



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

HYDROKINETICKÉ TURBÍNY

HYDROKINETIC TURBINES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Radim Zrebný

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Radim Zrebný**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

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:

Hydrokinetické turbíny

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Hydrokinetické turbíny nevyužívají potenciální energii vody, ale kinetické energie vodního proudu, do kterého je turbína vložena, tzn. podobný princip jako větrná turbína. Lze ji využít u řek v místech, kde není dostatečný spád, v mořských proudech, ale i v některých technologických procesech (např. výstupní kanál papírenského stroje, odtok z čistírny odpadních vod, apod.).

Cíle bakalářské práce:

Cílem je nalezení efektivního řešení pro využití kinetické energie vodního proudu ve vybrané lokalitě. Parciální cíle: rešerše stávajících typů hydrokinetických turbín, rozbor dosažitelné účinnosti (stupně energetické přeměny) různých typů hydrokinetických turbín, návrh hydrokinetické turbíny pro vybranou lokalitu/provoz.

Seznam doporučené literatury:

BEDNÁŘ, Josef. Turbíny: (malé vodní elektrárny). Českovice: Marcela Bednářová, c2013. ISBN 978-80-905437-0-6.

LAWS, Nicholas D. a Brenden F. EPPS. Hydrokinetic energy conversion: Technology, research, and outlook. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016, 57, 1245–1259.

GRABBE, Marten. Hydro-Kinetic Energy Conversion. Uppsala, 2013. Dizertační práce. Uppsala Universitet.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se věnuje problematice hydrokinetických turbín. První část krátce popisuje potencionální místa využití. Druhá část obsahuje rešerši dostupných technologických řešení, principy jejich fungování a vlastnostmi, přičemž základní rozdělení je podle osy rotace. Tato část je zakončena porovnáním dosažené účinnosti. Třetí část se zabývá základními principy proudění a limity dosažitelné energetické přeměny. Poslední kapitola se věnuje návrhu turbíny pro papírenský stroj. Návrh byl stanoven iteračním způsobem vycházejícím z teorie osamoceného profilu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Hydrokinetická turbína, Betzův limit, teorie osamoceného profilu

ABSTRACT

Bachelor thesis concerns about problematics of hydrokinetic turbines. First part briefly describes potential areas of utilization. Second chapter includes research of available technical solutions, its operation principles and characteristics, while the main distribution is according to the position of the axis of rotation. Following part describes basic principles of the flow theory and achievable limits of energy conversion. Last part deals with design of hydrokinetic turbine used in paper production. The design has been estimated via Blade Element Theory.

KEY WORDS

Hydrokinetic turbine, Betz limit, Blade Element Theory

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ZREBNÝ, Radim. Hydrokinetické turbíny [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/121777>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Pavel Rudolf.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Já, Radim Zrebný, prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně, s uvedením všech použitých pramenů a literatury, pod vedením vedoucího práce doc.Ing. Pavla Rudolfa,PhD.

V Brně 26.6.2020

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce panu doc.Ing.Pavlu Rudolfovi za jeho cenné rady a trpělivost. Poděkování také patří rodičům, kteří mne ve studiu vždy podporovali.

OBSAH

1.	ÚVOD	15
2	ZDROJE ENERGIE	16
2.1	Oceánské proudy	16
2.1.1	Energetický potenciál	16
2.1.2	Prostředí	16
2.1.3	Golfský proud	16
2.2	Přílivové proudy	17
2.2.1	Orkneje	17
2.2.2	Normanské ostrovy	18
2.3	Vnitrozemí	18
3	TYPY KINETICKÝCH TURBÍN	19
3.1	Axiální turbíny	19
3.1.1	Atlantis AR1500	19
3.1.2	SeaGen	21
3.1.3	Zeusova turbína	21
3.1.4	Wellsova turbína	22
3.1.5	Mikroelektrárna Waterlilly	23
3.2	Cross-flow turbíny	24
3.2.1	Darrieova turbína	24
3.2.2	Savoniův rotor	24
3.2.3	Schneiderova turbína	25
3.3	Srovnání dosažené účinnosti	26
4	TEORIE PROUDĚNÍ	27
4.1	Energie proudu	28
4.2	Obtékání těles	28
4.3	Betzův limit	30
5	NÁVRH PRO DANOU LOKALITU	35
5.1	Výroba papíru	35
5.2	Teorie osamoceného profilu	36
5.3	Volba vhodného profilu	38
5.4	Postup výpočtu	39
5.4.1	Schéma uspořádání a model rotoru	42
6	ZÁVĚR	43

7	POUŽITÁ LITERATURA	44
8	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	48

1. ÚVOD

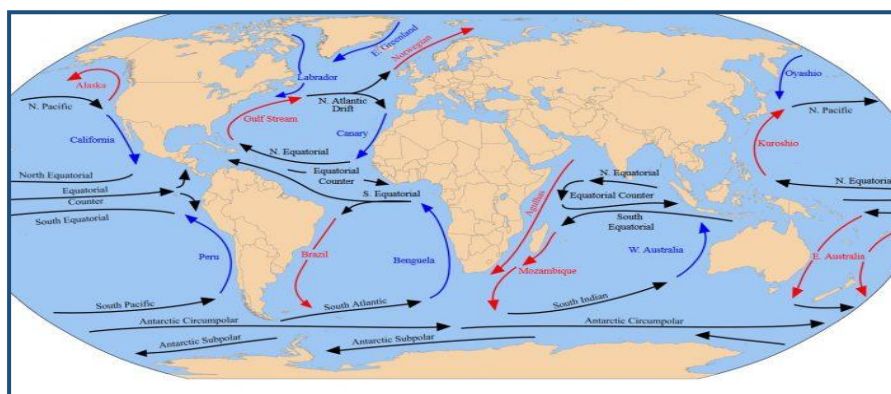
S rostoucí spotřebou elektrické energie a dnes již těžce popíratelným oteplováním zemské atmosféry roste i poptávka po obnovitelných zdrojích, které jsou šetrnější k prostředí než stávající zařízení čerpající energii z fosilních paliv. Plánované zdanění emisí vytváří dobré podmínky pro rozvoj netradičních způsobů výroby elektřiny. Jednotlivé státy a výzkumná centra proto začínají hledat nová technologická řešení. Jednou z možností pro rozšíření energetického portfolia může být přeměna hydrokinetické energie, která až donedávna nehrála významnou roli. Tento princip využívá volného proudu vody podobně jako větrné elektrárny proudu vzduchu.

Prvotní část práce se zaměřuje na krátký popis některých míst, které mohou mít pro zisk energie význam a na kterých již bylo dosaženo zdárných výsledků. Další část se věnuje dostupným technickým řešením, jejich vlastnostem a specifikům, přičemž hlavní rozdělení jednotlivých typů je určeno podle orientace osy rotace. Třetí část práce se zabývá poznatky z teorie proudění a limity, kterých je možné dosáhnout. Z této kapitoly vychází část poslední, která se zaměřuje na návrh oběžného kola axiální turbíny a její lopatky pro papírenský stroj.

2 ZDROJE ENERGIE

2.1 Oceánské proudy

Oceánské proudy jsou vyvolány složeným pohybem Země kolem své osy a zároveň kolem Slunce. Tento pohyb ovlivňuje také vzdušné proudění a vytváří pravidelné větry (pasáty), které v přízemních vrstvách atmosféry působí na hladiny oceánů. Tím vznikají driftové proudy kolem rovníku. Setrvačností driftových proudů vznikají tzv. volné proudy.[1]



Obrázek 1 - Systém oceánských proudů [2]

2.1.1 Energetický potenciál

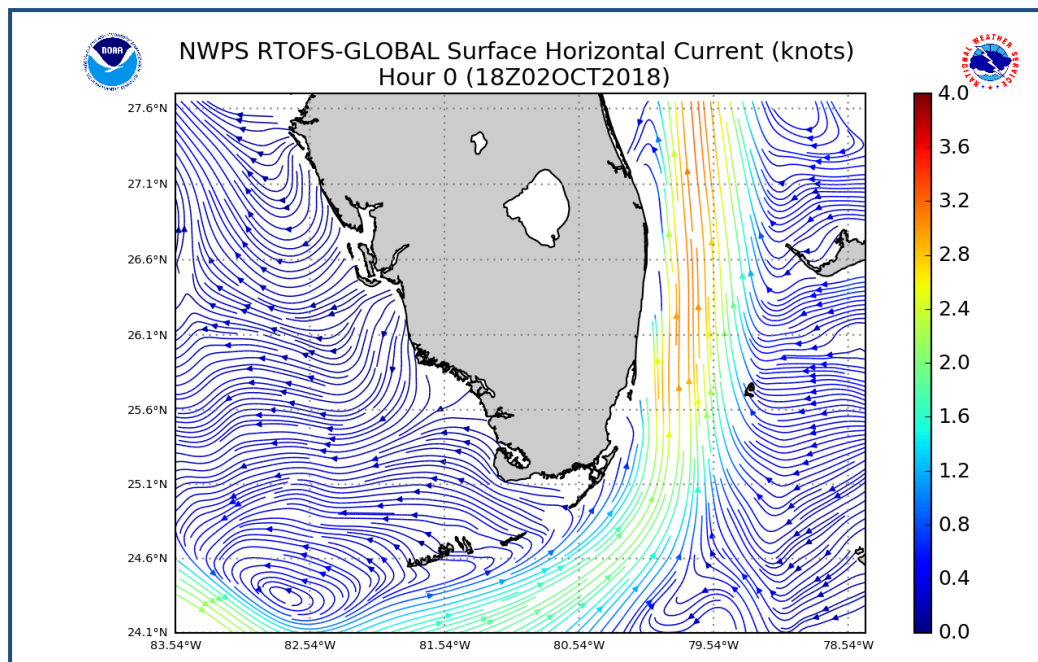
Celkový energetický potenciál oceánských proudů je odhadnut na 5000 GW, přičemž energetická hustota dosahuje v některých místech hodnot až k 15 kW/m^2 . V porovnání s ostatními obnovitelnými zdroji nabízí mořské proudy příslib pravidelné a předvídatelné energie s vyšší hustotou, tedy s vyšším množstvím energie vztažené na plochu, kterou prochází. Energie proudů je na většině své délky rozptýlená, ale soustředí se na řadě míst, kde jsou toky omezeny topografiemi, jako jsou průlivy, pobřeží a systémy ostrovů.[3]

2.1.2 Prostředí

Prostředí mořských hlubin má několik technických problémů, kvůli kterým je obtížné v něm cokoli vyvíjet, či budovat. Vysoce korozní povaha mořské vody, extrémní tlak a tendence mořských organismů ulpívat na površích zařízení klade důraz na kvalitu a životnost. Jakákoliv vada, která znemožní funkčnost turbín, by mohla znamenat, že kvůli nákladné opravě by výnos elektráren byl nižší než náklady na její provoz. Náklady také rostou se vzdáleností od pobřeží. Z těchto důvodů je velmi obtížné až nemožné využít některé mořské proudy a je třeba hledat takové proudy, které jsou pro člověka lépe dosažitelné.[4]

2.1.3 Golfský proud

Golfským proudem protéká 50krát více vody než ve všech světových řekách dohromady. Vzniká v Mexickém zálivu a teče podél Floridy v některých místech pouze 8 km od pobřeží, relativně blízko hustě zabydlené oblasti Miami s vysokou poptávkou po energii. Bylo zjištěno, že v některých místech má konstantní rozložení výkonu s hodnotou kolem 1 kW/m^2 . Pokud bychom byli schopni získat alespoň 1/1000 energie Golfského proudu, dokázali bychom pokrýt 35% spotřeby energie státu Florida. [4, 5]



Obrázek 2 - Rychlost Golfského proudu u pobřeží Floridy [6]

V nedávné době firma Ocean Based Perpetual Energy, zabývající se vývojem hydrokinetických zařízení, ve spolupráci s Floridskou Atlantickou Universitou úspěšně otestovala své 3 turbíny. V roce 2021 by měla začít instalace těchto zařízení, která by vytvořila pole turbín s výkonem až 5MW. [7]

2.2 Přílivové proudy

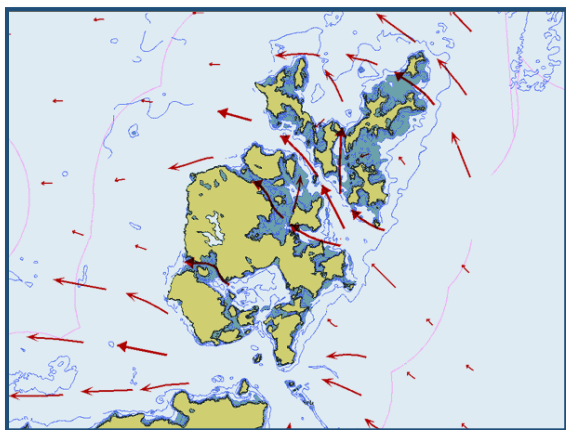
Jsou vyvolány gravitační silou Měsíce a Slunce. Tyto síly vytvářejí proudy, které mění svou rychlost a směr v průběhu sezóny, dne i několika minut. Můžeme si je představit jako jazyky proudů, mezi kterými se mohou vyskytovat i víry a protiproud. Na severní polokouli pozorujeme nejvýraznější příliv na jaře, když jsou středy Slunce, Země i Měsíce v jedné přímce. Naopak nejslabší příliv nastává na podzim, když jsou tyto středy v pravém úhlu. Díky tomu jsme schopni předpovědět směr i rychlost proudění. [1]

Nejlepší využití pro tento zdroj energie najdeme v místech, kde nastává výrazný rozdíl hladin během přílivu a odlivu a tam, kde topografie mořského dna a pobřeží zvyšuje rychlost proudu. V současné době probíhají studie na několika místech ve světě, přičemž jedny z nejlepších výsledků dosahují výzkumníci kolem Velké Británie na Orknejských a Normanských ostrovech.

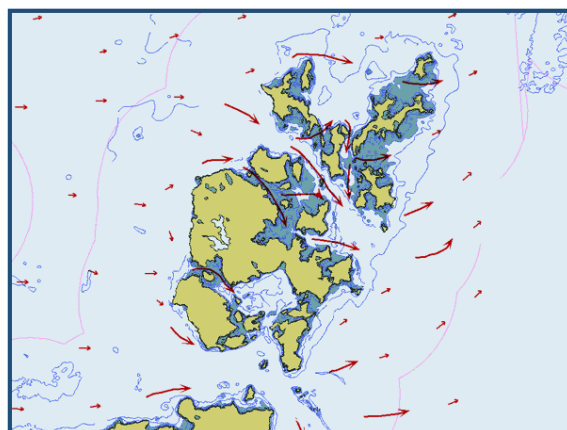
2.2.1 Orkneje

Orkneje jsou souostroví skládající se z 70 ostrovů, které spolu se Shetlandy tvoří Severní ostrovy Skotska. Díky jejich topografickému uspořádání zde vznikají silné přílivové proudy, které na jaře dosahují v některých místech rychlosti až 5m.s^{-1} . [9]

V dnešní době zde Evropské centrum pro mořskou energetiku (EMEC) vytváří mezinárodní standardy pro přílivovou energii a umožňuje 97 firmám z celého světa testovat a vyvíjet svoje zařízení. Jeden z největších pokroků zaznamenal projekt MeyGen. [11]



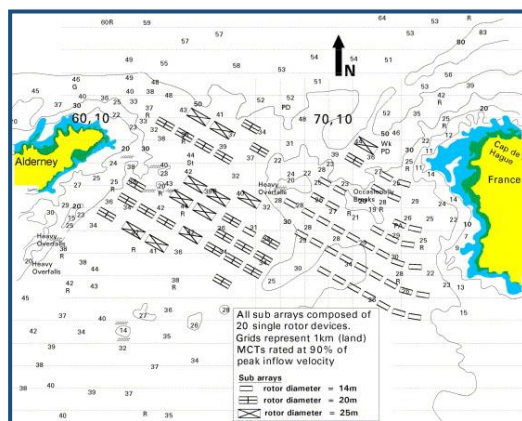
Obrázek 3 - Směr proudění na Orknejských ostrovech 4h po přílivu [10]



Obrázek 4 - Směr proudění na Orknejských ostrovech 4h před přílivem [10]

2.2.2 Normanské ostrovy

Další z míst s vysokým potenciálem je Lamanšský průliv, přesněji oblast kolem Normanských ostrovů, kterou protéká proud zvaný „Race of Alderney”. Tato oblast je zhruba 6,5 km široká a nejvyšší rychlost proudu dosahuje hodnot 5 m.s^{-1} . Univerzita v Southhamptonu se zabývala návrhem pole turbín, které by využilo energetického potenciálu tohoto proudu. Pole by se skládalo ze 3 verzí axiálních turbín s rozdílnými průměry rotoru – 14m, 20m a 25m. Při správné konfiguraci by bylo možné dosáhnout celkového výkonu 1500MW. [14]



Obrázek 5 - Schéma rozmístění turbín v průplavu Race of Alderney [14]

2.3 Vnitrozemí

Využití pro hydrokinetické turbíny lze nalézt hlavně v oblastech řek s nízkým spádem. Tato místa jsou většinou na dolních tocích před vyústěním do moře. Hlavním úskalím pro přeměnu energie jsou nízké rychlosti proudu, které významně snižují možný výkon.

Dalšími oblastmi mohou být procesy, ve kterých se využívá velké množství vody, jako jsou papírenské stroje nebo čistírny odpadních vod. Tedy místa, kde by bylo možné určitou část energie rekuperovat.

3 TYPY KINETICKÝCH TURBÍN

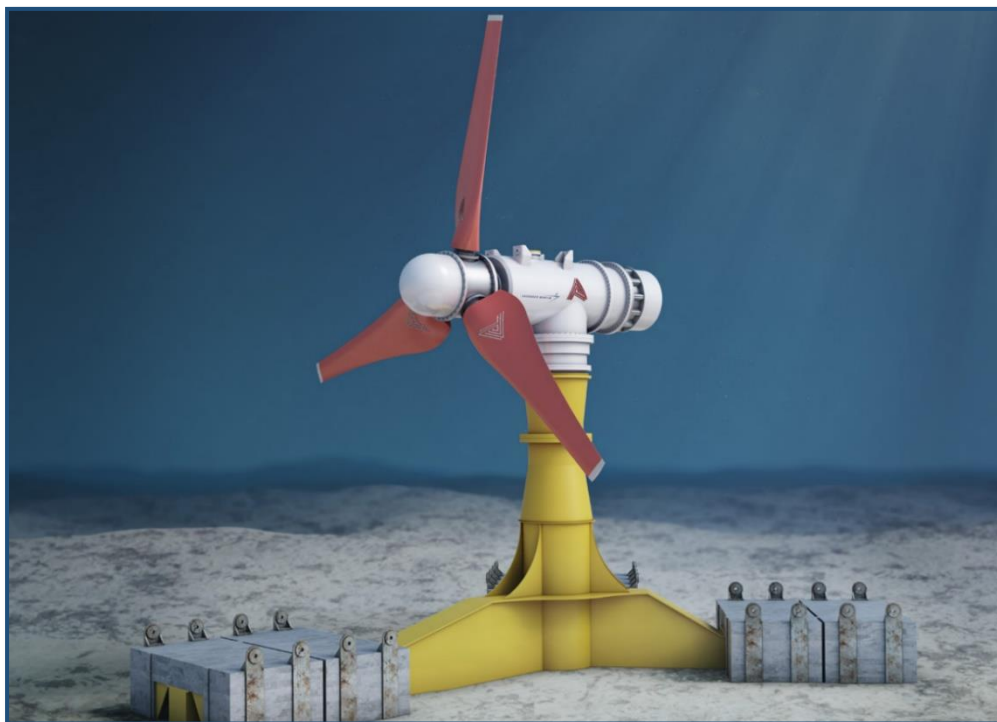
Kinetické turbíny můžeme dělit podle orientace osy otáčení – turbíny s osou orientovanou ve směru proudu – axiální, a turbíny s osou orientovanou kolmo na směr proudění – crossflow.

3.1 Axiální turbíny

Axiální turbíny mají nejčastěji lopatky s aerodynamickým profilem. Využívají vztakového principu stejně jako křídla letadel, lodní šrouby a větrné turbíny. Lopatky se otáčejí stejnou úhlovou rychlostí, ale obvodová rychlost se mění se vzdáleností od osy rotace. Pro dosažení maximálního výkonu je potřeba, aby byl vztlak po délce křídla maximální. To znamená, že aerodynamický profil lopatky směrem od osy otáčení mění velikost a klesá úhel náběhu. Tento typ hydrokinetických turbín dosahuje nejvyšší účinnosti, a proto se také komerčně využívá nejčastěji. [15]

3.1.1 Atlantis AR1500

Turbína byla vyvinuta Skotskou firmou SIMEC Atlantis Resources. Jedná se o třílopatkový axiální rotor používaný v místech s výraznými přílivovými proudy s hloubkami od 30 do 100m. Díky karbonovým vláknům, ze kterých jsou lopatky vyrobeny, mohou mít relativně tenký profil se zachováním dostatečné pevnosti, což ústí v lepší výkon rotoru a větší efektivitu. Průměr rotoru je 18m, výška osy rotoru je 15m nad mořským dnem. Turbína operuje v rychlostech vody od 3 do 5 m.s⁻¹ při nízkých otáčkách od 7 do 15min⁻¹. Turbína je schopna dálkově ovládat úhel náběhu lopatek podle aktuální rychlosti vody. Ovládání systému je řešeno hydraulicky. Kroutící moment je pomocí dvoustupňové planetové převodovky přenesen na generátor s permanentním magnetem. Převodovka má olejový mazací systém, který poskytuje dostatečné chlazení zajišťující delší životnost součástek. Chlazení také dodává samotná voda proudící přes skříň strojovny, která je umístěna přímo za rotorem jako gondola u větrných elektráren. Gondola je upevněna k ocelové konstrukci. Tato konstrukce vážící 10 tun je upevněna vlastní vahou k mořskému dnu. Gondola je schopná se natáčet podle aktuálního směru proudění. Elektrický proud je pomocí podmořského kabelu přenesen na pobřeží, kde je připojen do sítě. Celková životnost elektrárny byla navržena na 25 let, přičemž vyžaduje servis po 6,25 letech. Pro snadný servis je gondola odnímatelná od ocelové konstrukce, která zůstává během servisu na mořském dně. Výkon elektrárny činí 1,5MW. [16]



Obrázek 6 - Atlantis AR1500 [16]

Projekt MeyGen

Tento projekt má ambici vytvořit největší přílivovou elektrárnu na světě. Firma Atlantis Resources ve spolupráci s Andritz Hydro Hammerfest od roku 2010 plánuje na Orknejích vybudovat pole axiálních turbín ukotvených k mořskému dnu s celkovou energetickou kapacitou 16,6TWh za rok. Tato hodnota by byla schopna pokrýt 45% elektrické spotřeby Skotska (vztaženo k elektrické spotřebě za rok 2011). Celkově by mělo být nainstalováno 269 turbín, přičemž největší počet z nich by tvořily turbíny s průměrem rotoru 16m a výkonem 1,5MW. V roce 2016 se podařilo uvést první turbínu do provozu a o dva roky později začala etapa výroby dalších 49 zařízení, která by měla být spuštěna v roce 2021. V současné době zde fungují 4 hydrokinetické turbíny, které za rok 2019 vyprodukovaly 13,8 GWh. [12, 13]



Obrázek 7 - Pole axiálních turbín ukotvených k mořskému dnu [13]

3.1.2 SeaGen

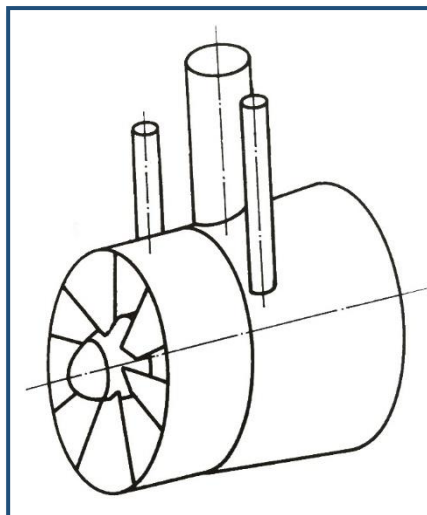
Zařízení od britské firmy Marine Current Turbines dnes spadající pod světový koncern Siemens je provedeno jako dvojice dvoulopatkových axiálních turbín upevněných pomocí ramen na ocelovou věž, která je ukotvena k mořskému dnu. Lopatky turbíny jsou vyrobeny z kompozitních materiálů s délkou 10m. Při vyšších rychlostech vody je možné měnit úhel náběhu lopatek. Turbína pracuje v rychlostech od 2,5 do 4 m.s⁻¹ s otáčkami od 4 do 11,5 min⁻¹. Krouticí moment je přenesen na generátor pomocí planetární převodovky. Chlazení generátoru i převodovky je zajištěno pomocí vody protékající kolem skříně v níž jsou uloženy. Ramena, na kterých jsou turbíny upevněny, se mohou po válcové věži pohybovat a měnit svoji výšku, což zajišťuje jednoduchý přístup při servisu turbín. Celkový výkon dvojice turbín činí 2MW. [17]



Obrázek 8 - SeaGen [17]

3.1.3 Zeusova turbína

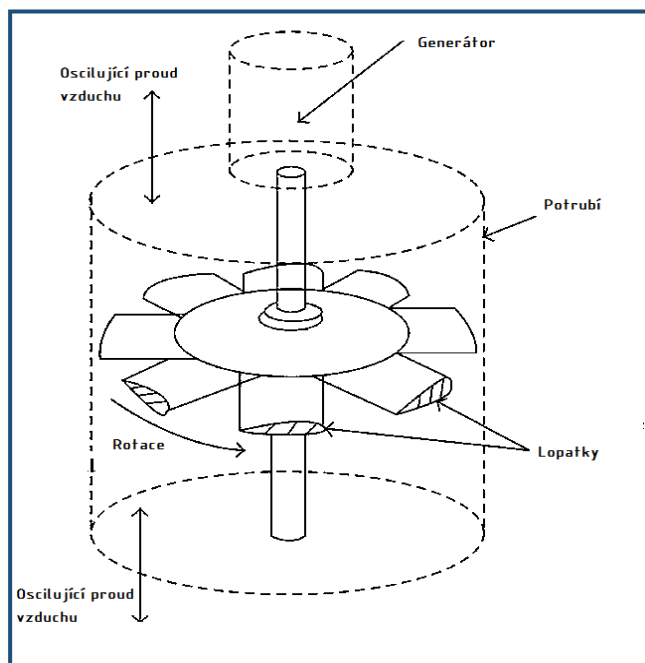
Zeusova turbína je typ ponorného vodního motoru, který je připevněn k plováku. Oběžné kolo je řešeno jako Voltmannovo křídlo ve tvaru vícechodého šroubu většinou se 4 lopatkami. Je uloženo ve válci, který lze doplnit vtokovým konfuzorem a výtokovým difuzorem pro zvýšení účinnosti. Těleso turbíny je zavěšeno na pontonech. Spojení mezi turbínou a generátorem je provedeno řetězovým nebo řemenovým převodem schovaným v krytu. Při rychlosti toku vody 2m.s⁻¹ dokáže turbína s průměrem rotoru 1,5m vygenerovat výkon až 3,25kW. Účinnost turbíny dosahuje od 60-70% teoreticky možné účinnosti. [18]



Obrázek 9 - Schéma zeusovy turbíny
[18]

3.1.4 Wellsova turbína

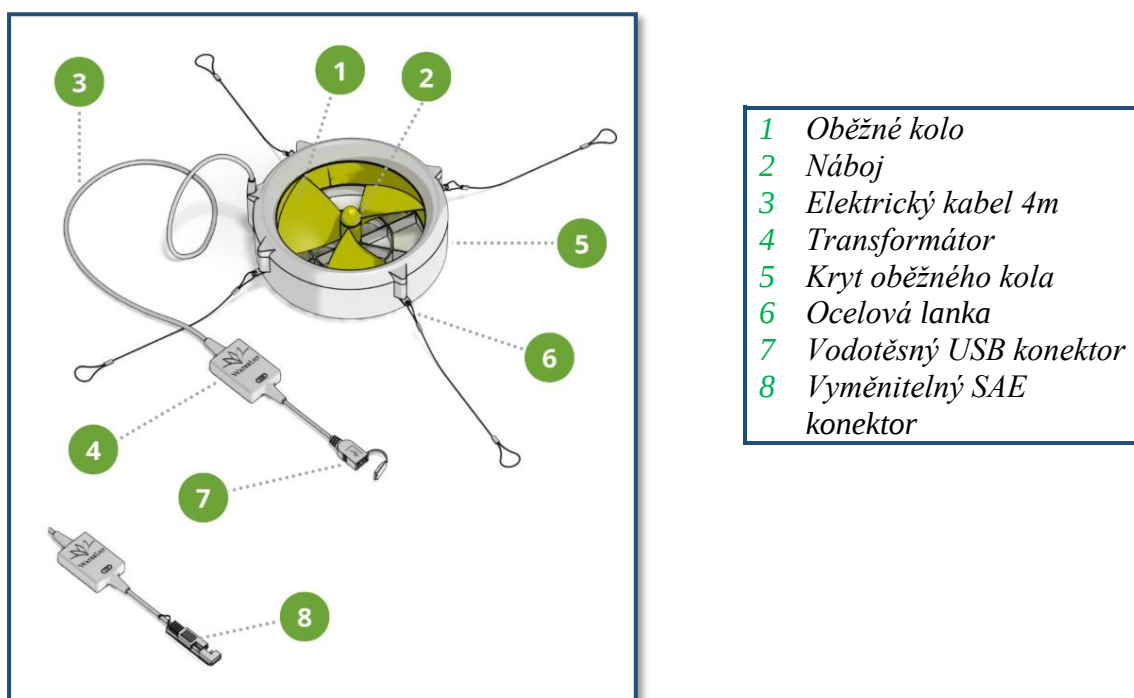
Tato turbína využívá energie mořských vln, které při interakci s potrubím ponořeným pod hladinu vody vytváří oscilující proud vzduchu. Turbína, která je instalována v potrubí, odebírá energii tohoto proudu a přenáší krouticí moment na generátor, který odvádí elektrickou energii do sítě. Kvůli povaze proudění je potřeba, aby lopatky turbíny byly schopny odebírat energii proudu v obou směrech, což se projevuje na profilu lopatek, který bývá osově symetrický. Zařízení lze postavit na pobřeží nebo na plovacích pontonech. Účinnost dosahuje až 60%. [19]



Obrázek 10 - Schéma Wellsovy turbíny [20]

3.1.5 Mikroelektrárna Waterlilly

Několik společností na světě se rozhodlo vytvořit malá přenosná zařízení, která jsou schopna čerpat energii z tekoucích řek a nabíjet tak externí baterii. Jedná se o malé axiální turbíny s různými typy lopatek. Jedním z provedení, které se dá zakoupit, je od kanadské firmy Seaformatics systems. Jde o turbínu s průměrem 180 mm, délkou 76 mm a hmotností 1,3 kg. Operuje v rychlostech od 0,3 do 4,2 m.s⁻¹, při optimální rychlosti vody (3,2 m.s⁻¹) je schopna vyprodukovat 15 W. Turbína je určena pro vložení do proudu řeky. Ukotvení je zajištěno pomocí 4 ocelových lan. Cena tohoto zařízení činí 160 \$, což je zhruba 3700 Kč. [21]



Obrázek 11 - Mikroelektrárna Waterlilly [21]

3.2 Cross-flow turbíny

Většina těchto turbín funguje na stejném principu vztlkových sil působících na hydrodynamicky upravený tvar lopatek jako turbíny axiální. Na rozdíl od nich má tento typ turbín osu rotace orientovanou kolmo na směr proudu tekutiny. To znamená, že v průběhu rotace se napětí působící na lopatky cyklicky mění, což snižuje životnost více než u turbín axiálních. Toto napětí se dá rozložit při použití šroubových lopatek místo lopatek přímých. [15]

Obecně jsou tato zařízení méně účinná než zařízení axiální, ale mají také své výhody. Tou hlavní je, že nezáleží na směru, kterým médium proudí, což může být velkým přínosem v některých přílivových oblastech, kde se směr proudění mění během minut. Další výhodou je, že z pohledu proudícího média zaujímá plocha těchto rotorů obdélníkový tvar, takže se dají rozmístit tak, aby zabraly větší plochu proudící tekutiny a tím ji využily efektivněji. [15]

Pro svoji nízkou účinnost jsou však komerčně využívány minimálně.

3.2.1 Darrieova turbína

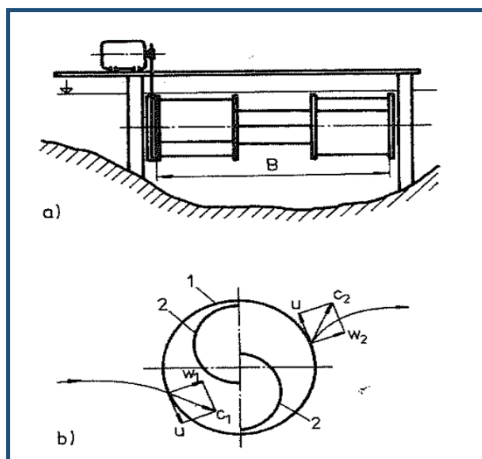
Tento typ turbíny se skládá z několika křídel/listů s aerodynamickým profilem připevněných k rotující hřídeli. Turbína pracuje na vztlkovém principu. Maximální účinnost dosahuje až k 45 %. Tvar a uspořádání listů je zpracován různým způsobem. První variantu s přímými listy sestrojil francouzský inženýr Darrierus, po kterém byl tento typ turbíny pojmenován. Existuje však i varianta s listy ve tvaru H nebo varianta s šroubovitým tvarem lopatek. Nevýhodou turbíny je, že pro roztočení potřebuje počáteční impuls – není schopna se sama roztočit. Pro správné fungování je také potřeba vyšší rychlost proudění. [18]

RivGen

Aljašský projekt má cíl snížit výrobu elektrické energie pomocí drahých a k přírodě nešetrných dieslových generátorů, které jsou v oblasti s nerozvinutou sítí hojně využívány. Za tímto účelem byl vyvinut šroubovitý rotor Darrierova typu. Zařízení je uchyceno na plovacích pontonech, které jsou ukotveny ke dnu. Pontony jsou schopny se pomocí dálkového ovládání samy ponořit. Rotor dosahuje při ideálních rychlostech vody výkonu 35kW a účinnosti 45%. [23]

3.2.2 Savoniův rotor

Savoniův rotor je založen na odporovém principu rozdílného součinitele duté, vypouklé lopatky. Skládá se z n disků tvořící $n-1$ sekce. V každé sekci jsou dvě obloukovité lopatky. Sekce jsou vůči sobě natočeny o 60° . O něco výhodnější provedení je propojení sekcí šroubovitým tvarem lopatek. Jeho výhoda spočívá ve snadné a levné výrobě. Hlavní nevýhoda je její nízká účinnost do 23 %, kterou je schopna dosáhnout pouze pro rychlost vody 1,5 m/s. Při jiné rychlosti vody se účinnost ještě snižuje. Pro délku turbíny 3 m, průměr disku 1 m a rychlost vody 1,5 m/s dokáže turbína vyprodukovat výkon 0,65 kW. [18]

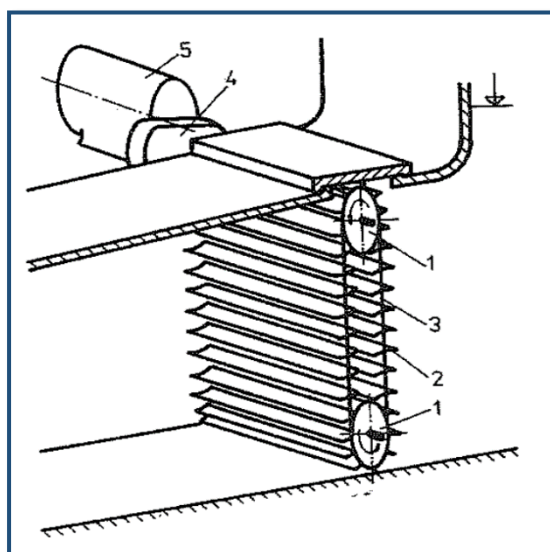


- | | |
|----|----------------------|
| a) | Pohled ve směru toku |
| B | Délka rotoru |
| b) | Pohled z boku |
| 1 | Disk |
| 2 | Lopatka |

Obrázek 12 - Schéma Savoniova rotoru [18]

3.2.3 Schneiderova turbína

Tato turbína je dalším z jednoduchých řešení pro využití energie vody. Jedná se o soustavu lopatek s aerodynamickým profilem upevněných na dvojici pásů. Pásky jsou nesené dvěma kladkami. Z hřídele horní kladky je energie přenášena převodem k hřídeli generátoru. Tato turbína lze využít i pro opačný směr proudění. Nevýhodou je nízká životnost při malých otáčkách z důvodu působení velkých sil na lopatky. [18]

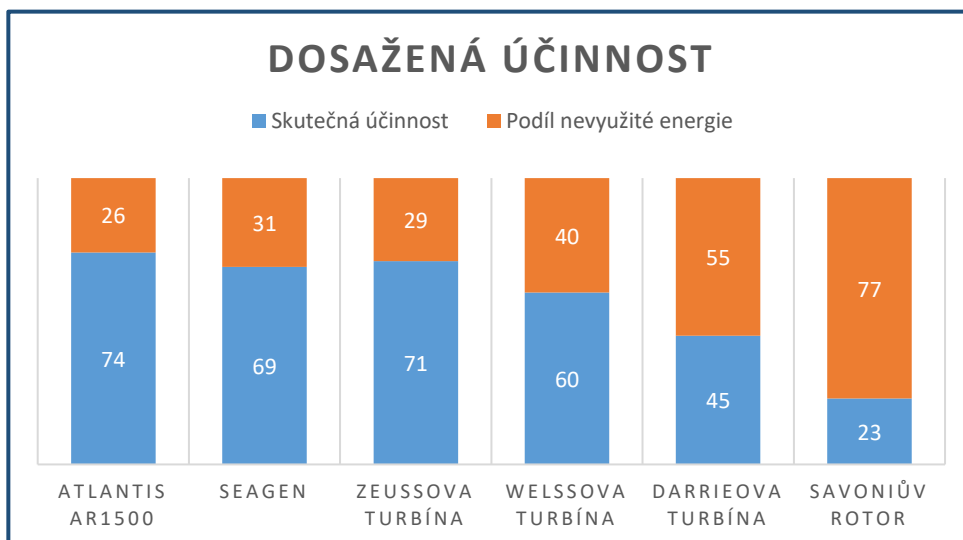


- | | |
|---|----------------|
| 1 | Nosné kolo |
| 2 | Oběžná lopatka |
| 3 | Nosný pás |
| 4 | Převod |
| 5 | Generátor |

Obrázek 13 - Schéma Schneiderovy turbíny [18]

3.3 Srovnání dosažené účinnosti

Dosažená účinnost je vztažena k Betzovu limitu teoreticky možné účinnosti, kterému se věnuje kapitola 4.3.



4 TEORIE PROUDĚNÍ

Proud tekutiny si můžeme představit jako množství částic, které se pohybují svojí rychlostí. Trajektorie jednotlivých částic se nazývá proudnice. Vektor rychlosti v libovolné poloze částice je vždy tečný na tuto proudnici. Pokud je rychlost tekutiny protékající kontrolní plochou stálá a její směr neměnný, pak nazýváme toto proudění stacionární.

Ideální a reálná tekutina

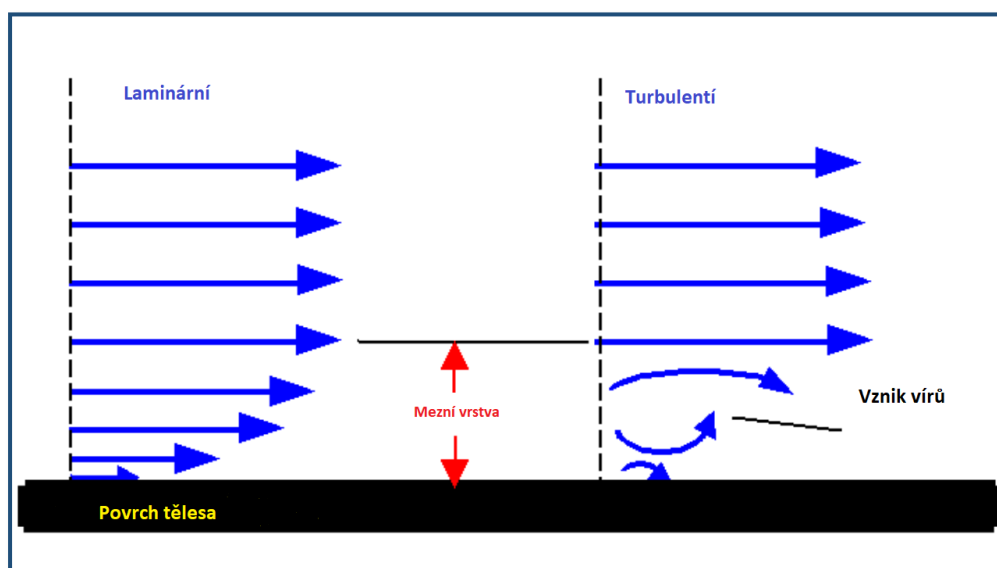
Ideální tekutina se od reálných kapalin liší dvěma vlastnostmi. První je, že za všech podmínek udržuje konstantní hustotu – je nestlačitelná a s měnící teplotou nemění svůj objem. Druhou vlastností je nulová viskozita – neexistují přitažlivé síly mezi jednotlivými částicemi kapaliny, které by zapříčinily vnitřní tření. Proudění reálné tekutiny se dělí na laminární a turbulentní.

Laminární a turbulentní proudění

Pokud nedochází k výměně částic mezi vrstvami proudu v normálovém směru, pak nazýváme tento typ proudění laminární. Jestliže dochází k výměně částic mezi jednotlivými vrstvami, mluvíme o turbulentním typu proudění. U turbulentního proudění vzniká velké množství vírů, které vedou ke snížení rychlosti kapaliny.

Mezní vrstva

Mezní vrstva je tenký prostor kolem obtékaného tělesa, ve kterém dochází ke změně profilu rychlosti proudění.



Obrázek 14 - Mezní vrstva [24]

4.1 Energie proudu

Kinetická energie obecně je jedna z druhů mechanické energie, kterou má pohybující se těleso. Tato energie je rovna práci, kterou bychom museli vykonat, abychom přivedli těleso do stavu klidu. Je závislá na rychlosti a hmotnosti. Řídí se vztahem [25]:

$$(1) \quad E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad [J]$$

Objemový tok:

$$(2) \quad Q = S \cdot v \quad [m^3/s]$$

Jestliže budeme uvažovat ustálené proudění ideální kapaliny, pak hodnota hmotnostního toku tekutiny procházející plochou kolmou na vektor rychlosti bude dána vztahem:

$$(3) \quad \dot{m} = \rho \cdot S \cdot v \quad [kg/s]$$

Hodnota kinetické energie proudu tekutiny procházejícího danou plochou je tedy:

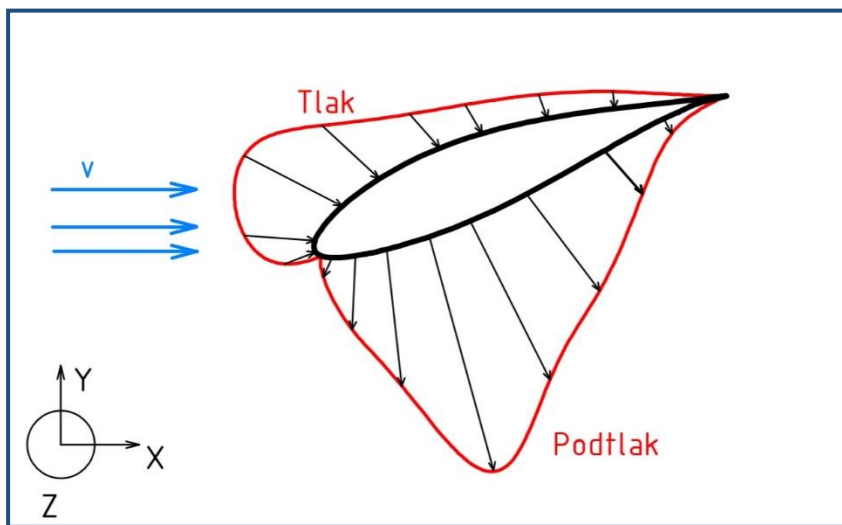
$$(4) \quad P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \quad [J]$$

Kinetická energie vztažená na jednotku objemu tekutiny se nazývá dynamický tlak, který je definován podle vztahu:

$$(5) \quad q = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad [Pa]$$

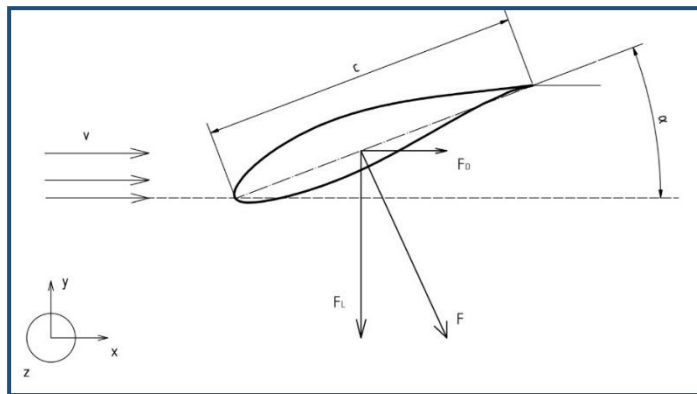
4.2 Obtékání těles

Při obtékání tělesa tekutinou vzniká reakční síla působící na těleso. Tato síla je dána rozdílem tlaků působících na horní a spodní část obtékaného tělesa. Pro popsání této síly vycházíme z úvahy o nekonečně dlouhém profilu, kde je rychlost proudu vody ve směru x , y několiknásobně vyšší než ve směru z . Lopatka má aerodynamický tvar s konstantní třetivou a geometrií po celé délce lopatky. Na obr.16 je ukázáno silové působení na těleso. [26]



Obrázek 15 - Rozložení tlaku na aerodynamický profil

Výslednou sílu působící na těleso můžeme v souřadném systému rozdělit na x -složku (odporová síla F_D) a y -složku (vztlaková síla F_L). Pro aerodynamické tvary také určujeme délku tělivity c – vzdálenost od náběžné hrany po odtokovou hranu, a velikost úhlu náběhu α – úhel, který svírá vektor rychlosti vody s tělívou.



Obrázek 16 - Rozložení síly na aerodynamický profil

Vztlaková síla

Tato síla je vždy kolmá na vektor rychlosti vody. Je dána rozdílem tlaků působících na spodní a horní části obtékaného tělesa. Na horní části roste při kontaktu s povrchem tělesa tlak, který je vyšší než tlak hydrostatický a vzniká tak přetlak. Opačně je tomu na spodní části, kde vzniká podtlak. [26]

Velikost vztlakové síly na délku lopatky je definována vztahem:

$$(6) \quad F_L = \frac{1}{2} \cdot C_L \cdot \rho \cdot v_\infty^2 \cdot c$$

Kde C_L je vztlakový koeficient a c je délka tělivity

Odporová síla

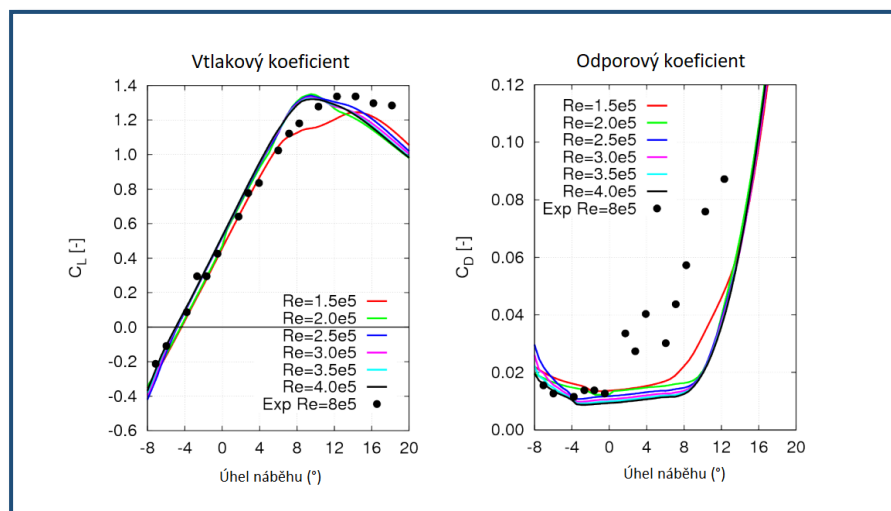
Odporová síla je x -složkou výsledné síly působící na těleso. Tato složka je vždy rovnoběžná se směrem proudění. Popisujeme ji obdobným vztahem:

$$(7) \quad F_D = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho \cdot v_\infty^2 \cdot c$$

Kde C_D je odporový koeficient.

Koeficienty vztlaku a odporu

Tyto koeficienty popisují vztah mezi silou a dynamickým tlakem v okolí tělesa. Pro normalizované aerodynamické profily byla měřením stanovena závislost mezi koeficienty a úhlem náběhu. Jejich poměr je v literatuře označován jako klouzavost. Pro aerodynamický profil NACA 62-815 je tato závislost ukázána na obr.17:



Obrázek 17 - Koeficienty vztlaku a odporu pro profil NACA 63-815 [27]

Z naměřených hodnot vyplývá, že s rostoucím úhlem náběhu roste i vztlakový koeficient až do určité hodnoty, kde začne vztlakový koeficient klesat a zvyšovat se koeficient odporový. Tato skutečnost se dá vysvětlit tím, že při určité hodnotě úhlu náběhu dochází k odtržení mezní vrstvy od spodní hrany a za lopatkou začne vznikat silně turbulentní proudění. Pro navržení turbíny je tedy důležité, aby klouzavost, tedy poměr C_L/C_D , byl co nejvyšší. [25]

4.3 Betzův limit

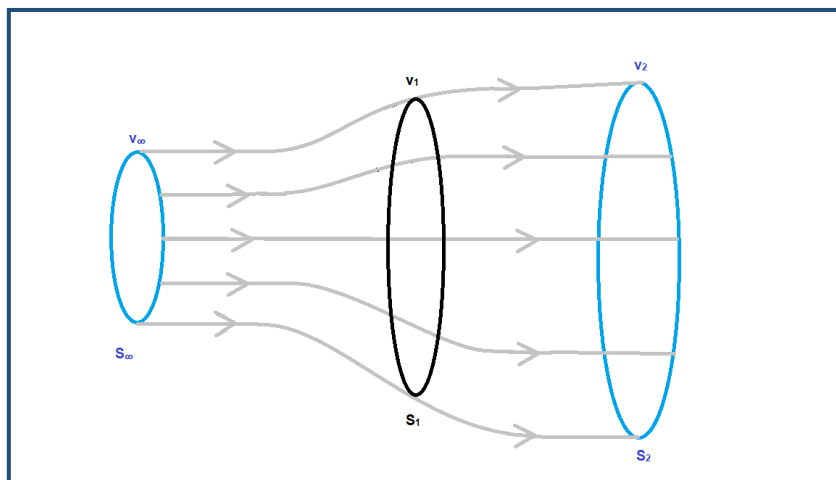
„Betzův limit je teoretická horní hranice výkonu turbíny, jejíž lopatky krouží po dané ploše.“ [28]

Tento limit udává, jaké maximální množství energie jsme schopni vyprodukovat z média pomocí rotoru pohybujícího se zadanou rychlostí. Používá se pro stanovení teoretické účinnosti větrných turbín, ale platí i pro turbíny hydrokinetické. Je odvozen z principů zachování hmoty a hybnosti proudícího média přes imaginární válec. Médium by předalo rotoru maximální energii, pokud by rychlost média za motorem byla nulová, což by popřelo zmíněné dva zákony. [29]

Pro určení tohoto limitu uvažujeme tyto podmínky [30]:

- Médium je ideální kapalina
- Stacionární proudění
- Rotor je považován za disk o ploše S – nekonečný počet lopatek
- Tlak daleko před a daleko za rotorem je stejný
- Za lopatkami nevzniká rotující úplav
- Kapalina nevykazuje v kontaktu s rotorem třecí odpor

Uvažujme, že rychlost média daleko před rotorem je v_∞ a rychlost média za rotorem je v_2 . [31]



Obrázek 18 - Médium proudící přes rotor

Rychlost média těsně za diskem je:

$$(8) \quad v_1 = \frac{1}{2} \cdot (v_\infty + v_2)$$

Síla působící na disk se nazývá tahová síla, který je dána rozdílem tlaků těsně před a těsně za diskem:

$$(9) \quad T = \Delta p \cdot S_1$$

Rozdíl tlaků lze vyjádřit z Bernoulliho rovnice použité pro stejnou proudnici bodu daleko před a bodu v těsné blízkosti před diskem. Tutéž rovnici můžeme sestavit pro proudnici bodu těsně za a bodu daleko za diskem:

$$(10) \quad p_\infty + \frac{1}{2} \rho v_\infty^2 = p + \frac{1}{2} \rho v_1^2$$

$$(11) \quad p - \Delta p + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_\infty + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

Dosažením podmínek zjistíme výsledný vztah pro tahovou sílu T:

$$(12) \quad T = \rho \cdot v_1 \cdot S_1 \cdot (v_\infty - v_2) = \dot{m} \cdot (v_\infty - v_2)$$

Energie předaná rotoru je rozdíl kinetické energie média nabíhající na rotor a kinetické energie média za rotorem

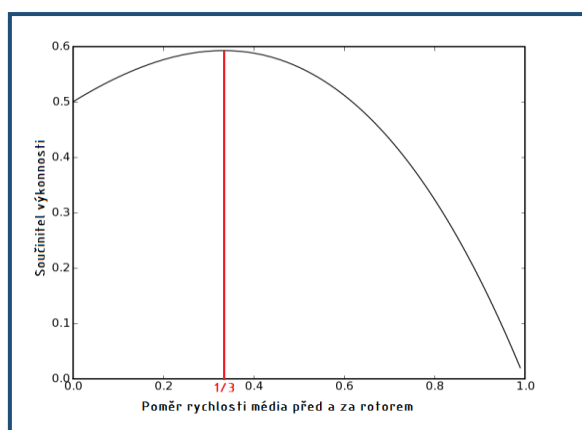
$$(13) \quad P = \frac{1}{2} \cdot Q \cdot (v_\infty^2 - v_2^2)$$

$$(14) \quad P = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot S \cdot (v_{\infty} + v_2) \cdot (v_{\infty}^2 - v_2^2)$$

$$(15) \quad P = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot S \cdot v_{\infty}^3 \cdot \left[1 - \left(\frac{v_2}{v_{\infty}} \right)^2 + \left(\frac{v_2}{v_{\infty}} \right) - \left(\frac{v_2}{v_{\infty}} \right)^3 \right]$$

Jestliže budeme znát rychlost média před rotorem a plochu rotoru, pak derivací výkonu podle poměru $\frac{v_2}{v_{\infty}}$ zjistíme hodnotu tohoto poměru, pro kterou je výkon maximální.

$$(16) \quad P \cdot \frac{d}{d\left(\frac{v_2}{v_{\infty}}\right)} = \frac{1}{3}$$



Obrázek 19 - Funkce součinitele výkonnosti

Výsledný poměr mezi $\frac{v_2}{v_{\infty}}$, při kterém dosáhneme nejvyššího výkonu, je roven $\frac{1}{3}$. Po dosazení zjistíme, že maximální možný výkon je dán vztahem:

$$(17) \quad P_{max} = \frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v_{\infty}^3$$

Práce, kterou je médium o rychlosti v_{∞} schopno předat na ploše válce S , se rovná:

$$(18) \quad P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v_{\infty}^3$$

Součinitel výkonnosti C_p je dán poměrem mezi odvedenou prací na rotoru a kinetickou energií větru.

$$(19) \quad C_p = \frac{P_{max}}{P_w}$$

Pro maximální možný výkon na rotoru se potom tento součinitel rovná:

$$(20) \quad C_p = \frac{16}{27} \cong 0,593 = 59,3\%$$

Z Betzovy teorie je zřejmé [30]:

- S rostoucí rychlostí média se kubicky zvyšuje i výkon
- S rostoucí plochou rotoru se lineárně zvyšuje výkon
- Při bezztrátové přeměně energie je poměr mezi mechanickou energií větru a odvedenou prací turbíny 16/27
- Maximálního výkonu dosáhneme, když je rychlost média za turbínou třetinová oproti rychlosti média před turbínou

Indukční faktory

Pro výpočty je užitečné uvažovat změnu rychlosti jako podíl z rychlosti média před rotorem, který považujeme za známý parametr. Proto je zaveden axiální indukční faktor a , pro který platí:

$$(21) \quad a = \frac{v_{\infty} - v_1}{v_{\infty}}$$

Pomocí tohoto faktoru si můžeme vyjádřit ostatní vztahy jako jeho funkci. Rychlost média v rovině rotoru je:

$$(22) \quad v_1 = v_{\infty} \cdot (1 - a)$$

Rychlost média daleko za turbínou:

$$(23) \quad v_2 = v_{\infty} \cdot (1 - 2a)$$

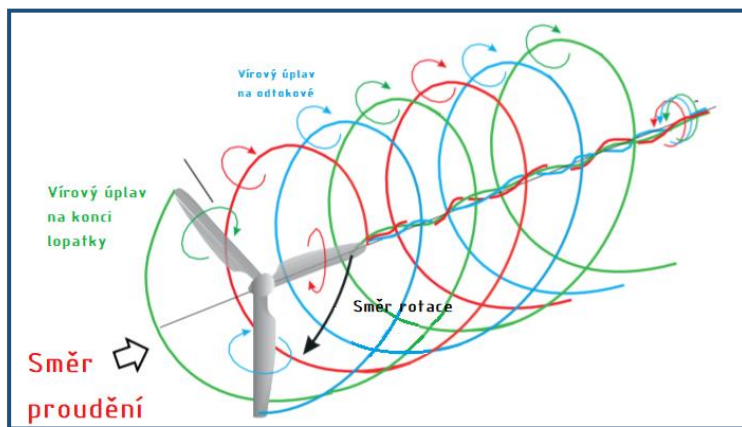
Tah rotoru lze přepsat jako funkci indukčního faktoru:

$$(24) \quad T = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S_1 \cdot v_{\infty} \cdot [4a \cdot (1 - a)]$$

Výkon je potom:

$$(25) \quad P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v_{\infty}^2 \cdot 4a \cdot (1 - a)^2$$

Proudění před rotorem má axiální směr. Listy rotoru, přes které médium protéká, však tento směr mění svojí rotací. Důsledkem je, že médium za rotorem získává významnou složku rychlosti ve směru opačném, než je rotace disku. Tím vzniká za diskem rotující úplav, který zvyšuje kinetickou energii odcházejícího média a snižuje tak práci předanou rotoru.



Obrázek 20 - Vírový úplav vznikající za rotorem [32]

Dle zákona o zachování energie je potom energie proudu před rotorem rovna práci odvedené na rotoru, kinetické energie rotace proudu za rotorem a kinetické energie axiální složky rychlosti za rotorem. Médium před rotorem má nulovou složku úhlové rychlosti. Médium za rotorem má však úhlovou složku rychlosti navýšenou o úhlovou rychlost rotoru. Pro další výpočty zavádíme úhlový indukční faktor a' , který je definován jako.:

$$(26) \quad a' = \frac{\frac{c_{2u}}{r}}{2 \cdot \Omega} = \frac{\omega}{2\Omega}$$

Kde Ω je úhlová rychlost rotoru, ω je úhlová rychlost média za rotorem. Dosazením koeficientů a , a' lze pro daný element lopatky určit výkon jako:

$$(27) \quad dP = 4 \cdot \pi \cdot \rho \cdot \Omega^2 \cdot v_{\infty} \cdot a' \cdot (1 - a) \cdot r^3 \cdot dr$$

Integrací po délce lopatky získáme celkový výkon podle rovnice:

$$(28) \quad P = 4\pi\rho\Omega^2 v_{\infty} \int_0^R a'(1-a)r^3 dr$$

Abychom dokázali zhodnotit výkon, je tento vztah porovnán s kinetickou energií média před rotorem v bezrozměrném výkonovém součiniteli:

$$(29) \quad C_p = \frac{4\pi\rho\Omega^2 v_{\infty} \int_0^R a'(1-a)r^3 dr}{\frac{1}{2}\rho v_{\infty}^3 S}$$

Pokud bychom vztah upravili pomocí koeficientu rychloběžnosti, který porovnává poměr mezi obvodovou rychlostí na konci lopatky a rychlostí média před rotorem:

$$(30) \quad \lambda = \frac{\Omega R}{v_{\infty}}$$

A pomocí lokálního koeficientu rychloběžnosti, jež dává do poměru obvodovou rychlost pro daný element lopatky a rychlost větru:

$$(31) \quad \lambda_r = \frac{\Omega r}{v_{\infty}}$$

Získáme vztah pro výkonový součinitel ve tvaru:

$$(32) \quad C_p = \frac{8}{\lambda^2} \int_0^{\lambda} a' \cdot (1 - a) \cdot \lambda_r^3 \cdot d\lambda_r$$

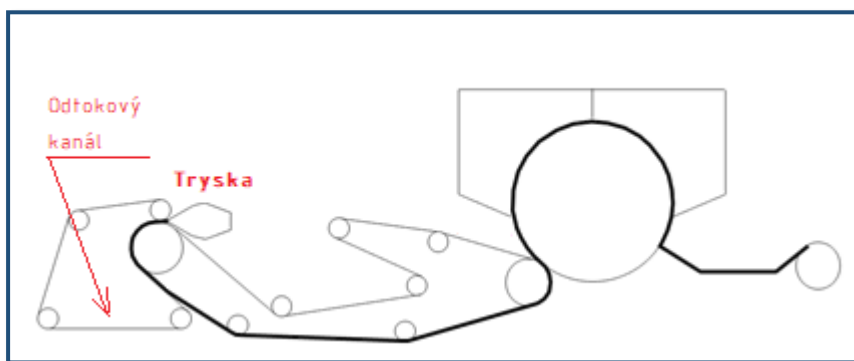
Rotory kinetických turbín pracujících s reálnou tekutinou tedy vykazují další ztráty energie, a proto je jejich účinnost ještě nižší. Moderní větrné turbíny dosahují hodnot $C_p = 0,4 \sim 0,5$, tedy 70-80% teoreticky možné účinnosti.

5 NÁVRH PRO DANOU LOKALITU

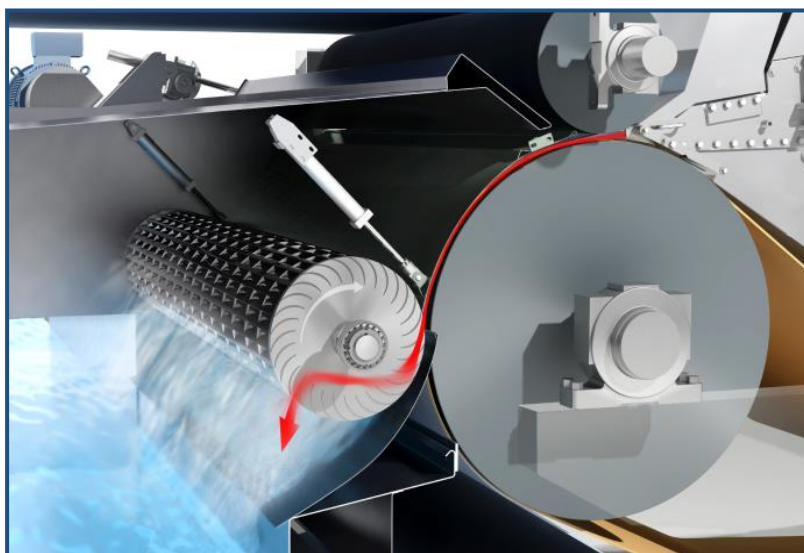
Z předchozí rešerše vyplývá, že nejúčinnější přeměny energie dosahují axiální turbíny.

5.1 Výroba papíru

Produkce papíru spotřebovává velké množství vody. Recyklovaný papír je smícháván s vodou a pomocí břitů rozmělněn na jemnou látku. Tato tekutina je vstřikována několika tryskami na vliesový válec, na kterém se tuhá část tekutiny zachytí a pomocí zahřátého přitlačného válce odchází v pevném stavu do dalšího procesu úpravy. Voda, která z vliesového válce propadá, vytéká odtokovým kanálem k čerpadlům, odkud je vrácena do části míchání s recyklovaným papírem.



Obrázek 21 - Schéma papírenského stroje



Obrázek 22 - Detail vliesového válce a propadu vody do odtokového kanálu

Odtokovým kanálem proteče 586,2kg/s vody. Tato masa má velké množství kinetické energie. Cílem následujících kapitol bude navrhnout tvar turbíny umístěné do odtokového žlabu, která by byla schopna určitou část této energie rekuperovat.

Z poskytnutých dat je patrné, že odtokový žlab má čtvercový průřez, přičemž délka strany je $A=90 \text{ cm}$. Výška hladiny byla stanovena odhadem na $h=75 \text{ cm}$.

Z dat můžeme určit rychlost vody:

$$(33) \quad v_{\infty} = \frac{Q}{S} = \frac{\frac{m}{\rho}}{A \cdot h} = 0,8684 \text{ m.s}^{-1}$$

5.2 Teorie osamoceného profilu

Tato teorie se používá ke stanovení tvaru lopatky větrných turbín. Vychází z předpokladu, že síly působící na lopatku se dají vyjádřit jako funkce vztlakového a odporového koeficientu a úhlu náběhu pro daný aerodynamický profil. Tato koncepce rozděluje lopatku na konečný počet elementů N . Pro každý element je silové působení řešeno zvlášť. Jedná se o metodu aproximační, která nezahrnuje vliv rotace za větrnou turbínou, odpor turbíny, pohyb média v radiálním směru a konečný počet lopatek. Následující výpočty byly stanoveny na základě návodů v literatuře. [25] [29]

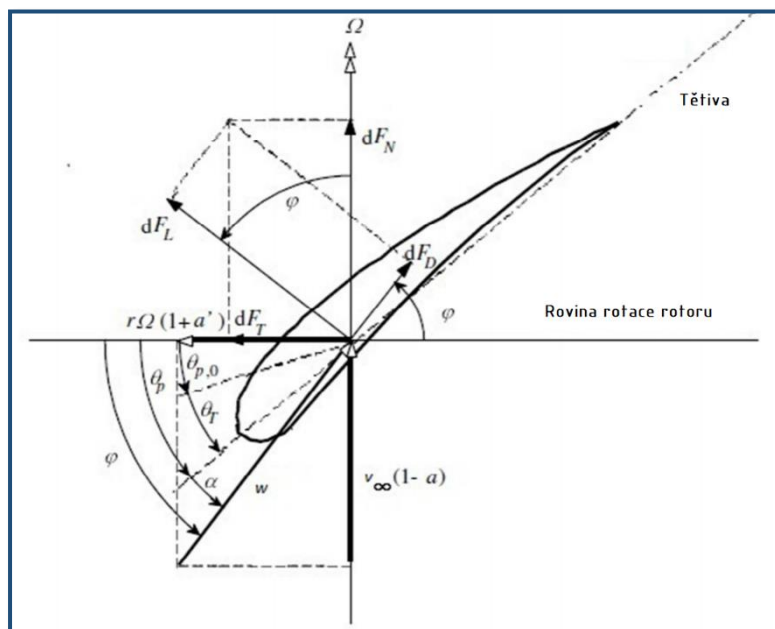
Tahová síla vyjádřená pomocí indukčních faktorů je dána vztahem:

$$(34) \quad dT = 4\rho v_{\infty}^2 a(1-a)\pi r dr$$

Krouticí moment jako funkce indukčních faktorů je:

$$(35) \quad d\tau = 4\pi\rho v_{\infty} a'(1-a)r^3 dr$$

Geometrie pro jednotlivé elementy je ukázána na obr.25:



Obrázek 23 - Geometrie lopatky [26]

F_L	Vztlaková síla
F_D	Odporová síla
F_N	Normálová síla
F_T	Tečná síla
v_{∞}	Rychlost média před rotorem
w	Relativní rychlost média
α	Úhel náběhu
ϕ	Úhel relativní rychlosti k rovině rotace
θ_p	Úhel stoupání daného elementu
$\theta_{p,0}$	Počáteční úhel stoupání vztažen na konec lopatky
θ_T	Úhel kroucení lopatky
Ω	Úhlová rychlost rotoru

Geometrické parametry vycházející z obr.23 je možné definovat těmito vztahy:

$$(36) \quad \theta_T = \theta_P - \theta_{P,0}$$

$$(37) \quad \varphi = \theta_P + \alpha$$

$$(38) \quad \tan \varphi = \frac{v_\infty \cdot (1-a)}{\Omega r (1+a')} = \frac{(1-a)}{(1+a') \lambda_r}$$

$$(39) \quad w = \frac{v_\infty \cdot (1-a)}{\sin(\varphi)}$$

$$(40) \quad dF_L = \frac{1}{2} C_L \rho w^2 c dr$$

$$(41) \quad dF_D = \frac{1}{2} C_D \rho w^2 c dr$$

$$(42) \quad dF_N = dF_L \cos(\varphi) + dF_D \sin(\varphi)$$

$$(43) \quad dF_T = dF_L \sin(\varphi) - dF_D \cos(\varphi)$$

$$(44) \quad dF_N = \frac{1}{2} \rho B c w^2 [C_L \cos(\varphi) + C_D \sin(\varphi)] \cdot dr$$

$$(45) \quad d\tau = r B \cdot dF_T$$

$$(46) \quad d\tau = \frac{1}{2} \rho B c w^2 [C_L \sin(\varphi) - C_D \cos(\varphi)] \cdot dr$$

Následující postup výpočtu je proveden za těchto předpokladů [26]:

- Za turbínou nevzniká rotující úplav - $a' = 0$
- Přeměna kinetické energie dosahuje Betzova limitu - $a = 1/3$.
- Odporový koeficient je roven nule - $C_D = 0$
- Pro zvolený aerodynamický profil známe jeho geometrii a hodnoty vztlakového a odporového koeficientu jsou experimentálně zjištěny v závislosti na úhlu náběhu
- Úhel náběhu je pro první element na konci lopatky uvažován jako úhel, pro který je poměr koeficientu vztlaku a odporu maximální
- Známe zvolený koeficient rychloběžnosti λ a počet lopatek B

Dosažením podmínek do rovnice (33) získáme vztah pro tahovou sílu:

$$(47) \quad dT = \frac{4}{3} \pi \rho v_\infty^2 \left(1 - \frac{1}{3}\right) r dr$$

Vztah pro normálovou sílu z rovnice (43):

$$(48) \quad dF_N = \frac{1}{2} C_L \rho B c w^2 \cos(\varphi) \cdot dr$$

Relativní rychlost média:

$$(49) \quad w = \frac{2v_\infty}{3 \sin(\varphi)}$$

Z podmínky, že odporový koeficient je roven nule, můžeme tahovou sílu T a normálovou sílu prohlásit za ekvivalentní. Dosazením získáme vztah:

$$(50) \quad \frac{BC_L c}{4\pi r} = \tan(\varphi) \sin(\varphi)$$

Pro známé indukční faktory je úhel relativní rychlosti:

$$(51) \quad \tan(\varphi) = \frac{2}{3\lambda_r}$$

Dosazením rovnice (50) do rovnice (49) dostaneme rovnici:

$$(52) \quad \frac{BC_L c}{4\pi r} = \frac{2}{3\lambda_r}$$

Potom si můžeme vyjádřit vztah pro velikost tětiny c a úhel relativní rychlosti φ

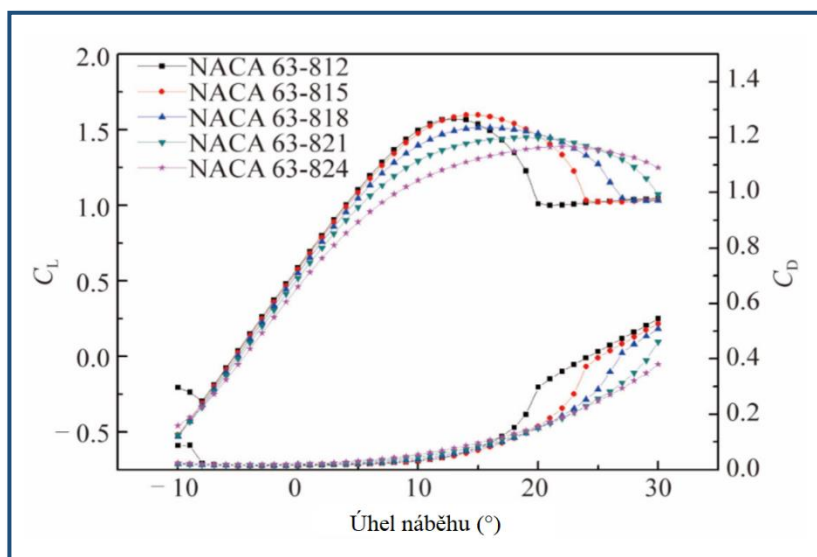
$$(53) \quad c = \frac{8\pi r \sin(\varphi)}{3\lambda_r BC_L}$$

$$(54) \quad \varphi = \tan^{-1} \left(\frac{2}{3\lambda_r} \right)$$

5.3 Volba vhodného profilu

Aerodynamické tvary NACA airfoils byly zpracovány primárně pro křídla letadel. Postupem času se začaly vytvářet profily i pro větrnou a vodní energetiku. Profily NACA jsou rozděleny do několika kategorií, které označuje čtyř až šestmístné číslo. [35]

V dnešní době jsou pro návrh hydrokinetických turbín velmi často využívány profily ze série 63-8XX. [36] Na obr.25 jsou uvedeny závislosti vztlačových a odporových koeficientů několika profilů z této série. Dle konzultace byl zvolen aerodynamický profil NACA63-815, který dosahuje nejvyšší klouzavosti.



Obrázek 24 - Vztlačové a odporové koeficienty aerodynamických profilů NACA 63-8XX [37]

5.4 Postup výpočtu

Poloměr rotoru R

U papírenského stroje je délka lopatek omezena velikostí odtokového žlabu. Abych docílil vymezení prostoru mezi lopatkou a stěnami žlabu, volím poloměr rotoru $R = 0,35m$.

Počet lopatek B

Z předchozích kapitol vyplývá, že nejvyšší účinnosti dosahují třílopatkové stroje. Proto volím $B = 3$.

Součinitel rychloběžnosti λ

Součinitel rychloběžnosti se pro daný počet lopatek volí jako hodnota od 5 do 6. Volím tedy $\lambda = 5$.

Se známým součinitelem rychloběžnosti jsme schopni jednoduše odvodit úhlovou rychlost rotoru a jeho otáčky:

$$(55) \quad \Omega = \lambda \cdot v_{\infty} = 12,4 \text{ rad.s}^{-1}$$

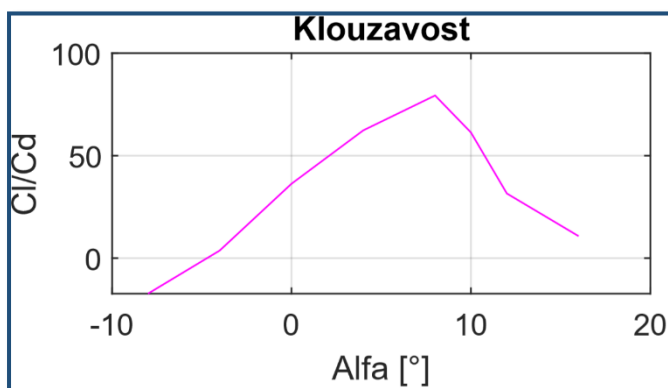
$$(56) \quad n = \frac{\Omega}{2\pi} = 118 \text{ min}^{-1}$$

Pro tyto otáčky bude nutné přenést kroutící moment turbíny ke generátoru pomocí převodu.

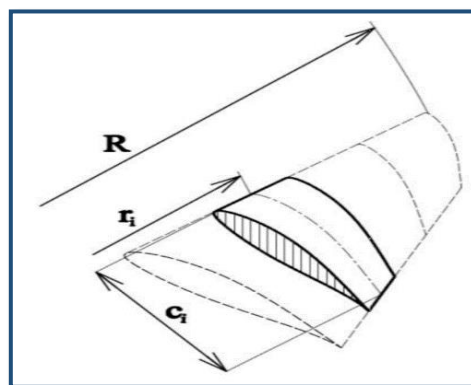
Návrhový úhel α_{design}

Tento počáteční úhel se volí pro maximální hodnotu klouzavosti. Z obr.29 můžeme vyčíst, že maximum funkce připadá na úhel 8° .

$$\alpha_{design} = 8^\circ$$



Obrázek 25 - Klouzavost profilu NACA 63-815



Obrázek 26 - Rozdělení lopatky na elementy [26]

Rozdělení na elementy N

Počet elementů volím $N = 50$.

Poloha jednotlivých elementů r_i

Tento parametr se řídí podle vztahu:

$$(57) \quad r_i = R - \left[\frac{R}{N} \cdot (i - 1) + \frac{1}{2} \cdot \frac{R}{N} \right]$$

Návrh lopatky

Tyto parametry pro určení velikosti tětiny a jednotlivých úhlů jsou odvozeny z kapitoly 5.1. Pro daný element se řídí vztahy:

$$(58) \quad \lambda_{r,i} = \lambda\left(\frac{r_i}{R}\right)$$

$$(59) \quad \varphi_i = \left(\frac{2}{3}\right) \tan^{-1}\left(\frac{1}{\lambda_{r,i}}\right)$$

$$(60) \quad c_i = \frac{8\pi r_i}{BC_{LDesign}} (1 - \cos(\varphi_i))$$

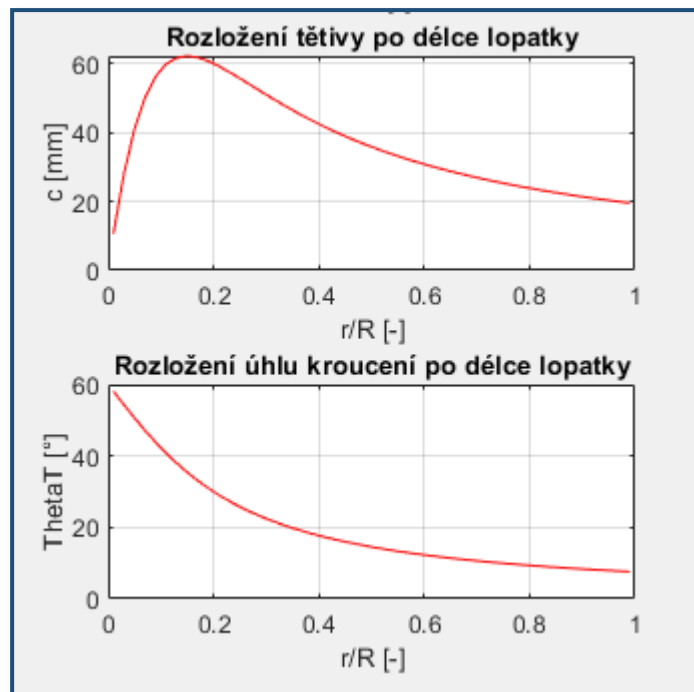
$$(61) \quad \theta_{p,i} = \varphi_i - \alpha_{Design}$$

$$(62) \quad \theta_{T,i} = \theta_{p,i} - \theta_{p,0}$$

Jednotlivé elementy byly vypočítány pomocí programu MatLab. Pro každý pátý element jsou jeho parametry popsány v tabulce č.1. Rozložení délky tětiny a úhlu kroucení v závislosti na délce lopatky je ukázáno na obr.31:

Tabulka 1 - Geometrie lopatky

Geometrie lopatky							
i	r _i [mm]	r _i /R [-]	λ _i [-]	φ _i [°]	c _i [mm]	θ _{pi} [°]	θ _{Ti} [°]
1	346.5	0.99	4.95	7.6141	19.6	-0.3859	7.6141
5	318.5	0.91	4.55	8.2636	21.2	0.2636	8.2636
10	283.5	0.81	4.05	9.2465	23.6	1.2465	9.2465
15	248.5	0.71	3.55	10.488	26.6	2.488	10.488
20	213.5	0.61	3.05	12.1018	30.4	4.1018	12.1018
25	178.5	0.51	2.55	14.2753	35.3	6.2753	14.2753
30	143.5	0.41	2.05	17.3356	41.8	9.3356	17.3356
35	108.5	0.31	1.55	21.8857	50.1	13.8857	21.8857
40	73.5	0.21	1.05	29.0685	59.4	21.0685	29.0685
45	38.5	0.11	0.55	40.7928	60	32.7928	40.7928
50	3.5	0.01	0.05	58.0917	10.6	50.0917	58.0917



Obrázek 27 - Geometrie lopatky v závislosti na poloze
elementu

Výkon turbíny je dán vztahem:

$$(63) \quad P = \frac{1}{2} C_p \eta \rho \pi R^2 v_\infty^3$$

Pokud bychom uvažovali, že výkonový koeficient C_p dosáhl maxima Betzova limitu a elektrická účinnost generátoru $\eta = 95\%$, dostaneme výkon turbíny:

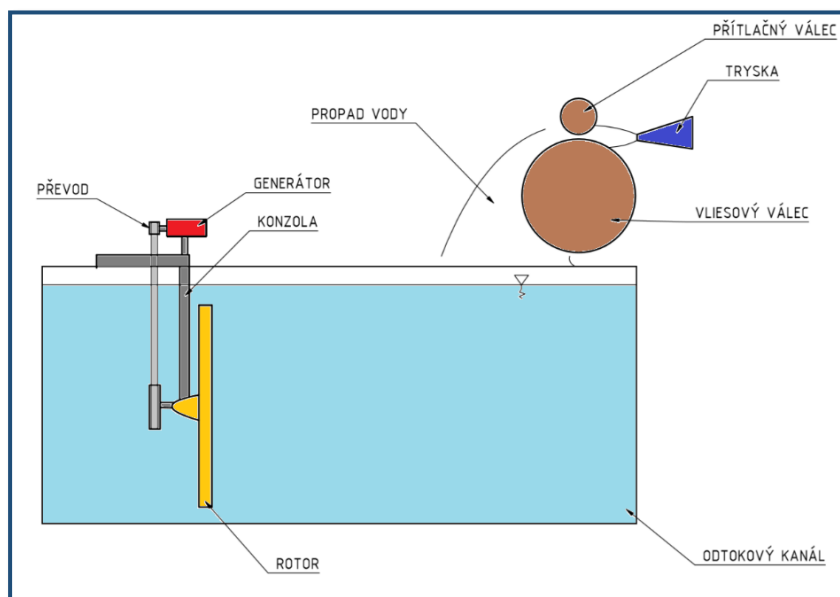
$$P = 71 \text{ W}$$

Tento výkon je velmi nízký, což je dáno nízkou rychlostí vody. Otázkou je, jakým způsobem by se dala rychlost média navýšit. Volba správného difuzoru před turbínou by mohla být za tímto účelem nápomocná, avšak je třeba dodržet požadavek papíren, a to že musí být zachován přístup do odtokového žlabu a turbína musí být demontovatelná pro snadné čištění během odstávky provozu.

I přes rostoucí cenu elektrické energie, která se dnes pohybuje od 1,00 do 1,20 Kč/kWh a která by se měla díky plánovanému zdanění fosilních paliv v budoucnu zvýšit, se dá konstatovat, že návratnost turbíny pro tento provoz je mizivá.

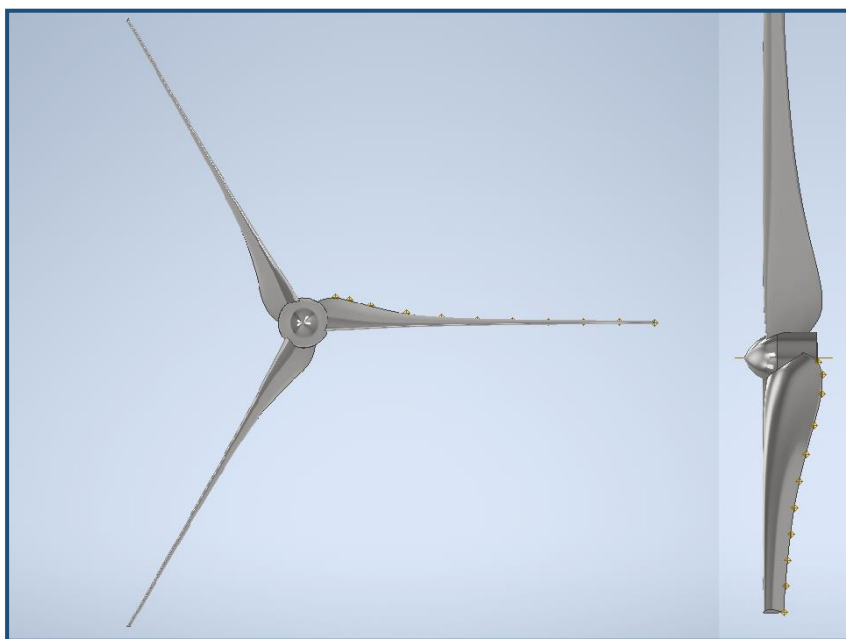
5.5 Schéma uspořádání a model rotoru

Na obr.28 je vidět zjednodušené schéma uložení turbíny do odtokového válce:



Obrázek 28 - Schéma uložení turbíny v odtokovém kanále

Model samotného rotoru je ukázán na obr.29:



Obrázek 29 - Model rotoru

6 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo shrnout dostupná technologická řešení pro využití hydrokinetické energie. Úvodní část se věnovala popisu některých míst, která by mohla v budoucnu sehrát významnou roli jako zdroj této energie. Navazující část popisuje jednotlivé zařízení, jejich vlastnosti a výhody. Hlavní rozdělení bylo provedeno podle orientace osy rotace. Z této rešerše je patrné, že nejvyššího stupně energetické přeměny dosahují axiální turbíny, které jsou dnes používány nejvíce. Tato kapitola také pojednává o místech, kde jsou turbíny již instalovány a připojeny k síti.

Třetí část práce se věnuje základům teorie proudění a vymezení jejich stěžejních pojmů. Hlavní poznatky, ze kterých vychází návrh turbíny, jsou: popis síly vznikající při interakci média s obtékaným tělesem, výpočet velikosti kinetické energie proudu a nalezení teoretického maxima energetické přeměny, ke kterému se vztahuje účinnost kinetických elektráren – Betzova limitu. Důraz byl kladen zejména na jeho odvození a na vyplývající skutečnosti.

Poslední kapitola se zabývá návrhem třílopatkové axiální turbíny pro rekuperaci nevyužitě hydrokinetické energie papírenského stroje. Vychází z poznatků z předchozí teoretické části. Návrh byl vytvořen iterační metodou na základě teorie osamoceného profilu, který se používá ke stanovení geometrie lopatek větrných turbín pracujících na podobném principu jako turbíny hydrokinetické. I přes zdražování elektrické energie by tato turbína bohužel nebyla efektivním řešením pro danou lokalitu. Její nízký výkon by nedokázal vyprodukovat dostatečné množství energie, aby pokryl náklady pro realizaci. Je to dáno parametry odtokového žlabu, který má příliš velký průřez a rychlost vody zde nedosahuje potřebných hodnot pro správné fungování turbíny. Volba vhodného difuzoru by mohla mít přínos pro zvýšení rychlosti vody, avšak pro zachování kinetického principu je nutné, aby hladina zůstala nerozdělená. Otázkou je, zda by pro tuto lokalitu byl výhodnější jiný typ turbíny pracující se spádem jako tradiční vodní turbíny.

7 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Fyzikální vlastnosti mořské vody. Klimatologie a hydrogeografie pro učitele [online]. Brno: Katedra geografie, Pedagogická fakulta, Masarykova univerzita, 2014 [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/pedf/ps14/fyz_geogr/web/pages/12-2-fyzikalni-vlastnosti.html
- [2] Mořský proud. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Mořský_proud
- [3] Marine current power. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Marine_current_power
- [4] The Technical Challenges of Deep Sea Exploration. ESIMotion [online]. Simi Valley: ESIMotion, 2016 [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: <https://www.esimotion.com/the-technical-challenges-of-deep-sea-exploration/>
- [5] Minerals Management Service Renewable Energy and Alternate Use Program U.S. Department of the Interior. Office of Congressional and Legislative Affairs [online]. 2006, 2006(1), 7 [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: <https://www.boem.gov/sites/default/files/renewable-energy-program/Renewable-Energy-Guide/OCSOceanCurrentTechWhitePaper2006.pdf>
- [6] How Red Tide Is Making It's Way From Florida's Gulf Coast To The Eastern Shores. In: CBS Miami [online]. Miami: CBS Miami, 2018 [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: <https://miami.cbslocal.com/wp-content/uploads/sites/15909786/2018/10/red-tide-image.png>
- [7] First Gulf Stream ocean current energy farm 'by next year' after Florida tests. In: Recharge [online]. Oslo: Recharge, 2020 [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: <https://www.rechargenews.com/transition/first-gulf-stream-ocean-current-energy-farm-by-next-year-after-florida-tests/2-1-819094>
- [8] Ocean Based Perpetual Energy. In: *Ocean Based Perpetual Energy* [online]. Miami: OceanBased Perpetual Energy, 2020 [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://oceanbased.energy>
- [9] Wave & Tide. In: Orkney Renewable Energy Forum [online]. Stromness: Orkney Renewable Energy Forum, 2020 [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <http://www.oref.co.uk/orkneys-energy/wave-tide/>
- [10] Tide Charts. In: Orkney Islands Council Harbour Authority [online]. Scapa, Orkney: Orkney Islands Council, Marine Services, 2020 [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: <https://www.orkneyharbours.com/port-authority/info/tides>
- [11] EMEC - European Marine Energy Centre [online]. Stromness: The European Marine Energy Centre Limited, 2020 [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <http://www.emec.org.uk>
- [12] Atlantis Announces Funding For the World's Largest Tidal Energy Project in Scotland. In: INHABITAT [online]. El Segundo, California, USA: MH Sub I, LLC dba

Internet Brands, 2014 [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: <https://inhabitat.com/atlantis-announces-funding-for-the-worlds-largest-tidal-energy-project-in-scotland/>

[13] MeyGen. In: SIMEC Atlantis Energy [online]. EDINBURGH: SIMEC Atlantis Energy, 2020 [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://simecatlantis.com/projects/meygen/>

[14] Simulated electrical power potential harnessed by marine current turbine arrays in the Alderney Race. In: Sustainable Energy Research Group [online]. Southampton: University of Southampton, 2004, s. 1 [cit. 2020-04-10]. ISBN SO17. ISSN SO17. Dostupné z: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S096014810500039X?token=55E40B730374D95052059B0A11F562ECED223BDE1719E5F48670485DDAB6A34617BB0DB29B1E529C71AE35806B1B1477>

[15] LAWS, Nicholas D. a Brenden F. EPPS. Hydrokinetic energy conversion: Technology, research, and outlook. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016, 57, 1245–1259

[16] AR1500 TIDAL TURBINE. SIMEC Atlantis [online]. Edinburgh, Scotland, United Kingdom: SIMEC Atlantis Energy, 2020 [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: <https://simecatlantis.com/wp-content/uploads/2016/08/AR1500-Brochure-Final-1.pdf>

[17] SeaGen. In: SIMEC Atlantis [online]. Bristol, United Kingdom: Marine Current Turbines, 2020 [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: <https://simecatlantis.com/wp-content/uploads/2016/08/SeaGen-Brochure.pdf>

[18] BEDNÁŘ, Josef. Turbíny: (malé vodní elektrárny). Českovice: Marcela Bednářová, c2013. ISBN 978-80-905437-0-6.

[19] Ocean Engineering: Optimization of blade profiles for the Wells turbine [online]. 2018, 2018(169), 202-214 [cit. 2020-04-21]. ISSN 0029-8018. Dostupné z: <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0029801818305328>

[20] Improved Design of Wells Turbine for Wave Energy Conversion Using Entropy Generation - Scientific Figure on ResearchGate. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-the-Wells-turbine_fig1_284435214 [cit. 21 Apr, 2020]

[21] WaterLily Turbine [online]. St. John's, Newfoundland and Labrador: Seaformatics systems, 2019 [cit. 2020-04-20]. Dostupné z: <https://shop.waterlilyturbine.com/products/waterlily-turbine?variant=29523372048445>

[22] Experimental Vibration Analysis of a Small Scale Vertical Wind Energy System for Residential Use. In: Researchgate [online]. Wien, Austria: FH Technikum Wien, 2019 [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/333316757_Experimental_Vibration_Analysis_of_a_Small_Scale_Vertical_Wind_Energy_System_for_Residential_Use

[23] RivGen® Power System. In: RivGen® Power System [online]. Portlane: ORPC, 2020 [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://www.orpc.co/our-solutions/scalable-grid-integrated-systems/rivgen-power-system>

- [24] Mezní vrstva: Boundary layer. In: Glenn Research Center | NASA [online]. Cleveland USA: Nancy hall, 2015 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/boundlay.html>
- [25] Kinetic energy. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Kinetic_energy
- [26] JUST, J. Aerodynamika axiálních větrných turbín. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 71 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Škorpík, Ph.D
- [27] Marine Turbine Hydrodynamics by a Boundary Element Method with Viscous Flow Correction [online]. [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=https://www.mdpi.com/2077-1312/6/2/53/pdf&ved=2ahUKEwjB29Pt4_zpAhVF-qQKHtAw04ChAWMAR6BAGFEAE&usg=AOvVaw2-cFmAALAt7OrtPS-8_9tzBetz,
- [28] Das Maximum der theoretisch möglichen Ausnützung des Windes durch Windmotoren, Zeitschrift für das gesamte Turbinenwesen, 1920
- [29] Exceeding the Betz limit with tidal turbines. Renewable Energy [online]. 2013, 2013(55), 277-285 [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.12.016>
- [30] CHROMECC, T. Aerodynamický návrh větrné turbíny pro zvolenou lokalitu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 113 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Škorpík, Ph.D.
- [31] Betz's law. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Betz%27s_law
- [32] Effect of unsteady flow on wind turbine wake development and noise generation. In: National Wind Watch [online]. [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://www.wind-watch.org/documents/effect-of-unsteady-flow-on-wind-turbine-wake-development-and-noise-generation/>
- [33] Comparison of aerodynamic efficiencies of common types of wind turbines. In: ResearchGate [online]. Berlin: ResearchGate, 2011 [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Comparison-of-aerodynamic-efficiencies-of-common-types-of-wind-turbines-Source-NREL_fig36_255380937
- [34] Představení společnosti. PAPCEL [online]. Litovel: PAPCEL, 2016 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://www.papcel.cz/o-spolecnosti/o-spolecnosti-predstaveni-firmy/>
- [35] NACA profil křídla - NACA airfoil. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: https://cs.qwe.wiki/wiki/NACA_airfoil

[36] Renewable Energies Offshore [online]. 1. Lisbon: CRC Press, 2015, 2015, s. 643-644 [cit. 2020-06-26]. ISBN 1315647850. Dostupné z:

[https://books.google.cz/books?id=nNCYCgAAQBAJ&pg=PA644&lpg=PA644&dq=naca+63-](https://books.google.cz/books?id=nNCYCgAAQBAJ&pg=PA644&lpg=PA644&dq=naca+63-8xx&source=bl&ots=ol4DPLLZLl&sig=ACfU3U30lBbZQgWeWtMz0XFEIS0eiopwng&hl=cs&sa=X&ved=2ahUKEwiQ0q6cjp_qAhWZwQIHHebCC9sQ6AEwBHoECAoQAQ#v=onepage&q=naca%2063-8xx&f=false)

[8xx&source=bl&ots=ol4DPLLZLl&sig=ACfU3U30lBbZQgWeWtMz0XFEIS0eiopwng&hl=cs&sa=X&ved=2ahUKEwiQ0q6cjp_qAhWZwQIHHebCC9sQ6AEwBHoECAoQAQ#v=onepage&q=naca%2063-8xx&f=false](https://books.google.cz/books?id=nNCYCgAAQBAJ&pg=PA644&lpg=PA644&dq=naca+63-8xx&source=bl&ots=ol4DPLLZLl&sig=ACfU3U30lBbZQgWeWtMz0XFEIS0eiopwng&hl=cs&sa=X&ved=2ahUKEwiQ0q6cjp_qAhWZwQIHHebCC9sQ6AEwBHoECAoQAQ#v=onepage&q=naca%2063-8xx&f=false)

[37] ZHANG, Da-hai, Lan DING, Bin HUANG, Xue-meng CHEN a Jin-tao LIU.

Optimization Study on the Blade Profiles of A Horizontal Axis Tidal Turbine Based on BEM-CFD Model. China Ocean Engineering [online]. Nanjing: Chinese Ocean Engineering Society, 2019, 33(4), 436-445 [cit. 2020-06-26]. DOI: 10.1007/s13344-019-0041-5. ISSN 0890-5487. Dostupné z:

<http://www.chinaoceanengin.cn/article/doi/10.1007/s13344-019-0041-5?pageType=en>

8 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 – Systém oceánských proudů [2] _____	16
Obrázek 2 – Rychlost Golského proudu u pobřeží Floridy [6] _____	17
Obrázek 3 - Směr proudění na Orknejích 4h po přílivu [10] _____	18
Obrázek 4 - Směr proudění na Orknejích 4h před přílivem [10] _____	18
Obrázek 5 - Schéma rozmístění turbín v průplavu Race of Alderney [14] _____	18
Obrázek 6 - Atlantis AR1500 [16] _____	20
Obrázek 7 - Pole axiálních turbín ukotvených k mořskému dnu [13] _____	20
Obrázek 8 - SeaGen [17] _____	21
Obrázek 9 - Schéma zeusovy turbíny [18] _____	22
Obrázek 10 - Schéma Wellsovy turbíny [20] _____	22
Obrázek 11 - Mikroelektrárna Waterlilly [21] _____	23
Obrázek 12 - Schéma Savoniova rotoru [18] _____	25
Obrázek 13 - Schéma Schneiderovy turbíny [18] _____	25
Obrázek 14 - Mezní vrstva [24] _____	27
Obrázek 15 - Rozložení tlaku na aerodynamický profil _____	28
Obrázek 16 - Rozložení síly na aerodynamický profil _____	29
Obrázek 17 - Koeficienty vzlaku a odporu pro profil NACA 63-815 [27] _____	30
Obrázek 18 - Médium proudící přes rotor _____	31
Obrázek 19 - Funkce součinitele výkonosti _____	32
Obrázek 20 - Vírový úplav vznikající za rotorem [32] _____	33
Obrázek 21 - Schéma papírenského stroje _____	35
Obrázek 22 - Detail vliesového válce a propadu vody do odtokového kanálu _____	35
Obrázek 23 - Geometrie lopatky [26] _____	36
Obrázek 24 - Vztahové a odporové koeficienty aerodynamických profilů NACA 63-8XX [37] _____	38
Obrázek 25 - Klouzavost profilu NACA 63-815 _____	39
Obrázek 26 - Rozdělení lopatky na elementy [26] _____	39
Obrázek 27 - Geometrie lopatky v závislosti na poloze elementu _____	41
Obrázek 28 - Schéma uložení turbíny v odtokovém kanále _____	42
Obrázek 29 - Model rotoru _____	42