď Syrakúsie, která byla schopna pojmout až 600 lidí a ve výbavě měla například i tělocvičnu. Šnekové čerpadlo bylo pro loď nepostradatelným prvkem, protože se jím odstraňovala stoková voda. [16]

Obr. 10- Historické Archimédovo (šnekové) čerpadlo [16]

Teorii Archimédova šroubu se zabývali i další významní vynálezci jako např. Vitruvius, Cardano, da Vinci, Galilei, Bernoulli, ... První celý výpočet Archimédova šroubu však provedl až nizozemský vědec Muysken v roce 1932. Nejlépe popsal výpočet přepravovaného objemu a účinnost čerpadla. Na jeho výsledcích stojí všechny moderní publikace o Archimédově šroubu (např. Nagel, Rorres, Kantert).

Představa, že lze Archimédův šroub využít jako turbínu pro přeměnu energie vody na elektrickou energii, byla vyjádřena až v 90. letech 20. století. Tento vynález si patentoval Radlik.

Dalším zkoumáním Archimédova šroubu jako turbíny se zabývá český profesor Karel Brada. Ten určil hlnost šnekové turbíny, optimální otáčky a účinnost turbíny.

2.2. Princip činnosti šnekových turbín

Volně přitékající voda vstupuje do prvních závitů šnekovnice. Zde působí na zakřivenou plochu lopatek její hmotnost. Šnekovnice se vlivem působení hmotnosti vody roztáčí. Voda klesá uzavřená v jednotlivých buňkách šnekovnice. Každá buňka šnekovnice je tvořena dvěma chody šnekovnice, centrální trubkou a žlabem. Voda působící svou hmotností po celé délce šnekovnice na jejím konci vytéká do volné hladiny. Spodní hladina nesmí být příliš vysoká ani nízká. Při vysoké hladině nám klesá účinnost turbíny a při nízké hladině nám roste její hluk.

2.2.1. Výhody šnekových turbín

- Využití i velmi malých spádů, využitelnost spádu od 1m
- Poměrně vysoká nezávislost na množství protékaného množství vody; již při 30% průtoku má turbína téměř stejnou účinnost jako při nominálním 100% průtoku. Možnost až 120% průtoku turbínou při ztrátě účinnosti 5%.
- Minimální počet konstrukčních prvků → vysoká provozní spolehlivost
- Robustní, odolná a bezproblémová konstrukce
- Snadná a rychlá instalace na vybranou lokalitu
- Nižší pořizovací a provozní náklady ve srovnání s klasickými turbínami
- Nepotřebují jemné česle → není potřeba složité strojní čištění česlí, nevzniká tlaková ztráta na česlích

- Jsou šetrné k živočichům žijícím v řece (viz. 2.4)
- Okysličují řeku a tím přispívají ke zkvalitnění vody v řece
- Šetří fosilní paliva a tím i naši přírodu [14]

2.2.2. Nevýhody šnekových turbín

- Složitý a rozměrný svařenec rotoru šnekové turbíny → obtížnější výroba
- Vydávají hluk → lze částečně eliminovat vhodnými opatřeními
- Použití jen do spádu 6,5m a průtoku 6,5m³/s

2.3. Hluk šnekových turbín

Problémem šnekových turbín je hluk, který produkují. Běžné šnekové turbíny dosahují hodnot do 80dB. To v dřívější době vedlo k odstavení a úpravě některých šnekových turbín tak, aby odpovídaly hygienickým normám. U již postavených turbín je většinou možná úprava pouze úplným zakrytím šnekové turbíny. [14]

Jsou dva hlavní zdroje hluku:

- K prvnímu zdroji hluku dochází díky náhlému otevření vodní hladiny, kam vstupuje vzduch a dochází ke vzniku hluku. Tento efekt nastává zejména při nízké hladině vody a také při velkém výškovém rozdílu vody v jednotlivých buňkách šnekovnice. [14]
- Druhý zdroj hluku je způsobován interakcí (názem do hrany do vodní hladiny) mezi koncovou hranou rotoru a vodou. Tento zdroj hluku lze ovlivnit: stoupáním chodů šnekovnice S , vnějším poloměrem rotoru R_a a sklonem šnekové turbíny β . [14]

Druhotným zdrojem hluku je vstup vody do šnekovnice.

Opatření ke snížení hladiny hluku: [14]

- Zvýšení počtu chodů šnekovnice N . Tím dojde ke snížení výškových rozdílů mezi hladinami v jednotlivých buňkách šnekovnice. Toto opatření je obzvláště účelné u velmi malých šneků.
- Snížení sklonu šnekové turbíny β .
- Zaoblením nebo zalomením konců šnekovnice
- Úprava žlabu – realizace je složitá
- Proměnlivým vnějším poloměrem a stoupáním po délce šnekovnice. Toto řešení je však konstrukčně velmi komplikované
- Kompletní zakrytí šnekové turbíny – nejúčelnější, nejjednodušší, nejefektivnější. Kryt je výhodný i v zimě, když nastanou mrazy.

Prostřednictvím výše uvedených opatření a jejich kombinací lze snížit hluk šnekové turbíny na přijatelnou hladinu.

2.4. Šnekové turbíny a životní prostředí

Šnekové turbíny životní prostředí nepoškozují. Šneková turbína má otevřený pracovní prostor, kde dochází k turbulentnímu proudění a také k odstřikování, rozstřikování vody. Tímto způsobem dochází k vytvoření velkého povrchu mezi vodou a vzdušným kyslíkem. Vodní tok je takto prokysličován.

Další výhodou šnekové turbíny z pohledu životního prostředí je bezpečnost, kterou poskytují vodním živočichům. Konkrétně rybám. Šneková turbína ryby nijak nepoškozuje a umožňuje jim jejich migraci, což klasické turbíny neumožňují. Tato skutečnost byla prokázána rozsáhlými studiemi v Německu a ve Velké Británii. Turbína je pomaluběžná, ryba vpluje do buňky mezi dvěma chody šnekovnice a ta ji přepraví až do vývaru turbíny bez poškození. Zkoušky ukázaly, že turbínou může projít široké spektrum velikostí ryb. Největší ryba, která prošla turbínou, měla 98cm a 7,6kg. [17]

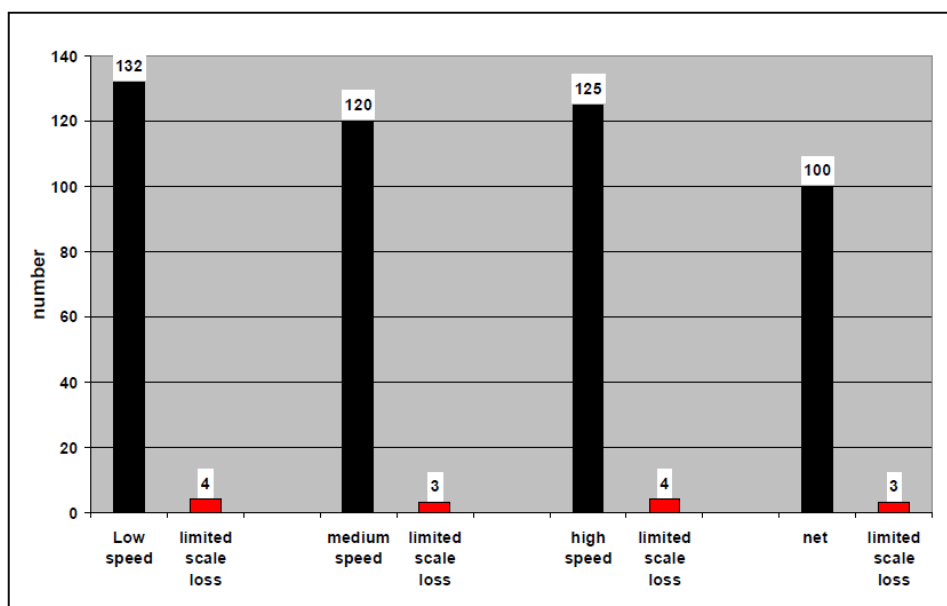
V následující části jsou uvedeny některé výsledky studie průchodu pstruhů přes turbínu. Metoda měření: ryby byly fotografovány po obou stranách a vypuštěny v měřeném souboru 8-12 kusů. Otáčky turbíny byly zaznamenávány pro každý soubor ryb. Na odtoku vody z turbíny byly ryby chytány do sítě a znovu fotografovány pro posouzení jejich stavu před a po průchodu turbínou. Následně byly ryby umístěny do nádrží a sledovány po dobu 48h pro vyloučení vnitřních zranění. Toto testování proběhlo v širokém spektru provozních otáček: [18]

Kategorie	Otáčky (ot/min)
Pomalé (low speed)	20-23
Střední (medium speed)	25-26
Rychlé (high speed)	29-31

V grafu 1 je vidět porovnání výsledků pro jednotlivé kategorie otáček. Zobrazuje nám celkový počet ryb, které prošly turbínou a počet ryb, které utrpěly drobná poranění. [18]

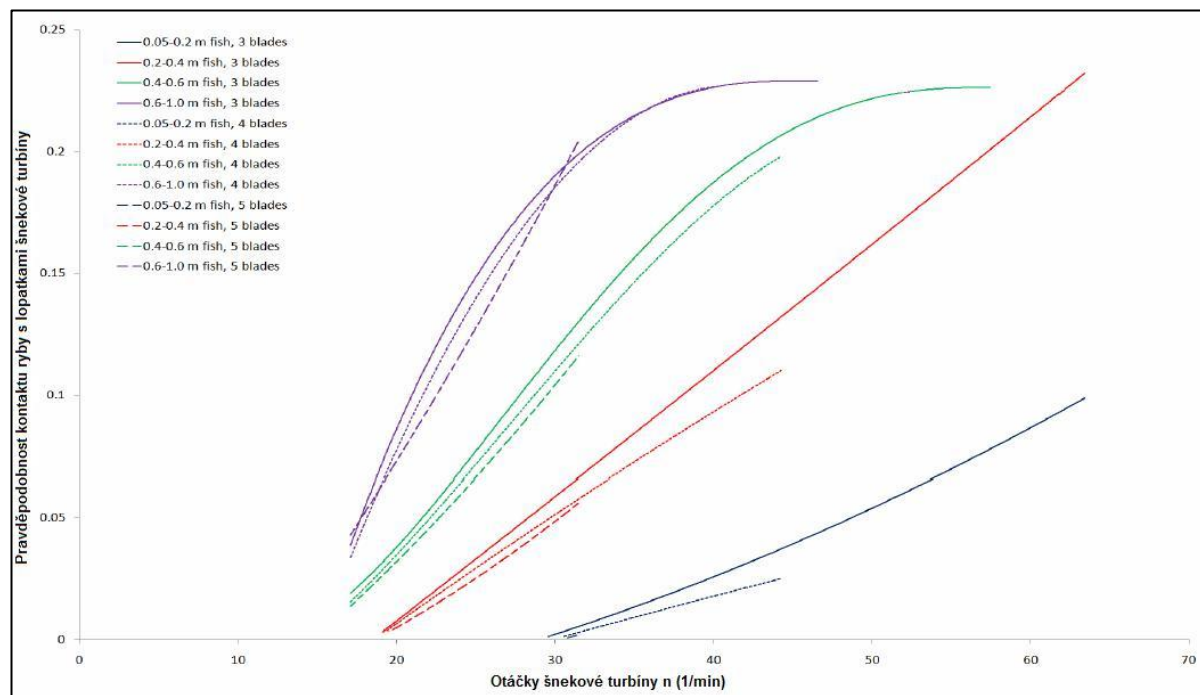
Turbína, která bude v následujících kapitolách navržena má otáčky 32 1/min a tudíž patří do skupiny s rychlými otáčkami. Pro tuto skupinu byly při testech zjištěny následující informace: turbínou prošlo 125 ryb, z toho 4 ryby utrpěly lehké poranění v důsledku kontaktu s turbínou. Zranění tedy utrpělo 3,2% ryb z celkového množství. [18]

Graf 1- Srovnání výsledku měření průchodu ryb turbínou pro jednotlivé otáčky turbíny [18]



Následující graf zobrazuje pravděpodobnost kontaktu ryby s rotorem turbíny, jak pro proměnlivé otáčky, tak pro různé počty chodů (3,4,5). Tento graf byl vytvořen na základě měření 201 šnekových turbín. Plné čáry odpovídají 3 chodům šnekovnicím, tenké přerušované 4 chodům a tlusté přerušované 5 chodům.

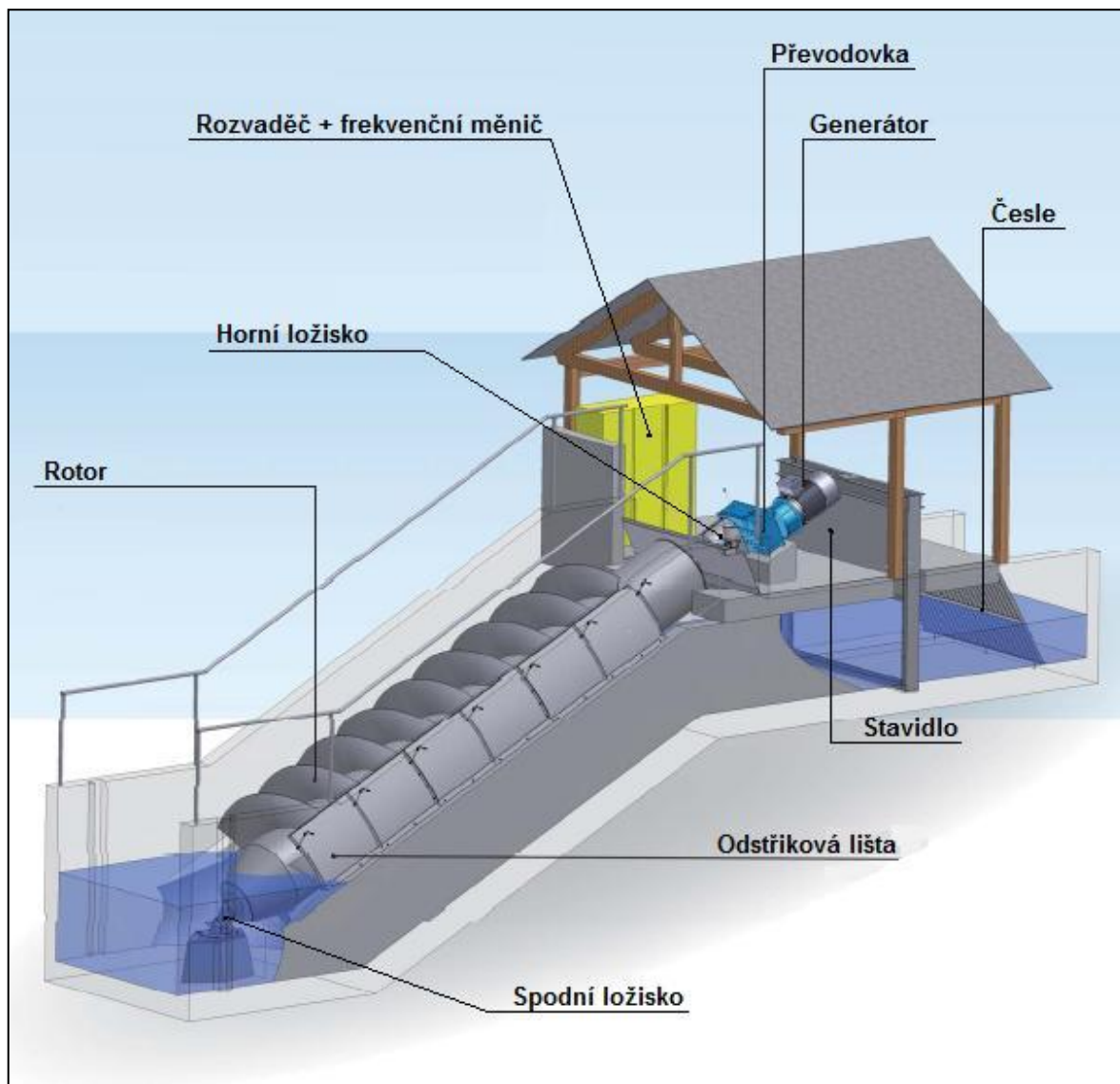
Graf 2- Pravděpodobnost kontaktu ryby a rotoru šnekové turbíny [19]



Ryba může přijít do kontaktu s lopatkami turbíny téměř výhradně buďto na vstupu vody do turbíny, nebo na výstupu z ní. Z tohoto důvodu bývají lopatky na vstupních a výstupních hranách opatřeny gumovým chráničem. [17]

2.5. Části šnekových turbín

Obr. 11- Šneková turbína - popis jednotlivých částí [13]



Šneková turbína sestává z následujících částí:

2.5.1. Rotor

Rotor je obvykle svařovaný z centrální trubky, šnekovnice a hřídelů.

Centrální trubka je volena tak, aby odpovídala normalizovaným trubkám. Je důležité vybrat rozměry trubky tak, aby byla dostatečně tuhá a nedocházelo k nepřípustnému průhybu. Průhyb je nutné ověřit výpočtem.

Šnekovnice je přímková šroubová plocha. Šnekovnice se vyrábí ze segmentů. Segment je vypálen nebo vyřezán z plechu vhodné tloušťky. Vloží se do lisovacího přípravku a vylisuje se jeho tvar. Vylisované segmenty se ustaví na centrální trubku bodovými svary. Následně se svaří vzájemně a k centrální trubce. Po svařování se šnek vyzkouší na soustřednost a staticky se vyváží. Na závěr se provedou povrchové úpravy rotoru šnekové turbíny.

2.5.2. Převodovka

Vzhledem k otáčkám rotoru cca 30-40 1/min je pro pohon generátoru nutné použití převodu. U šnekových turbín se nejvíce používá 2-3 stupňová převodovka s čelním ozubením. Tato převodovka má vysokou účinnost a dlouhou životnost. V některých případech se používá jednostupňová čelní převodovka v kombinaci s řemenovým převodem.

Rotor je spojen s převodovkou obvykle pružnou spojkou. Ta kompenzuje možné nesouososti rotoru a převodovky.

2.5.3. Ložiska

Horní ložisko bývá radiálně axiální. Obvykle je voleno dvouřadé kuželíkové ložisko spojené do O. Ložisko by mělo umožňovat náklon tak, aby kompenzovalo průhyb hřídele. Také by mělo mít co největší životnost a minimální ztráty.

Spodní ložisko bývá řešeno buď jako kluzné, nebo s ložiskem CARB, vyvinutým firmou SKF. Ložisko CARB je radiální, umožňující axiální posuv v rámci ložiskového kroužku a také náklon pro vyrovnání průhybu hřídele. Spodní ložiskové těleso je nutné vhodně utěsnit, protože je v přímém kontaktu s vodou. Ložisko se řeší jako bezúdržbové s co nejdelší životností. Mazivo používané pro mazání ložisek musí být biologicky odbouratelné.

2.5.4. Generátor

Pro šnekové turbíny se v současné době nejčastěji používá třífázový asynchronní generátor. Účinnost asynchronních generátorů se pohybuje mezi 80-95%. Zvýšení účinnosti generátoru dosáhneme, použijeme-li generátor s měděnou kotvou namísto hliníkové.

Před výběrem vhodného generátoru se musí zvolit vhodná koncepce řízení otáček šnekové turbíny. Jsou tři možnosti:

- 1) Provoz s konstantními otáčkami – obvykle je použit asynchronní generátor napřímo spojený se sítí. Musí být zajištěn konstantní průtok turbínou.
- 2) Stupňovitá změna otáček – otáčky se řídí přepínáním počtu pólů generátoru, změna otáček je provedena přepínáním počtu pólových dvojic. Používají se asynchronní generátory.
- 3) Spojitá změna otáček změnou frekvence pomocí rekuperačního frekvenčního měniče – otáčky jsou řízeny frekvenčním měničem. Používají se asynchronní generátory. Při příliš nízkých otáčkách je nutné dochlazování generátoru. Tato varianta je upřednostněna v této práci.

Provozní otáčky bývají mírně nad synchronními. Je pravidlo, že čím vyšší jsou otáčky nebo výkon generátoru, tím vyšší je účinnost generátoru. Generátor s vyššími otáčkami je menší a levnější.

Vlastnosti a výhody asynchronních generátorů:

- Jako asynchronní generátor lze použít standardní řadu asynchronních motorů
- Robustní konstrukce a nízké nároky na údržbu
- Provoz se změnou frekvence je po úpravě možný (zesílená izolace)
- Široké rozmezí synchronních otáček $n_{syn}=500, 600, 750, 1000, 1500, 3000$ ot/min

- Přepínání mezi hvězdou a trojúhelníkem pro zvýšení účinnosti v oblasti částečného zatížení
- Vysoká účinnost

2.5.5. Frekvenční měnič

Frekvenční měnič použijeme, chceme-li provozovat šnekovou turbínu v širokém rozmezí průtoků.

Výhody řešení s frekvenčním měničem:

- Stabilita otáček se zpětnou vazbou na otáčkoměr
- Provoz generátoru s velkým rozsahem otáček
- Není nutná instalace kompenzačního bloku

Nevýhody řešení s frekvenčním měničem:

- Cena
- Ztráty měniče 4-5%

2.6. Konstrukční provedení žlabu pro šnekovou turbínu

Každá z následně uvedených variant by měla být doplněna také odstříkovou lištou. Tato lišta je pouze na jedné straně žlabu. Částečně se vynechává ve spodní části žlabu tam, kde končí rotor, tak aby se včas mohly vyprázdnit buňky šnekovnice. Odstříková lišta nám usnadňuje opravy a údržbu rotoru turbíny. Z tohoto důvodu je odstříková lišta vyrobena ze segmentů a rozebíratelná.

2.6.1. S betonovým žlabem

Na šnekovnici jsou přimontovány ocelové desky, pomocí kterých je vytvořeno betonové koryto. Turbína je pomocným pohonem uvedena pomalu do rotace a žlab je v různých místech vyplňován betonem. Ocelové desky namontované na rotoru turbíny vytvářejí hladký povrch žlabu. [14]

Nevýhody:

- Vyšší ztráty třením vody o betonový žlab
- Riziko promrznutí betonu a následného vyplavování žlabu
- Nákladné čištění šneku po dokončení prací na žlabu
- Poškození protikorozi ochrany
- Delší časový úsek montáže

Výhody:

- Nižší cena

2.6.2. Se zabetonovaným ocelovým žlabem

Žlab je plechový svařenec. Rotor je dodáván a montován spolu se žlabem do předem částečně připraveného koryta. Mezera mezi šnekem a žlabem je při instalaci upravena ocelovými rozpěrkami. Žlab se po usazení následně z vnější strany zabetonuje. [14]

Nevýhody:

- Vyšší cena
- Delší časový úsek montáže

Výhody:

- Dlouhá životnost
- Minimální údržba
- Nedochozí k poškození protikorozi ochrany při montáži šnekové turbíny
- Nižší ztráty třením (než u betonu)

Obr. 12- Šneková turbína se zabetonovaným ocelovým žlabem [20]



2.6.3. Se samonosným ocelovým žlabem – tzv. kompaktní provedení

Žlab je ocelový stejně jako u předchozího řešení, ale je samonosný. Díky tomuto řešení je možnost přesného sestavení turbíny v dílně. Na místo je přivezena kamionem jako složený komplet a pouze se usadí do připraveného betonového základu. [14]

Nevýhody:

- Cena
- Možnost namrzání
- Nutná častější údržba

Výhody:

- Přesnost sestavení
- Snadná a rychlá montáž na místě

- Nedochází k poškození protikorozní ochrany šneku

Obr. 13- Šneková turbína se samonosným ocelovým žlabem [20]



2.7. možnosti řešení elektráren se šnekovou turbínou

- 1) **Pouze šnek** – hydrodynamický šnek je dodáván samostatně, na místě je vložen do připraveného koryta. Příslušenství bude samostatně namontováno uvnitř strojovny (obvykle dřevěný domek).

Obr. 14- Šneková turbína ve verzi pouze šnek [21]



- 2) **Kompaktní systém** – jedná se o kompaktní jednotku obsahující šnek, žlab, převodovku, generátor a ostatní příslušenství, která je již smontovaná ve výrobě. Někdy obsahuje i kryt nebo domek strojovny. Jednotka je přivezena do místa instalace a umístěna do vybrané lokality. Výhodou tohoto řešení je menší pracnost na místě instalace a možnost úpravy montážní výšky.

Obr. 15- Kompaktní systém šnekové turbíny [21]



- 3) **Více šnekových turbín vedle sebe** – toto řešení volíme v případě, že celkový průtok přesahuje maximální průtok pro jednu šnekovou turbínu.

Obr. 16- Více šnekových turbín vedle sebe [20]



2.8. Příklady použití šnekových turbín

Šnekové turbíny lze využít jak na řekách tak například při odtoku vody z čistíren odpadních vod, odtoku vody z papíren a z jiných průmyslových objektů, na jalových přepadech větších elektráren apod.

Šnekové turbíny jsou rozšířeny v Německu, Rakousku, Nizozemsku. Začínají se také uplatňovat i ve Velké Británii, kde jsou podporovány i královskou rodinou. Hrad Windsor je od roku 2012 napájen dvěma velkými šnekovými turbínami. Každá turbína má délku 12m, průměr 4m, váhu okolo 40tun a výkon 150kW. Celá stavba stála cca 1,7mil. liber.

Obr. 17- Šnekové turbíny pro Windsorský hrad [22]



2.9. Výrobci šnekových turbín

Výrobci ČR:

- [GESS-CZ, s.r.o.](#)

Výrobci ve světě:

- [ANDRITZ GROUP](#)
- [Spaans Babcock](#)
- [Mann Power Consulting Limited](#)
- [Rehart GmbH](#)
- [Landustrie](#)

3. Lokalita pro MVE

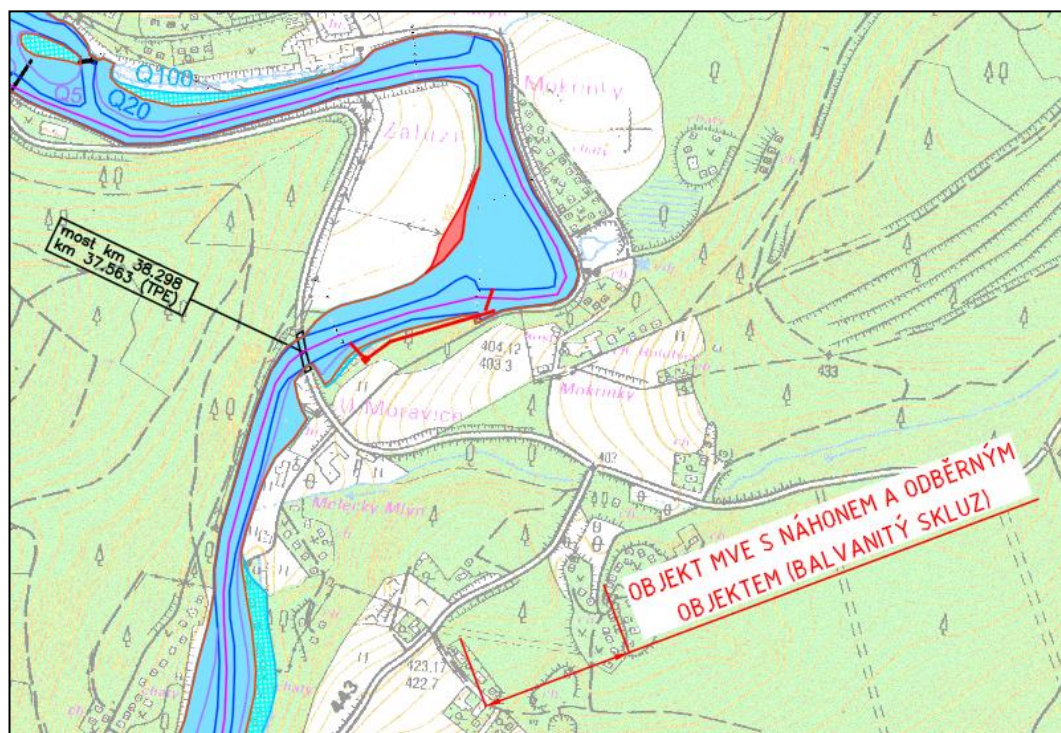
3.1. Popis lokality pro MVE

Řešená lokalita se nachází v méně zastavěné části obce Melč, místní části Mokřinky, na levém břehu vodního toku Moravice (38,37 km). Zde je starý neudržovaný vodní náhon o délce 151m. Pro umožnění využívání energetického potenciálu toku řeky Moravice je navržena výstavba MVE sestávající se z: balvanitého skluzu, odběrného objektu, opravy stávajícího náhonu vedoucího k vlastnímu objektu MVE, objektu MVE (betonová deska s dřevěnou nástavbou), vývaru turbíny a odpadního kanálu. [23]

Stavba se částečně nachází v aktivní zóně záplavového území toku Moravice (balvanitý skluz, odběrný a vyústní objekt se nachází přímo v korytě toku), je však svým charakterem vodohospodářskou stavbou, kterou v aktivní zóně záplavového území umístit lze. [23]

Spád na této lokalitě byl změřen na 1,4m.

Obr. 18- Katastrální uspořádání MVE



3.2. Hydrologické údaje o toku

Hydrologické údaje jsou základním podkladem pro návrh MVE. Používají se hydrologické údaje dle ČSN 75 1400.

V následujících tabulkách jsou zobrazeny základní hydrologické podklady dané lokality dle ČSN 75 1400. Tyto údaje poskytl Český hydrometeorologický ústav.

Tab. 2- Hydrologické údaje Mokřinky

Vodní tok:	Moravice (38,37km)
Číslo hydrologického pořadí:	2-02-02-0650
Profil:	Vodoměrná stanice Kružberk pod nádrží
Třída:	II
Plocha povodí A (km ²):	567,63
Dlouhodobý průměrný průtok za období 2005-2006 $Q_{a2005-2006}$ (m ³ .s ⁻¹):	2,84
Zůstatkový sanační průtok řekou Q_s (m ³ .s ⁻¹)	0,656

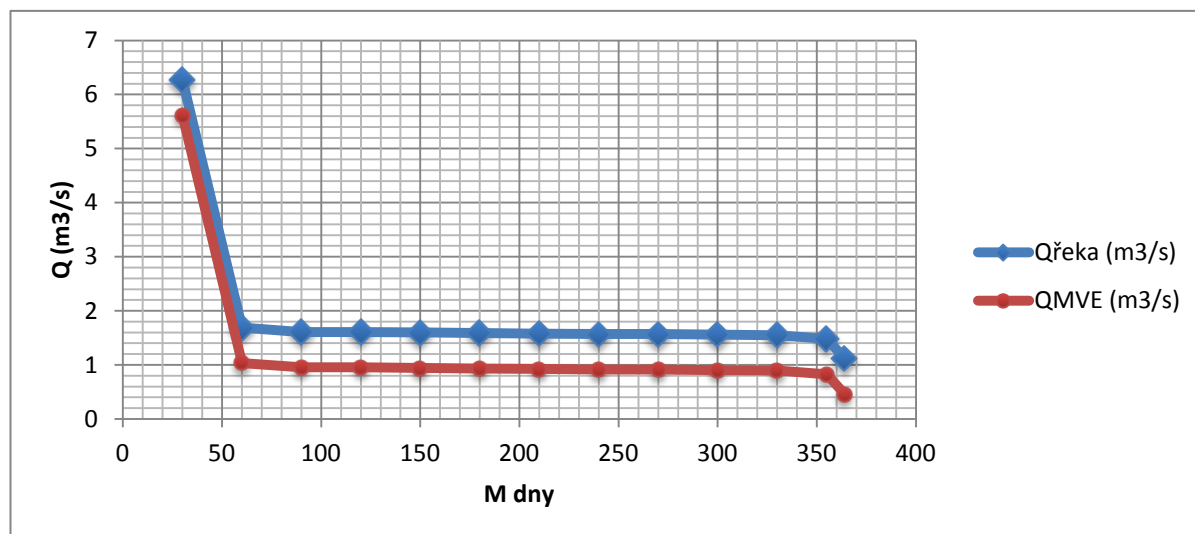
Tab. 3- Zatřídění hydrologických údajů [24]

Třída	Orientační charakteristika	Orientační hodnoty střední kvadratické chyby v %				
		Q_a	$Q_{30d}-Q_{300d}$	$Q_{330}-Q_{364d}$	Q_1-Q_{10}	$Q_{20}-Q_{100}$
II	Hydrologické údaje zpracované na základě dlouhodobých pozorování, která svojí délkou nebo kvalitou nevyhovují třídě I. Hydrologické údaje odvozené pro jiný profil na témže toku, pokud to připouští charakter odvozované veličiny, charakter vodního toku, délka a kvalita pozorování aj.	12	15	30	20	30

Tab. 4 M-denní průtoky za období 2005-2006

M-dny	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	355	364
$Q_{řeka}$ (m ³ /s)	6,27	1,69	1,61	1,61	1,6	1,59	1,58	1,57	1,57	1,56	1,55	1,48	1,12
Q_{MVE} (m ³ /s)	5,61	1,03	0,95	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91	0,91	0,90	0,89	0,82	0,46

Graf 3- M-denní průtoky



Výše uvedené údaje byly vypočteny z naměřených hodnot ve vodoměrné stanici Kružberk pod přehradou za období 2005-2006. Vystihují tedy hydrologický režim Moravice včetně vlivu nádrže Kružberk za uvedené období. [25]

M-denní průtoky ve vodoměrných stanicích Q_{Md} v $m^3 \cdot s^{-1}$ se určují z funkce překročení průměrných denních průtoků, zpracované za stejné období jako dlouhodobý průměrný roční průtok. Udávají se číselně pro vybrané hodnoty průměrné doby dosažení nebo překročení dnů v roce. [24]

Obvykle se MVE navrhuje na hodnotu průtoku, ke které dochází během 240 dní. Avšak, jak je vidět z M-denních průtoků, je na lokalitě Mokřinky průtok od 90 – 355 dní za rok ustálený okolo $0,9 m^3/s$. Protože však šneková turbína má od 30% svého jmenovitého průtoku téměř stejnou účinnost jako při 100% průtoku, je vhodné kvůli zvýšení roční výroby elektrické energie zvolit o něco vyšší průtok. Proto je turbína navrhována pro průtok $1,4 m^3/s$.

4. Návrh šnekové turbíny

Návrh šnekové turbíny byl proveden v několika alternativách a postupně optimalizován. Pro orientační výpočet výkonu MVE se šnekovou turbínou lze použít následující vztah:

$$P_{orient} = 7,5 \cdot Q \cdot H = 7,5 \cdot 1,4 \cdot 1,4 = 14,7 kW \quad (4.1)$$

4.1. Vstupní údaje pro výpočet šnekové turbíny

Na vstupních hodnotách závisí ostatní počítané parametry šnekové turbíny. Nejdůležitějšími hodnotami pro výpočet jsou průtok, spád, sklon šnekové turbíny a počet chodů šnekové turbíny. Počet chodů šnekovnice a sklon volí konstruktér na základě zkušeností.

Na výše uvedených parametrech závisí další vstupní hodnoty, které byly určeny jako optimální z literatury [14].

Některé optimální konstrukční parametry: [14]

- Optimální sklon je 22, 26, 28, 30°. Pro lokality s malým spádem a velkým průtokem používáme malý sklon. Pro velké spády a menší průtoky používáme větší sklon. Při menším sklonu roste hltlost turbíny, ale nepatrně nám klesá účinnost. U většího sklonu šneku je tomu přesně naopak.
- Optimální počet chodů šnekovnice je 3-5. S rostoucím počtem chodů klesá účinnost, ale roste možný průtok. Snížení účinnosti je dáno zvýšenou ztrátou třením kapaliny na listech šnekovnice. Větší počet chodů se doporučuje pro vyšší spády.
- Poměr poloměrů rotoru šnekové turbíny $\rho_R = R_i/R_a$ je obvykle volen v rozmezí 0,4-0,53.
- Ostatní hodnoty bezrozměrných součinitelů jsou vyčteny z literatury. Byly postupně optimalizovány tak, aby stoupání šnekovnice nebylo příliš velké. Tímto opatřením by se měl eliminovat hluk, který šneková turbína vydává, protože se bude nacházet nedaleko rekreačního objektu.

Název	Zkratka		Hodnota	Jednotky
Průtok	Q	=	1,4	m ³ /s
Spád	H	=	1,4	m
Úhel sklonu šnekové turbíny	β	=	22	°
Počet chodů šnekové turbíny	N	=	3	-
Poměr poloměrů	ρ_R	=	0,45	-
Poměr stoupání	λ	=	0,1290	-
Hydraulická účinnost šnekové turbíny	η_{WKS}	=	0,8540	-
Mechanická energie hydrodynamického šroubu	$(\lambda.v.\eta_{WKS})$	=	0,0429	-
Normalizovaný objem na jednu rotaci šneku	$(\lambda.v)$	=	0,0502	-
Plnicí poměr objemu	v	=	0,3894	-
Hustota vody	ρ	=	999,6	kg/m ³
Teplota vody	t	=	10,0	°C
Gravitační konstanta	g	=	9,81	m/s ²

4.2. Rozměrový výpočet šnekové turbíny

Výpočet vnějšího poloměru - orientační

$$R_a = \left(\frac{Q \cdot \tan(\beta)}{K_1 \cdot (\lambda \cdot \nu)} \right)^{\frac{3}{7}} = \left(\frac{1,4 \cdot \tan(22)}{(10,362 \dots 11,606) \cdot 0,0502} \right)^{\frac{3}{7}} = 0,987 \dots 1,036m \quad (4.2)$$

Výpočet vnitřního poloměru - orientační

$$R_i = \rho_R \cdot R_a = 0,45 \cdot (0,987 \dots 1,036) = 0,444 \dots 0,466m \quad (4.3)$$

Vnitřní průměr se stanoví tak, aby tato hodnota odpovídala normalizovanému rozměru potrubí: Zvoleno $D_i=0,914m$, tudíž $R_i=0,457m$. Centrální trubka je hlavním prvkem, který zajišťuje stabilitu konstrukce. Je nutné zvolit vhodnou tloušťku stěny nosné trubky. Tloušťku stěny trubky lze následně ověřit pomocí MKP. Tloušťka stěny zvolena 12mm.

Nyní se musí přepočítat vnější poloměr, aby byl zajištěn zadaný průtok

$$R_a = \frac{R_i}{\rho_R} = \frac{0,457}{0,45} = 1,015m \quad (4.4)$$

Stoupání šnekovnice

- Stoupání nesmí být příliš velké, jinak je axiální přepravní rychlost vody ve šneku příliš vysoká.
- Menší stoupání = nižší hlučnost šneku.

$$S = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_a \cdot \lambda}{\tan(\beta)} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1,015 \cdot 0,129}{\tan(22)} = 2,036m \quad (4.5)$$

Šířka mezery mezi rotorem a žlabem

- Tuto hodnotu je nutno ještě zkontrolovat s maximálním průhybem šneku.

$$s_{SP} = 0,0045 \cdot \sqrt{2 \cdot R_a} = 0,0045 \cdot \sqrt{2 \cdot 1,015} = 0,0064m = 6,4mm \quad (4.6)$$

Poloměr žlabu

$$R_{TROG} = R_a + s_{SP} = 1,015 + 0,0064 = 1,0214m \quad (4.7)$$

Objem přepravovaný rotorem na jednu otáčku

$$V_U = \frac{2 \cdot \pi^2 \cdot R_a^3}{\tan(\beta)} \cdot (\lambda \cdot \nu) = \frac{2 \cdot \pi^2 \cdot 1,015^3}{\tan(22)} \cdot 0,0502 = 2,566m^3 \quad (4.8)$$

Otáčky šnekové turbíny

$$n_{WKS} = 60 \cdot \frac{Q}{V_U} = 60 \cdot \frac{1,4}{2,566} = 32,7 \text{ min}^{-1} \quad (4.9)$$

Maximální otáčky turbíny, které by neměly být překročeny

- V případě, že jsou otáčky šnekové turbíny vyšší než maximální otáčky turbíny, je obvodová rychlost konců lopatek příliš velká a začíná docházet k odstřikování vody.

$$n_{WKS} \leq \frac{53}{(4 \cdot R_a^2)^{\frac{1}{3}}} = \frac{53}{(4 \cdot 1,015^2)^{\frac{1}{3}}} = 33,06 \text{ min}^{-1} \quad (4.10)$$

- **Vyhovuje**

Axiální dopravní rychlost vody v turbíně

- Tato rychlost je konstantní a neměla by být příliš vysoká.
- Zde je axiální dopravní rychlost relativně malá.

$$c_{AX} = S \cdot \frac{n_{WKS}}{60} = 2,036 \cdot \frac{32,7}{60} = 1,111 \text{ m/s} \quad (4.11)$$

Objem jedné buňky rotoru (ta je tvořena dvěma přilehlými chody)

$$V_s = \frac{V_U}{N} = \frac{2,566}{3} = 0,855 \text{ m}^3 \quad (4.12)$$

Hmotnost jedné buňky rotoru

- Tato hodnota se používá pro silový výpočet šnekové turbíny a dimenzování ložisek

$$m_s = \rho \cdot V_s = 999,6 \cdot 0,855 = 855,1 \text{ kg} \quad (4.13)$$

Stanovení optimální hloubky vody v přívodním kanálu

- Následující výpočet je možný dvěma přístupy. A to buď graficky, který je méně přesný, ale zato dává dobrou představu o plnění šneku. Nebo numericky Newtonovou metodou. Zde byla zvolena přesnější Newtonova metoda, která byla kontrolována s metodou grafickou.

a) Koeficient vstupní výšky κ se volí individuálně, zde byla zvolena od 0,05-1,3 s krokem 0,05

b) Spočítají se úhly α

$$\alpha_8 = 2 \cdot \arccos(1 - \kappa) \quad (4.14)$$

$$\alpha_9 = 2 \cdot \arccos\left(\frac{1 - \kappa}{\rho_R}\right) \quad (4.15)$$

c) Určí se jednotlivé oblasti a k nim vzorce pro normalizované plnění
Oblast I:

$$0 \leq \kappa \leq (1 - \rho_R) \quad (4.16)$$

$$\nu(\kappa) = \frac{\alpha_8}{2 \cdot \pi} - \frac{(1 - \kappa)}{\pi} \cdot \sqrt{1 - (1 - \kappa)^2} \quad (4.17)$$

Oblast II:

$$(1 - \rho_R) \leq \kappa \leq (1 + \rho_R) \quad (4.18)$$

$$\nu(\kappa) = \frac{\alpha_8 - \alpha_9 \cdot \rho_R^2}{2 \cdot \pi} - \frac{(1 - \kappa)}{\pi} \cdot \left[\sqrt{1 - (1 - \kappa)^2} - \sqrt{\rho_R^2 - (1 - \kappa)^2} \right] \quad (4.19)$$

Hodnoty by se neměly dostávat do III. oblasti, protože tam voda přetéká přes centrální trubku.

d) Stanovení průtoku

$$Q = \pi \cdot R_a^2 \cdot \nu(\kappa) \cdot c_{ax} \quad (4.20)$$

e) Koeficient hydraulických ztrát

$$\zeta = \left(\frac{\pi \cdot \nu}{\kappa \cdot 2 \cdot \cos(\beta)} - 1 \right)^2 \quad (4.21)$$

f) Hloubka vody v přívodním kanále pro optimální plnění šneku

$$h_2 = \kappa \cdot R_a \cdot \cos(\beta) \quad (4.22)$$

g) Nyní musíme dle známého průtoku lineární interpolací dopočítat přesně hodnoty

$$y = y_0 + (x - x_0) \cdot \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \quad (4.23)$$

h) Normalizované plnění

$$\nu = \nu_0 + (Q - Q_0) \cdot \frac{\nu_1 - \nu_0}{Q_1 - Q_0} = 0,3894 \quad (4.24)$$

i) Koeficient vstupní výšky

$$\kappa = \kappa_0 + (Q - Q_0) \cdot \frac{\kappa_1 - \kappa_0}{Q_1 - Q_0} = 0,9734 \quad (4.25)$$

j) Koeficient hydraulických ztrát

$$\zeta = \zeta_0 + (Q - Q_0) \cdot \frac{\zeta_1 - \zeta_0}{Q_1 - Q_0} = 0,1038 \quad (4.26)$$

k) Hloubka vody v přívodním kanále pro optimální plnění šneku

$$h_2 = h_0 + (Q - Q_0) \cdot \frac{h_1 - h_0}{Q_1 - Q_0} = 0,916m \quad (4.27)$$

- Zeleně označené hodnoty odpovídají hodnotám, ze kterých je provedena lineární interpolace.
- Červeně označené hodnoty odpovídají hodnotám, ze kterých je provedena lineární interpolace pro maximální průtok.

κ (-)	h_2 (m)	v (-)	Q (m ³ /s)	ζ (-)	-	α_8 (rad)	α_9 (rad)
0,05	0,0471	0,0067	0,0239	0,5996	OBLAST 1	0,6351	-
0,1	0,0941	0,0187	0,0672	0,4669	OBLAST 1	0,9021	-
0,15	0,1412	0,0341	0,1225	0,3784	OBLAST 1	1,1096	-
0,2	0,1882	0,0520	0,1871	0,3126	OBLAST 1	1,2870	-
0,25	0,2353	0,0721	0,2594	0,2612	OBLAST 1	1,4455	-
0,3	0,2823	0,0941	0,3382	0,2198	OBLAST 1	1,5908	-
0,35	0,3294	0,1175	0,4226	0,1858	OBLAST 1	1,7264	-
0,4	0,3764	0,1424	0,5119	0,1576	OBLAST 1	1,8546	-
0,45	0,4235	0,1684	0,6055	0,1339	OBLAST 1	1,9769	-
0,5	0,4705	0,1955	0,7029	0,1140	OBLAST 1	2,0944	-
0,55	0,5176	0,2235	0,8035	0,0971	OBLAST 2	2,2081	-
0,6	0,5647	0,2479	0,8912	0,0900	OBLAST 2	2,3186	0,9518
0,65	0,6117	0,2695	0,9690	0,0885	OBLAST 2	2,4265	1,3593
0,7	0,6588	0,2897	1,0416	0,0893	OBLAST 2	2,5322	1,6821
0,75	0,7058	0,3090	1,1109	0,0912	OBLAST 2	2,6362	1,9635
0,8	0,7529	0,3276	1,1779	0,0937	OBLAST 2	2,7389	2,2205
0,85	0,7999	0,3458	1,2431	0,0966	OBLAST 2	2,8405	2,4619
0,9	0,8470	0,3636	1,3072	0,0996	OBLAST 2	2,9413	2,6934
0,95	0,8940	0,3812	1,3706	0,1025	OBLAST 2	3,0416	2,9189
1	0,9411	0,3988	1,4336	0,1053	OBLAST 2	3,1416	3,1416
1,05	0,9881	0,4163	1,4966	0,1078	OBLAST 2	3,2416	3,3643
1,1	1,0352	0,4339	1,5599	0,1101	OBLAST 2	3,3419	3,5898
1,15	1,0823	0,4517	1,6240	0,1119	OBLAST 2	3,4427	3,8213
1,2	1,1293	0,4699	1,6893	0,1133	OBLAST 2	3,5443	4,0627
1,25	1,1764	0,4885	1,7562	0,1142	OBLAST 2	3,6470	4,3197
1,3	1,2234	0,5078	1,8255	0,1144	OBLAST 2	3,7510	4,6010

Hloubka vody v přívodním kanálu

$$h_1 = R_a = 1,015m \quad (4.28)$$

Šířka přívodního kanálu

$$b_1 = 2 \cdot R_a = 2 \cdot 1,063 = 2,030m \quad (4.29)$$

Výška prahu ve vstupním průřezu do turbíny

$$w = R_a - h_2 - \frac{1}{2 \cdot g} \cdot \left(\frac{Q}{h_2 \cdot b_1} \right)^2 \cdot \left[1 + \zeta - \left(\frac{h_2}{R_a} \right)^2 \right]$$

$$w = 1,015 - 0,916 - \frac{1}{2 \cdot 9,81} \cdot \left(\frac{1,4}{0,916 \cdot 2,030} \right)^2 \cdot \left[1 + 0,1038 - \left(\frac{0,916}{1,015} \right)^2 \right] \quad (4.30)$$

$$w = 0,091m$$

Výstupní výška vody bez deformace způsobené změnou tvaru vstupního průřezu

$$h_{zu} = R_a - w = 1,015 - 0,091 = 0,924m \quad (4.31)$$

Průměrná rychlost vody v přívodním kanálu

$$c_1 = \frac{Q}{2 \cdot R_a^2} = \frac{1,4}{2 \cdot 1,015} = 0,68m/s \quad (4.32)$$

Průměrná rychlost vody ve vstupním průřezu do turbíny

$$c_2 = \frac{Q}{2 \cdot R_a \cdot h_2} = \frac{1,4}{2 \cdot 1,015 \cdot 0,916} = 0,753m/s \quad (4.33)$$

Koeficient hloubky vody v odtokovém kanálu

$$\tau = (1 + \rho_R) \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\rho_R} \right)^2} - \lambda \cdot \frac{2 \cdot \pi}{N}$$

$$\tau = (1 + 0,45) \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{0,129}{0,45} \right)^2} - 0,129 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{3} = 1,119 \quad (4.34)$$

Optimální hloubka vody v odtokovém kanálu

$$h_4 = R_a \cdot \cos \beta \cdot \tau = 1,015 \cdot \cos(22) \cdot 1,119 = 1,053m \quad (4.35)$$

Průměrná rychlost vody v odtokovém kanálu

$$c_4 = c_{ax} \cdot \cos \beta = 1,11 \cdot \cos(22) = 1,03m/s \quad (4.36)$$

Průměrná šířka vývaru šnekové turbíny

$$b = \frac{\nu \cdot \pi \cdot R_a^2}{h_{4,opt}} = \frac{0,3894 \cdot \pi \cdot 1,015^2}{1,053} = 1,197m \quad (4.37)$$

Činná délka šnekové turbíny (délka šnekovnice)

$$L_B = \frac{H + R_a \cdot (\tau \cdot \cos \beta - 1) + w}{\sin(\beta)}$$

$$L_B = \frac{1,4 + 1,015 \cdot (1,119 \cdot \cos(22) - 1) + 0,091}{\sin(22)} = 4,08m \quad (4.38)$$

Celková délka šnekové turbíny (centrální trubky) je zvolena $L=6m$.

4.3. Výpočet výkonu a mechanických vlastností šnekové turbíny

Hydraulická účinnost šnekové turbíny korigovaná opravným koeficientem

- Opravný koeficient $K_2=0,945$ (-)

$$\eta_{WKS} = K_2 \cdot \eta_{WKS,st} = 0,945 \cdot 0,854 = 0,807 \quad (4.39)$$

- Testy na modelu ukázaly, že se účinnost odchyluje o 1,5%.

Teoretický hydraulický výkon dané lokality

$$P_{th} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H = 999,6 \cdot 9,81 \cdot 1,4 \cdot 1,4 = 19219,9W \quad (4.40)$$

Mechanický výkon na hřídeli turbíny

- Na tento výkon je navrhován generátor

$$P_{mech,opt} = P_{th} \cdot \eta_{WKS} = 19219,9 \cdot 0,807 = 15511,0W \quad (4.41)$$

Mechanický výkon na hřídeli turbíny vzhledem k vysoké vodě

$$P_{mech} = 1,15 \cdot P_{mech,opt} = 1,15 \cdot 15511,0 = 17837,7W \quad (4.42)$$

Krouticí moment šnekové turbíny

- Tento moment je použit i pro dimenzování spojky a převodovky.

$$M = \frac{P_{mech,opt} \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot n_{WKS}} = \frac{15511,0 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 32,7} = 4385,2N / m \quad (4.43)$$

Hmotnost centrální nosné trubky šnekové turbíny

$$\begin{aligned} m_{ZR} &= \rho_{St} \cdot L_{ZR} \cdot \pi \cdot (R_i^2 - (R_i - s_w)^2) \\ m_{ZR} &= 7860 \cdot 6 \cdot \pi \cdot (0,457^2 - (0,457 - 0,012)^2) = 1603,7kg \end{aligned} \quad (4.44)$$

Objem listů šneku

$$V_{Bl} = \pi \cdot s_{Bl} \cdot \left[R_a \cdot \sqrt{R_a^2 + \left(\frac{S}{2 \cdot \pi}\right)^2} - R_i \cdot \sqrt{R_i^2 + \left(\frac{S}{2 \cdot \pi}\right)^2} + \left(\frac{S}{2 \cdot \pi}\right)^2 \cdot \ln \frac{R_a + \sqrt{R_a^2 + \left(\frac{S}{2 \cdot \pi}\right)^2}}{R_i + \sqrt{R_i^2 + \left(\frac{S}{2 \cdot \pi}\right)^2}} \right] \quad (4.45)$$

$$V_{Bl} = 0,03m^3$$

Hmotnost listů šneku

$$m_{Bl} = \rho_{St} \cdot N \cdot \frac{L_B}{S} \cdot V_{Bl} = 7860 \cdot 3 \cdot \frac{4,08}{2,036} \cdot 0,03 = 1337 \text{ kg} \quad (4.46)$$

Celková orientační hmotnost šnekové turbíny

$$m = m_{ZR} + m_{Bl} = 1603,7 + 1337 = 2940,7 \text{ kg} \quad (4.47)$$

Tíhová síla šnekové turbíny v axiálním směru

$$F_{G,AX} = m \cdot g \cdot \sin(\beta) = 2940,7 \cdot 9,81 \cdot \sin(22) = 10806,6 \text{ N} \quad (4.48)$$

Tíhová síla šnekové turbíny v radiálním směru

$$F_{G,RAD} = m \cdot g \cdot \cos(\beta) = 2940,7 \cdot 9,81 \cdot \cos(22) = 26747,2 \text{ N} \quad (4.49)$$

Objem vody, která vytváří vzlakovou sílu na centrální nosnou trubku šnekové turbíny

$$V_{ZR,W} = \pi \cdot R_a^2 \cdot \nu_A \cdot L_B = \pi \cdot 1,015^2 \cdot 0,3894 \cdot 4,080 = 1,236 \text{ m}^3 \quad (4.50)$$

Vzlaková síla vody působící na šnekovou turbínu v axiálním směru

$$F_{A,AX} = \rho \cdot V_{ZR,W} \cdot g \cdot \sin(\beta) = 999,6 \cdot 1,236 \cdot 9,81 \cdot \sin(22) = 4541,9 \text{ N} \quad (4.51)$$

Vzlaková síla vody působící na šnekovou turbínu v radiálním směru

$$F_{A,RAD} = \rho \cdot V_{ZR,W} \cdot g \cdot \cos(\beta) = 999,6 \cdot 1,236 \cdot 9,81 \cdot \cos(22) = 11241,7 \text{ N} \quad (4.52)$$

Úhel funkčního povrchu

$$\gamma = \arctan\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot (R_a + R_i)}{2 \cdot S}\right) = \arctan\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot (1,015 + 0,457)}{2 \cdot 2,036}\right) = 66,24^\circ \quad (4.53)$$

Hmotnost buňky

$$m_s = \rho \cdot V_s = 999,6 \cdot 0,855 = 855,1 \text{ kg} \quad (4.54)$$

Tlaková axiální síla způsobená rozdílem hladin v jednotlivých kapsách šneku

$$F_{D,AX} = N \cdot \frac{L_B}{S} \cdot m_s \cdot g \cdot \sin(\beta) = 3 \cdot \frac{4,08}{2,036} \cdot 855,1 \cdot 9,81 \cdot \sin(22) = 18893 \text{ N} \quad (4.55)$$

Tlaková radiální síla způsobená rozdílem hladin v jednotlivých kapsách šneku

$$F_{D,RAD} = \frac{N \cdot \frac{L_B}{S} \cdot m_s \cdot g \cdot \sin(\beta)}{\tan(\gamma)} = \frac{3 \cdot \frac{4,08}{2,036} \cdot 855,1 \cdot 9,81 \cdot \sin(22)}{\tan(66,24)} = 8319 \text{ N} \quad (4.56)$$

Celková síla v axiálním směru působící na šnekovou turbínu

- Tato síla působí na horní radiálně-axiální ložisko

$$F_{\text{ložisko,AX}} = F_{G,AX} + F_{A,AX} + F_{D,AX} = 25157,7N \quad (4.57)$$

Celková síla v radiálním směru působící na šnekovou turbínu

$$F_{RAD} = \sqrt{(F_{G,RAD} - F_{A,RAD})^2 + F_{D,RAD}^2} = 17596N \quad (4.58)$$

Radiální síla působící na jedno ložisko

$$F_{\text{ložisko,RAD}} = \frac{F_{RAD}}{2} = \frac{18098,6}{2} = 8798,1N \quad (4.59)$$

Výpočet průměru nosných hřídelí

- Materiál hřídele ČSN 41 1500
- Dovolené napětí $\tau_D = 40\text{MPa}$

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{16 \cdot M_K}{\pi \cdot \tau_D}} = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot 4346 \cdot 1000}{\pi \cdot 40}} = 82,1\text{mm} \quad (4.60)$$

- d voleno $d = 95\text{mm}$

Nyní jsou všechny hlavní rozměry šnekové turbíny určeny a můžeme stanovit ostatní příslušenství.

4.4. Dimenzování pohonu a součástí šnekové turbíny

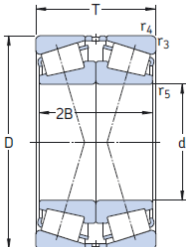
Tab.5- Generátor

Výrobce	Siemens		
Typové označení	180M – 1LE1603		
Výkon	P_N	18,5	kW
Standardní otáčky generátoru	n_{GEN}	1470	ot/min
Jmenovitý moment generátoru	M_N	120	N.m
Účinnost generátoru	η_{GEN}	92,6	%
Hmotnost generátoru	m_{GEN}	165	kg

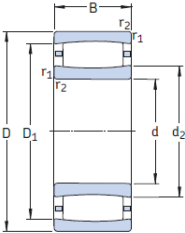
Tab. 6- Převodovka

Výrobce	Siemens		
Typové označení	FD		
Převodový poměr	i	46,6	-
Krouticí moment mezi šnekem a převodovkou	M	4385,2	N.m
Krouticí moment mezi převodovkou a generátorem	M ₄	91,4	N.m
Účinnost převodovky	η_{GETR}	97	%
Hmotnost převodovky	m _{GETR}	90	kg

Tab. 7- Horní ložisko

Výrobce	SKF			
Typové označení	Kuželíková ložiska			
Typ	32022X/QDF			
Vnitřní průměr ložiska	d	110	mm	
Vnější průměr ložiska	D	170	mm	
Šířka ložiska	T	76	mm	
Mazivo ložiska	LGGB2			
Hmotnost ložiska	m _{LOŽ}	6,3	kg	

Tab. 8- Spodní ložisko

Výrobce	SKF			
Typové označení	CARB			
Typ	*C 4033 V			
Vnitřní průměr ložiska	d	100	mm	
Vnější průměr ložiska	D	150	mm	
Šířka ložiska	B	50	mm	
Mazivo ložiska	LGGB 2			
Hmotnost ložiska	m _{lož}	3,05	kg	

Výkon na svorkách generátoru

$$P_{elek,Gen} = \eta_{getr} \cdot \eta_{gen} \cdot P_{mech} = 0,97 \cdot 0,926 \cdot 15511 = 13918,4W \quad (4.61)$$

Výkon na svorkách frekvenčního měniče

$$P_{elek,FU} = P_{elek,gen} \cdot \eta_{fu} = 13918,4 \cdot 0,96 = 13361,6W \quad (4.62)$$

Celková účinnost šnekové turbíny

$$\eta_A = \eta_{getr} \cdot \eta_{gen} \cdot \eta_{fu} \cdot \eta_{WKS} = 0,97 \cdot 0,926 \cdot 0,96 \cdot 0,807 = 0,695 = 69,6\% \quad (4.63)$$

Skluz generátoru

$$s = 1 - \frac{n_N}{n_{syn}} = 1 - \frac{1470}{1500} = 0,02 \quad (4.64)$$

Poměr – mezi-výpočet

$$\frac{2 \cdot M_K}{s_K} = \frac{M_N}{s} = \frac{120}{0,02} = 6000 N.m \quad (4.65)$$

Optimální otáčky generátoru

$$n = \frac{n_{syn}}{2} \pm \sqrt{\frac{n_{syn}^2}{4} \cdot \frac{60 \cdot P_{th} \cdot \eta_{WKS} \cdot \eta_{getr} \cdot n_{syn}}{2 \cdot \pi \cdot \frac{2 \cdot M_K}{s_K}}} = 1523,6 \text{ ot / min} \quad (4.66)$$

Převodový poměr

$$i = n_{WKS} : n_{Gen,max} = 1 : 46,6 \quad (4.67)$$

4.5. Hrubé česle

Hrubé česle budou vyrobeny z ocelové kulatiny.

Tab. 9- Hrubé česle

Průměr česle	d	25	mm
Rozteč česlí	a	150	mm
Sklon česlí	α	80	mm
Třecí koeficient pro kruhový profil	β_R	1,79	-

Ztráta spádu na česlích

$$h_{V,R} = \beta_R \cdot \left(\frac{d}{a}\right)^{4/3} \cdot \sin(\alpha) \cdot \frac{c_1^2}{2 \cdot g} = 1,79 \cdot \left(\frac{25}{150}\right)^{4/3} \cdot \sin(80) \cdot \frac{0,62}{2 \cdot 9,81} \quad (4.68)$$

$$h_{V,R} = 3,8 \text{ mm}$$

4.6. Maximální a minimální průtok turbínou

Maximální průtok

$$Q_{MAX} = 1,15 \cdot Q = 1,15 \cdot 1,4 = 1,61 m^3 / s \quad (4.69)$$

Otáčky turbíny při maximálním průtoku

$$n_{MAX} = 60 \cdot \frac{Q}{V_U} = 60 \cdot \frac{1,61}{2,566} = 37,6 ot / min \quad (4.70)$$

Minimální průtok

$$Q_{MIN} = 0,3 \cdot Q = 0,3 \cdot 1,4 = 0,42 m^3 / s \quad (4.71)$$

Otáčky turbíny při minimálním průtoku

$$n_{WKS} = 60 \cdot \frac{Q}{V_U} = 60 \cdot \frac{0,42}{2,566} = 9,8 ot / min \quad (4.72)$$

4.7. Shrnutí výsledků

Název	Značka		Hodnota	Jednotky
Spád	H	=	1,40	m
Průtok	Q	=	1,40	m ³ /s
Úhel sklonu šnekové turbíny	β	=	22	°
Počet chodů šnekové turbíny	N	=	3	-

Vnější průměr šnekovnice	D_a	=	2,030	m
Vnitřní průměr šnekovnice (průměr centrální trubky)	D_i	=	0,914	m
Činná délka šnekové turbíny (délka šnekovnice)	L_B	=	4,081	m
Celková délka nosné trubky šnekové turbíny	L_R	=	6,000	m
Přibližná hmotnost šnekovnice a nosné trubky	m_{celk}	=	2940,6	kg

Výkon na svorkách frekvenčního měniče	$P_{elek,FU}$	=	13361,7	W
Výkon na svorkách generátoru	$P_{elek,gen}$	=	13918,4	W
Výkon hydrodynamického šroubu	$P_{mech,OPT}$	=	15511,0	W

Otáčky šnekové turbíny	n_{WKS}	=	32,7	ot/min
Stoupání šnekovnice	S	=	2,036	m
Axiální dopravní rychlost vody v turbíně	c_{ax}	=	1,11	m/s
Poměr poloměrů	ρ_R	=	0,450	-
Poměr stoupání	λ	=	0,129	-
Plnicí poměr objemu	v	=	0,389	-
Normalizovaný objem na jednu rotaci šneku	$(\lambda \cdot v)$	=	0,050	-

Účinnost

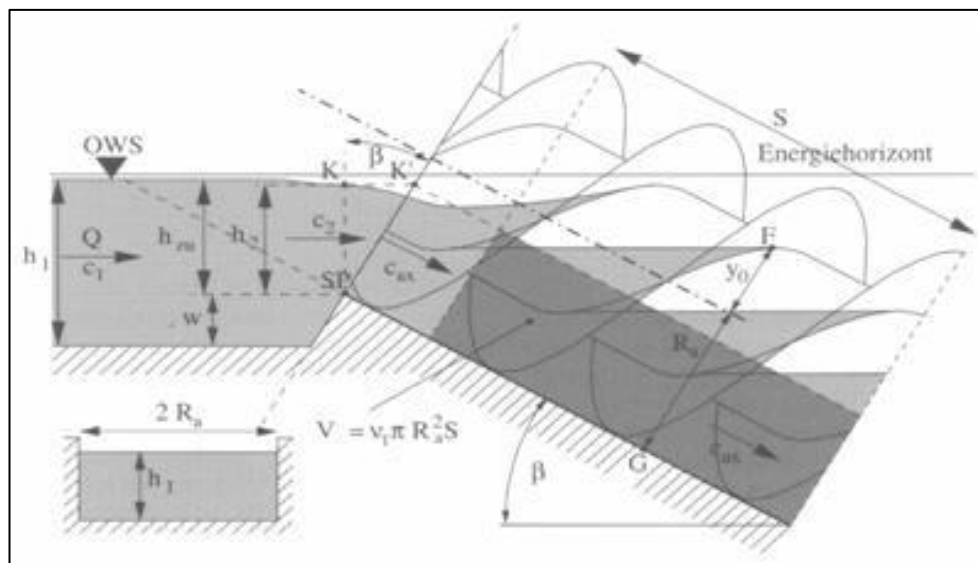
Hydraulická účinnost šnekové turbíny	η_{WKS}	=	0,807	-
Celková účinnost šnekové turbíny	η_A	=	0,695	-
Účinnost převodovky	η_{getr}	=	0,97	-
Účinnost generátoru	η_{gen}	=	0,93	-
Účinnost frekvenčního měniče	η_{fu}	=	0,96	-

Průměr nosných hřídelů šneku	d	=	100	m
Tloušťka stěny nosné trubky šnekové turbíny	s_w	=	0,012	m
Tloušťka listů šnekovnice šnekové turbíny	s_{BL}	=	0,010	m
Šířka mezery mezi žlabem a šnekem	s_{sp}	=	6,4	mm
Poloměr žlabu	R_{trog}	=	1,021	m

Přívodní kanál + horní část šnekové turbíny

Hloubka vody v přívodním kanálu	h_1	=	1,015	m
Šířka přívodního kanálu	b_1	=	2,030	m
Výstupní výška vody bez deformace způsobené změnou tvaru vstupního průřezu	h_{zu}	=	0,924	m
Vstupní výška vody s deformací	h_2	=	0,916	m
Výška prahu ve vstupním průřezu do turbíny	w	=	0,091	m
Průměrná rychlost vody v přívodním kanále	c_1	=	0,68	m/s
Průměrná rychlost vody ve vstupním průřezu do šneku	c_2	=	0,75	m/s

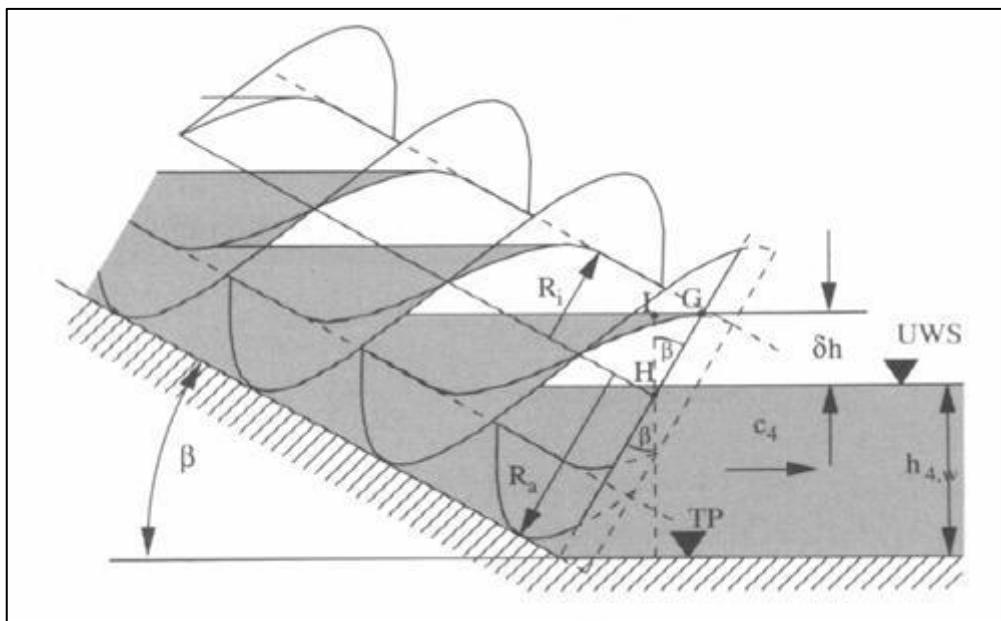
Obr. 19- Přívodní kanál + horní část šnekové turbíny [14]



Odtokový kanál + spodní část šnekové turbíny

Optimální hloubka vody v odtokovém kanálu	h_4	=	1,053	m
Průměrná šířka vývaru šnekové turbíny	b	=	1,197	m
Průměrná rychlost vody v odtokovém kanálu	c_4	=	1,03	m/s
Výškový rozdíl mezi dvěma hladinami v rotoru turbíny	δh	=	0,254	m

Obr. 20- Odtokový kanál + spodní část šnekové turbíny [14]

**Data pro generátor + převodovku**

Převodový poměr	$i =$	1: 46,547	-
Krouticí moment mezi šnekem a převodovkou	M	$=$ 4385,2	N.m
Krouticí moment mezi převodovkou a generátorem	M_4	$=$ 91,4	N.m

Silový výpočet

Tíhová síla šnekové turbíny v axiálním směru	$F_{G,AX}$	$=$ 10806,6	N
Tíhová síla šnekové turbíny v radiálním směru	$F_{G,RAD}$	$=$ 26747,2	N
Vztlaková síla vody působící na šnekovou turbínu v axiálním směru	$F_{A,AX}$	$=$ 4541,9	N
Vztlaková síla vody působící na šnekovou turbínu v radiálním směru	$F_{A,RAD}$	$=$ 11241,7	N
Tlaková axiální síla způsobená rozdílem hladin v jednotlivých kapsách šnekové turbíny	$F_{D,AX}$	$=$ 18893,0	N
Tlaková radiální síla způsobená rozdílem hladin v jednotlivých kapsách šnekové turbíny	$F_{D,RAD}$	$=$ 8319,0	N
Celková síla v axiálním směru působící na šnekovou turbínu	F_{AX}	$=$ 25157,6	N
Celková síla v radiálním směru působící na šnekovou turbínu	F_{RAD}	$=$ 17596,1	N
Radiální síla působící na jedno ložisko	$F_{RAD}/2$	$=$ 8798,1	N

5. Technicko-ekonomické zhodnocení

5.1. Ceny MVE

Ceny uvedené v tabulce jsou v Kč bez DPH.

Tab. 10- Nabídky na výrobu šnekové turbíny

	Výrobce č.1	Výrobce č.2	Výrobce č.3
Turbína + plechový žlab	866 500	546 620	568 750
Stavidlo	304 750	167 000	234 375
Česle	54 750	38 260	37 950
Převodovka + spojka + generátor	zahrnuto v ceně turbíny		197 410
Řídicí systém	328 500	327 600	190 625
Celková cena	1 554 500	1 276 890	1 209 955

Další náklady:

Tab. 11- Ostatní náklady

Náklady na dopravu	závislé na vzdálenosti dopravy (až 88 000)
Montáž a uvedení do provozu	200 000

Všichni tři výrobci nabízejí variantu turbíny s plechovým zabetonovaným žlabem. V uvedených cenách však není uvedena cena za betonové základy pod žlabem a za následnou betonáž žlabu. Toto je nutné zohlednit při porovnávání nabídek ku vlastní výrobě, která bude kompaktního typu (není potřeba betonový základ pod žlabem).

5.2. Vlastní výroba

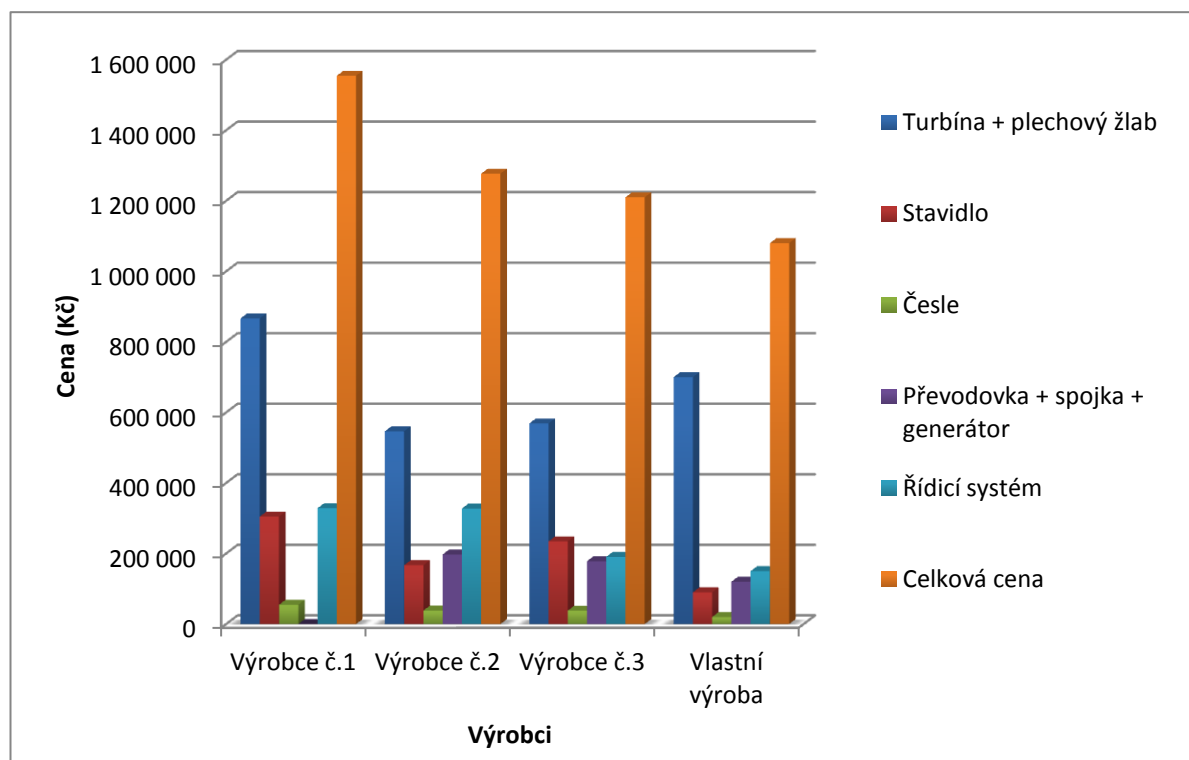
Tab. 12- Cena vlastní výroba

	Vlastní výroba
Turbína + plechový žlab	700000
Stavidlo	90000
Česle	20000
Převodovka + spojka + generátor	120000
Řídicí systém	150000
Celková cena	1 080 000

U vlastní výroby není nutné připočítávat náklady na montáž a uvedení do provozu, protože tyto úkony nebude provádět externí firma.

5.3. Srovnání jednotlivých možností

Graf 4- Srovnání jednotlivých nabídek



V grafu pro srovnání jednotlivých nabídek je zahrnuta pouze technologická dodávka zařízení. Není zde uvažováno s ostatními náklady. Cena turbíny + plechového žlabu je u vlastní výroby vyšší, protože jak již bylo zdůvodněno o kapitolu výš, jedná se o samonosný žlab a nejsou tedy nutné další práce při betonování žlabu.

Jak je vidět z grafu, největší úspora nákladů je u součástí (převodovka, spojka, generátor, řídicí systém), které stejně všechny firmy, které se zabývají výrobou šnekových turbín, překupují od jiných výrobců.

Další výrazná úspora je na stavidle, na kterém mají výrobci vysokou marži.

Poslední výraznou úsporou je u „vlastní výroby“ montáž a uvedení do provozu, kde si jednotlivý výrobci účtují přibližně 200 000Kč.

Při „vlastní výrobě“ uspoříme na technologii a montáži přibližně 320 000Kč. Tato úspora není definitivní z důvodu nezapočtení ceny za stavební úpravy pro jednotlivé varianty.

6. Závěr

V rámci této bakalářské práce byly navrženy hlavní rozměrové a ostatní parametry šnekové turbíny s hltností $1,4\text{m}^3/\text{s}$ a spádem $1,4\text{m}$. Při návrhu turbíny bylo vycházeno z dostupných hydrologických podkladů od ČHMÚ. Tato bakalářská práce je hlavním podkladem pro zpracování výrobní výkresové dokumentace pro výrobu turbíny. Montáž technologického zařízení MVE Mokřinky by měla být započata v období září-říjen 2013 a kvůli garantované výkupní ceně zkolaudována nejpozději 31.12.2013. Výkupní cena z malých vodních elektráren postavených v nových lokalitách je pro rok 2013 stanovena na 3230Kč/MWh [26].

Kromě návrhu turbíny bylo cílem bakalářské práce vyhodnocení ekonomiky její výroby. Po uvážení veškerých faktorů ovlivňujících cenu výroby šnekové turbíny vyšla jako nejlevnější varianta „vlastní výroba“. To znamená výroba rotoru + plechového žlabu na základě vlastní výkresové dokumentace a nakoupení jednotlivých komponentů (generátor, převodovka, ...) od různých výrobců. Cena takto sestavené turbíny je 1 080 000Kč.

Turbína ročně vyprodukuje přibližně 102 551kW/h. Roční generovaný zisk MVE Mokřinky je cca 331 000Kč. To znamená, že při variantě „vlastní výroba“ bude elektrárna zaplácena za 3,3 roku.

7. Použité informační zdroje

1. **Motlík, Jan, a další.** *Obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich uplatnění v České Republice*. Praha : ČEZ, a.s., 2003. str. 141.
2. **ČSN 75 2601.** Malé vodní elektrárny - základní požadavky. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010. str. 28.
3. **Ministerstvo životního prostředí.** Malé vodní elektrárny. *Ministerstvo životního prostředí*. [Online] [Citace: 7. 4 2013.] http://www.mzp.cz/cz/male_vodni_elektrarny.
4. **Hes, Stanislav.** Hydroenergetické využití velmi malých spádů v závislosti na ekonomické efektivitě. [PDF]. Praha : ČVUT v Praze. str. 21.
5. **Tennessee valley authority.** Hydroelectric power. *Hydroelectric power*. [Online] TVA. [Citace: 13. 4 2013.] <http://www.tva.gov/power/hydro.htm>.
6. **LAIKA, Viktor.** *Abeceda malých vodních pohonů*. [Online] [Citace: 16. 3 2013.] Dostupné z: <<http://mve.energetika.cz/>>.
7. **Ritz Atro.** *Die Wasserkraftschnecken*. [Online] [Citace: 16. 1 2013.] www.ritz-atro.de. PDF.
8. **Nechleba, Miroslav.** *Vodní turbíny, jejich konstrukce a příslušenství*. 1. vydání. Praha : autor neznámý, 1954. str. 546.
9. *Hydraulic water turbine*. [Online] [Citace: 2. 4 2013.] http://members.tripod.com/hydrodocs_1/turbines.html.
10. *Turbína*. [Online] [Citace: 13. 4 2013.] <http://www.quido.cz/objevy/turbina.htm>.
11. **Wikipedia the free encyclopedia.** *Francis turbine*. [Online] Wikipedia the free encyclopedia, 16. 12 2005. [Citace: 16. 4 2013.] http://en.wikipedia.org/wiki/File:M_vs_francis_schnitt_1_zoom.jpg.
12. **Schweiss, Markus.** Kaplanova turbína. *Wikipedie otevřená encyklopedie*. [Online] Wikipedie otevřená encyklopedie, 13. 12 2005. [Citace: 14. 4 2013.] http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:S_vs_kaplan_schnitt_1_zoom.jpg.
13. **Direct Idustry.** Andritz AG - Pumps Division. *Direct Industry*. [Online] Direct Industry, 31. 1 2013. [Citace: 6. 4 2013.] <http://www.directindustry.com/prod/andritz-ag-pumps-division/hydrodynamic-screws-26150-914659.html>.
14. **NUERNBERGK, Dirk Michael.** *Wasserkraftschnecken: Berechnung und optimaler Entwurf von archimedischen Schnecken als Wasserkraftmaschine*. Detmold : Verlag Moritz Schäfer GmbH & Co. KG, 2012. str. 256. ISBN: 978-3-87696-136-1.
15. **Andritz.** *Hydrodynamic screw*. [Online] [Citace: 9. 5 2013.] <http://grz.g.andritz.com/c/com2011/00/02/13/21383/1/1/0/325941156/oi-atro-hydrodynamic-screws-en.pdf>.
16. **Wikipedia.** Archimedes screw. *Wikipedia The Free Encyclopedia*. [Online] Wikipedia The Free Encyclopedia, 18. 6 2007. [Citace: 6. 4 2013.] http://en.wikipedia.org/wiki/File:Archimedes_screw.JPG.

-
17. *Key Benefits*. [Online] MannPower, 2009. [Citace: 19. 3 2013.] <http://www.mannpower-hydro.co.uk/benefits.php>.
18. **Fishtek consulting**. *Fish Monitoring and Live Fish Trials. Archimedes Screw Turbine, River Dart*. [Online] Mann Power Consulting Ltd., 11 2007. [Citace: 19. 3 2013.] <http://www.mannpower-hydro.co.uk/attachments/research/archimedean-screw-fish-passage-test-results-phase-1.pdf>.
19. **Kibel, Pote a Coe, Toby**. Archimedean Screw risk assessment, strike and delay probabilities. [PDF]. místo neznámé : Fishtek consulting, 2011. str. 36.
20. **Mann Power CONSULTING LIMITED**. *Studies*. [Online] [Citace: 15. 5 2013.] [http://www.mannpower-hydro.co.uk/attachments/casestudies/dauntsey-job-sheet-1110\(amended\).pdf](http://www.mannpower-hydro.co.uk/attachments/casestudies/dauntsey-job-sheet-1110(amended).pdf).
21. **Rehart GMBH**. *Archimedean screw turbines*. [Online] [Citace: 15. 5 2013.] <http://rehart.de/fileadmin/daten/pdf/Datenblaetter-WK/WKdatasheetsBild.pdf>.
22. **Cohen, Tamara**. *Mail Online*. [Online] Mail Online, 21. 12 2011. [Citace: 6. 4 2013.] <http://www.dailymail.co.uk/news/article-2076675/Merry-waves-Windsor-Green-Queen-uses-water-power-run-castle.html>.
23. **BOHÁČ, Marek**. *Průvodní zpráva B*. [Interní dokumentace k MVE] Opava : Ing. Marek Boháč, 2011.
24. **ČSN 75 1400**. Hydrologické údaje povrchových vod. *Česká technické norma*. Praha : Český normalizační institut, 10 1997. str. 16.
25. **Český hydrometeorologický ústav**. *Hydrologické údaje povrchových vod*. Ostrava : Český hydrometeorologický ústav, 2008.
26. **Energetický regulační úřad**. Energetický regulační věštník. *ERU*. [Online] 27. 11 2012. [Citace: 16. 3 2013.] Dostupné z: <http://www.eru.cz/user_data/files/ERV/ERV8_2012.pdf>.
27. **BLÁHA, Jaroslav a BRADA, Karel**. *Příručka čerpací techniky*. 1.vydání. Praha : České vysoké učení technické, 1997. str. 289. ISBN: 80-01-01626-9.
28. **Adam, Roman**. *Je hydropotenciál v ČR skutečně vyčerpán?* [Online] Asociace hydroenergetiků ČR, 30. 1 2011. [Citace: 19. 3 2013.] <http://oze.tzb-info.cz/vodni-energie/7109-je-hydropotencial-v-cr-skutecne-vycerpan>.

Seznam obrázků

Obr. 1- Vodní elektrárna [5].....	19
Obr. 2- Jezová vodní elektrárna [6].....	21
Obr. 3- Derivační vodní elektrárna s beztlakovým přivaděčem [6]	22
Obr. 4- Oblast použití turbín pro MVE [7]	23
Obr. 5- Bánkiho turbína [9].....	25
Obr. 6- Francisova turbína [11]	26
Obr. 7- Kaplanova turbína [12]	27
Obr. 8- Šneková turbína [13].....	29
Obr. 9 - Účinnost šnekové turbíny [15].....	30
Obr. 10- Historické Archimedovo (šnekové) čerpadlo [16].....	31
Obr. 11- Šneková turbína - popis jednotlivých částí [13]	35
Obr. 12- Šneková turbína se zabetonovaným ocelovým žlabem [20].....	38
Obr. 13- Šneková turbína se samonosným ocelovým žlabem [20]	39
Obr. 14- Šneková turbína ve verzi pouze šnek [21]	39
Obr. 15- Kompaktní systém šnekové turbíny [21]	40
Obr. 16- Více šnekových turbín vedle sebe [20].....	40
Obr. 17- Šnekové turbíny pro Windsorský hrad [22].....	41
Obr. 18- Katastrální uspořádání MVE	42
Obr. 19- Přívodní kanál + horní část šnekové turbíny [14].....	58
Obr. 20- Odtokový kanál + spodní část šnekové turbíny [14]	59
Obr. 21- šneková turbína rozměry [14]	60

Seznam grafů

Graf 1- Srovnání výsledku měření průchodu ryb turbínou pro jednotlivé otáčky turbíny [18]	33
Graf 2- Pravděpodobnost kontaktu ryby a rotoru šnekové turbíny [19]	34
Graf 3- M-denní průtoky	44
Graf 4- Srovnání jednotlivých nabídek	62

Seznam tabulek

Tab. 1- Třídění MVE podle instalovaného výkonu [2]	22
Tab. 2- Hydrologické údaje Mokřinky	43
Tab. 3- Zatřídění hydrologických údajů [24]	43
Tab. 4 M-denní průtoky za období 2005-2006.....	43
Tab.5- Generátor	53
Tab. 6- Převodovka	54
Tab. 7- Horní ložisko.....	54
Tab. 8- Spodní ložisko.....	54
Tab. 9- Hrubé česle	55
Tab. 10- Nabídky na výrobu šnekové turbíny	61
Tab. 11- Ostatní náklady	61
Tab. 12- Cena vlastní výroba	61

Seznam použitých zkratk

Název	Zkratka
Malá vodní elektrárna	MVE
Vodní elektrárna	VE
Česká Republika	ČR
Energetický regulační úřad	ERU