

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST



Obor SOČ: Obor č. 2: Fyzika

Model malé větrné elektrárny

Jakub Mariančík

Jihomoravský kraj

Brno, 2025

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor SOČ: Obor č. 2: Fyzika

Model malé větrné elektrárny

Model of a small wind turbine

Autor: Jakub Mariančík

Škola: Gymnázium Matyáše Lercha, Žižkova 980/55, 616 00 Brno

Kraj: Jihomoravský kraj

Konzultant: Ing. Petr Sadovský, Ph.D.

Brno 2025

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou práci SOČ vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v seznamu vloženém v práci SOČ.

Prohlašuji, že tištěná verze a elektronická verze soutěžní práce SOČ jsou shodné.

Nemám závažný důvod proti zpřístupňování této práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) v platném znění.

V Brně dne 20.02.2024 podpis:

Jakub Mariančík

Poděkování

Předně děkuji za obětavou pomoc a podnětné připomínky, které mi během práce poskytoval Ing. Petr Sadovský Ph.D..

Velký dík si taktéž zaslouží Mgr. Vojtěch Beneš, jenž vyučuje fyziku na GML a zapůjčil mi reostat spolu a další komponenty.

V neposlední řadě má můj dík další fyzikář z GML Mgr. Tomáš Kopřiva, jelikož mi půjčil digitální siloměr.

Samozřejmě i instituce JCMM si zaslouží můj dík, jelikož do jisté míry umožňuje jak mně i ostatním studentům středních škol vyzkoušet si práci vědce.

Děkuji taktéž své rodině a přátelům za podporu při výzkumu a sepisování této práce.

ANOTACE

Tato práce se zabývá porovnáváním 12 různých vrtulí o stejném průměru, pomocí statické zkoušky, jež zjišťovala točivý moment, a dynamické zkoušky, která měřila mechanický výkon.

Cílem bylo najít design, jež by byl kompromisem maximálního výkonu a točivého momentu a který by šel replikovat ve větším měřítku ideálně s obdobnými charakteristikami.

Nakonec z důvodu omezeného času na testování muselo testování výkonu proběhnout v omezeném rozsahu, což nabádá k dalšímu pokračování výzkumu mimo soutěž SOČ.

Práce sice nedosahuje původní zamýšlené vypovídající hodnoty, ale přesto z ní dle mého názoru lze využít informace při konstrukci vrtule ve větším měřítku a má tedy jistý význam.

KLÍČOVÁ SLOVA

Betzovo pravidlo; efektivita; točivý moment; optimalizace; Reynoldsovo číslo

ANNOTATION

This work compares 12 different propellers of the same diameter, using a static test that measured torque, and a dynamic test that measured mechanical power. The goal was to find a design that would be a compromise between maximum power and torque and that could be replicated on a larger scale, ideally with similar characteristics. Finally, due to limited testing time, the performance testing had to be carried out on a limited scale, which encourages further research outside the SOČ competition. Although the work does not reach the originally intended informative value, in my opinion it can still be used to design propellers on a larger scale and therefore has some significance.

KEYWORDS

Betz's law; efficiency; torque; optimization; Reynolds number

OBSAH

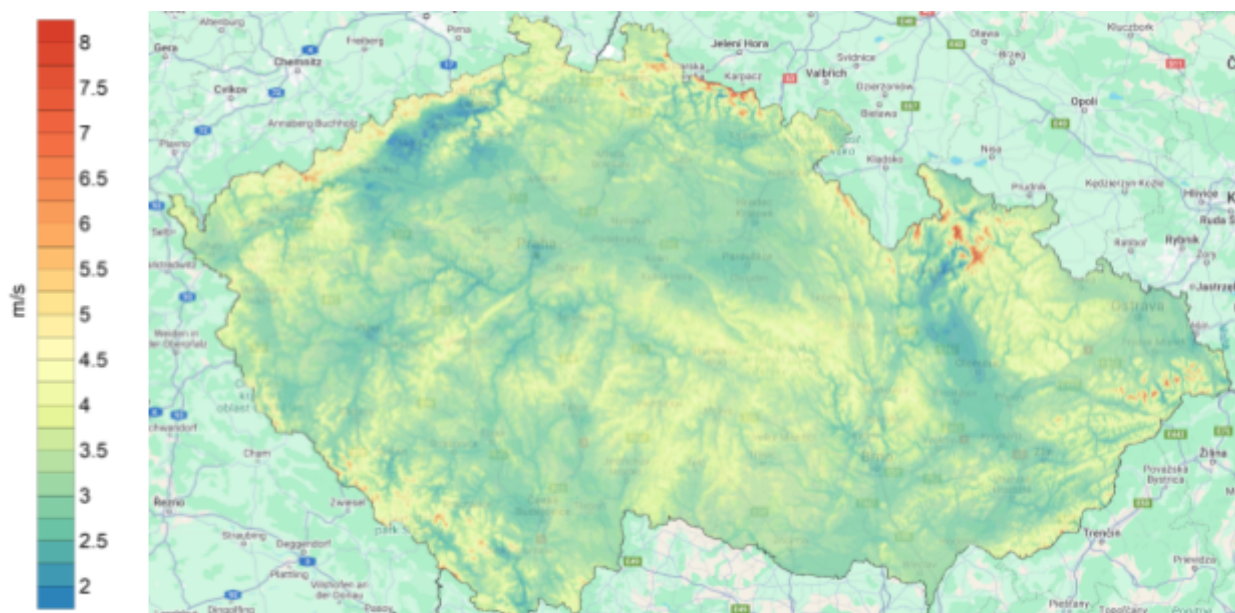
01	Úvod.....	
02	Typy větrných elektráren.....	
2.1	Elektrárny vertikálního typu (VAWT).....	
2.1.1	Fungující na bázi odporu.....	
2.1.2	Fungující na bázi vztlaku.....	
2.2	Elektrárny horizontálního typu (HAWT).....	
2.2.1	Fungující na bázi odporu.....	
2.2.2	Fungující na bázi vztlaku.....	
3	Důležité parametry u HAWT.....	
3.1	Výška sloupu.....	
3.2	Průměr rotoru.....	
3.3	Materiál konstrukce.....	
3.4	Pokrytí záběrové plochy.....	
3.5	Počet listů.....	
3.6	Úhel a twist listů.....	
3.7	Profil listů.....	
3.8	Celkový výkon dané instalace.....	
3.8.1	Výpočet energie větru.....	
3.8.2	Výpočet vytěžitelné energie a Betzův zákon.....	
3.8.3	Výpočet reálně vyrobené energie a vliv Reynoldsovo čísla.....	
	(zmínit členění dle výkonu)	
04	Myšlenka práce.....	
4.1	Proč ?.....	
4.2	Jak ?.....	
4.3	Kde ?.....	
4.4	Kdy ?.....	
05	Testování vrtulí.....	
5.1	Výroba mini vrtulí.....	
5.2	Testovací konstrukce.....	
5.2.1	Dřevěná kostra.....	
5.2.2	Vrtule na vytváření větrného pole.....	
5.2.3	DC motor	
5.2.4	Zdroj DC napětí.....	
5.3	Statická zkouška.....	
5.4	Dynamická zkouška	
06	Výsledky a jejich vyhodnocení.....	
6.1	Statická zkouška.....	
6.2	Dynamická zkouška.....	
6.3	Zamyšlení nad budoucností.....	
07	Závěr.....	
08	Soupis použité literatury.....	
09	Přílohy.....	

1 ÚVOD

V dnešní době se stále více dostává do popředí nutnost využívání obnovitelných zdrojů energie. Mnohé studie naznačují, že dochází k nepřírozenému nárůstu průměrné teploty Země, což je ze značné části způsobeno nadměrnými emisemi oxidu uhličitého (CO_2) a dalších plynů. Jedním ze způsobů, jak lze snížit množství skleníkových plynů v atmosféře, snížit obecně kontaminaci životního prostředí, a vyhnout se vzniku neobyvatelné planety, je minimalizace spalování fosilních paliv a přechod na zelené, obnovitelné zdroje energie. Mezi ně patří například větrné elektrárny, jejichž výroba sice vyprodukuje jisté emise, ale elektřinu dokážou vyrobit bez produkce emisí a tak svůj dluh životnímu prostředí jsou po nějaké době schopny splatit.

Naprostá většina elektřiny vyrobené tímto způsobem pochází z obrovských větrných farem. Cílem této práce není vývoj takto velkých instalací schopných napájet celá města, ale spíše najít design vrtule, která by poté složila jako mikrozdroj energie, ať už v lokalitách bez elektrické sítě, nebo spíše zákazníkům, jež smýšlejí ekologicky a chtějí svoji domácnost třeba ve městě částečně či kompletně odstříhnout od státní elektrické sítě, a kvůli okolním pozemkům si nemohou dovolit stavět pro elektrárnu vysoký stožár a tak potřebují co nejvíce využít pomalejší vítr u země.

Při využití bez vysokého sloupu se u běžně na internetu zakupovaných malých elektráren vyskytuje velký problém, jež spočívá v tom, že většina těchto elektráren má rotor optimalizovaný na aplikaci v lokalitě s velmi rychlým větrem, a jmenovitého výkonu tedy dosahují třeba až při 14 m/s, což je pro instalaci v ČR nevhodné, jelikož na Obrázku 1 lze vidět, že průměrná rychlost zde taková nikde není, a i když tedy někdy taková rychlost někde nastane, tak jen velice nakrátko.



Obrázek 1: Grafické zobrazení ročního průměru rychlosti větru v ČR deset metrů nad povrchem.

Po většinu času tedy na takové elektrárny fouká naprosto nedostatečný vítr k tomu, aby se využil potenciál jejich tenkolistého rotoru a právě proto mě napadlo, že bych si mohl někdy v budoucnu postavit vlastní elektrárnu s rotorem, který by byl právě na takovéto neoptimální podmínky optimalizován. předtím, než tak ale udělám, tak jsem chtěl mít jistotu, že zvolím správný design a proto bylo třeba provést výzkum, jehož příprava, průběh a výsledky jsou právě v této SOČ.

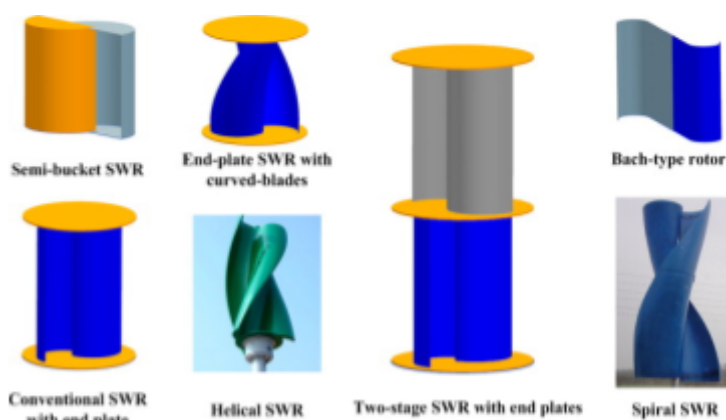
2 TYPY VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN

2.1 Elektrárny vertikálního typu (VAWT)

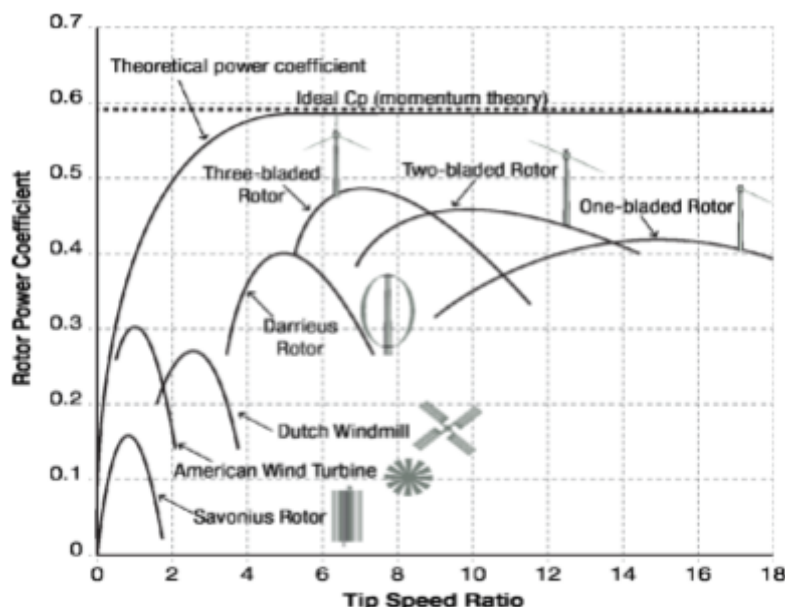
2.1.1 Fungující na bázi odporu

Vertikální odporové elektrárny jsou založeny na principu, že osa rotace rotoru je vertikální, tedy kolmá na horizont. Od toho mají i zkratku VAWTs, tedy Vertical Axis Wind Turbines. Pro tento typ elektráren na bázi odporu platí, že nehledě na to odkud fouká, jedna strana je obtékána vzduchem lépe než druhá, přičemž na stranu, jež je obtékána vzduchem hůře, působí vítr větší silou, než na stranu, kterou může obtéci lehčeji. Tím se vytvoří rozdíl sil a točivý moment. Jelikož tyto síly působí proti sobě a navzájem se tedy vyrušují výsledný točivý moment tedy není tak velký, jako kdyby výsledná síla byla součtem, což nastává třeba u elektráren na bázi vzlaku.

Tento způsob využití větru je tedy vhodný jen pokud nechceme, aby bylo nutné neustálé sledování směru větru a nevadí nám, že námi instalovaná elektrárna nebude mít velkou efektivitu. Tento fakt potvrzuje i efektivita jednoho z nejznámějších designů využívajících koncept rozdílného odporu, tedy rotoru typu Savonius, jehož základní, tedy konvencionální verzi lze vidět spolu s dalšími na Obrázku 2 a graf jeho efektivitu na Obrázku 3.



Obrázek 2: Zobrazení částí z používaných variant rotoru typu Savonius.

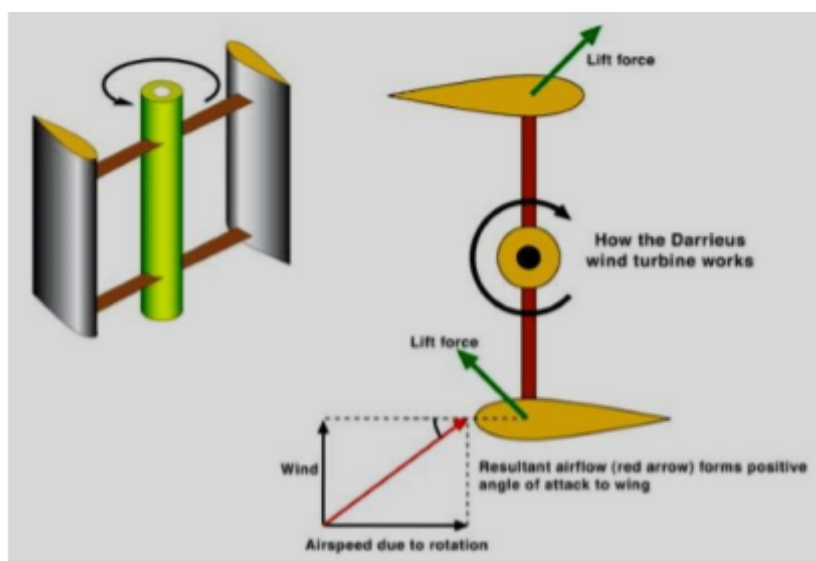


Obrázek 3: Zachycení efektivitu různých elektráren v závislosti na jejich TSR, tedy poměru rychlosti větru a obvodové rychlosti konců lopatek dané turbíny, nebo části rotoru nejvíce vzdálené od osy rotace rotoru.

Na Obrázku 3 lze vidět, že koeficient efektivitu konvenčního rotoru Savonius je při TSR 1 roven asi jen 0,15, což je, v porovnání s dalšími typy do grafu zanesených elektráren, velmi málo. TSR je poměr rychlosti větru a obvodové rychlosti rotoru nejdále od osy rotace, tedy u normálních vrtulí obvodové rychlosti konců lopatek. S narůstajícím TSR by měla narůstat efektivita dané turbíny, což lze z grafu vidět taktéž. Této teoretické maximální efektivitě se říká Betzův limit a detailněji o něm v jedné z podkapitol další kapitoly.

2.1.2 Fungující na bázi vztlaku

Vertikální vztlakové elektrárny využívají aerodynamického vztlaku k vytvoření točivého momentu. V této konfiguraci je rotor umístěn svisle a vítr prochází skrze plochu opisovanou jeho, většinou dvěma až třemi, listy. Nepraktické je, že pro každý list existuje při rotaci jen nekonečně krátký moment, kdy se nachází v naprosto optimálním úhlu vůči na něj foukajícímu větru. Právě proto dosahují vertikální vztlakové elektrárny o něco menší, než tomu je u horizontálních vztlakových elektráren, jejichž listy jsou v optimálním úhlu po celou dobu rotace. S tím se částečně pojí to, že většina takovýchto vrtulí se ani při větším větru není schopna sama roztočit. Jako ukázkového zástupce lze brát rotor typu Darrieus, jež lze vidět spolu s dalšími vrtulemi vztlakového typu na Obrázku 4.

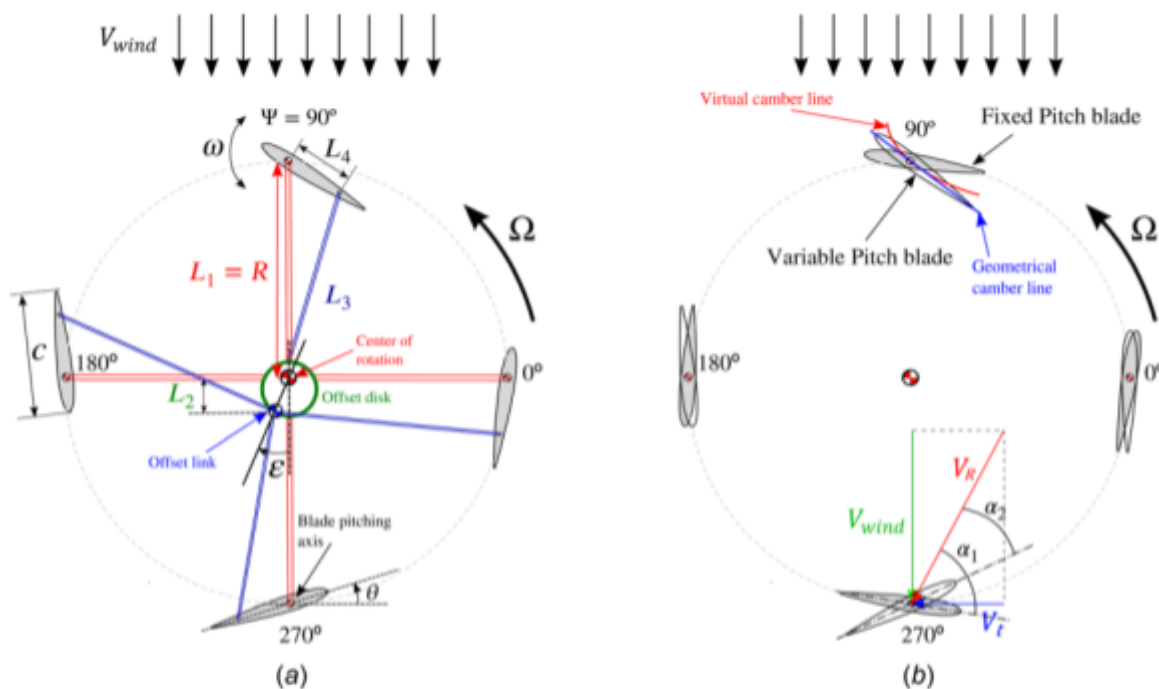


Obrázek 4: Schéma rotoru Darrieovy turbíny spolu s grafem zobrazujícím složení vektoru výsledné rychlosti větru působící na list Darrieovy turbíny.

Nejhůře startovatelná je jeho dvoulistá varianta, jelikož se u ní může stát, že se rotor natočí do polohy, kde oba listy neprodukují tangentně dost velkou sílu na jimi opsívanou kružnici. Na Obrázku 4, je dokonce malý graf, z něhož lze vyčíst, že pro tvorbu vztlaku potřebuje list, aby na něj foukalo pod optimálním úhlem. Tento úhel se vypočítá jako tangens rychlosti větru a obvodové rychlosti listů daného rotoru. Pokud se tedy rotor neotáčí, tak mají jeho listy nulovou obvodovou rychlost a vítr na ně jde kolmo a rozbíjí se o ně do stran, čímž se nevytváří vztlak a my jsme ve smyčce. Aby se o

ně totiž nerozbíjel, tak by do něj listy v první řadě musely, kvůli své obvodové rychlosti, nabíhat dost rychle na to, aby na ně působil pod vhodným úhlem a vytvářel se vztlak. To se právě neděje a tak není vytvářen žádný vztlak, rotor tedy není schopen se roztočit, což opět vede k tomu, že jeho listy mají nulovou obvodovou rychlost a není jimi generován žádný vztlak.

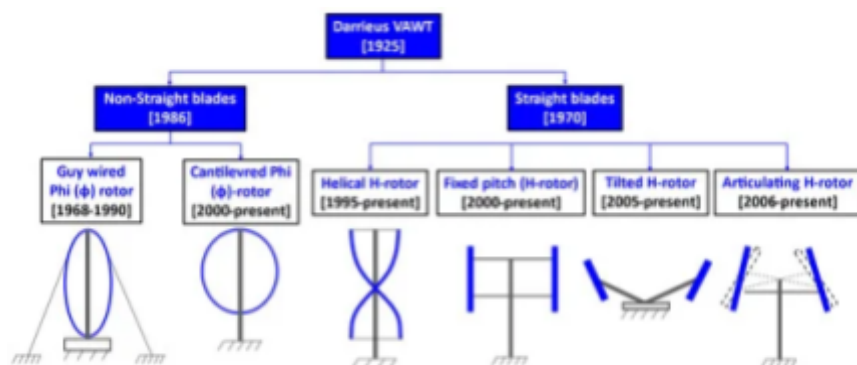
Z paradoxu neshodování se lze dostat pomocí dynamického měnění úhlu listu během plné rotace rotoru, aby i pokud se nehýbe, byl natočen vůči větru tak, aby generoval vztlak. Dynamické změny úhlu lze docílit jen u rotoru typu H pomocí táhel, jež jsou řízeny za větrem se otáčejícím diskem, jež je uchycen na centrální hřídel a má na sebe uchycenou vějíčku, aby se otáčel za větrem. Tímto způsobem se nejen zlepší samostartovací schopnost elektrárny, ale i její efektivita při výrobě energie, jelikož nastavuje každý z listů během rotace, přicházejícímu větru, tak, aby vždy generoval nějaký vztlak, což se u Darrieovy turbíny s fixními listy jinak neděje. Tento princip lze vidět na Obrázku 5.



Obrázek 5: Zobrazení fungování Darrieovy turbíny typu H s dynamicky se měnícím úhlem listu vůči větru, jež je měněn pomocí táhel.

Nevýhodou je, že táhla jsou pohyblivé součástky, jež se mohou pokazit a u nichž je potřeba pravidelná údržba a kontrola. A tak je další možnost navýšit počet listů a případně udělat listy zatočené, jako tomu je u typu Helix resp. Gorlov. Tím pádem nehledě na otočení rotoru vůči větru, je vůči němu vždy vhodně natočeno více oblastí listů, což vede k vyhlazení točivého momentu. Ve velkém měřítku se Darrieova turbína každopádně vyrábí spíše s fixními listy a spoléhá se na menší motor, jež ji uvede do minimálních potřebných otáček. Princip startéru pro tento typ elektrárny taktéž může plnit malý rotor typu Savonius, upevněný na střed hřídele rotoru. Taková elektrárna na své hřídeli upevněné dva rotory. Jeden na bázi odporu vhodný pro startování, jelikož nejlépe funguje při nízkém TSR a druhý na bázi vztlaku, jež nejlépe pracuje až při vyšších TSR.

Typy Darrieova rotoru a variantu kombinovaného rotoru lze vidět na Obrázku 6 a Obrázku 7.



Obrázek 6: Vývoj rotoru Darrieus a jeho typy.



Obrázek 7: Kombinace Savoniova rotoru a Darrieova rotoru.

Na obrázku 6 lze vidět, že rotor typu Darrieus vyvíjí již dlouho a existuje tedy více jeho variant. Pokud se pro změnu kouknete dozadu na Obrázek 2, lze hezky vidět jak rotor typu D, resp. Phi generuje vztlak právě jen při velmi úzkém rozmezí TSR, konkrétně nejvíc asi při TSR 5, jelikož jinak na jeho fixní listy vektor výsledné rychlosti větru nenabíhá pod vhodným úhlem a nevytváří se tak velký vztlak. Z TSR lze vypočítat úhel náběhu výsledného větru. Při TSR rovnému 5 je to asi 11,31 stupně. Přes omezenost pracovních otáček, tedy TSR, dosahuje svým koeficientem efektivity rovným 0,4 již vyšší maximální efektivity, než Savonius.

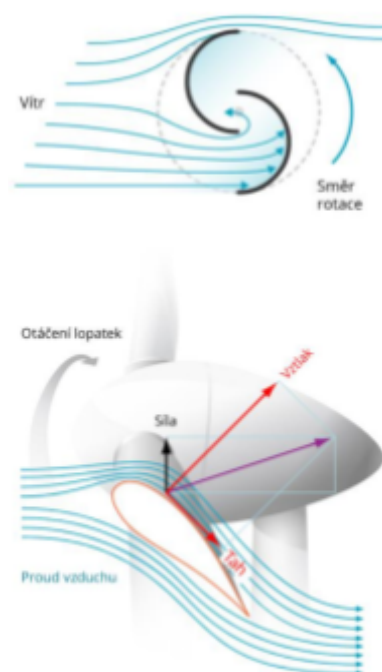
2.2 Elektrárny horizontálního typu (HAWT)

2.2.1 Fungující na bázi odporu

Horizontální odporové elektrárny, tedy HAWTs, či Horizontal Axis Wind Turbines, kde osa otáčení leží vodorovně, v praxi neexistují. Představovaly by pravděpodobně nejméně výhodnou konfiguraci, kterou lze postavit, jelikož jejich rotor by byl málo efektivní a navíc by se celá elektrárna musela ještě otáčet za větrem. U jedné elektrárny by se tedy vyskytovaly nevýhody odporové a ještě k tomu horizontální konfigurace. Jako jeden z možných designů, který by splňoval definici horizontální odporové elektrárny, si lze představit rotor typu Savonius převrácený o 90 stupňů na bok, jehož hřídel by byla zasazena do vidlice, která by byla na stožáru a měla na sebe připevněnou směrovku, aby se mohla otáčet za větrem, jinak by celý systém musel být natáčen elektromotorem, což by bylo ještě komplikovanější.

2.2.2 Fungující na bázi vztlaku

Horizontální vztlkové elektrárny patří, i přes potřebu se natáčet za větrem, mezi nejefektivnější konfiguraci větrných elektráren, jelikož každý list je po celou dobu rotace v naprosto optimálním úhlu vůči přicházejícímu větru, čímž vzniká velmi silný a plynulý výsledný točivý moment. Díky tomu má tento typ elektráren i lepší poměr plochy k hmotnosti, než třeba Darrieus a dokonce i Savonius, což nehledě na měřítko vede k roztočení při nižších rychlostech větru a možnosti vyrábět v širším rozsahu rychlostí větru. Právě proto se využívají i ve velkém měřítku ve větrných farmách. Zkrátka při stejné ploše záběru generuje rotor větší točivý moment, což, spolu s jeho menší vahou, tedy setrvačností, má za následek to, že se lehčeji roztočí. Přestože je tedy potřeba otáčecího serva na precizní nastavení rotoru vůči větru, nebyla tato konfigurace při stavbě elektráren ve velkém měřítku zatím nahrazena, jelikož i výzkumy a technické studie, jako jsou například závěrečné práce na ČVUT, potvrzují, že horizontální vztlkový typ nabízí nejlepší kompromis mezi efektivitou a konstrukční náročností. To obecně lze vidět i na Obrázku 2, kde konkrétně trojlistá vrtule pro HAWT, dosahuje svým koeficientem rovným asi 0,48, nejvyšší efektivity ze všech, na grafu zobrazených, vrtulí. Řekl jsem si tedy, že pokud budu stavět elektrárnu, tak jedině HAWT a v rámci SOČ jsem testoval vrtule vhodné jen pro tuto konfiguraci. Rozdílný princip vzniku točivého momentu u horizontálních vztlkových a vertikálních odporových elektráren zobrazuje Obrázek 8.



Obrázek 8: Porovnání vzniku točivého momentu
1) z důvodu rozdílu odporu
či
2) působením vztlaku

3 DŮLEŽITÉ PARAMETRY U HAWT

3.1 Výška sloupu

Vítr je pohyb vzduchu, který vzniká při nerovnoměrném ohřívání zemského povrchu v důsledku působení slunečního záření. Jeho proudění ovlivňuje odlišná teplota ve dne a v noci, liší se v různých nadmořských výškách, nad lesem či polem, nad městem či volnou krajinou, nad pevninou či nad mořem. Na rozdílnou teplotu vzduchu, tedy i na jeho pohyb má také vliv zbarvení povrchu.

Výška elektrárny, zahrnující sloup i gondolu (střed rotoru), přímo ovlivňuje využití větrné energie. S rostoucí výškou roste i průměrná rychlost větru a šance, že právě fouká a to v důsledku jeho viskozity. Viskozita vzduchu je důsledkem mezimolekulárních či meziatomových interakcí v něm probíhajících. Vrstva molekul úplně kompletně u země je nehybná, jelikož se navázala těmito silami na povrch. Vrstva nad ní už je volnější ale tře se o ní, takže je jen o něco rychlejší a nad touto vrstvou je zase další, jež je ještě volnější a takto se rychlost zvyšuje, dokud nedojdeme třeba do 10 km, kde není neobvyklé, když vítr fouká rychlostí i přes 300 km/h. Energie získaná z větru se zvyšuje s třetí mocninou rychlosti větru, což znamená, že každý dodatečný metr výšky značně zvyšuje možný výkon elektrárny. Konstrukce sloupu však musí být dostatečně pevná a co nejlhčí, aby se minimalizoval vliv jeho vlastní hmotnosti. Klíčovou roli zde hraje použití materiálů s vysokým poměrem pevnosti k hmotnosti, což zajišťuje odolnost, jak rotoru, tak celého zbytku konstrukce elektrárny. Právě díky nim v dnešní době již stojí elektrárny se sloupy o výšce i přes 150 metrů a průměr rotoru přes 200 metrů.

3.2 Průměr rotoru

Průměr rotoru je dalším z parametrů ovlivňujících výkon větrné elektrárny. U všech variant horizontálních vztlačových turbín ale i u VAWT je zásadní maximalizovat záběrovou plochu rotoru, tedy plochu opisovanou jeho listy, ze které mohou ony zachytávat energii větru, která je následně pomocí generátoru převedena na elektrickou. Energie získaná z větru je přímo úměrná druhé mocnině průměru rotoru a tak například zdvojnásobením poloměru rotoru dojde ke čtyřnásobnému zvětšení plochy zachycující vítr, což zase povede k cca. čtyřnásobnému navýšení výkonu elektrárny. Současně se zvětšováním rotoru však rostou mechanické nároky na rotor i zbytek konstrukce – váha působící na hlavní hřídel, setrvačnost celého systému, stres na materiál lopatek atd.. Proto je nutné hledat optimální rovnováhu mezi velikostí rotoru, jeho pevností a schopností odolávat dynamickým silám při provozu.

3.3 Materiály konstrukce

Moderní větrné elektrárny jsou vyráběny z pokročilých kompozitních materiálů, jako jsou skleněná a uhlíková vlákna kombinovaná s polymerními pryskyřicemi. Tyto materiály se vyznačují nízkou hmotností a vysokou pevností, což umožňuje výrobu dlouhých a tenkých lopatek. Nicméně jejich složení značně komplikuje recyklaci, což představuje environmentální výzvu. Současné výzkumy se zaměřují na vývoj nových metod recyklace kompozitních materiálů, ale v praxi stále platí, že zpracování těchto odpadních materiálů je mnohem složitější než u tradičních kovových komponent a jedna z mála možností, jak se lopatek zbavit, je spalení třeba ve výrobnách cementu či jinde.

3.4 Pokrytí záběrové plochy

Lopatky u lodních šroubů velmi často zabírají většinu, tedy více než 50 % jeho záběrové plochy. U větrných elektráren je tomu ve většině případů zcela jinak, lopatky u největších vrtulí zabírají jen několik procent z této plochy, protože jsou vůči své délce velmi tenké. Tato tenkost není jen tak náhodná, ale z velké části důsledek velkých rozměrů samotných lopatek, které čím jsou delší, tím jsou samozřejmě těžší a nejvíc tuto tíhu pozná část nejbližší centrální hřídele dané elektrárny, protože na ni má hmotnost zbytku listu největší páku. Již nyní to vypadá tak, že pokud se nepodaří objevit lepší materiál než sklolaminát či obdobné kompozyty, tak lidstvo brzy dosáhne limitu velikosti elektrárny přes který nelze jít, jelikož by se jinak celá konstrukce zhroutila pod vlastní vahou. Pokud by se tedy někdo pokoušel postavit 200 metrovou vrtuli s velkými plackovými listy, místo tenkých, tak by danou konstrukci velice pravděpodobně ani nešlo dát do provozu, jelikož jedna lopatka by místo obvyklých několika tun vážila více než desetinásobek a v základně listu, tedy části u středu rotoru, by se ihned vytvořily mikrotrhliny, jež by se postupně při provozu zvětšovaly, dokud by se daná lopatka kompletně neutrhla.



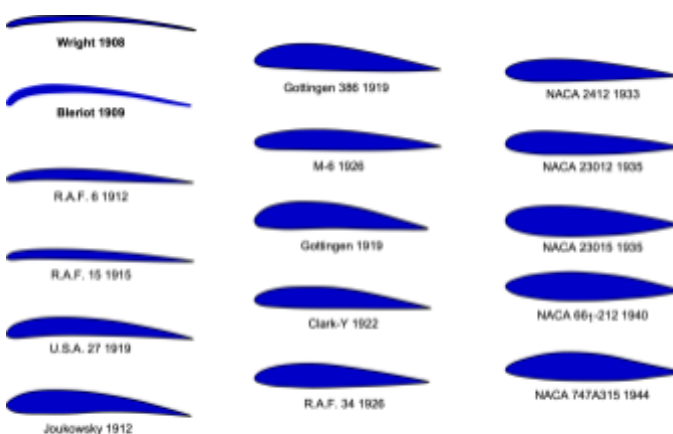
Obrázek 9: Porovnání záběrové plochy lodního šroubu a větrné elektrárny.

3.5 Počet listů

Většina horizontálních větrných turbín používá třílistý rotor, což představuje kompromis mezi aerodynamickou efektivitou a náklady na výrobu. Zvýšení počtu lopatek na čtyři by pravděpodobně zvýšilo výkon turbíny, ale ne dost na to, aby se nějak značně snížila doba návratnosti. Existují samozřejmě výjimky, jako třeba vrtule amerického typu, jež má obvykle i přes 20 listů. Jak již mnoho studií ale zjistilo, tak navyšování počtu neznamená vždy navyšování výkonu.

3.6 Profil listů

Profil listu lze definovat jako tvar plochy, kterou bychom dostali, pokud bychom provedli kolmý řez lopatkou vůči její délce a to v jakékoliv vzdálenosti od středu rotace listu. U všech velkých elektráren je tento tvar kapkovitý a je jedním z nejvíce optimalizovaných aspektů, jelikož dle toho, jak dobře je obtékán okolo něho proudícím vzduchem, se mění efektivita celé elektrárny. Anglicky se profilu listu říká airfoil a existuje i několik jejich databází. Jak lze vidět na obrázku, horní strana profilu je pokaždé o něco málo delší než dolní.



Obrázek 10: Zobrazení různých profilů.

Z Bernoulliho principu víme, že se ať už při průtoku tekutiny skrz potrubí či okolo nějakého objektu, musí zachovat neměnnost průtoku. Vzduch proudící okolo horní strany profilu tedy musí za daný časový interval urazit větší vzdálenost nežli vzduch proudící okolo dolní strany. Stejně jako v potrubí tedy nastane jev, že pokud se tekutina v nějaké oblasti pohybuje rychleji relativně k další oblasti, tak aby se zachovala celková energie tekutiny, musí se adekvátně snížit tlak v rychlejší oblasti. Nad horní částí profilu tedy bude nižší tlak než pod dolní částí a tento rozdíl tlaků bude mít za následek to, že vzduch v dolní části bude chtít natlačit sám sebe a celý profil do oblasti nad profilem.

3.7 Úhel a twist listů

Listy většiny turbín mají dle vzdálenosti od středu rotace proměnlivý úhel náběhu profilu, tedy úhel mezi osou profilu a rovinou daným listem opisovanou. Jeho samotný tvar se mění podél jejich délky – blíže ke středu je vyšší a na koncích nižší. Lze ho spočítat jako obrácený tangens z výsledku podílu rychlosti větru a oběhové rychlosti listu. Pokud je úhel po celé délce listu správně spočítán, pomáhá minimalizovat odpor vzduchu a maximalizovat aerodynamickou efektivitu. Tento „twist“ lopatek umožňuje rovnoměrné rozložení sil podél listu, což přispívá k menším namáhání lopatek a prodlužuje životnost mechanických komponent.

3.8 Celkový výkon dané instalace

Větrné elektrárny lze dle výkonu členit do několika obecných kategorií:

Mikro větrné elektrárny (do 10 kW)

Používají se k individuálnímu využití, například pro domácnosti, chaty nebo menší firmy. Obvykle mají průměr vrtule do **5 metrů** a slouží k dobíjení baterií nebo přímému napájení menších spotřebičů.

Malé větrné elektrárny (10 kW – 100 kW)

Vhodné pro farmy, malé podniky nebo izolované oblasti bez přístupu k elektrické síti. Průměr vrtule se pohybuje mezi **5–20 metry**. Často se používají v hybridních systémech společně s fotovoltaikou.

Střední větrné elektrárny (100 kW – 1 MW)

Určené pro místní distribuční síť nebo menší komunitní projekty. Průměr vrtule bývá **20–50 metrů**. Mohou zásobovat menší obce nebo průmyslové objekty.

Velké větrné elektrárny (1 MW – 10 MW)

Typické pro větrné farmy napojené na přenosovou síť. Vrtule mají průměr **50–150 metrů** a výšku věže často nad **100 metrů**. Jedna turbína může zásobovat stovky domácností.

Obří větrné elektrárny (nad 10 MW)

Moderní offshore (přímořské) turbíny, které se staví na moři kvůli vyšší stabilitě větru. Průměr vrtule přesahuje **150 metrů**, některé prototypy mají až **250 metrů**. Jsou navrženy pro maximální efektivitu a výkon.

3.9 Vzorec pro vyrobenou energii a Betzův limit

3.8.1 Výpočet energie větru

Vítr je pohybující se vzdušná masa, která obsahuje kinetickou energii a může být využita například k pohonu větrných turbín nebo experimentálních vrtulí. Tato energie je přímo úměrná hmotnosti pohybujícího se vzduchu a kvadrátu jeho rychlosti. Proto je výkon větru silně závislý na rychlosti proudění vzduchu.

Výkon větru lze vyjádřit vztahem: $P = \frac{1}{2} \rho A v^3$

Kde P je výkon, ρ hustota vzduchu (přibližně 1,225 kg/m³ při normálních podmínkách), A je plocha, kterou vítr ovlivňuje (plocha kruhu odpovídající vrtuli) a v je rychlost větru.

Významným faktem je, že výkon roste se třetí mocninou rychlosti větru, což znamená, že i mírné zvýšení rychlosti má dramatický vliv na dostupnou energii. Například zvýšení rychlosti větru ze 4 m/s na 5 m/s způsobí téměř dvojnásobný nárůst výkonu.

3.8.2 Výpočet vytežitelné energie a Betzův zákon

Žádná větrná turbína nemůže získat z větru 100 % jeho výkonu, protože část vzduchu musí nadále proudit skrz vrtuli, aby se zachoval plynulý tok vzduchu. Tento princip popisuje Betzův zákon, který stanovuje teoretickou maximální účinnost větrné turbíny. Podle tohoto zákona lze z větru získat maximálně 59,3 % jeho původní energie, což odpovídá výrazu:

$$\eta_{max} = \frac{16}{27} \approx 59,3\%$$

V reálných podmínkách se však účinnost větrných turbín obvykle pohybuje výrazně níže, a to kvůli různým ztrátám spojeným s aerodynamikou, mechanickým třením a dalšími faktory. Pro výpočet maximálního výkonu dostupného vrtuli lze použít upravenou verzi základního vzorce:

$$P_{max} = \frac{16}{27} \times \frac{1}{2} \rho A v^3$$

3.8.3 Výpočet reálně vyrobené energie a vliv Reynoldsova čísla

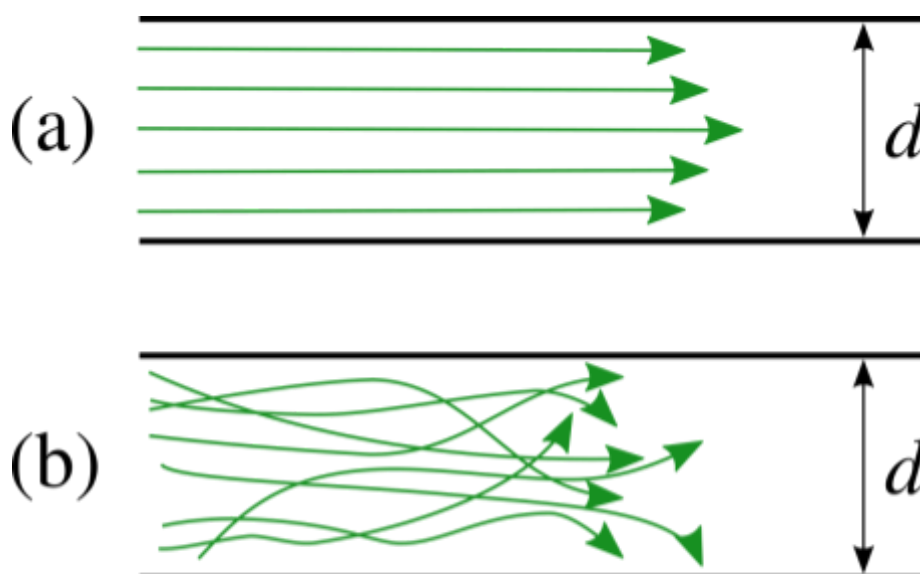
Skutečně získaná energie vrtule se bude vždy lišit od teoretického maxima stanoveného Betzovým zákonem. Hlavními faktory ovlivňující reálný výkon vrtule jsou aerodynamické ztráty, mechanické ztráty v ložiskách a převodech, ale také vliv Reynoldsova čísla.

Reynoldsovo číslo (Re) je klíčovým parametrem ovlivňujícím aerodynamické chování lopatek turbíny. Je definováno jako poměr setrvačných sil k viskózním silám v proudící kapalině, kde ρ je hustota vzduchu, v je charakteristická rychlost proudění, L charakteristická délka, jako třeba střední délka profilu listu vrtule, a μ dynamická viskozita vzduchu.

Reynoldsovo číslo se vypočítá podle vztahu: $Re = \frac{\rho v L}{\mu}$

Při nízkých hodnotách Reynoldsova čísla ($Re < 2\,320$) převládá laminární proudění, zatímco při vysokých ($Re > 3\,450$) se proudění stává turbulentním, což negativně ovlivňuje účinnost turbíny. Při změně měřítka vrtule dochází k růstu či poklesu hodnoty L , čímž se zvyšuje či snižuje hodnota poměru čitatele vůči jmenovateli a roste či klesá Reynoldsovo číslo.

Pro menší vrtule pracující s relativně nízkými rychlostmi větru je Reynoldsovo číslo poměrně nízké a proudění vzduchu je většinou laminární. Jakmile se však zvětší rozměry vrtule, její otáčky nebo rychlost proudění vzduchu, Reynoldsovo číslo se zvýší a pokud to daný design vrtule nebude kompenzovat úpravou profilu, twistu a úhlu náběhu, tak celková efektivita vrtule výrazně poklesne, protože turbulentní proudění klade vrtuli při otáčení velký odpor a snižuje tedy její schopnost přeměňovat energii větru na mechanický výkon.



Obrázek 11: Zobrazení trubek o stejném průměru a způsobu, jakým v nich může protékat tekutina.

Vliv délky L na Reynoldsovo číslo umělého typu vrtulí lze pochopit pomocí Obrázku 10 tak, že čím větší vrtule je, tím větší je i mezera mezi jejími listy. Pokud bychom uvažovali v rámci potrubí, je to jako by se zvětšil parametr d , tedy průměr trubky, jež je v kontextu vrtulí nahrazen délkou listu L . Ve větší trubce při stejné průměrné rychlosti proudění, dosáhne střední proud vyšší rychlosti, než v menší trubce. Rychlost proudění kompletně u stěn je nulová a roste směrem do středu trubky. Pokud se střední proud bude pohybovat dostatečně rychle, tak přesáhne jistou rychlostní mez, pod kterou teče laminárně, a začne se trochu vířit, to nazýváme přechodnou fází. Pokud by se rychlost kapaliny ještě navýšila, třeba tím, že by se ještě zvětšil průměr trubky, a tedy vzdálenost středního proudu od stěny, tak by se střední proud definitivně dostal do rychlosti, kdy dochází ke tvoření turbulencí. I pokud by se následně snížil celkový průtok trubkou, tedy průměrná rychlost tekutiny, tak již vzniklé turbulence mohou přetrvávat do rychlostí, kde by v první řadě vůbec nevznikly.

Vliv Reynoldsova čísla se projeví zejména při porovnání dvou geometricky podobných rotorů o různých velikostech. Pokud bychom vzali například vrtuli a zvětšili ji desetkrát, nelze očekávat, že by výsledný výkon byl stonásobný. Důvodem je, že se změnou velikosti se mění i písmeno L a tedy i Reynoldsovo číslo, což ovlivňuje celkový charakter proudění vzduchu kolem listů vrtule. Zvětšený rotor by byl vystaven vyšší míře turbulence, což by snížilo jeho efektivitu. Aby se tento problém eliminoval, bylo by nutné provést úpravy designu vrtule, například změnou sklonu listů nebo optimalizací jejich aerodynamického profilu.

4 MYŠLENKA PRÁCE

4.1 Proč?

Myšlenka této práce vznikla z mého dlouhodobého zájmu o větrné turbíny a efektivitu využívání větrné energie. Přibližně před rokem jsem si postavil speciální plachtěnou vrtuli, která měla tři listy natočené pod úhlem 35 stupňů vůči rovině rotace a dosahovala průměru přes jeden metr. Tento první experiment mě inspiroval k dalšímu zkoumání a mé ambice se postupně rozšířily. Mým cílem je jednou postavit ještě větší turbínu o průměru přes dva metry, která by byla schopná efektivně vyrábět elektřinu i v podmínkách slabého větru, což je zásadní pro oblast, kde žiji, tedy město Brno. Abych však mohl postavit efektivní větrnou turbínu v plném měřítku, bylo nutné nejprve provést experimentální testování menších modelů. Když mi byla nabídnuta možnost tento výzkum dělat oficiálně jako SOČ, tak jsem nemohl odmítnout.

4.2 Jak?

Původně jsem plánoval otestovat přibližně 25 různých variant vrtulí o průměru 170 mm, ale kvůli časovým omezením a složitosti testování jsem nakonec zvolil dvanáct modelů. Důvodem výroby menších modelů byla nejen finanční náročnost výroby dvanácti velkých testovacích modelů, ale také fakt, že na testování menších vrtulek je potřeba menší větrný tunel, resp. v mém případě testovací konstrukce. Přestože malé modely poskytují cenné informace o výkonu jednotlivých návrhů, je nutné si uvědomit, že výsledky nelze přímo přenést na větší měřítko kvůli změně Reynoldsova čísla, které výrazně ovlivňuje proudění vzduchu kolem listů vrtule a tím i její efektivitu. Mým cílem bylo porovnat dva základní typy vrtulí:

8 vrtulí navržených podle mého konceptu, tedy takové, jejichž listy pokrývají celou záběrovou plochu, a jejich geometrie je optimalizována pro maximální zachycení energie větru při nulovém pohybu a tedy na maximalizování počátečního startovacího impulsu.

4 vrtule stažené z platformy Thingiverse, které mají tenčí listy a představují spíše konvenční přístup k designu malých větrných turbín.

Testování bylo provedeno jak ve statických, tak dynamických podmínkách, aby bylo možné určit, která konfigurace je nejvýhodnější. Klíčovým aspektem testování byla variace počtu listů jednotlivých vrtulí. Výchozí hypotézou bylo, že s rostoucím počtem listů se bude zvyšovat schopnost vrtule přeměňovat kinetickou energii větru na mechanickou sílu, avšak pouze do určitého bodu, za kterým by další zvyšování počtu listů mohlo vést k nadměrnému odporu a ztrátě efektivit.

Základní konstrukční myšlenka mých prototypů spočívá v použití plochých desek z PLA, které simulují lehké plastové plachty, jaké se běžně používají na fóliovníky. Tento materiál jsem totiž využil na mé metrové plachtěné vrtuli. Logika tohoto designu vychází z toho, že plachta váží málo, a po jejím napnutí vznikne relativně velká rovná plocha, tedy jeden z listů vrtule. V rámci časových omezení jsem zvolil fixní úhel 45 stupňů pro všechny vrtule, což usnadnilo porovnávání jednotlivých modelů. Bylo mi však jasné, že tento úhel není naprosto optimální, jeho úprava by mohla vést k navýšení výkonu a také, že existuje mnoho dalších aspektů, jež je možné optimalizovat, ale tento proces by mi zabral moc času.

4.3 Kde?

Experimenty probíhaly v kontrolovaných podmínkách okolo 12 stupňů Celsia a 64 procentech vlhkosti v garáži domu, kde mám stálé bydliště. Postavil jsem si domácí větrný tunel, resp. speciální testovací konstrukci ze dřeva, která byla postupně upravována tak, aby umožňovala co nej přesnější měření. Konstrukce zahrnovala motor s vrtulí, který vytvářel větrné pole, a hliníkovou tyč s ložiskem pro uchycení testovaných vrtulí.

Vzhledem k tomu, že mé měření byla založena na aerodynamických vlastnostech vrtulí v proudícím vzduchu, bylo nutné zajistit co nej konzistentnější podmínky větrného pole. V praxi se ukázalo, že vhodná konfigurace testovací konstrukce je klíčová pro dosažení opakovatelných výsledků. V budoucnu by bylo ideální provádět testy v profesionálním větrném tunelu, kde by bylo možné zajistit ještě stabilnější proudění vzduchu bez nechtěných rušivých vlivů prostředí.

4.4 Kdy?

Testování probíhalo postupně v průběhu několika měsíců. Přípravná fáze, zahrnující návrh a výrobu testovacích modelů, zabrala značnou část času, neboť bylo nutné pečlivě navrhnout jednotlivé varianty vrtulí a zajistit jejich přesný tisk na 3D tiskárně. Následovalo sestavení testovacího stendu, kalibrace měřicího zařízení a první ověřovací měření, která pomohla doladit experimentální postup.

Samotné testování jednotlivých vrtulí bylo časově náročné, protože bylo třeba zajistit co nejvíce měření pro každý model a eliminovat možné chyby. Odhaduji, že pokud bych chtěl důkladně prověřit všechny konfigurace a provést kompletní analýzu každé z nich, bylo by potřeba změřit přibližně 12 000 hodnot. Toto množství dat by si vyžádalo obrovské množství času a zpracování, a proto jsem se rozhodl omezit rozsah měření na rozumnou úroveň, která stále poskytne relevantní výsledky.

Tento projekt byl tedy pouze jedním krokem na cestě k vývoji efektivní větrné turbíny. Pokud budu mít možnost pokračovat ve výzkumu, rád bych se zaměřil na další optimalizaci geometrie listů, zkoumání vlivu různých aerodynamických úprav a využití pokročilejších materiálů pro zvýšení účinnosti turbíny. Moje práce na této problematice tedy nekončí a v budoucnu plánuji pokračovat ve vývoji, abych dosáhl svého dlouhodobého cíle – postavit efektivní větrnou turbínu schopnou vyrábět elektřinu i za slabého větru.

5 TESTOVÁNÍ VRTULÍ

5.1 Výroba mini vrtulí

Výroba dvanácti testovacích mini vrtulí představovala úvodní, ale přesto velmi důležitou část celého experimentu. Všechny modely vrtulí byly vytištěny z PLA plastu na 3D tiskárně, což zajistilo přesnou reprodukovatelnost tvarů i rozměrů jako u digitální předlohy. Všechny měly průměr mm a celkově jsem vytvořil osm různých vrtulí podle vlastního konceptu, lišících se jen počtem listů od dvou po osmnáct (tj. 2, 3, 4, 6, 8, 10, 14 a 18 listů). Kromě toho jsem vybral čtyři další vrtule z veřejně dostupné databáze Thingiverse, které reprezentovaly běžně používané konstrukce s tenkými listy. To mi umožnilo přímé porovnání efektivity mého konceptu se standardními designy. Všechny testované vrtule byly upevněny stejným způsobem – na závitovou tyč M6 délky 0,33 metru, čímž byly zajištěny shodné a objektivní podmínky testování.

5.2 Testovací konstrukce

5.2.1 Dřevěná kostra

Pro účely testování jsem zhotovil jednoduchý dřevěný rám. Jeho původní rozměry byly přibližně 80×80×70 cm, ale později jsem rám zvětšil na rozměry 124×124×113 cm. Důvodem pro toto zvětšení bylo to, že druhá verze vrtule generující větrné pole měla výrazně větší průměr a do původního rámu by se nevešla. Přestože jsem nakonec tuto druhou, větší vrtuli nahradil třetí menší verzí (s průměrem 200 mm), větší rám jsem ponechal kvůli pohodlnějšímu přístupu dovnitř při vyměňování vrtulí a kvůli tomu, abych se případně mohl vrátit k větším vrtulím na výrobu větrného pole. Rám byl sestaven z dřevěných desek spojených pomocí vrutů, což umožňovalo velmi snadné změny a přidávání dalších součástí podle aktuální potřeby.

5.2.2 Vrtule na vytváření větrného pole

Pro vytvoření proudu vzduchu, v němž se testovaly mini vrtule, jsem navrhl vlastní vrtuli. První dvě verze této vrtule měly průměry okolo 680 mm a 800 mm. Postupně se však ukázalo, že při tak velkých rozměrech nebylo možné dosáhnout požadované rychlosti generovaného větrného pole, protože DC motoru a dostupným DC zdrojům chyběl potřebný výkon k roztočení vrtule na dostatečně vysoké otáčky. Proto jsem nakonec vytvořil třetí verzi vrtule s průměrem pouhých 200 mm, která byla výrazně lehčí a snadno dosahovala vysokých otáček. Všechny vrtule na tvorbu větrného pole měly přesně vypočítaný twist, což umožnilo efektivní generování a poměrně stabilní rychlost větrného pole, nehledě na tom, jestli jsem jeho rychlost anemometrem měřil spíše u okraje či prostředku vrtule.

5.2.3 DC motor

Pro pohon vrtule generující větrné pole jsem zvolil kvalitní DC motor, který jsem objednal z internetového obchodu zaměřeného na autodíly. Tento motor zaujal zejména svou robustností a schopností trvale zvládat proudy až kolem 20 ampérů bez přehřívání nebo jiných problémů.

Během provozu motoru se spíše teoreticky trochu zahřívaly cívky, čímž se jejich odpor lehce zvyšoval, a to vedlo k miniaturnímu zmenšování procházejícího proudu a tedy i k malým změnám v jeho výkonu při dlouhodobějším testování. To znamená, že na nějakou později testovanou vrtuli mohl foukat třeba o desetinu procenta pomalejší vítr. Prakticky ale tato nepřesnost byla asi nejmenší v rámci celé testovací konstrukce, takže jsem ji naprosto zanedbal.

5.2.4 Zdroj DC napětí

Pro stabilní napájení motoru jsem zvolil laboratorní DC zdroje s regulovatelným napětím a proudem, konkrétně dva kusy zdrojů s maximálním napětím 30 V a proudem 10 A. Tyto zdroje mohly být zapojeny jak sériově, tak paralelně a teoreticky byly schopné poskytnout výkon až 600 W. Během testování jsem měl tedy naprostou jistotu, že motor obdrží stejné napětí a výkon bez ohledu na počet provedených testů. Samozřejmě drobné odchylky v řádu setin voltu mohly nastat, což jsem si plně uvědomoval, ale jejich vliv jsem opět bral jako zanedbatelný.

5.3 Statická zkouška

Statická zkouška byla zaměřena na měření počáteční síly (resp. kroutícího momentu), kterou vrtule vyvíjí při nulových otáčkách. Toto měření je klíčové, protože určuje schopnost vrtule samostatně se roztočit bez další pomoci. Použil jsem pro toto měření siloměr Vernier zapůjčený z GML a program Vernier Graphical Analysis. Tento senzor však vykazoval jistou systematickou chybu, která způsobovala konstantní ukazování síly kolem 0,5 N, jež musela být vždy odečtena.

Kroutící moment každé z vrtulí jsem testoval od 1 m/s do 10 m/s, přičemž reálně by postačil i menší rozsah. Protože při vyšších větru se vrtule samozřejmě má otáčet a již nebude statická. Faktem je, že testy ve vyšším větru lze využít alespoň při simulaci, jak bude pravděpodobně obtékat vzduch repliku testovaných vrtulí, která bude ve větším měřítku. Jak jsem již psal o Reynoldsově čísle, tak pomocí něho jde zjistit, jak asi bude proudit tekutina okolo třeba 1,7 metrové vrtule při rychlosti 1 m/s, když se nám ji nechce stavět. Lze to nasimulovat tím, že na vrtuli o velikosti 0,17 metru, kterých jsem vyrobil dvanáct, pustíme vzduch o rychlosti 10 m/s. V obou případech je Re stejné a tak by se obtékající vzduch měl chovat v obou případech stejně. Samozřejmě nelze výsledky brát jako stoprocentně směrodatné, ale do jisté míry ano.

Vrtule při této zkoušce působila přes vytištěnou kladku o poloměru 1,2 cm na provázek připojený k siloměru. Zkouška měla potvrdit mou hypotézu, že vrtule s celoplošnými listy budou mít výrazně lepší samostartovací vlastnosti než modely s úzkými listy, které by se pravděpodobně neroztočily bez pomocného startovacího systému. Tento aspekt byl velmi důležitý, protože konstrukce jednoduché větrné turbíny bez složité elektroniky vyžaduje výbornou samostartovací schopnost vrtule.

5.4 Dynamická zkouška

Účelem dynamické zkoušky bylo zjistit, jaký mechanický výkon je jednotlivá vrtule schopná reálně podat. Původně jsem plánoval tuto zkoušku realizovat pomocí elektrického motoru a reostatu, který by reguloval zátěž. Avšak kvůli časové tísni jsem zvolil jednodušší systém, kdy

vtule přes provázek zvedala reálné závaží (asi 23 gramovou PET lahev s přidanými maticemi M6, z nichž každá vážila 2g).

Při testování se měly všechny vrtule otestovat opět při všech deseti rychlostech větru a to se dvěma různými převody, které určovaly náročnost pro zvedání zátěže. První (těžký) převod používal větší kladku o poloměru 1,2 cm, druhý (lehký) používal prodlužovací matici o poloměru pouhých 0,575 cm. Hypotézou bylo, že při lehčím převodu dosáhne vrtule vyšších otáček, protože na každou otáčku zvedne závaží o menší vzdálenost a tak na dorovnání výkonu jako při těžkém převodu je potřeba navýšit otáčky. Tenkolistým vrtulím by toto mělo prospívat, jelikož jsou na tyto vyšší otáčky vhodněji nadesignované.

- Lehký převod – namotávání provázku na prodlužovací matici (průměr cca 11,5 mm, poloměr 0,575 cm).
- Těžký převod – namotávání provázku na kladku s průměrem 1,2 cm (poloměr 0,6 cm).

Hypotéza zněla tak, že ve vyšších otáčkách by mělo docházet ke zlepšení aerodynamických vlastností vrtule a k lepšímu využití kinetické energie větru, jelikož vítr bude nabíhat na listy pod optimálnějším úhlem, nežli při nehybnosti. Tento efekt se projevil zejména u osmilisté vrtule s tenkými listy, která sice v nulovém pohybu měla malou plochu na zachytávání větru, ale po dosažení vyšších otáček dokázala využít proudění vzduchu efektivněji než některé jiné vrtule.

Před testy jsem si uvědomoval, že existují jisté možnosti, jak měření dále zpřesnit. Například ložiska jsem mohl nahradit kvalitnějšími s nižším třením a místo ohnuté trubky použít kladku. Uvědomoval jsem si, že provázek, který se při testech třel o ohnutou trubku, by mohl postupně měnit své třecí vlastnosti. Také pružnost provázku a drobné vibrace konstrukce mohly vést k určitému kolísání měřených hodnot ještě při statické zkoušce. Tyto možné odchylky jsem vnímal jako limitace, jejichž odstranění by vyžadovalo větší časovou a finanční investici, kterou jsem si v této fázi projektu nemohl dovolit. Detailní rozbor následuje v další kapitole.

6 VÝSLEDKY A JEJICH VYHODNOCENÍ

6.1 Statická zkouška

Cílem statické zkoušky bylo zjistit, která vrtule dokáže v klidovém stavu vyprodukovat největší moment síly, což je klíčové pro schopnost vrtule roztočit se i při nízkých rychlostech větru. Výsledky byly zapsány v programu Vernier Graphical Analysis a přestože byly při vyšších rychlostech roztřepané, za pomoci AI je šlo aproximovat a jasně ukázaly, že čtrnáctilistá vrtule byla nejvýkonnější od 6 m/s výše, zatímco šestilistá vrtule dominovala v nižších rychlostech do 5 m/s. Tento výsledek je dobře vysvětlitelný skrze Reynoldsovo číslo – čtrnáctilistá vrtule měla mezi listy užší mezery (asi 3 cm), tedy parametr L resp. d byl menší, což vedlo k menšímu víření vzduchu a lepšímu využití proudění při vyšších rychlostech. Naopak šestilistá vrtule měla mezery mezi listy větší (asi 7 cm), což bylo výhodné při nižších rychlostech, protože v daném

Vrtule	cca. 1 m/s (5V)	cca. 2 m/s (8V)	cca. 3 m/s (11V)	cca. 4 m/s (14V)	cca. 5 m/s (18V)
dvoulístá(01)	0	0,0157	0,0529	0,0957	0,1729
trojlístá(02)	0	0,03	0,09	0,195	0,41
čtyřlístá(03)	0	0,015	0,11	0,215	0,38
šestilístá(04)	0	0,0606	0,1882	0,3616	0,6116
osmilístá(05)	0	0,0458	0,1511	0,2826	0,5616
desetilístá(06)	0	0,034	0,158	0,31	0,59
čtrnáctilístá(07)	0	0,0349	0,1514	0,3213	0,6077
osmnáctilístá(08)	0	0,0348	0,1271	0,2582	0,5349
osmi-rovno-tenko-listá(09)	0	0,0098	0,0589	0,1226	0,2451
osmi-měsico-tenko-listá(10)	0	0	0,0407	0,0935	0,187
troj-tenko-listá(11)	0	0	0,0162	0,0283	0,072
čtrnácti-flusto-listá(12)	0	0,0351	0,0833	0,1754	0,3289
cca. 6 m/s (21V)	cca. 7 m/s (23V)	cca. 8 m/s (26V)	cca. 9 m/s(29V)	cca. 10 m/s(31V)	suma sil [N]
0,2371	0,3186	0,4443	0,5357	0,61	2,4829
0,59	0,77	0,95	1,125	1,415	5,575
0,5	0,62	0,855	1,09	1,265	5,05
0,8004	1,0963	1,3974	1,6423	1,9076	8,066
0,7879	0,9721	1,3037	1,6563	1,93	7,6911
0,846	1,074	1,33	1,59	1,782	7,714
0,8552	1,0349	1,4281	1,7776	1,9378	8,1489
0,797	0,962	1,2679	1,6319	1,8941	7,5079
0,353	0,4314	0,5736	0,7059	0,8089	3,3092
0,2724	0,3374	0,4431	0,5813	0,6464	2,6018
0,121	0,1412	0,1936	0,242	0,2783	1,0926
0,4737	0,4999	0,7324	0,9605	1,0044	4,2936

Tabulka 1: Statická zkouška vrtulí.

kontextu měla tato turbína optimálnější číslo Re nežli u čtrnáctilisté, kde bylo číslo příliš malé.

Tenkolisté vrtule v tomto testu propadly, přičemž trojlístá tenkolistá a měsíční osmilístá vrtule při 2 m/s nebyly narozdíl od ostatních vrtulí schopny vyprodukovat žádnou sílu. Tento výsledek potvrzuje, že vrtule s plně pokrytou záběrovou plochou mají velkou výhodu v situacích, kdy je nutné zajistit snadné roztočení při nízkých rychlostech větru. Popravdě v tomto kontextu moc nesešlo na tom, že moje vrtule mají naprosto placaté listy a tedy žádný profil. Díky své plně pokryté ploše zkrátka roztáčely tak velké množství na ně nabíhajícího vzduchu, že se jim tenkolisté vrtule nemohly rovnat.

6.2 Dynamická zkouška

Dynamická zkouška měla za úkol určit, jaký reálný mechanický výkon jsou jednotlivé vrtule schopny vyvinout při různých zatíženích. Původně jsem chtěl všechny modely testovat od 1 do 10 m/s při zvedání plejády různých závaží na dva různé převody. Nakonec jsem z důvodu nedostatku času zkoušku provedl jen při 6 m/s, jelikož to byla maximální rychlost zdrojové vrtule, při které ještě nevytvářela moc silné vibrace a tak jsem mohl mít při testování jistotu, že mi neuletí. Otestoval jsem všechny čtyři modely z Thingiverse a dva modely dle mého konceptu, jež vypadaly nadějně z výsledků statické zkoušky (tedy pro 6ti listou a 14ti listou vrtuli). I zde se potvrdila nadřazenost čtrnáctilisté vrtule, která dosáhla nejvyššího výkonu 54,2 mW, nicméně osmilistá tenkolistá vrtule překvapivě podala velmi dobrý výkon 42,1 mW, což ukázalo, že pokud se vrtule dostane do správných otáček, může efektivně fungovat i s tenčími listy. Právě proto se staví velké elektrárny s tak tenkými listy, mají prostě stejný výkon jako kdyby listy byly tlusté, za využití méně materiálu.

Jedním z nejdůležitějších zjištění bylo, že použití lehkého převodu umožnilo vrtulím dosáhnout vyšších výkonů. Když čtrnáctilistá vrtule zvedala váhy okolo 30 gramů při těžším převodu, tak měla problémy se dostat do optimálních otáček a tím pádem i její výkon byl nepůsobivý. Kdežto jakmile zvedala hmotnost v lehčím převodu, tak se díky tomu dostala do vyšších otáček, dosáhla celkově vyšší efektivity a rozprášila konkurenci. Vlastně jsem ověřil pravidlo vyplývající z Obrázku 2, že čím vyšší má daná vrtule tzv. TSR, nebo-li poměr obvodové rychlosti špiček listů, vůči rychlosti na vrtuli proudící vzduchu, tak tím více efektivně dokáže zachycovat resp. konvertovat lineární vítr, tedy jeho kinetickou energii, do svého otáčivého pohybu, tedy do své rotační kinetické energie.

Dynamická zkouška také ukázala fenomén spirály zpomalování, který byl nejvíce patrný u tenkolistých vrtulí. Pokud byla vrtule příliš zatížena, zpomalila se. Jak jsme si již vysvětlili, tak právě to vedlo k nižší efektivitě konverze energie. To vedlo k tomu, že zpomalila ještě víc a tento řetězec pokračoval do doby, než kompletně zastavila. Jak všichni ví, zastavená vrtule nic nevyrábí a je tedy k ničemu. Jako příklad takové bezúčelnosti může být brán další testovaný model, tedy trojlístá tenkolistá vrtule. Ta narozdíl od všech ostatních testovaných modelů, nebyla schopna zvednout ani samotnou PET lahev vážící 23 g a pohla s ní až při 10 m/s.

Korelace efektivity a TSR byla potvrzena ještě při následném pozorování vztahu mezi hmotností závaží zvedaného už jen na lehký převod a efektivitou vrtule. Například šestilistá vrtule při zvedání 33g na těžký převod měla efektivitu 0,76 %, ale při 38g už jen 0,42 %, což jasně ukazuje, že pokud je vrtule přetížena, její výkon dramaticky klesá. Ukázalo se, že záleží jak na velikosti kladky, tak hmotnosti zvedaného závaží, tedy na celkovém požadovaném točivém momentu vrtule.

Výkon je totiž roven úhlové rychlosti v radiánech krát točivý moment v Nm. A jak jsem zjistil, vrtulím vyhovuje, pokud jejich úhlová rychlost je co nejblíže té maximální, tedy bezzátěžové, jelikož mají nejvyšší TSR. Nám lidem ale vyhovuje, když vrtule je pod zátěží, jelikož chceme něco vyrobit. Nesmíme to přehnat, jinak se dostane na nulové otáčky, kdy vrtule taky nic nevyrábí. Bod maximálního výkonu leží někde mezi, otázka kde. Jak se ukázalo, tak spíše blíže maximálních otáček, nežli minimálních. To jsem úplně neočekával, jelikož třeba u vodních elektráren, konkrétně Peltonova kola, je bod nejvyššího výkonu přesně při polovině maximálních

Měl jsem si uvědomit, že Peltonovo kolo, jež je založeno na konverzi energie tryskající vody, nelze úplně porovnávat s vrtulemi založenými sice taktéž na zákonu akce a reakce, ale navíc na generování vztlaku. Opět tedy opakuji, že čím vyššího TSR vrtule dosáhne, tím lépe a vracím se k tomu, že je vhodné po vrtuli požadovat pomocí převodů spíše menší dynamický točivý moment, aby se pro udržení požadovaného výkonu mohla držet spíše na vyšších otáčkách.

6.3 Zamyšlení nad budoucností

Z obou zkoušek lze zatím vyvozovat jen to, že čtrnáctilistá vrtule je asi nejvhodnější volbou pro široké spektrum podmínek, zatímco vrtule s menším počtem listů jsou s ní ať už svým mechanickým výkon, či statickým točivým momentem, srovnatelné jen ve specifických situacích. Výsledky naznačují mnoho možností pro další výzkum:

1. Testování při více rychlostech větru – Bylo by vhodné provést dynamické testování při různých rychlostech větru, aby bylo možné určit, jak se efektivita mění v závislosti na proměnlivých podmínkách.
2. Zkoumání vlivu převodů – Dynamická zkouška ukázala, že správný převod může dramaticky ovlivnit výkon vrtule. Bylo by zajímavé otestovat více převodových poměrů a zjistit, jaký poměr je ideální pro různé typy vrtulí.
3. Různé hmotnosti závaží – Přesnější testování s více váhovými variantami by umožnilo detailněji analyzovat optimální zatížení jednotlivých vrtulí. Nebo by šlo se vrátit k zátěži pomocí motoru a napojit ho na laboratorní, tedy nastavitelnou, zátěž.
4. Testování vlivu úhlu listů – Současné testy používaly fixní úhel 45 stupňů. Další výzkum by mohl zkoumat, zda by jiné úhly vedly k lepším výsledkům.
5. Zvětšení modelů a testování vlivu Reynoldsova čísla – Zvýšení měřítka vrtulí by ukázalo, jak se mění jejich výkon s měnícím se Reynoldsovým číslem. To by pomohlo při návrhu efektivnějších velkých větrných turbín.
6. Měření optimálních otáček jednotlivých vrtulí – Detailní měření optimálních otáček každého modelu by umožnilo lépe určit, při jakém zatížení dosahují vrtule nejvyššího výkonu.
7. Testování pokrytí záběrové plochy – Přestože výsledky naznačují, že plné pokrytí je nejlepší, stejně by nebylo na škodu si to ověřit ještě nanovo s více modely.

Celkově to zatím vypadá tak, že na každou danou rychlost větru je vhodný jiný počet listů. Z testování zatím vychází jako vítěz čtrnáctilistá vrtule, ale nehodlám dělat ukvapené závěry předtím, než otestuji všechny vrtule znovu a více do detailu. Zatím tedy nebudu stavět žádnou velkou vrtuli, protože ve statickém testu se ukázalo, že nadějná není jen 6ti listá, či 14ti listá vrtule, ale třeba i osmilistá či desetilistá nebyly moc pozadu. Jen jsem je prostě nestihl otestovat a právě to mám v plánu napravit. Taktéž, jak již bylo řečeno, je pořád otevřená cesta k testování optimálního úhlu listů, jejich rozložení, optimálního pokrytí záběrové plochy etc..

7 ZÁVĚR

V rámci této práce bylo provedeno relativně komplexní testování různých vrtulí o průměru 170 mm s cílem analyzovat jejich výkon a efektivitu v různých podmínkách. Statická zkouška se zaměřila na schopnost vrtulí generovat tah v klidovém stavu, zatímco dynamická zkouška hodnotila jejich mechanický výkon při reálném zatížení, tedy zvedání závaží.

Statická zkouška potvrdila, že vrtule s plně pokrytou záběrovou plochou mají jednoznačně lepší startovací schopnosti než vrtule s tenkými listy. Nejvýkonnější se ukázala být čtrnáctilistá vrtule, která dominovala při vyšších rychlostech větru, zatímco šestilistá vrtule vykazovala nejlepší vlastnosti při nižších rychlostech (do 5 m/s). V chování proudění vzduchu kolem listů hrálo zásadní roli Reynoldsovo číslo - při vyšších rychlostech kvůli menším mezerám mezi listy docházelo u čtrnáctilisté vrtule k menším ztrátám způsobeným vířením než naopak u šestilisté. Úplně mimo pódium skončily tenkolisté vrtule, zejména trojlístá a měsíční osmilistá, jež se v nízkých rychlostech vůbec neroztočily, což potvrdilo jejich nevhodnost pro prostředí s nízkou rychlostí větru.

Dynamická zkouška ukázala, že mechanický výkon vrtulí není ovlivněn pouze jejich designem, ale také správným nastavením převodu a zvedané váhy, tedy po vrtuli požadovaným točivým momentem. Nejlepší výkon podala čtrnáctilistá vrtule (54,2 mW), přičemž překvapivě dobře si vedla i osmilistá tenkolistá vrtule (42,1 mW), což naznačuje, že při dostatečných otáčkách mohou být tenké listy efektivní. Experimenty také prokázaly, že vrtule musí být udržována v optimálních otáčkách, jinak její výkon rychle klesá. Při příliš vysokém zatížení docházelo ke zpomalování, což vedlo ke ztrátě efektivit a v případech tenkolistých až k zastavení vrtule. Lehký převod umožnil vrtulím dosahovat vyšších otáček a tedy vyšší efektivit a výkonu.

Celkově se při výzkumu potvrdilo mnoho jinými studiemi ověřených pravidel a taktéž moje hypotéza, že jistá varianta vrtule dle mého konceptu byla lépe přizpůsobená na nižší vítr, nežli vrtule více konvenčního charakteru.

8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] **Dornier Darrieus Savonius 5.5 kW**. In: Wind Turbine Models [online]. [cit. 2024-03-14]. Dostupné z: <https://www.wind-turbine-models.com/turbines/358-dornier-darrieus-savonius-5-5-kw>
- [2] **Reynoldsovo číslo – obrázek**. In: Wikipedia: The Free Encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2024 [cit. 2024-03-14]. Dostupné z: https://sk.wikipedia.org/wiki/Reynoldsovo_%C4%8D%C3%ADslo#/media/S%C3%BAbor:Laminar_and_turbulent_flows.svg
- [3] **Airfoil Geometries**. In: EaglePubs [online]. [cit. 2024-03-14]. Dostupné z: https://eaglepubs.erau.edu/app/uploads/sites/4/2021/08/EarlyAirfoils_alt_N.png
- [4] **Historie lodního šroubu Josefa Ressela**. In: Historie Lusa [online]. [cit. 2024-03-14]. Dostupné z: <https://historie.lusa.cz/stoleti-pary-a-elektriny/parnik/lodni-sroub-josefa-ressela/>
- [5] **Jak vzniká vítr?** In: Svět Energie [online]. [cit. 2024-03-14]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/energetika-ctive/vetrne-elektrarny/jak-vznika-vitr>
- [6] **Mapa větrných podmínek v ČR**. In: Ústav fyziky atmosféry AV ČR [online]. [cit. 2024-03-14]. Dostupné z: http://vitr.ufa.cas.cz/vetrna_mapa_100m/
- [7] **Vývoj a návrh větrné elektrárny**. In: ČVUT DSpace [online]. [cit. 2024-03-14]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/115442/F3-BP-2024-Vlcek-Matej-navrh_vetrne_elektrarny.pdf
- [8] **Domácí větrná elektrárna 10kW VAWT**. In: Stavby Frýdlant [online]. [cit. 2024-03-14]. Dostupné z: <https://www.stavby-frydlant.cz/domaci-vetrna-elektrarna-10kw-vawt>
- [9] **Darrieus a Savonius rotory – ResearchGate**. In: ResearchGate [online]. [cit. 2024-03-14]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Fig-11-Three-bladed-combined-Darrieus-Savonius-rotor-49-Four-bladed-Darrieus-and-two_fig8_271656129
- [10] **Princip funkce větrných turbín – ScienceDirect**. In: ScienceDirect [online]. [cit. 2024-03-14]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114001221>
- [11] **Malé větrné elektrárny**. In: Ústav fyziky atmosféry AV ČR [online]. [cit. 2024-03-14]. Dostupné z: <http://vitr.ufa.cas.cz/male-vte/>

- [12] **Porovnání aerodynamické efektivity různých typů větrných turbín.** In: ResearchGate [online]. [cit. 2024-03-14]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Comparison-of-aerodynamic-efficiencies-of-common-types-of-wind-turbines-Source-NREL_fig36_255380937
- [13] **Vertikální osy větrných turbín – CarboEurope.** In: CarboEurope [online]. [cit. 2024-03-14]. Dostupné z: <https://www.carboeurope.org/vertical-axis-wind-turbines/>
- [14] **Darrieus Wind Turbine – Wikipedia.** In: Wikipedia: The Free Encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2024 [cit. 2024-03-14]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Darrieus_wind_turbine#/media/File:Darrieus-windmill.jpg
- [15] **Betzovo pravidlo – Wikipedia.** In: Wikipedia: The Free Encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2024 [cit. 2024-03-14]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Betzovo_pravidlo
- [16] **Reynoldsovo číslo – Wikipedia.** In: Wikipedia: The Free Encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2024 [cit. 2024-03-14]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Reynoldsovo_%C4%8D%C3%ADslo
- [17] **Princip činnosti větrných elektráren – základní rozdělení.** In: Oenergetice.cz [online]. [cit. 2024-03-14]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/vetrne-elektrarny-princip-cinnosti-zakladni-rozdeleni>
- [18] **Větrná turbína v podmínkách České republiky.** In: Ekokutil.cz [online]. [cit. 2024-03-14]. Dostupné z: <https://ekokutil.cz/vetrna-turbina-v-podminkach-ceske-republiky/>
- [19] **Větrná energie.** In: Wikipedia: The Free Encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2024 [cit. 2024-03-14]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/V%C4%9Btrn%C3%A1_energie
- [20] **Princip funkce větrných turbín – ScienceDirect.** In: ScienceDirect [online]. [cit. 2024-03-14]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114001221>
- [21] **Vývoj rotoru typu Darrieus** SMITH, John a DOE, Jane. *Title of the Paper.* **Energies** [online]. 2024, 5(2), 18. DOI: [10.3390/en5020018](https://doi.org/10.3390/en5020018) [cit. 2024-03-14]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2411-5134/5/2/18>
- [22] **VUT Brno – Závěrečná práce.** In: VUT Brno [online]. [cit. 2024-03-14]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=30523

9 SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obrázek 1: Grafické zobrazení ročního průměru rychlosti větru v ČR deset metrů nad povrchem [6]	6
Obrázek 2: Zobrazení části z používaných variant rotoru typu Savonius [20]	7
Obrázek 3: Zachycení efektivity různých elektráren v závislosti na jejich TSR, tedy poměru rychlosti větru a obvodové rychlosti konců lopatek dané turbíny, nebo části rotoru nejvíce vzdálené od osy rotace rotoru [12]	7
Obrázek 4: Schéma rotoru Darrieovy turbíny spolu s grafem zobrazujícím složení vektoru výsledné rychlosti větru působící na list Darrieovy turbíny [14]	8
Obrázek 5: Zobrazení fungování Darrieovy turbíny typu H s dynamicky se měnícím úhlem listu vůči větru, jež je měněn pomocí táhel	9
Obrázek 6: Vývoj rotoru Darrieus a jeho typy [21].....	9
Obrázek 7: Kombinace Savoniova rotoru a Darrieova rotoru [9].....	9
Obrázek 8: Porovnání vzniku točivého momentu 1) z důvodu rozdílu odporu či 2) působením vztlaku [7].....	10
Obrázek 9: Porovnání záběrové plochy lodního šroubu [4] a větrné elektrárny [22].....	12
Obrázek 10: Zobrazení různých profilů [3]	12
Obrázek 11: Zobrazení trubek o stejném průměru a způsobu, jakým v nich může protékat tekutina [16]	15
Tabulka 1: Statická zkouška vrtulí	22

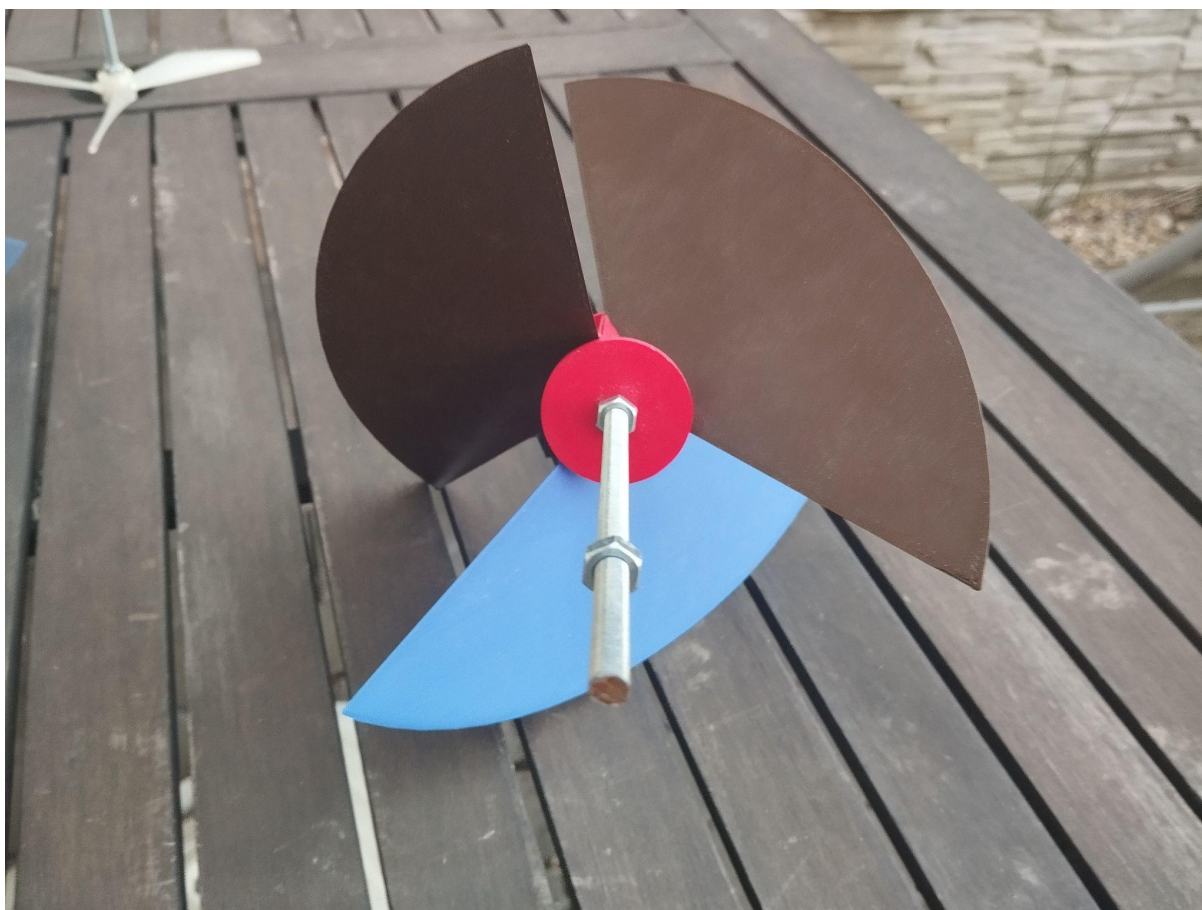
10 PŘÍLOHY

FOTKY VRTULÍ

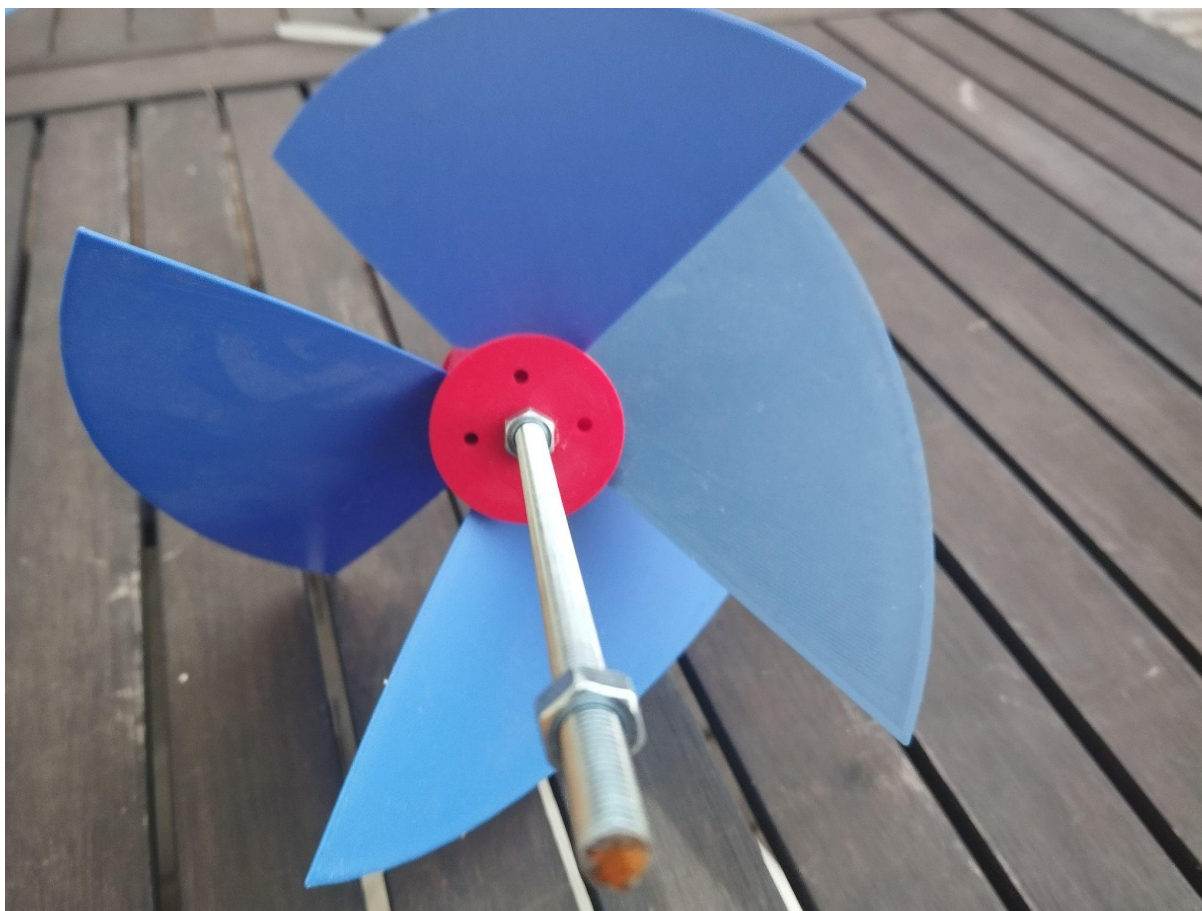
dvou listá



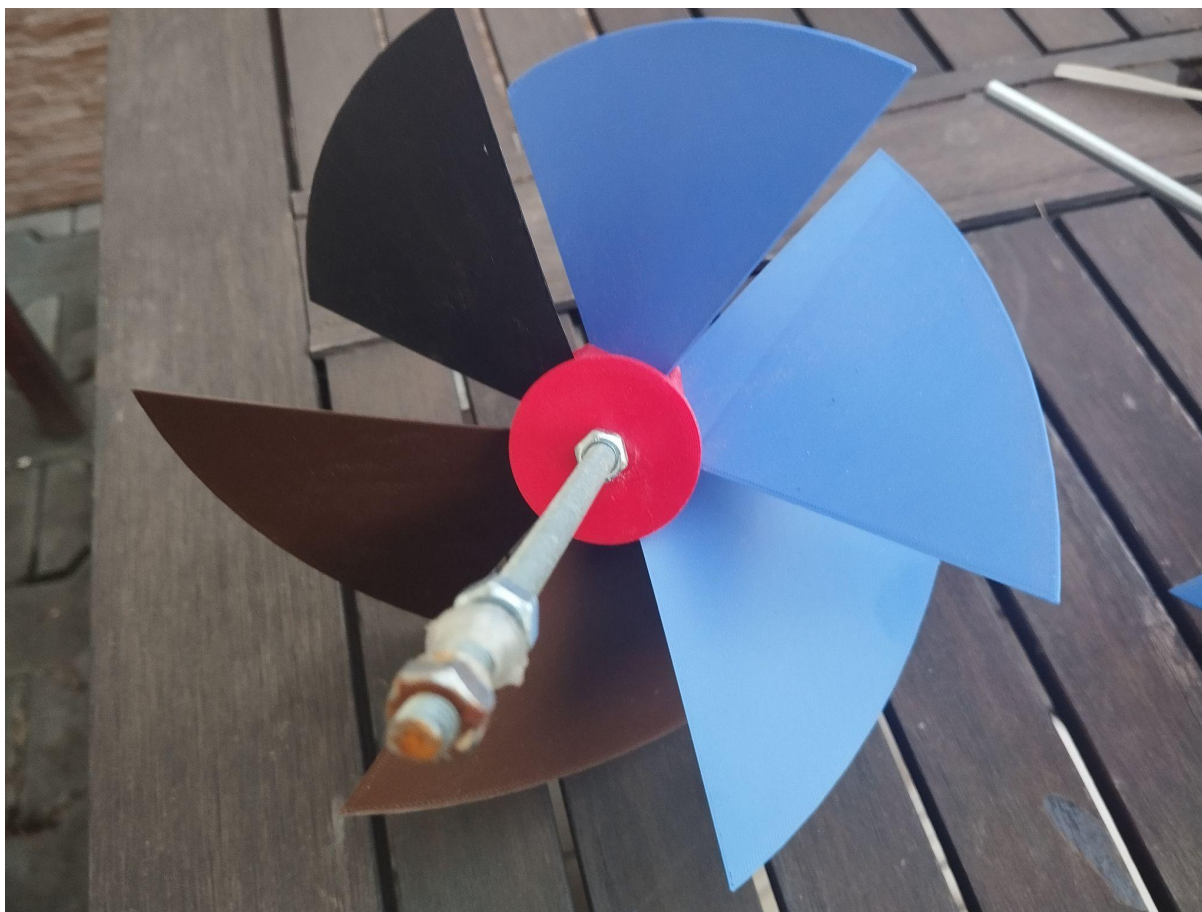
trojlistá



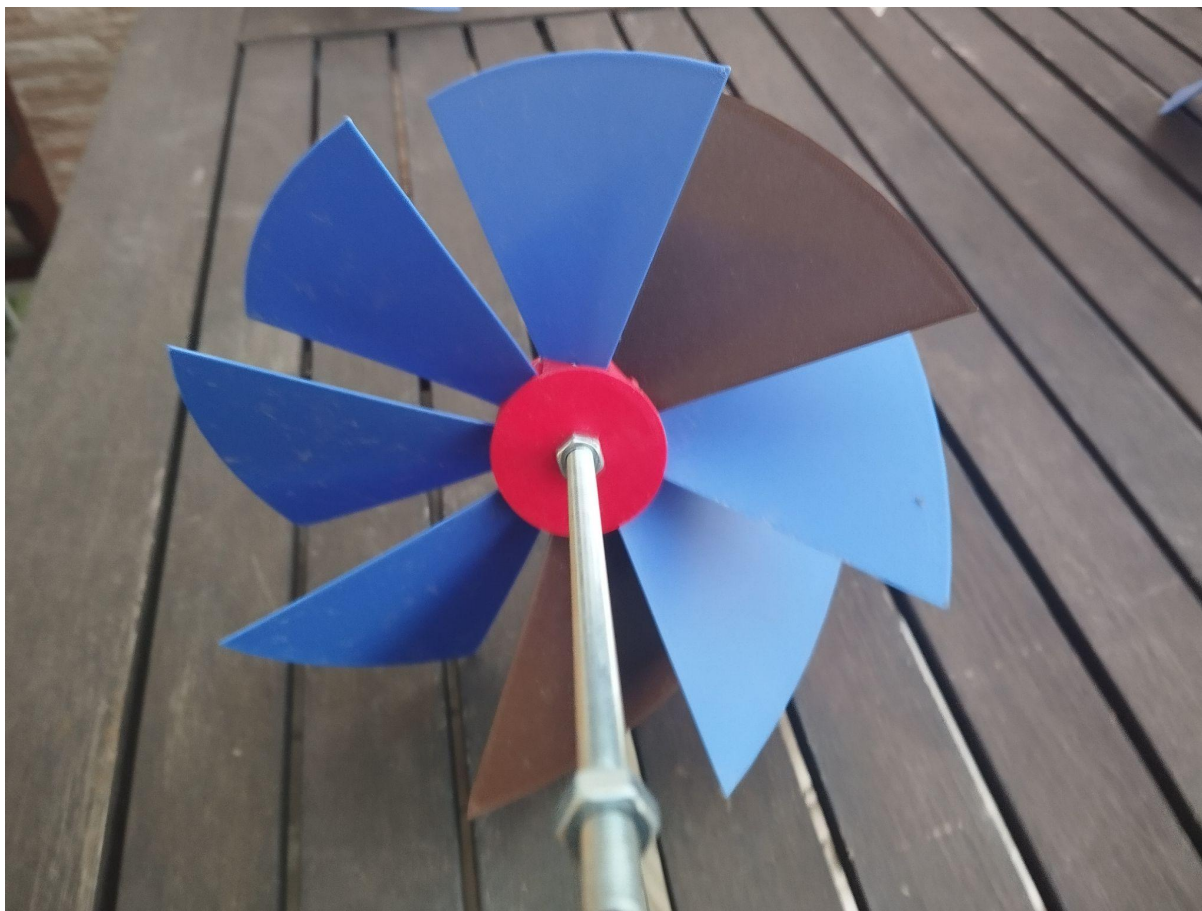
čtyřlístá



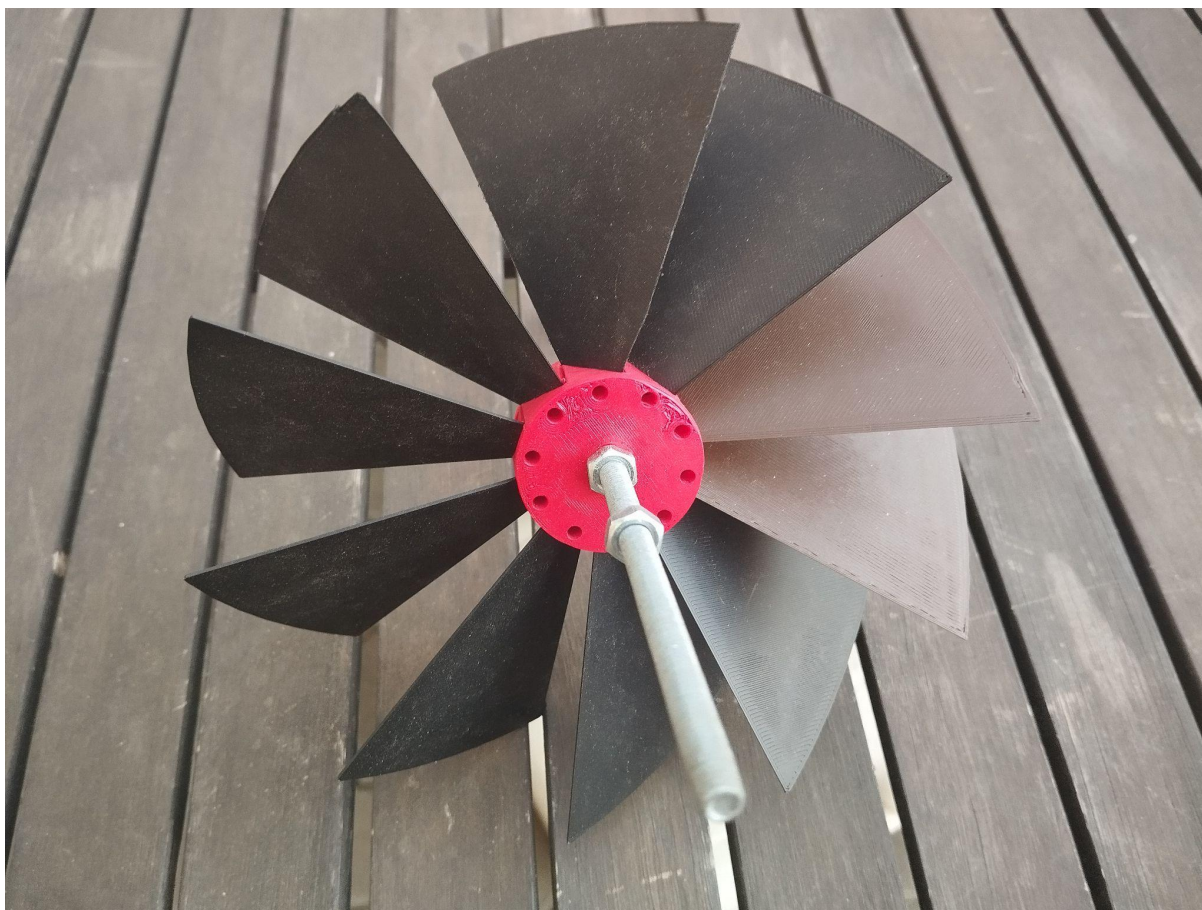
šestilístá



osmilitá



desetilitá



čtrnáctilistá



osmnáctilistá



osmilitá(úzká)



osmilitá(měsíc)



trojlistá(úzká)



čtrnáctilistá(tlusto)



FOTKY KONSTRUKCE





FOTO WATTMETRU, JEŽ JSEM NAKONEC NEVYUŽIL

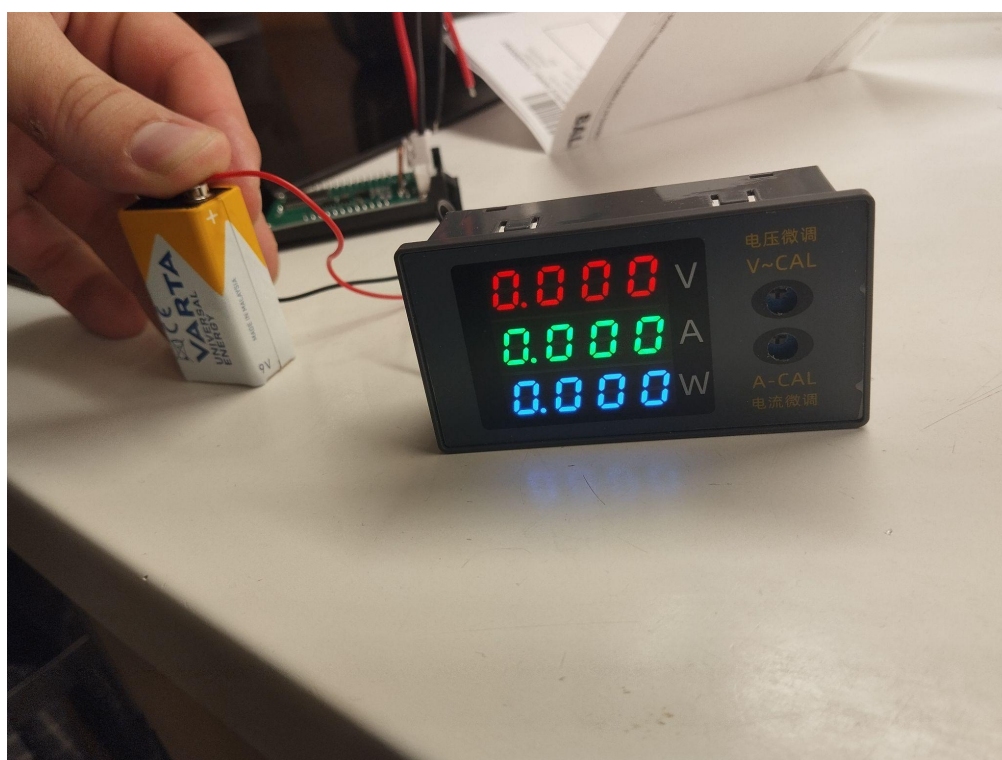


FOTO ANEMOMETRU



FOTO DC ZDROJŮ (leží na nich malý dc motorek s převodovkou a adaptérem na závitovou tyč M6, jež jsem chtěl použít na měření výkonu vrtulí při dynamické zkoušce, ale nakonec se mi nepodařilo zprovoznit potřebný el. obvod včas a tak vrtule prostě zvedaly normální závaží)

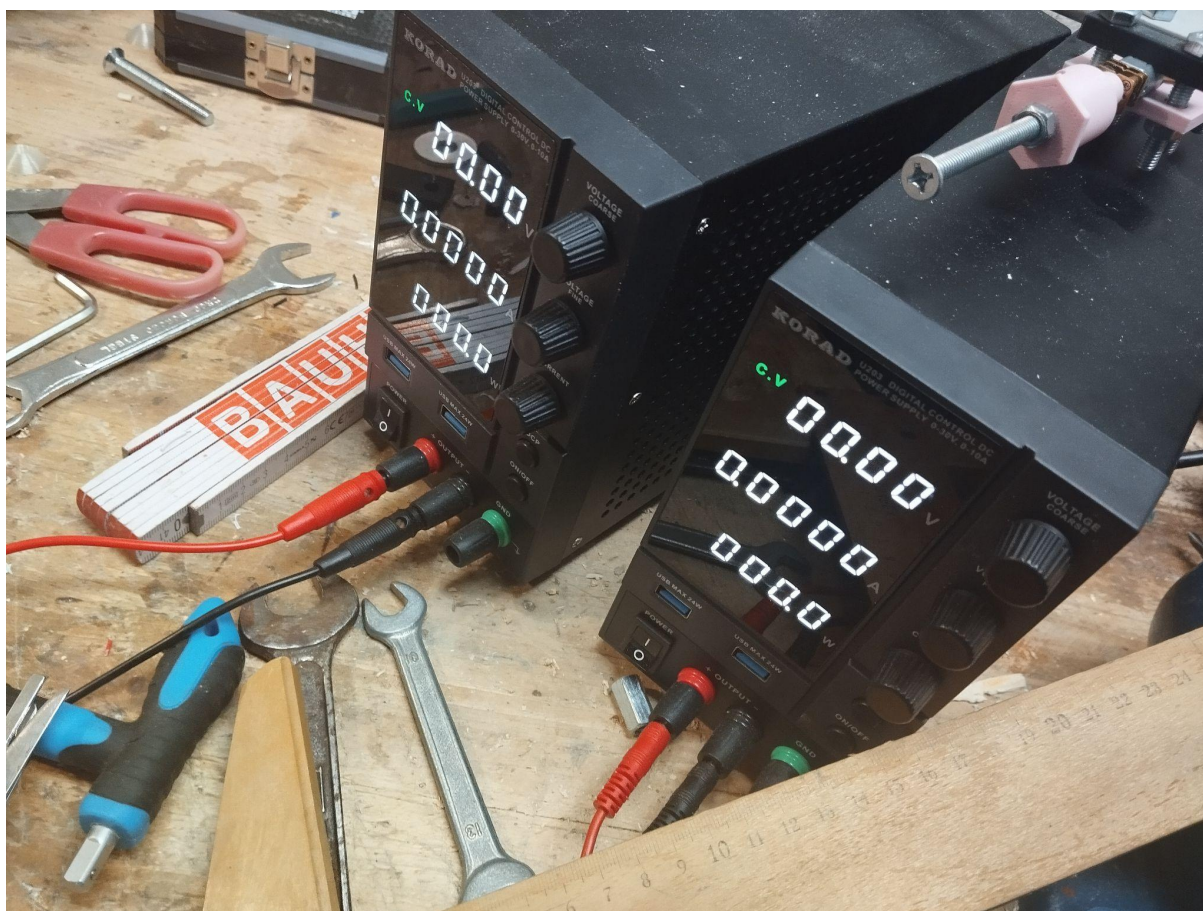


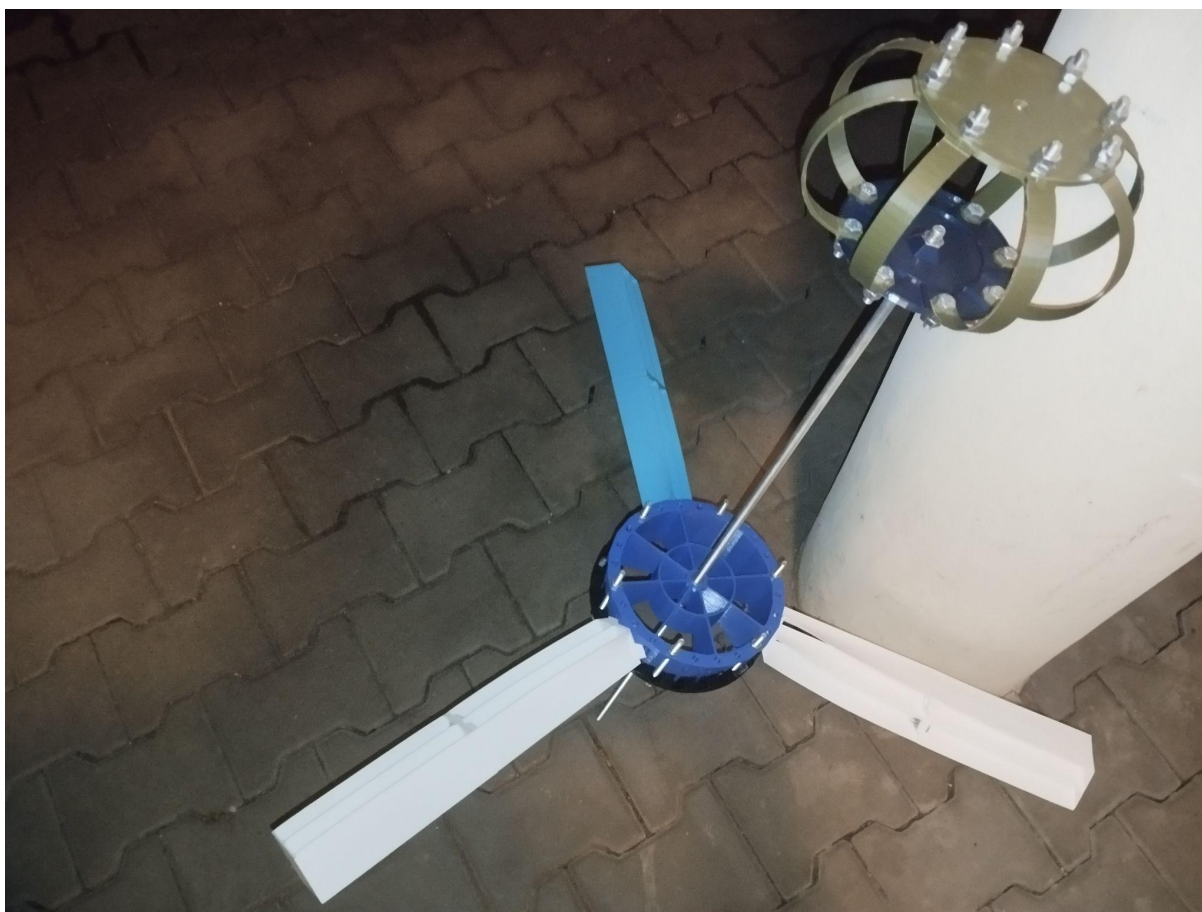
FOTO ZOBRAZUJÍCÍ PROFIL NA KONCI LOPATKY OSMI-ÚZKO-LISTÉ VRTULE



1. VERZE VRTULE VYTVÁŘEJÍCÍ VĚTRNÉ POLE



2. VERZE VRTULE VYTVÁŘEJÍCÍ VĚTRNÉ POLE V POROVNÁNÍ S VELIKOSTÍ DLANĚ



3. VERZE VRTULE VYTVÁŘEJÍCÍ VĚTRNÉ POLE



DETAILNÍ ZÁBĚR NA KLADKU

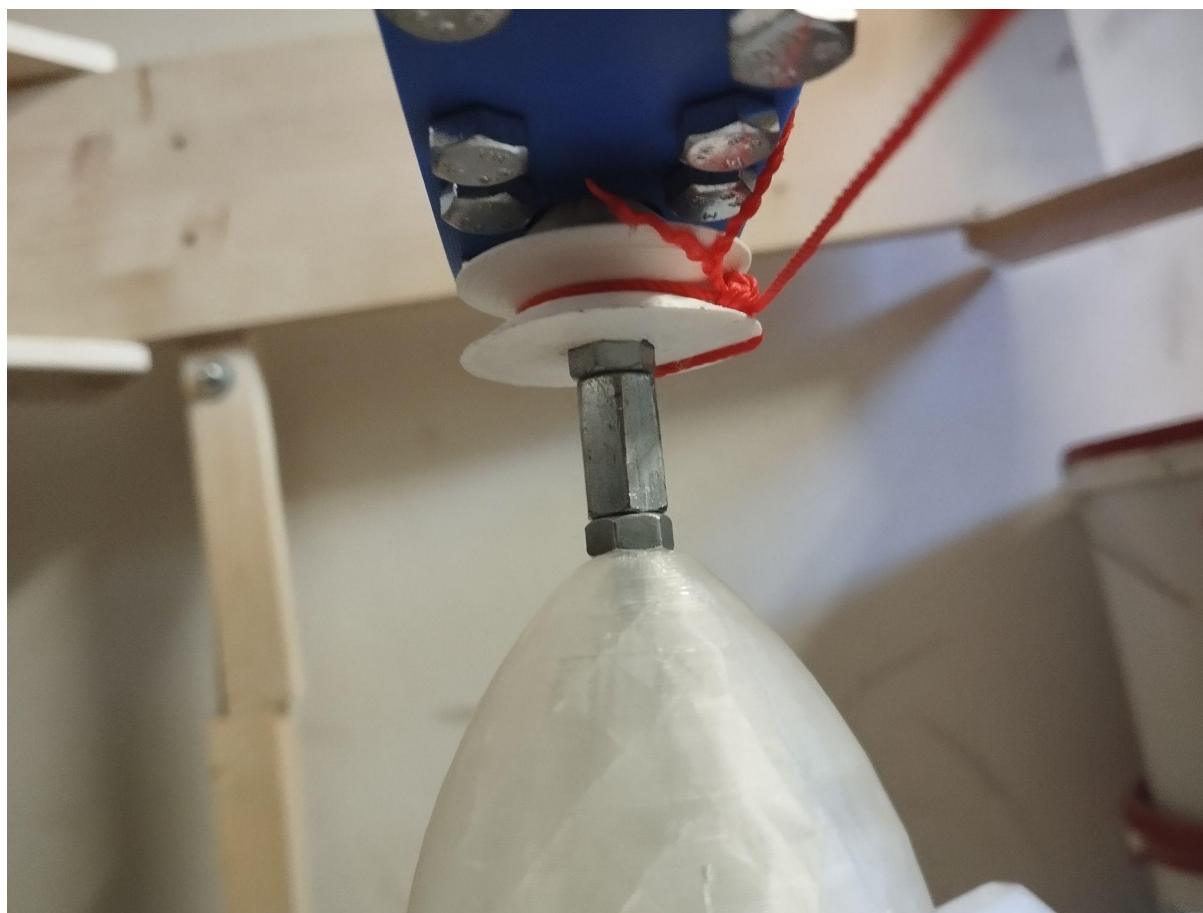


FOTO SILOMĚRU VERNIER



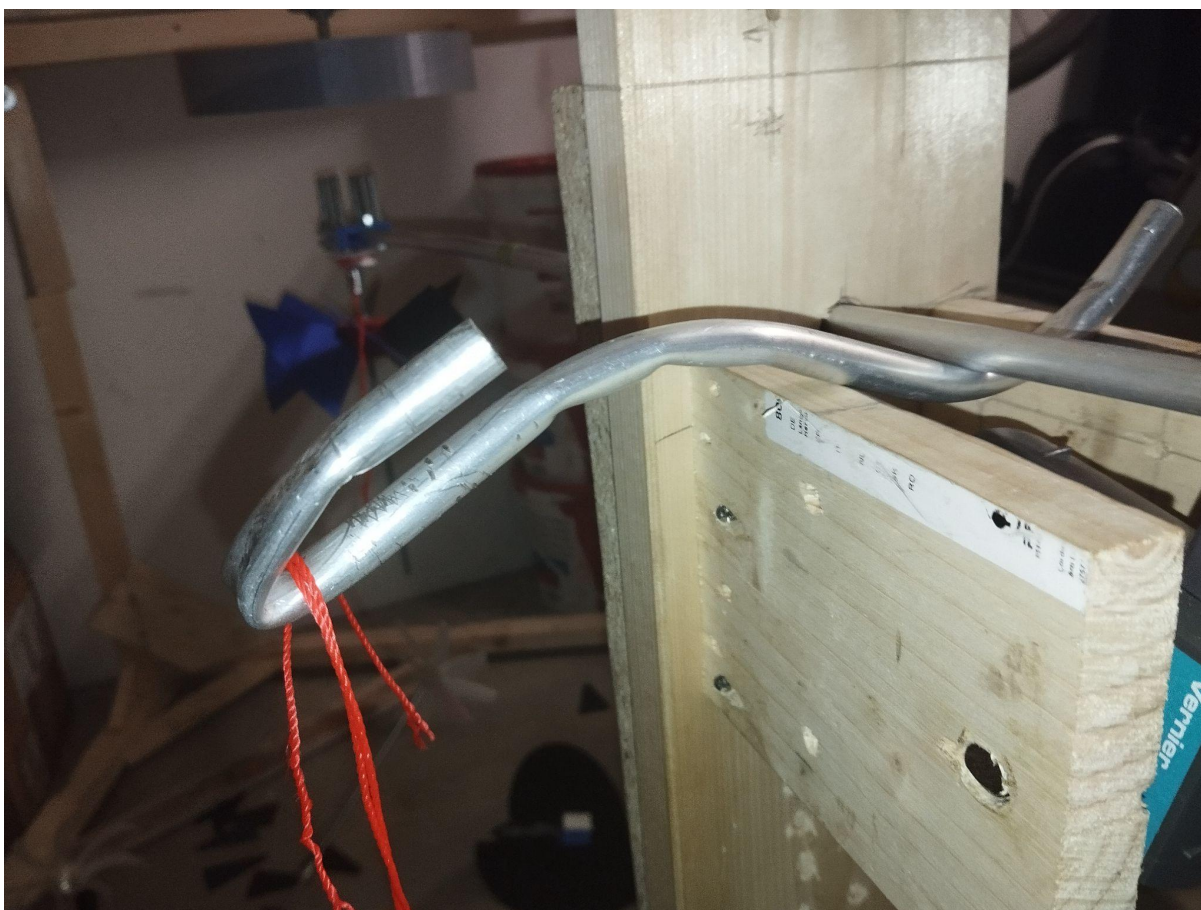
FOTKY ZACHYTÁVAJÍCÍ SETUP NA MĚŘENÍ MECHANICKÉHO VÝKONU

tato fotka je ukázkou, jak se může zvrhnout testování; nepořádek dole každopádně neměl dle mého názoru zvlášť zásadní vliv na proudění větrného pole a tak byl zanedbatelný

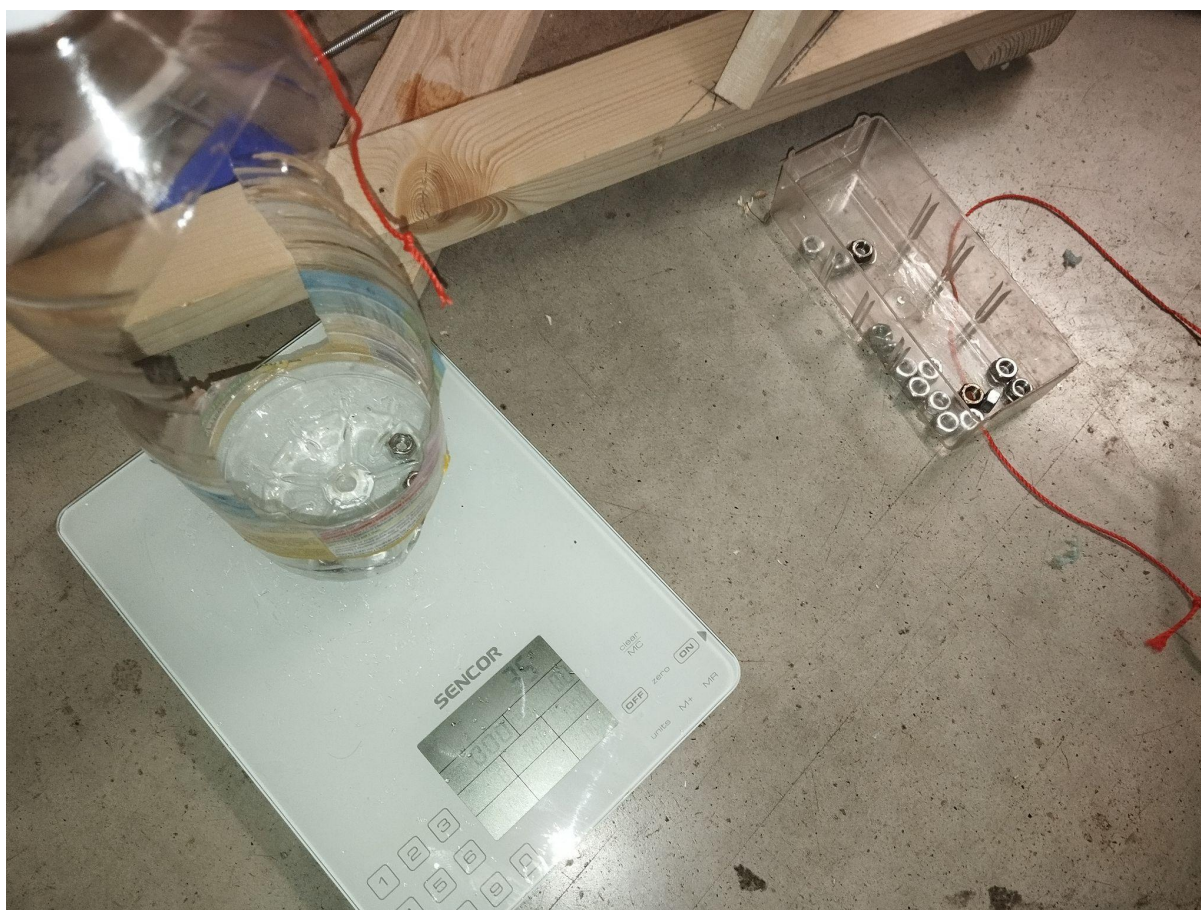
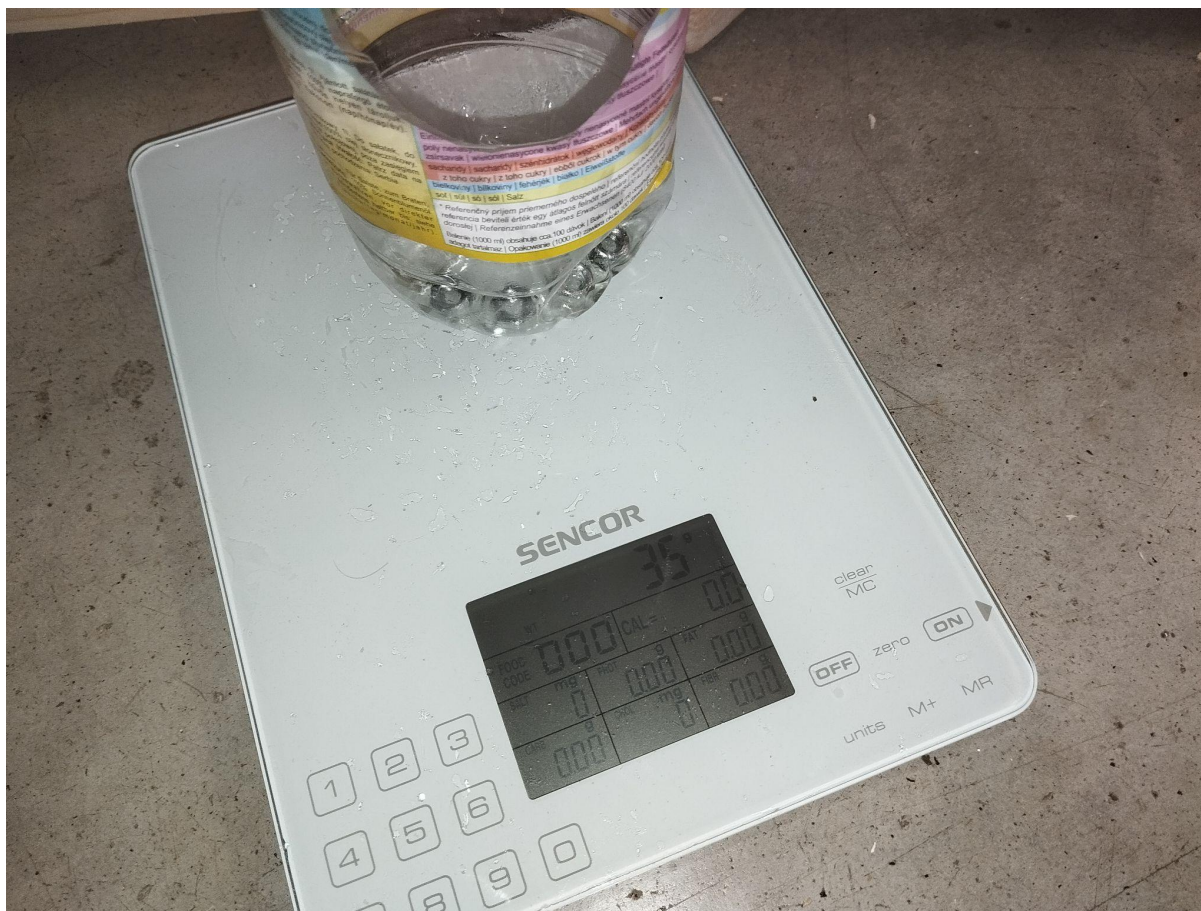




OHLÁ HLINÍKOVÁ TRUBKA MÍSTO Kladky

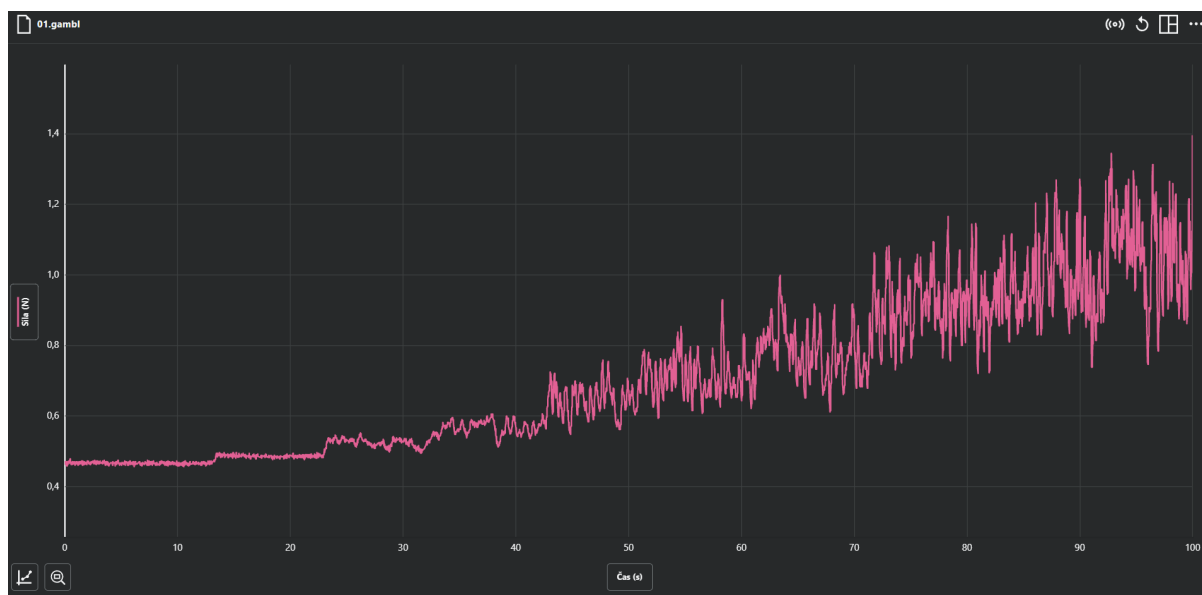


ZVEDANÁ PET LAHEV ZATÍŽENÁ ŠROUBY

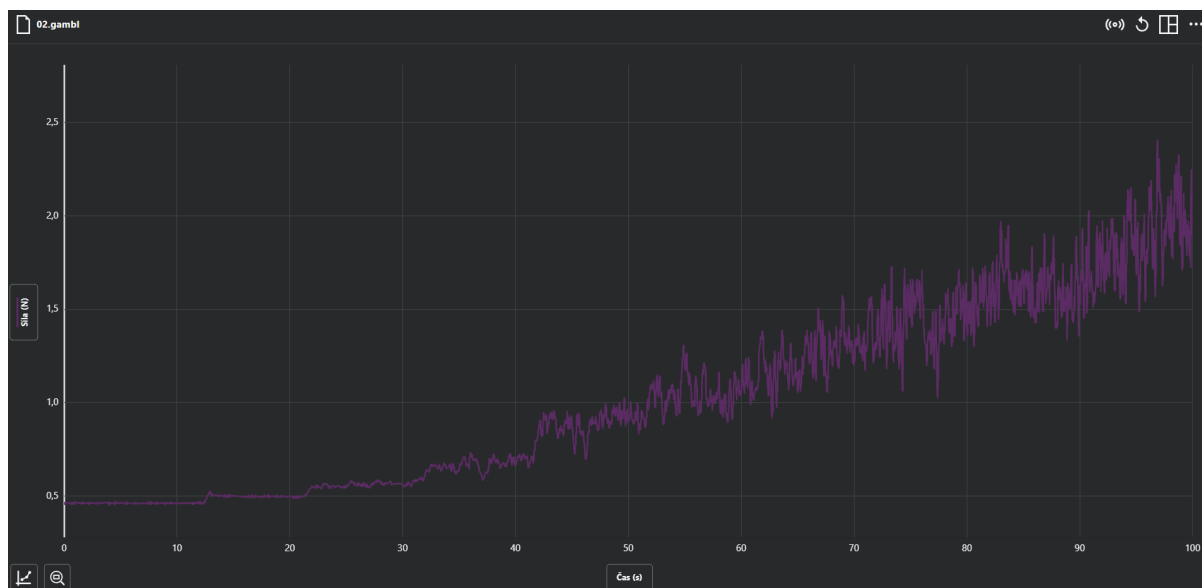


GRAFY V APLIKACI VERNIER GRAPHICAL ANALYSIS ZACHYCUJÍCÍ VÝSLEDKY STATICKÉ ZKOUŠKY PRO JEDNOTLIVÉ VRTULE

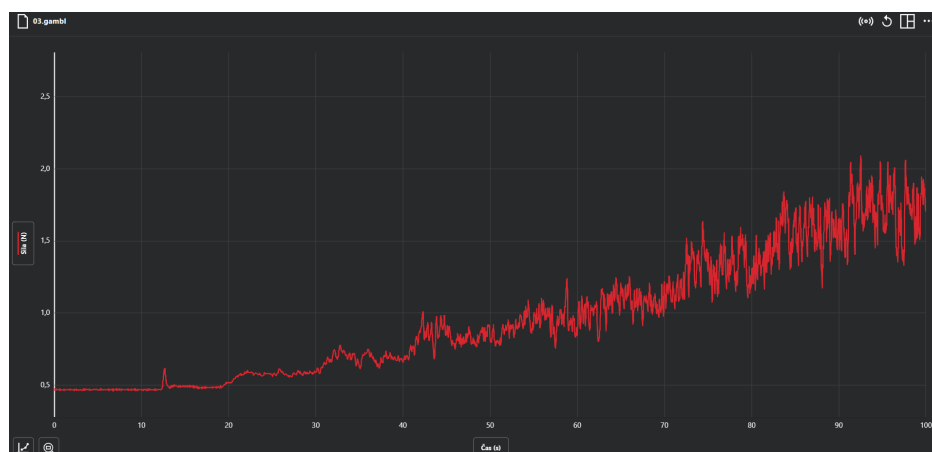
dvoulístá(01)



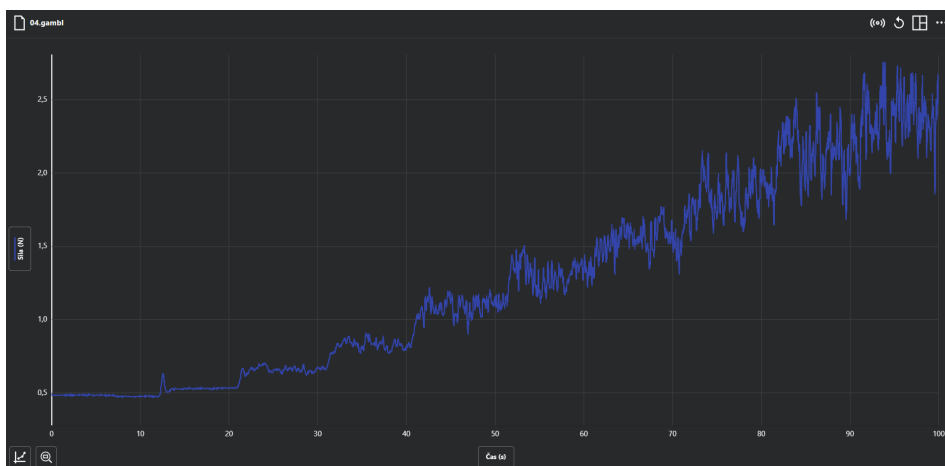
trojlístá(02)



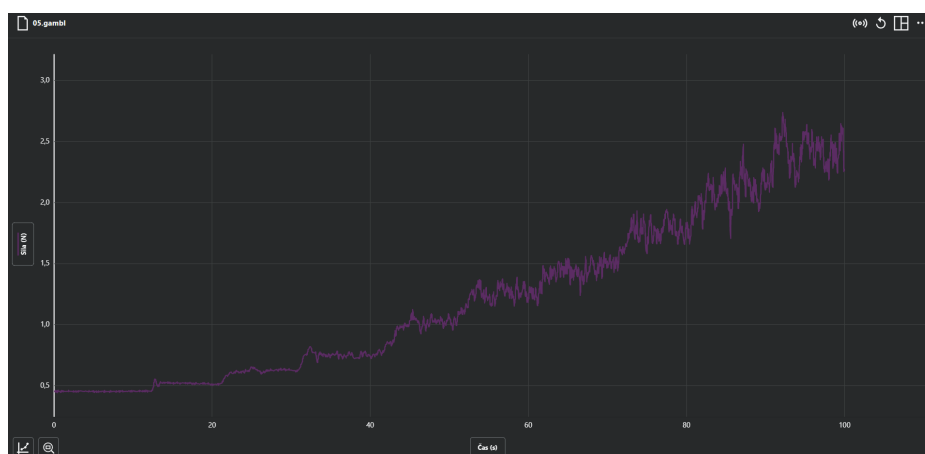
čtyřlístá(03)



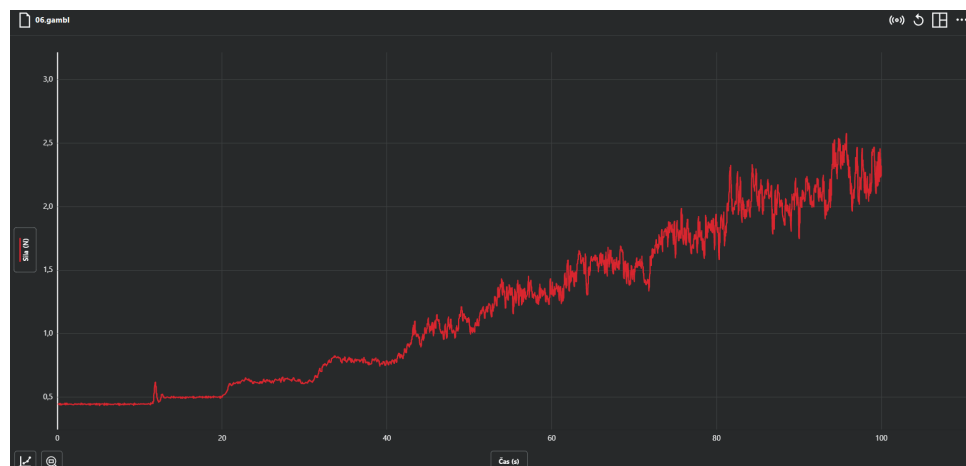
šestilistá(04)



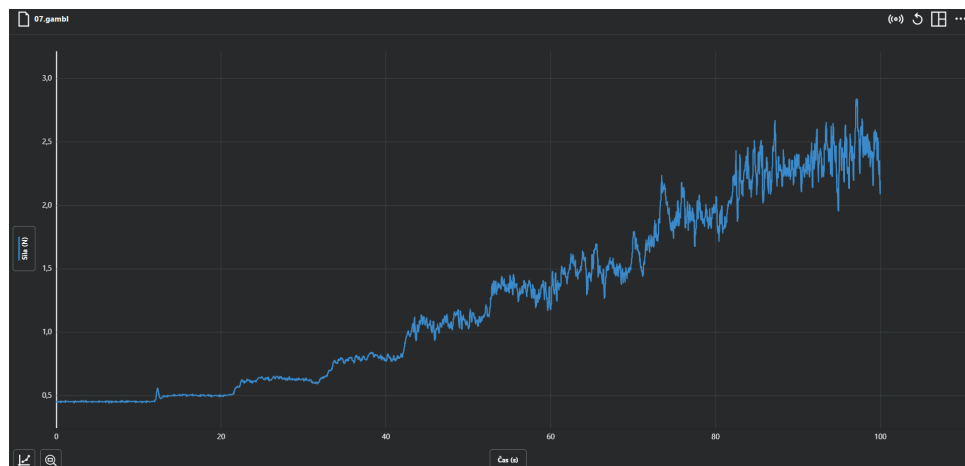
osmilistá(05)



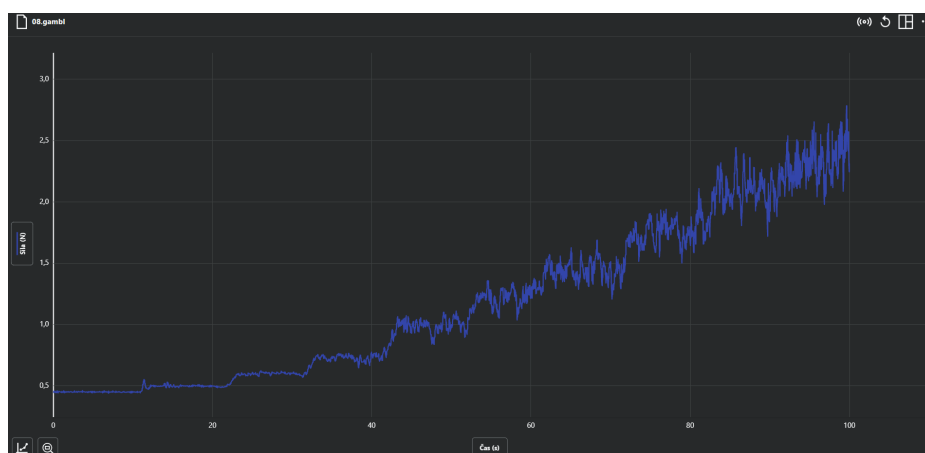
desetilistá(06)



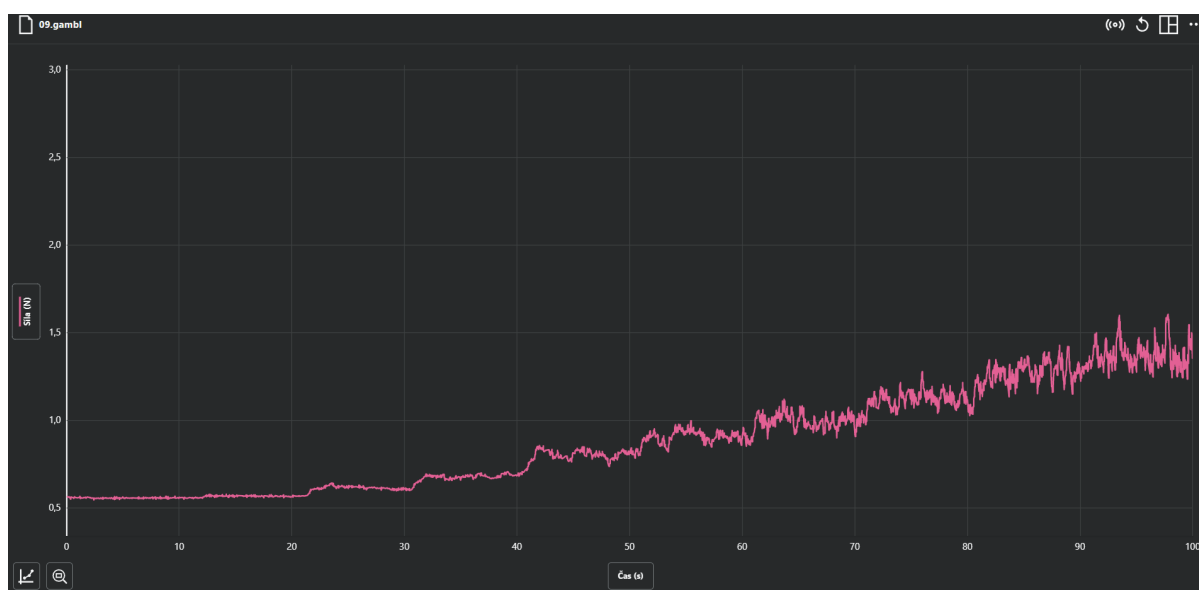
čtrnáctilistá(07)



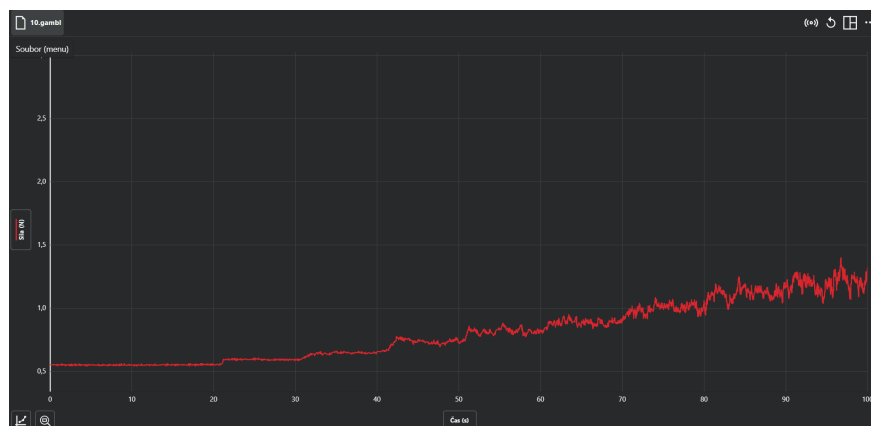
osmnáctilistá(08)



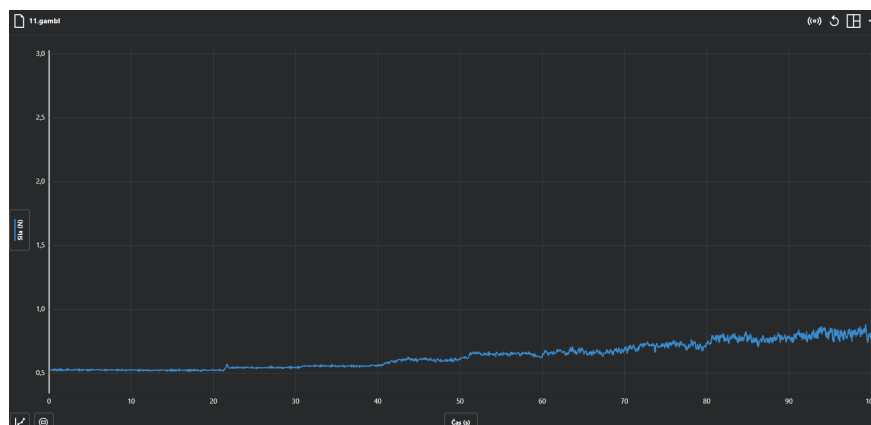
osmi-rovno-tenko-listá(09)



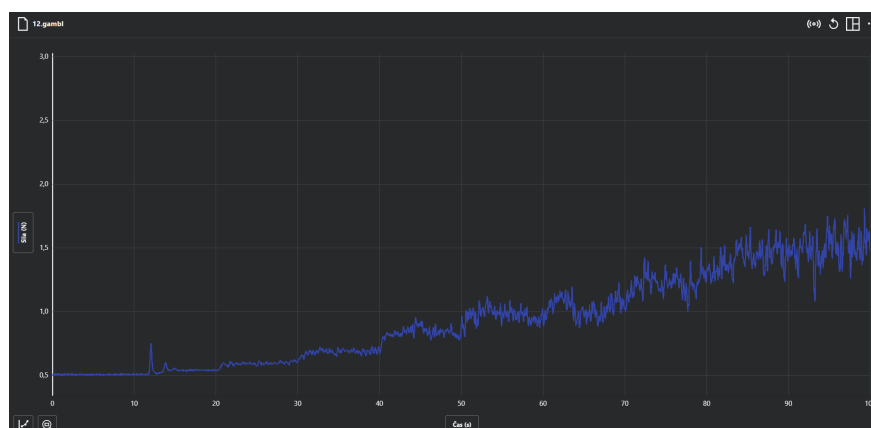
osmi-měsícó-tenko-listá(10)



troj-tenko-listá(11)



čtrnácti-ťlusto-listá(12)



Tabulka výkonů vrtulí při mechanické zkoušce

Vrtule	Převod	Váha	Čas [s]	Zdvih [m]	Výkon[W], práce, průměrný čas, efektivita
šestilistá	těžký	23g	2,59	0,39 metru	práce 0,0879957 J
			3,2		prumer 2,479 sekundy
			2,19		vykon 0,03549645018152480839048003227108 W
			3,33		0,0355 W
			2,45		35,5 mW
			1,92		efektivita 0,00851233817302753198812470797868, tedy 0,851 procenta
			2,15		dostupna energie na vrtulku foukajícího vzduchu je cca 4,17 W
			2,66		1/2*1,225*3,1415*0,085*0,085*5*5*5
			2,32		efektivitu lze brát spíše jen orientačně
			1,98		
	těžký	28g	2,87	0,39 metru	práce 0,1071252 J
			2,87		prumer 2,86 sekundy
			2,67		vykon 0,037456363636363636363636363636 W
			2,99		0,0375 W
			2,33		37,5 mW
			2,77		efektivita 0,00898234139960758665794637017659, tedy 0,898 procenta
			3,93		
			2,59		
			2,64		
			2,94		
	těžký	31g	3,17	0,39 metru	práce 0,1186029 J
			3,35		prumer 3,874 sekundy

			3,53		vykon 0,03061510067114093959731543624161 W
			4,09		0,0306 W
			4,46		30,6 mW
			4,21		efektivita 0,00734175076046545314084303027377, tedy 0,734 procenta
			4,29		
			3,67		
			3,75		
			4,22		
	těžký	33g	3,37	0,39 metru	prace 0,1262547 J
			3,94		prumer 3,988 sekundy
			3,74		vykon 0,0316586509528585757271815446339 W
			4,57		0,0317 W
			4,51		31,7 mW
			3,88		efektivita 0,00759200262658479034224977089542, tedy 0,759 procenta
			3,99		
			3,95		
			3,99		
			3,94		
	těžký	38g	5,75	0,19 metru	prace 0,0708282 J
			3,03		prumer 4,058 sekundy
			3,44		vykon 0,01745396747166091670773780187284 W
			3,67		0,0175 W
			4,16		17,5 mW
			3,79		efektivita 0,00418560371023043566132801004145, tedy 0,419 procenta
			3,84		
			3,69		
			6,16		
			3,05		

	lehký	23g	3	0,39 metru	prace 0,0879957 J
			4,68		prumer 3,6575 sekundy
			3,55		vykon 0,0240589747095010252904989747095 W
			3,4		0,0241 W
					24,1 mW,, efektivita 0,00576953829964053364280550952266, tedy 0,577 procenta
	lehký	28g	4,5	0,39 metru	prace 0,1071252 J
			4,25		prumer 4,2525 sekundy
			4		vykon 0,02519111111111111111111111111111 W
			4,26		0,0252 W
					25,2 W,, efektivita 0,00604103383959499067412736477485, tedy 0,604 procenta
	lehký	31g	6,6	0,39 metru	prace 0,1186029 J
			5,22		prumer 5,5125 sekundy
			5		vykon 0,02151526530612244897959183673469
			5,23		0,0215 W
					21,5 mW,, efektivita 0,00515953604463368081045367787403, tedy 0,516 procenta
	lehký	35g	6,22	0,39 metru	prace 0,1339065 J
			5,87		prumer 5,88 sekundy
			5,55		vykon 0,02277321428571428571428571428571 W
					0,0228 W
					22,8 mW,, efektivita 0,0054612024665981500513874614594, tedy 0,546 procenta
	lehký	38g	4,01	0,39 metru	prace 0,1453842 J
			4,21		prumer 4,33 sekundy

			4,18		vykon 0,03357602771362586605080831408776 W
			4,64		0,0336 W
			4,95		33,6 mW,, efektivita 0,00805180520710452423280774918172, tedy 0,805 procenta
			3,96		
			4,78		
			3,56		
			4,53		
			4,48		

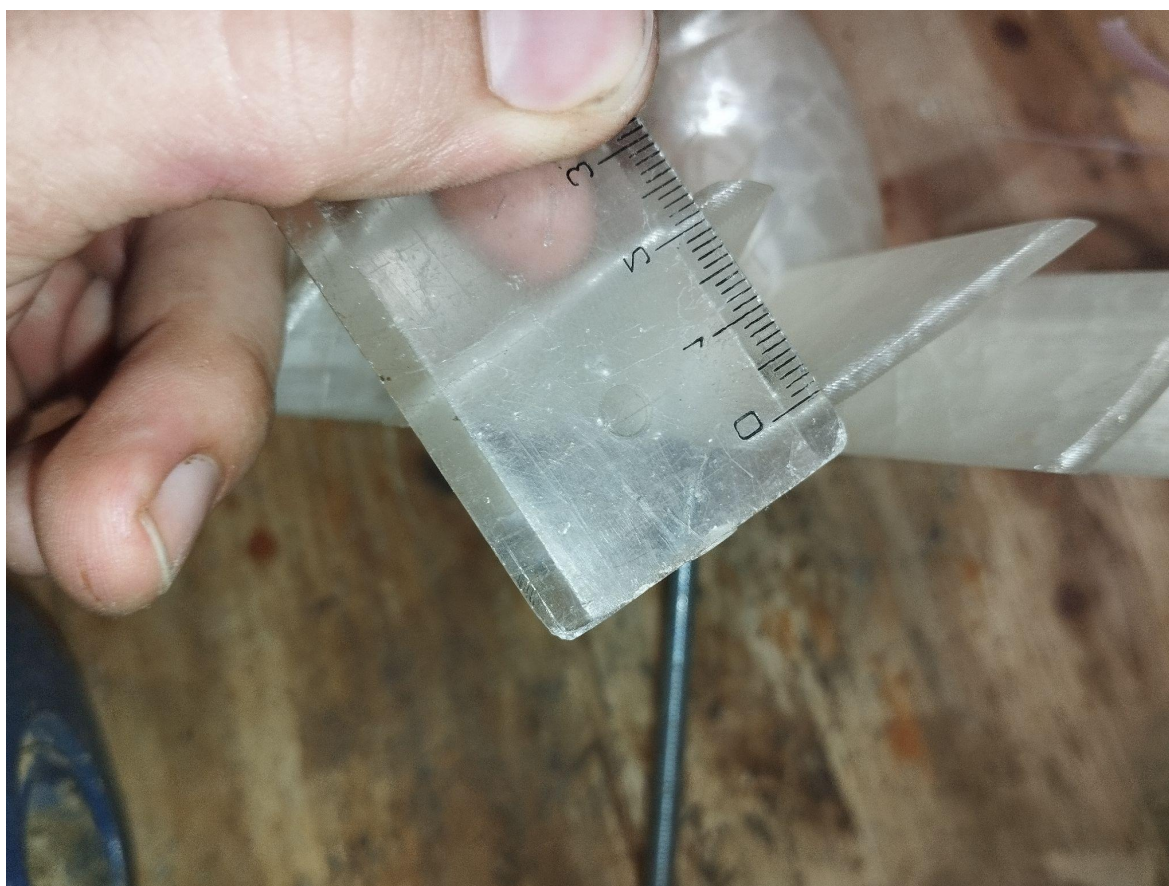
Vrtul e	Přev od	Váha	Čas [s]	Zdvih [m]	Výkon[W], práce, průměrný čas, efektivita
osmili stá měsíc	lehký	23g		0,39 3 metru	prace 0,0879957 J
					prumer 3 sekundy,, vykon 0,0293319 W, tedy 0,0293 W, tedy 29,3 mW
					efektivita 0,00703402877697841726618705035971
	lehký	20g		0,39 2,94 metru	prace 0,076518 J
					prumer 3,042 sekundy,, vykon 0,02515384615384615384615384615385 W, tedy 0,0252 W, tedy 25,2 mW
				2,84	
				3,31	efektivita 0,0060320973990038738240177089098, tedy 0,603 procenta
				2,76	
				3,36	
	lehký	28g		0,39 3,96 metru	prace 0,1071252 J
					prumer 4,06333...sekundy,, vykon 0,02636387202646730001662401394599 W, tedy 0,0264 W, tedy 26,4 mW
				3,63	
				4,86	efektivita 0,00632227146917681055554532708537, tedy 0,632 procenta
				3,76	
				3,96	
				4,21	

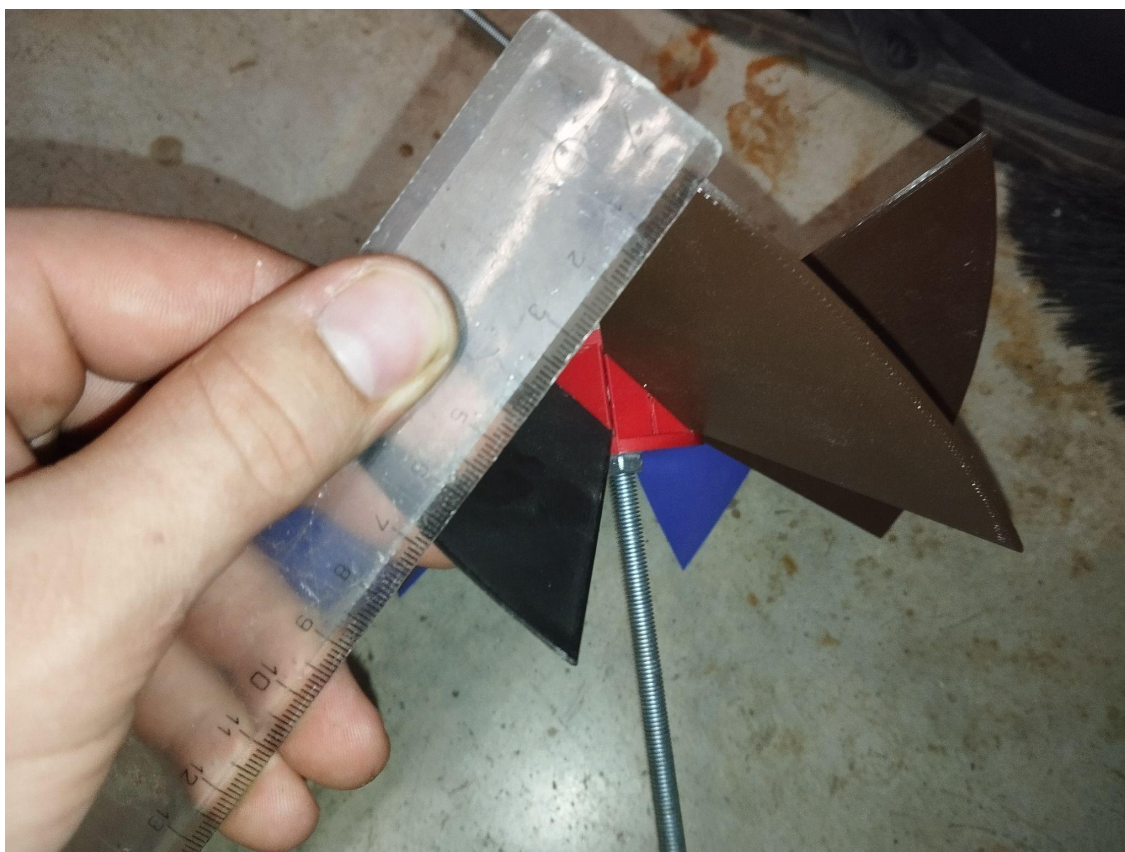
osmili stá rovná	lehký	23g		0,39 2 metru	prace 0,0879957 J
					prumer 2 sekundy,, vykon 0,04399785 W, tedy 0,0440 W, tedy 44 mW,, efektivita 0,01055104316546762589928057553957, tedy 1,055 procenta
	lehký	29g		2,6	prace 0,1109511 J
				2,61	prumer 2,63857142587142587...sekundy,, vykon 0,04204968602028910995901607048687, tedy 0,0421 W, tedy 42,1 mW
				2,6	efektivita 0,01008385755882232852734198333018, tedy 1,008 procenta
				2,99	
				2,71	
				2,47	
				2,49	
	lehký	33g		0,39 3 metru	prace 0,1262547 J
				4,01	prumer 3,93625 sekundy,, vykon 0,03207486821213083518577326135281 W, tedy 0,0321 W, tedy 32,1 mW
				3,76	efektivita 0,00769181491897621946901037442513, tedy 0,769 procenta
				4,28	
				3,69	
				4,03	
				4,11	
				4,61	
trojlist á tenká	lehký	23g	DNF	0,39 metru	
14tilis tá tlustá	lehký	23g		0,39 4 metru	prace 0,0879957 J
					prumer 4 sekundy,, vykon 0,021998925 W, tedy 0,0220 W, tedy 22 mW,, efektivita 0,00527552158273381294964028776978

	lehký	34g	5	0,39 metru	prace 0,1300806 J
					prumer 5 sekund,, vykon 0,02601612 W, tedy 0,0260 W, tedy 26 mW,, efektivita 0,00623887769784172661870503597122
	lehký	38g	7,48	0,39 metru	prace 0,1453842 J
			6,67		prumer 7,016 sekundy
			7,15		vykon 0,02072180729760547320410490307868 W
			7,3		tedy 0,0207 W
			7,28		tedy 20,7 mW
			8,34		efektivita 0,0049692583447495139578189216016, tedy 0,497 procenta
			6,88		
			6,23		
			6,13		
			6,7		
	lehký	43g	6,7	0,39 metru	prace 0,1645137 J
					prumer 6,7 sekundy,, vykon 0,02455428358208955223880597014925, tedy 0,0246 W, tedy 24,6 mW,, efektivita 0,00588831740577687104048104799742
14tisí tá norm al	těžký	23g	3	0,39 metru	prace 0,0879957 J
			3		prumer 2,66... sekundy,, vykon 0,03308109022556390977443609022556 W, tedy 0,0331 W, tedy 33,1 mW
			2		efektivita 0,00793311516200573375885757559366, tedy 0,793 procenta
	lehký	23g	4,35	0,39 metru	prace 0,1645137 J
			4		prumer 4,3133333...sekundy,, vykon 0,03814073415765072499283937994646 W, tedy 0,0381 W, tedy 38,1 mW
			4,59		efektivita 0,00914645903061168465056100238524, tedy 0,915 procenta

	těžký	32g	3,6	0,22 metru	prace 0,0690624 J
					prumer 3,6 sekundy,, výkon 0,019184 W, tedy 0,0192 W, tedy 19,2 mW,, efektivita 0,00460047961630695443645083932854, tedy 0,460 procenta
	lehký	32g	4	0,39 metru	prace 0,1224288 J
			3,44		prumer 3,4775 sekundy,, výkon 0,03520598130841121495327102803738, tedy 0,0352 W, tedy 35,2 mW
			3,26		efektivita 0,00844268136892355274658777650777, tedy 0,844 procenta
			3,21		
	lehký	43g	5,85	0,39 metru	prace 0,1645137 J
			4,2		prumer 4,99 sekundy,, výkon 0,0329686773547094188376753507014 W, tedy 0,0330 W, tedy 33 mW
			5		efektivita 0,00790615763901904528481423278211, tedy 0,791 procenta
			4,91		
	lehký	54g	5,43	0,39 metru	prace 0,2065986 J
			5,16		prumer 5,25 sekundy,, výkon 0,03935211428571428571428571 W, tedy 0,0394 W, tedy 39,4 mW
			5,16		efektivita 0,00943695786228160328879753340185, tedy 0,944 procenta
	lehký	64g	7,67	0,39 metru	prace 0,2448576 J
			5,28		prumer 4,522 sekundy,, výkon 0,05414807607253427686864219371959 W, tedy 0,0542 W, tedy 54,2 mW
			6,13		efektivita 0,01298515013729838773828349969295, tedy 1,299 procenta
			7,62		
			6,94		
			5,78		
			5,8		

Fotky zobrazující mezery mezi listy u obou čtrnáctilistých a šestilistě vrtule





Fotky zachycující twist u jedné z čtrnáctilistých vrtulí a troj-tenko-listé vrtule
 (žádné další vrtule twist neměly; neúplně pokrytou záběrovou plochu měly jen tři vrtule z Thingiverse, kdežto ta čtvrtá ano; dalších osm vrtulí bylo dle mého konceptu, tedy s plně pokrytou záběrovou plochou a to listy bez profilu, twistu či jakékoliv komplexní geometrie)



