VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

INSTALACE MALÉ VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY

INSTALLATION OF SMALL WIND POWER STATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE Bc. JIŘÍ PUCHNAR

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. PETR KŘIVÍK, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2015

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektrotechnická výroba a management

Student:	Bc. Jiří Puchnar	***ID:***	134389
Ročník:	2	***Akademický rok:***	2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Instalace malé větrné elektrárny

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se se stavem AZE v ČR a jejich rolí v energetickém mixu ČR. Zamyslete se nad přínosy a negativy těchto jednotlivých zdrojů. Navrhněte opatření, která by vedla ke zvýšení využitelnosti AZE v ČR.
Seznamte se s malou větrnou elektrárnou. Vytvořte měřicí pracoviště a software ke sběru dat z malé větrné elektrárny včetně dat z anemometru. Ve zvoleném časovém období proveďte experimentální měření a ze získaných údajů určete množství vyrobené elektrické energie malé větrné elektrárny. Vyhodnoťe vliv povětrnostních podmínek na množství vyrobené energie.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání:	10.2.2015	***Termín odevzdání:***	28.5.2015

Vedoucí práce: Ing. Petr Křivík, Ph.D.
Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato práce je zaměřena na energetiku ČR, především tu alternativní a její podmnožinu větrné elektrárny. Úvod seznamuje čtenáře se stavem energetiky v ČR. Jsou zde uvedena fakta o historickém vývoji energetiky v Československu a jejím stavu dnes. Zastoupení jednotlivých zdrojů uplatňujících se v tzv. „Velké energetice“, jejich popis a produkce. Každý z využívaných zdrojů je stručně charakterizován a zmíněny základní výhody a nevýhody vyplývající z povahy daného zdroje. Dále je naznačen možný vývoj energetiky a změny uplatnění těchto zdrojů v budoucích letech. Závěr je věnován alternativním energetickým zdrojům. Snaží se postihnout jejich kladné a záporné stránky. Zároveň ukazuje vliv alternativních zdrojů na stabilitu elektrizační soustavy. Závěr této kapitoly je věnován návrhům opatření pro zvýšení využití alternativních energetických zdrojů v energetickém mixu ČR.

Druhá část je věnována experimentálnímu měření na malé větrné turbíně JPT-100 od firmy Jetpro Technology, Inc. Začátek popisuje základní matematické metody pro výpočet výkonu větru a samotné větrné turbíny. Text je doplněn názornými grafy. Následující část se věnuje samotné větrné elektrárně. V závěru jsou zmíněny její charakteristiky, kompletní popis měřícího pracoviště a výsledky měření.

KLÍČOVÁ SLOVA

Větrná turbína, Alternativní zdroje energie, Energetika ČR, JPT-100, Betzův limit

ABSTRACT

This work is focused on the power engineering of the Czech Republic, particularly the alternative and its subset, wind power. Introduction acquaints readers with the state of energy in the country. They're the facts of the historical development of energy in Czechoslovakia and its status today. Representation of particular sources which are involved in the so-called. "Big Energy", their description and production. Each of the resources used is briefly described and discussed basic advantages and disadvantages arising from the nature of the source. It is also outlined the possible development of energy and change in the application of these resources in the future. The conclusion is devoted to alternative energy sources. Strives to cover the positive and negative aspects. It also shows the effect of alternative energy sources to power grid stability. The conclusion of this chapter is devoted to draft measures to increase the use of alternative energy sources in the energy mix of the Czech Republic.

The second part is devoted to experimental measurements on small wind turbine JPT-100 from Jetpro Technology, Inc. The beginning describes the basic mathematical methods for calculating wind power and wind turbine itself. The text is accompanied by illustrative graphs. Another part deals with the actual wind turbine JPT-100. There are mentioned its characteristics, complete description of measuring workplace and measurement results.

KEYWORDS

Wind turbine, Alternative Energy Sources, Energetics of Czech republic, JPT-100, Betz Limit

PUCHNAR, J. *Instalace a stanovení účinnosti malé větrné elektrárny.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 83 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Křivík, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Instalace a stanovení účinnosti malé větrné elektrárny jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne ....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Křivíkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Dále děkuji Ing. Martinu Lisému, Ph.D. za ochotu a spolupráci při realizaci měření na analyzační jednotce TESTO 350 M/XL.

V Brně dne ....

(podpis autora)

OBSAH

Obsah 1
Seznam obrázků 2
Seznam tabulek 4
Úvod 4
1 Stav energetiky v ČR 5
1.1 Energetika a výroba elektrické energie 7
1.2 Historie energetiky v ČR 7
1.3 Současnost 8
1.4 Budoucnost 12
1.5 Elektrizační soustava ČR 15
1.6 Trh s emisními povolenkami 16
2 Energie větru 19
2.1 Úvod 19
2.2 Větrné motory 20
2.3 Schéma VTE 21
2.4 Elektrické zařízení VTE 22
2.5 Regulace výkonu 24
2.6 Vliv VTE na provoz ES 25
3 Teorie měření 30
4 Malá větrná turbína JPT-100 45
4.1 Zařízení pro měření rychlosti větru – anemometr 47
5 Zapojení měřícího stanoviště 52
6 Naměřené hodnoty a grafy 54
7 Závěr a zhodnocení 63
Seznam použitých zdrojů 66
Rejstřík zkratek 68
Přílohy 69

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Roční toky elektřiny mezi ČR a sousedními státy [3] 6
Obrázek 2: Zastoupení instalovaných výkonů daných typů elektráren v ČR [12] 10
Obrázek 3: Větrná mapa ČR [14] 12
Obrázek 4: Graf vývoje a struktury konečné spotřeby energie dle schválené Státní energetické koncepce [10] 14
Obrázek 5: Mapa zemí využívajících principy emisních povolenek a zemí plánujících jejich zavádění [28] 17
Obrázek 6: EUA cena nejbližších kontraktů a kontraktů pro prosinec 2020 obchodovaných na ICE ECX platformě v časovém období 2011 – 2013 [24] 18
Obrázek 7: Schéma VTE 22
Obrázek 8: Asynchronní generátor s napájeným rotorem 23
Obrázek 9: Synchronní generátor napájený turbínou 23
Obrázek 10: Průběh fázového napětí a proudu po připojení asynchronního generátoru s kotvou nakrátko k síti [7] 29
Obrázek 11: Průběh fázového napětí a proudu statoru po připojení asynchronního generátoru s kroužkovou kotvou v kaskádním zapojení k síti [7] 30
Obrázek 12: Ideální proudění vzduchu okolo překážky [2] 32
Obrázek 13: Reálné proudění vzduchu okolo překážky [2] 32
Obrázek 14: Vliv tvaru předmětu na součinitel odporu C_D [30] 33
Obrázek 15: Závislost výkonu větru na jeho aktuální rychlosti 35
Obrázek 16: Rozložení rychlosti větru po směru proudění [4] 36
Obrázek 17: Funkce rychlostního poměru s maximem v 1/3 37
Obrázek 18: Graf sestrojený na základě Rayleighovy distribuční funkce [31] 42
Obrázek 19: Větrná turbína JPT-100 [5] 45
Obrázek 20: Grafická závislost produkovaného výkonu turbíny JPT-100 na rychlosti větru . 46
Obrázek 21: Grafická závislost hodnot výkonů na rychlosti větru 47
Obrázek 22: Elektronika a senzor ethernetového anemometru TX20ETH [26] 49
Obrázek 23: Kontrolní jednotka analyzačního přístroje TESTO 350 M/XL [36] 51
Obrázek 24: Schéma zapojení měřícího stanoviště 52
Obrázek 25: Koláčový graf rozložení směru větru pro měření z 5. 11. 2014 54
Obrázek 26: Graf rozložení výkonu na turbíně v průběhu měření od 5. 11. 2014 55
Obrázek 27: Graf rozložení výkonu na turbíně v průběhu měření od 15. 11. 2014 56
Obrázek 28: Koláčový graf rozložení směru větru pro měření z 15. 11. 2014 56
Obrázek 29: Graf četnosti rozložení směru větru od 25. 2. 2015 57
Obrázek 30: Graf rozložení výkonu na turbíně v průběhu měření z 25. 2. 2015 57
Obrázek 31: Graf rozložení výkonu na turbíně v průběhu měření od 16. 3. 2015 58
Obrázek 32: Graf rozložení výkonu na turbíně v průběhu měření od 7. 4. 2015 59
Obrázek 33: Graf rozložení směru větru od 20. 4. 2015 60
Obrázek 34: Graf závislosti průměrných naměřených hodnot výkonu větrné turbíny ve všech obdobích na rychlosti větru 61
Obrázek 35: Graf predikce výkonu větrné turbíny s rostoucí rychlostí větru 61
Obrázek 36: Znázornění hodnot měření ze dne 20. 4. 2015 proložené polynomickou křivkou 62
Obrázek 37: Porovnání křivky sestrojené proložením naměřených hodnot s údaji výrobce ... 62
Obrázek 38: Pozice větrné turbíny JPT-100 a ethernetového anemometru TX20ETH 69
Obrázek 39: Uživatelské prostředí v programu HP VEE 70
Obrázek 40: Vlastnosti vzduchu pro stanovení účinnosti větrné turbíny JPT-100 [34] 72
Obrázek 41: Diagram denního zatížení ES ČR [12] 73

Obrázek 42: Nejčastější směry působení větru [32][33] 74
Obrázek 43: Záznam z měření anemometrem TESTO. Rychlost větru – modře, změna tlaku – zeleně. 76

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Srovnání zastoupení zdrojů v energetickém mixu podle SEK [16] 13
Tabulka 2: Rozšířená Beaufortova stupnice [35] 40
Tabulka 3: Parametry tvaru a rozsahu ve městech na území Německa [6]..... 41
Tabulka 4: Klasifikace tříd povrchů podle jejich drsnosti [6]..... 43
Tabulka 5: Změna rychlosti větru ve výšce 10 m [6]..... 43
Tabulka 6: Technické specifikace větrné turbíny JPT-100 [5] 45
Tabulka 7: Teoretické hodnoty výkonů v závislosti na rychlosti větru [5]..... 47
Tabulka 8: Srovnaní predikovaného výkonu s výkonem uváděným výrobcem 60
Tabulka 9: Výpočet rychlosti větru podle Hellmanna..... 71
Tabulka 10: Porovnání předpokládaného výkonu s výkonem uvedeným výrobcem - příloha k Obrázek 29 71
Tabulka 11: Záznam měření v programu Excel 75

ÚVOD

Elektrická energie se stala nedílnou součástí našich životů. Život bez ní, si již nelze objektivně představit. Na stabilitě a cenové dostupnosti dodávek elektrické energie jsme životně závislí a její dostatek má zásadní vliv na ekonomický a technologický vývoj země. Nacházíme se v době, kdy elektřinu a teplo bereme jako samozřejmost a přerušení jejich dodávek pouze jako výjimečný stav v případě extrémního počasí. Navíc s dobou trvání výpadku nejvýše několik málo hodin. Ačkoliv rizika nemusí být tak zřejmá jako dřív, jsou aktuální a chtě nechtě si musíme připustit, že naše závislost na těchto energiích narůstá. Kromě stability dodávek, jsme nuceni řešit i ekologii a vliv energetiky na životní prostředí. Působení spalovacích elektráren na globální oteplování může být někdy označován jako diskutabilní, zvyšování znečištění ovzduší je ale neoddiskutovatelný fakt. Cenné zásoby fosilních paliv se snižují a vyvolávají některé otázky. Co nahradí současné energetické zdroje, po vyčerpání zásob fosilních paliv? Jaké náklady to s sebou ponese? Můžeme být, jako vnitrozemský stát, vůbec energeticky soběstační?

Odpovědí mohou být alternativní zdroje energie, které jsou z menší či větší části obnovitelné a mohou nám pomoci vyřešit současnou závislost na fosilních palivech. Jejich širší zavádění je tématem několika posledních desítek let a někdy nechtěně i mnoha politických diskuzí. S růstem jejich účinnosti si nachází uplatnění ve stále více oblastech a díky snižujícím se nákladům, je jejich použití možné i pro jednotlivce a tzv. „Malou“ energetiku. Jedním z těchto zdrojů jsou i větrné turbíny. Velké větrné elektrárny mají své místo především na místech, s velmi dobrými větrnými podmínkami po značnou část roku. Naproti tomu malé větrné elektrárny s výkonem ve stovkách wattů mohou být vhodným doplňkem pro hrazení energetických potřeb domácnosti. Větrná turbína s jednotkovým výkonem 100 W byla podrobena měření a její vlastnosti jsou tématem této práce.

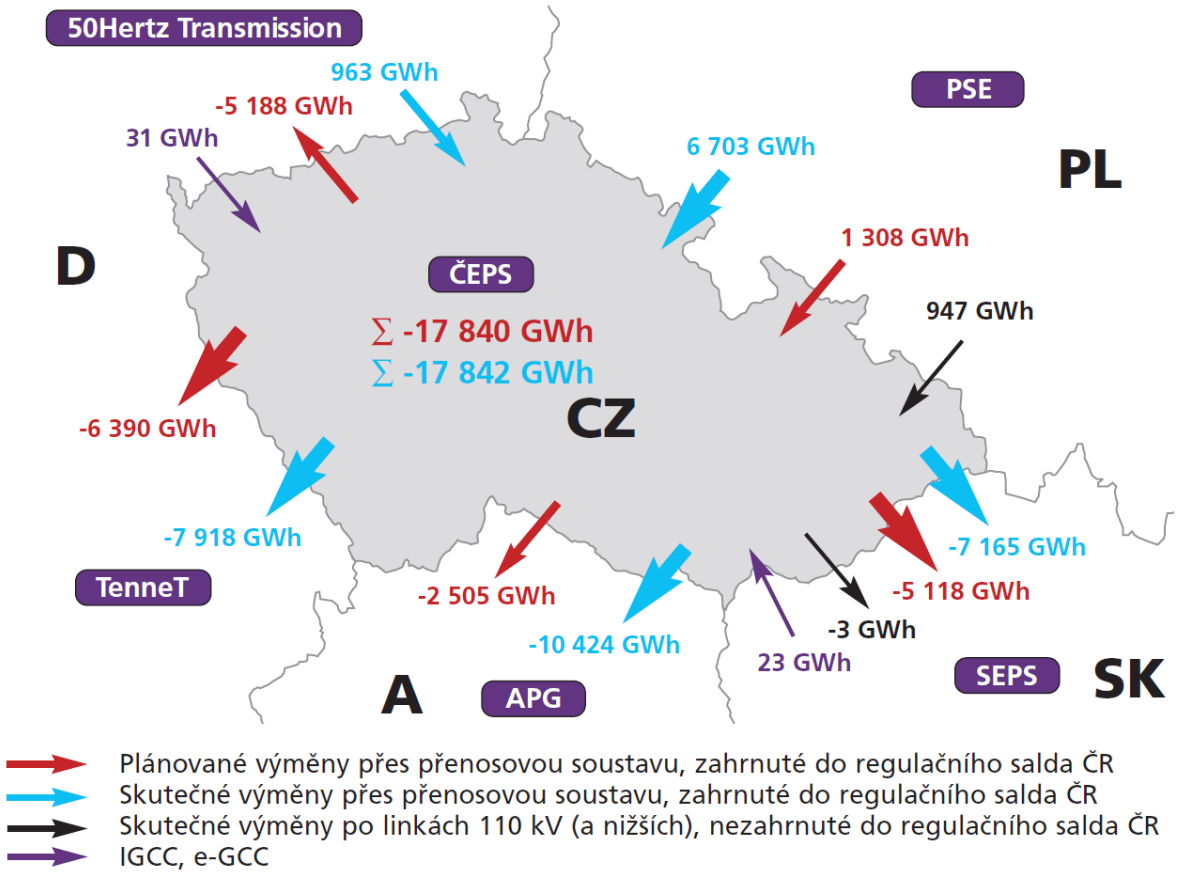
1 STAV ENERGETIKY V ČR

Česká republika má v energetickém průmyslu dlouholetou tradici. Poloha naší země do značné míry určuje energetické zdroje, které je rozumné využívat. Jako jedna z mála zemí Evropy jsme v současné době energeticky soběstační. Díky propojenému trhu a mezinárodnímu obchodu s elektřinou se nejedná v běžném provozu o nutnost. Z pohledu energetické bezpečnosti však jde o důležitý faktor.

Je potřeba se na současnou energetiku nedívat pouze z pohledu ekonomického, ale i bezpečnostního a ekologického. Energetika je totiž složitá oblast průmyslu, ve které bývají investice dlouhodobé a vývoj energetiky jen těžce předvídatelný. Cílem by mělo být vytvořit vyváženou kompozici energetických zdrojů s cílem snížení emisí, odpadů, rizik spojených s výrobou a naopak zvyšovat účinnost přeměny energie a zabezpečení dodávek elektřiny. Současná cena silové elektřiny není nakloněna investicím do nových zdrojů, neboť při tomto klesajícím trendu cen nejsou investice do nedotovaných zdrojů návratné.

Při analýze současného stavu se vychází z dokumentu Státního energetického úřadu „Národní zpráva Energetického regulačního úřadu o elektroenergetice a plynárenství v České republice za rok 2013“ vydané v červnu 2014 a stručného přehledu „Data do kapsy 2013“ od společnosti ČEPS a.s., který je vytvořen na základě podkladů dostupných k datu 31. 12. 2013. Na území ČR se za rok 2013 vyrobilo 87 065 GWh (80 858 GWh netto). Z toho ČR „vyvezla“ do zahraničí 27 458 GWh a „dovezla“ 10 571 GWh. Dlouhodobě nejvíce importované elektrické energie je z Polska a exportované na Slovensko, a do Rakouska. Český energetický průmysl (divize silové elektřiny) je tedy přebytkový. Více vyrobíme, než spotřebujeme. V Evropské unii je trend spíše opačný. Většina států EU elektřinu dováží a jsou závislé na zdrojích existujících mimo hranice státu. Největšími exportérem elektřiny je již mnoho let Francie, která těží ze svých stabilních a levných zdrojů elektřiny (více než 70% výroby tvoří jaderné elektrárny), a v poslední době Německo především díky svým velkým větrným a solárním parkům na severu země. Na druhé straně stojí Itálie s množstvím více než 40 000 GWh dovezené elektřiny ročně. Z ekonomického hlediska při současné ceně silové elektřiny na burze se jeví dovoz výhodnější, než export. Energetika je však komplexnější obor, ve kterém není vždy dobré se orientovat pouze na cenu, ale i na bezpečnost dodávky. Riziko blackoutu je nemalé a jeho důsledky mohou být katastrofické. Ostatně Itálie si už jedním velkým blackoutem sama prošla.

Blackout – Nazýváme tak stav, kdy dojde ke kolapsu elektrizační soustavy, v jejímž důsledku je postižená oblast odpojena od dodávek elektrické energie. Postižená oblast může být od několika obydlí, či městských ulici (výpadek transformátorové stanice) až po blackouty států nebo dokonce částí kontinentu, které postihnou milióny lidí. Největší blackout zažila v roce 2012 Indie. Při tomto výpadku se ocitlo více než 600 miliónů obyvatel Indie a okolních států na 3,5 hodiny bez proudu. Italský blackout se počtem cca 55 miliónů obyvatel (Itálie, Slovinsko, Rakousko, Švýcarsko a Chorvatsko) řadí spíše mezi ty menší, přesto poukázal na to, že ani technicky vyspělá Evropa není dostatečně ochráněna před přerušením dodávek elektřiny. I když příčiny blackoutů byly různé (politický tlak na operátory ES, požár křovinných porostů, úder blesku do rozvodny, lidská chyba…), je riziko jejich vzniku aktuální pro všechny státy a nejlepší ochranou se v současnosti jeví dostatečná decentralizace menších energetických zdrojů.



Obrázek 1: Roční toky elektřiny mezi ČR a sousedními státy [3]

Spotřeba elektrické energie bude v budoucnu stoupat. A ať už to bude podle ekologických představ mírným tempem (spotřebiče budou mnohem účinnější než dnes) nebo podle konzervativnějších představ strmě, v obou případech musíme disponovat dostatečnými energetickými zdroji, abychom tyto potřeby pokryli. V následujících letech bude důležité udržet rozumný mix energetických zdrojů a vyvarovat se ukvapených rozhodnutí, jakým byla v nedávné historii nevydařená podpora fotovoltaických elektráren. Důležité také bude zachovat si energetickou soběstačnost, alespoň co se týče výroby elektrické energie a to hlavně ze zdrojů u kterých nebudeme příliš závislí na zahraničních státech (např. dovoz ropy a zemního plynu z Ruska). Některé energetické a ekonomické vize dokonce hovoří o nutnosti nejen energetické soběstačnosti, ale přímo o orientaci na silně exportní energetiku. Tyto vize se opírají o představu stagnace a poté i poklesu našeho exportu, hlavně v automobilovém průmyslu (v reakci na prudce rostoucí růst čínských automobilek). Takovýto pokles exportu by způsobil nedostatek zahraničních peněz (EUR, USD), za které ČR nakupuje zahraniční komodity. Pro představu, v roce 2011 vynaložila ČR na dovoz ropy více než 100 miliard kč. Může tedy snadno vzniknout problém, za co energetické suroviny nakupovat. [1]

Spotřeba elektrické energie vzroste nejen v důsledku odklonění od kotlů na uhlí a plyn a přechod na tepelná čerpadla, ale i nahrazením spalovacích pohonů na fosilní paliva v dopravě za pohony elektrické. Zvyšování účinnosti elektrických zařízení se zvyšuje, ale takto ušetřená energie zřejmě nepokryje potřeby elektřiny vzniklé odklonem od spalování fosilních paliv. To je ale zatím spíše vizí vzdálenější budoucnosti.

1.1 Energetika a výroba elektrické energie

Výroba elektrické energie s energetickým průmyslem souvisí. V mnoha oblastech bychom mohli říci, že je její podmnožinou. Tato skutečnost je dána hlavně tím, že mnoho klasických zdrojů elektrické energie je založeno na přeměně kinetické energie páry (plynu) v turbogenerátoru na energii elektrickou. Po průchodu páry turbínou vstupuje pára o nižších parametrech do kondenzátoru, kde se ochlazuje a kondenzuje. Při tomto procesu je odevzdáno značné množství tepelné energie (chladící médium přebírá nejen teplo vzniklé ochlazením páry, ale i kondenzační teplo). Některé elektrárny umí toto teplo využít pro vytápění, některé jej přes chladící věže odevzdávají do atmosféry. Předáním tohoto teplat o atmosféry se zásadně snižuje účinnost elektrárny, protože je značná část vyrobené energie nevyužita (1 blok JE Dukovany má tepelný výkon 1444 MW, ale elektrický výkon je pouze 500 MW). Vhodným využitím tohoto tepla je vytápění průmyslových provozů nebo domácností. Z projektových důvodů a podmínek pro výstavbu jaderné elektrárny je širší využití vzniklého tepla pro vytápění domácností a průmyslových objektů velmi komplikované (větší města a průmyslové zóny jsou od elektrárny daleko) s rozvojem technologií by se však časem nabízela například přidružená výroba vodíku apod. Teplo pro vytápění se však dá odebírat například z provozu uhelných elektráren, spaloven odpadu nebo kogeneračních jednotek. Zde se nabízí zajímavý potenciál a možnost zvýšení účinnosti české energetiky. V našich podmínkách jsou možnosti slunečních tepelných elektráren a geotermálních elektráren velmi omezené a proto se z alternativních energetických zdrojů pro vytápění hodí spíše zdroje založené na spalování paliv (např. již zmíněné kogenerační jednotky, spalovny, bioplynové stanice apod.).

Alternativní zdroje energie (AZE) – Pojem, který je často zaměňován s obnovitelnými zdroji energie a má mnoho různých definic. Podle některých teorií mezi obnovitelné zdroje nepatří zdroje využívající energii ze slunce, protože energie dopadající na naši planetu Zemi je produktem termojaderné fúze na Slunci, při níž jsou slučována jádra vodíku (následně dochází k fúzi jader hélia) a tím se jeho koncentrace snižuje. Nejedná se tedy o nevyčerpatelný zdroj. Přesto se nepředpokládá, že by v následujících čtyřech miliardách let mělo dojít k jeho vyčerpání. Obecně se ale má za to, že obnovitelné zdroje jsou podmnožinou zdrojů alternativních.

1.2 Historie energetiky v ČR

Základy energetiky v naší oblasti byly položeny koncem 19. století. V této době však o energetice jak ji známe dnes rozhodně mluvit nelze. Výroba elektřina byla v té době spíše individuální záležitost a do elektrifikace českých měst ještě zbývalo mnoho, ačkoliv v Praze fungovalo elektrické veřejné osvětlení již od roku 1884. V době vzniku Československa se na jeho území nacházelo 450 elektráren, především malého instalovaného výkonu. Neexistovala v podstatě žádná elektrizační soustava, která by byla nutná pro širší uplatnění elektřiny v průmyslu. Ambiciózní myšlenkou byl návrh elektrizační soustavy pro Moravu, který navrhl prof. Ing. Vladimír List v roce 1913. Její realizace však z důvodů První světové války nezačala. Výstavba elektrizační soustavy tedy začala až po 1. světové válce. Bylo rozhodnuto o použití napěťových úrovní 110 kV pro transport elektřiny na větší vzdálenosti, 22 kV na úrovni meziměstské a 220/380 V do měst a obcí. Elektrizační soustava vznikala jako trojfázová s frekvencí 50 Hz. Hlavními zdroji elektrické energie byly elektrárny vodní

a zdroje spalující hnědé uhlí. V roce 1928 vyprodukovalo tehdejší Československo úctyhodných 2,8 GWh, což jej řadilo na 9. místo v Evropě. Elektrifikováno bylo 40 % obcí na Moravě a dokonce 50 % v Čechách. Postupem času počet elektrifikovaných měst a obcí rostl, až v roce 1955 byl elektrický proud přiveden do poslední obce na území dnešní ČR. Obecně lze říci, že elektrifikace probíhala rychle (zpočátku mnohem rychleji) v Čechách a na Moravě, než na Slovensku. Vývoj energetiky měl u nás v té době příznivé podmínky (financován byl částečně státem a částečně soukromým sektorem) a proto není divu, že se Československu dařilo v tomto průmyslovém odvětví držet na úrovni Francie a dalších vyspělých států Evropy.

Instalovaný výkon – Jde o množství činného výkonu vyprodukovaný energetickým zdrojem za 1 sekundu v případě, že zdroj jede na maximální projektovaný výkon. Jeho základní jednotkou je watt (W). Skutečné množství vyprodukovaného výkonu za rok je vždy menší než součin instalovaného výkonu a množstvím sekund v jednom roce. Tento poměr symbolizuje koeficient využití zdroje (skutečně vyprodukovaný výkon/instalovaný výkon). Nejvyšší hodnotu koeficientu využití mají u nás zdroje základního zatížení (jaderné elektrárny, velké uhelné elektrárny), nejnižší zas zdroje s vysokými náklady na palivo a zdroje závislé na počasí (Plynové, fotovoltaické a větrné elektrárny).

V padesátých letech 20. století byla dokončení přenosová soustava 200 kV a v šedesátých letech základ energetiky tvořily uhelné elektrárny o výkonu 200 MW. Jejich celkový instalovaný výkon byl 5 GW (Přibližně 2,4 krát instalovaný výkon Jaderné elektrárny Temelín). V této době začala výstavba přenosových sítí dodnes nejvyššího napětí 400 kV a naše ES se zapojila do evropské přenosové sítě. Do té doby se hojně využívala regulace výkonu spotřeby, podle výroby. Zapojením národní přenosové soustavy do Evropské elektrizační soustavy, se od tohoto trendu začalo ustupovat. S nástupem tržního hospodářství na energetickém trhu se naopak začala výroba podřizovat spotřebě. Tento trend přetrval a množství vyrobené elektrické energie se i dnes podřizuje množství energie spotřebované. Regulace tohoto typu je nutná, protože současné technologické znalosti a struktura ES nám nedovoluje elektřinu ve velké míře skladovat. Jediným rozumným uložištěm jsou přečerpávací elektrárny. Jejich výstavba je však velmi nákladná a kapacita omezená maximálním objemem vody v horní nádrži.

Přečerpávací elektrárna – její základ tvoří dvě nádrže (horní a dolní), které jsou propojený vodním kanálem, ve kterém je umístěn turbogenerátor s Francisovou turbínou. V době přebytku elektrické energie v síti (především v nočních hodinách) je přebytečná=levná elektřina využita ke zpětnému chodu Francisovi turbíny pomocí které je voda vyčerpána ze spodní nádrže do horní. Ve chvíli kdy je v síti elektřiny nedostatek, otevře se vodní kanál a voda tekoucí přes turbogenerátor vyrábí elektrickou energii.

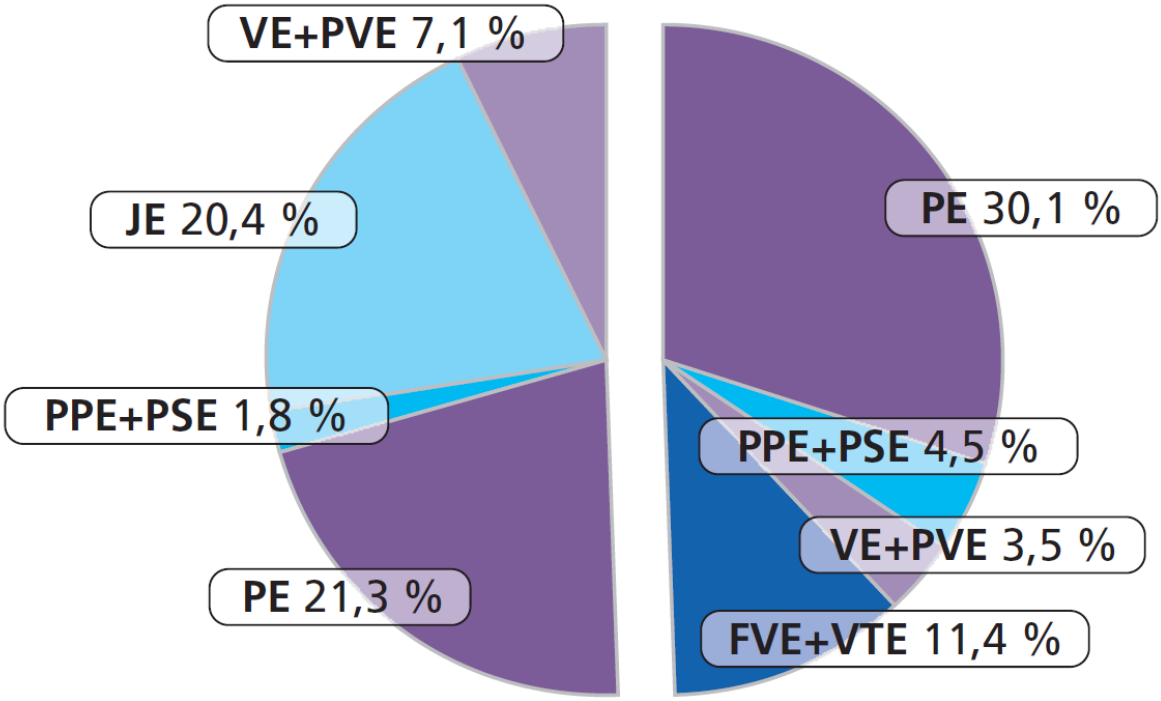
1.3 Současnost

Uhlí

Energetika ČR, stejně jako světová, je založena na fosilních palivech. U nás je to především uhlí. Vzhledem k národním zásobám, tradici a rozvinutému těžebnímu průmyslu se v nejbližší budoucnosti tento trend nejspíše nezmění. Současné studie uvádějí světové zásoby uhlí na následujících 1000 let (plynu na 450 let a ropy na 150 let). Pro srovnání, s národními zásobami uhlí se počítá přibližně na 100 let. Uhlí je spalováno nejčastěji v kondenzačních nebo tepelných elektrárnách. Podíl toho zdroje na výrobě elektřiny je okolo 50 %. Kromě

elektrické energie spalovací elektrárny produkují i nezanedbatelné množství tepla, kterým jsou zásobovány statisíce domácností v ČR. Při spalování v těchto zdrojích dochází k uvolňování tuhých nečistot, NO_x, oxidu uhličitého, uhelnatého a oxidů síry do životního prostředí. Koncentraci těchto škodlivých látek ve výpustích ovlivňuje úroveň modernizace elektrárny a kvalita spalovaného uhlí. V naší zemi již prošla většina klasických elektráren odsířením, čímž se výrazně snížila produkce oxidů síry. Odsířeno bylo více než 6400 MW výkonu instalovaného v uhelných elektrárnách. Produkovaný neaktivovaný popílek, jako zbytek po hoření, se používá jako příměs do stavebních materiálů. Především do betonu. Spalování hnědého uhlí nepatří mezi základní stavební kameny ekologické energetiky, které se spolu s EU snaží Česko dosáhnout. Především z tohoto důvodu se v posledních letech velké chvále v médiích netěší. Pro energetiky hrají parní elektrárny významnou roli a jsou levným, stabilním a bezpečným zdrojem pro energetický konzum ČR. Vzhledem k množství fungujících uhelných elektráren, jejich dlouhé životnosti a relativně nízké ceně uhlí se z energetického mixu budou vyřazovat až na základě jejich ukončené životnosti. Vliv na cenu vyrobené energie má však změna cen uhlí nízké, protože náklady na výrobu v klasických elektrárnách tvoří uhlí přibližně jen z 10 %.

Moderní uhelné elektrárny a především teplárny však do ekologické energetiky patří (alespoň pro následující desetiletí), protože se jedná o stabilní zdroj, kterým lze například bezpečně vykrývat špičky v denní spotřebě. Mají vysokou úroveň regulace výkonu a nízkou produkci emisí. Fungují tedy jako záloha instalovaného výkonu ve fotovoltaických a větrných zdrojích v případě nepříznivého počasí. Teplárny zásobují teplem přibližně 1,6 mil. českých domácností a podílí se na asi 20 % tuzemské produkce elektřiny. Transformace energie dosahuje u tepláren vysoké účinnosti díky výrobě tepelné a elektrické energie (v poměru 2:1). Palivem je ze 70 % hnědé uhlí. Některé studie naznačují, že zvýšením účinnosti tepláren lze společnou výrobou elektřiny a tepla dosáhnout až 85 % účinnosti.



Obrázek 2: Zastoupení instalovaných výkonů daných typů elektráren v ČR [12]

PE – Parní elektrárny
PPE – Paroplynové elektrárny
PSE – Plynové a spalovací elektrárny
JE – Jaderné elektrárny
VE - Vodní elektrárny
PVE - Přečerpávací vodní elektrárny
FVE - Fotovoltaické elektrárny
VTE - Větrné elektrárny
AE - Alternativní elektrárny (obnovitelné zdroje vyjma VE)

Jaderná energetika

Dalším významným zdrojem elektrické energie u nás jsou elektrárny jaderné. Obě jaderné elektrárny (JE Dukovany a Temelín) disponují instalovaným výkonem cca 4000 MW a ročně vyrobí více než 30 TWh elektrické energie. Elektrárna Dukovany, spuštěná v letech 1985 - 1987 (1. až 4. Blok) je v současnosti na konci své projektované doby provozu. Vzhledem k rezervám původního projektu, neustálé modernizaci a zodpovědnému provozu se plánuje prodloužení na dalších 10 - 30 let. Elektrárna Temelín disponuje dvěma reaktorovými bloky, které jsou v provozu od roku 2000 a vyrábí přibližně polovinu celkové produkce jaderných elektráren. Výroba v jaderných elektrárnách je založena na štěpení izotopu uranu 235 obsaženého v mírně obohaceném palivu. Její výhodou je nulová produkce oxidů uhlíku, nízké náklady na palivo v kontrastu na množství vyrobené energie a malá obestavěná plocha na jednotkový výkon. Nevýhodou je vzniklý jaderný odpad z použitého paliva, neboť

přepracování paliva je nákladnější než výroba nového a technologie množivých reaktorů není zatím na dostatečně vysoké úrovni pro běžné využití.

Plyn

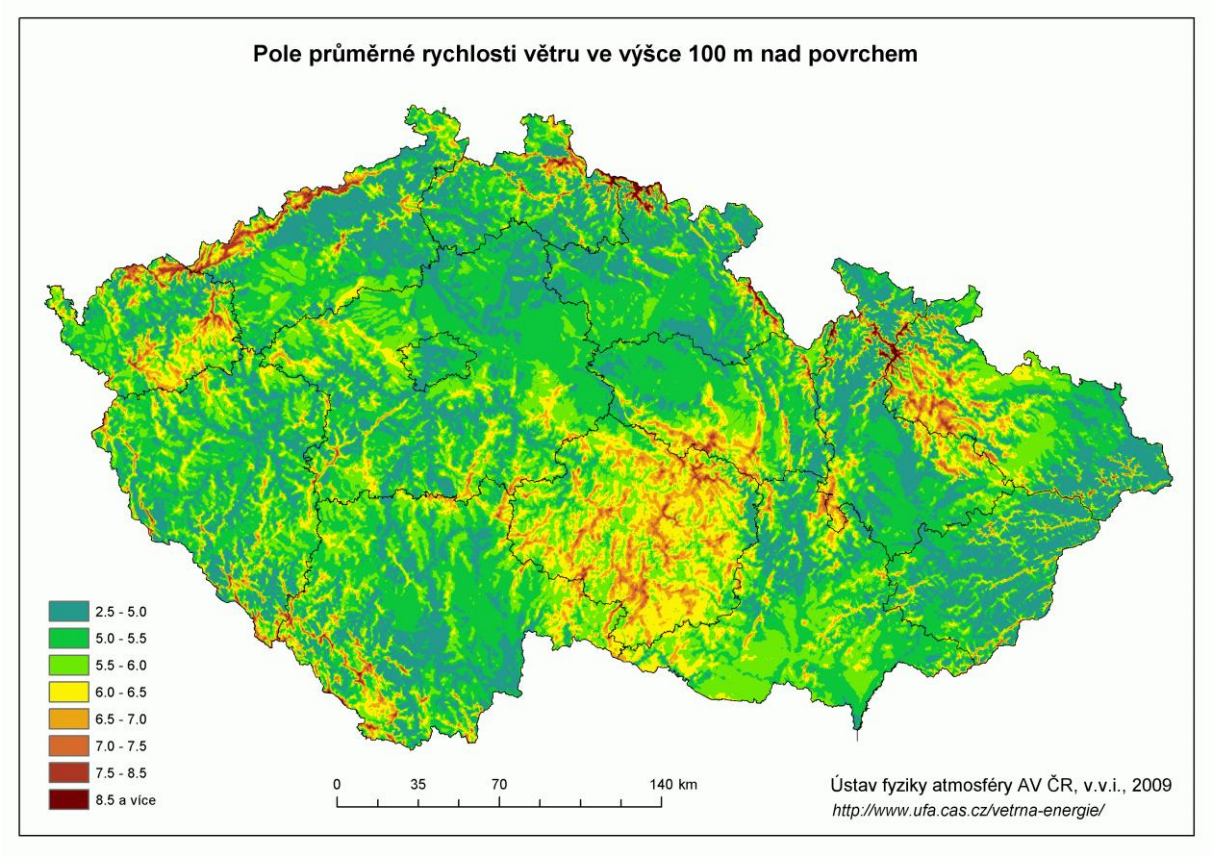
V národní energetice se již více než sto let používá i plyn (od roku 1847). V různém období se oblibě těšily jiné druhy plynu. Všechny ale byly vyráběny zplyněním, nebo odplyněním uhlí. V historii například velmi oblíbený svítiplyn se dnes již téměř nevyužívá. V současné energetice je nepopulárnější zemní plyn, který je hořlavý především díky obsahu metanu (90 %). Z energetického pohledu je vyšší obsah metanu znakem kvalitnějšího plynu. Nachází se v několika set metrových hloubkách buď samotný, nebo spolu s ropou či černým uhlím. V posledních letech se hojně rozšířila těžba zemního plynu z břidlic, nízko rozpustných písků či trvale zamrzlé polární půdy. Zemní plyn není jedovatý, je ale nedýchatelný, bezbarvý a bez zápachu. Ostrý zápach získává záměrně plynárenskou úpravou. Zásoby zemního plynu se při současné spotřebě odhadují na následujících 200 let. Roční spotřeba plynu v ČR je 8 - 9 000 000 000 m^3 a tvoří 18 % podílu na energetické výrobě.

Alternativní energetické zdroje v ČR

Česká republika bohužel kvůli svému geografickému umístění nedisponuje tak vhodnými podmínkami pro široké uplatnění alternativní zdrojů energie jako například sousední Rakousko. Vítr zde nemá ideální rychlost a dobu foukání, slunnými dny v roce a intenzitou slunečního záření jsme daleko za rovníkovými státy, řeky mají malý spád a pro geotermální energetiku jsou potřeba velmi hluboké vrty. Zajímavou příležitostí pro nás může být energie ukrytá v biomase.

Biomasa – substance biologického původu, jako je rostlinná biomasa pěstovaná v půdě nebo ve vodě, živočišná biomasa, vedlejší organické produkty nebo organické odpady. [20]

Instalovaný výkon fotovoltaických elektráren je 2132 MW což znamená 10,1 % podíl na instalovaném výkonu všech druhů elektráren. Výroba za rok 2013 dosáhla 2070 GWh. Ve větrných elektrárnách je na území ČR instalovaný výkon 270 MW (1,3 % podílu). Tento druh elektráren vyprodukoval v roce 2013 solidních 478 GWh. Na větrné mapě (Obr. 3) je vidět, že potenciál širšího využití větru v celostátní energetice není příliš velky. Vodní elektrárny mají instalovaný výkon 1083 MW (5,1 %) a přečerpávací elektrárny 1147 MW (5,4 %). Tyto elektrárny vyprodukovaly v minulém roce 3762 GWh elektrické energie. Za zmínku stojí také výroba elektřiny z bioplynových stanic a z biomasy, ta v uplynulém roce dosáhla hodnoty 3912 GWh. Z těchto alternativních zdrojů tedy vyprodukovaly nejvíce právě elektrárny spalující bioplyn a biomasu. Výroba elektřiny ze spaloven komunálního odpadu je oproti ostatním výrobním závodům nepoměrně nižší (necelých 84 GWh). Musíme ale mít na paměti, že spalovny vyrábějících elektřinu jsou pouze tři. Výhřevnost směsného komunálního odpadu je 10 - 12 MJ/kg. Primárním účelem spaloven je snižovat množství odpadu určeného ke skládkování.



Obrázek 3: Větrná mapa ČR [14]

Dle evropských směrnic by objem spotřebované energie měl být alespoň ze 13 % hrazen alternativními zdroji. Navíc Evropská unie stanovila cíl 20-20-20, který požaduje do roku 2020, aby 20 % energetické spotřeby EU bylo zajištěno z AZE, o 20 % byla snížena energetická náročnost a o 20 % se zvýšila energetická účinnost. Tato pravidla spolu s limitem 3 % míry zadlužování jsou pro některé členy za současných okolností nesplnitelné. Členské státy si mohou vybrat, jakými zdroji stanovených 20 % pokryjí. Splnění této kvóty lze v našich podmínkách dosáhnout větším zastoupením malých vodních elektráren, malých větrných elektráren a využitím moderních fotovoltaických systémů pro domácí použití, nebo pokrytím střech budov těmito panely. Rozhodně bychom se měli vyhnout další zástavbě bonitní zemědělské půdy. Jak již bylo zmíněno výše, velký potenciál nabízí i rozumné využití biomasy pro spalování a nejlépe při kogeneraci výroby elektřiny a tepla.

1.4 Budoucnost

V první řadě je třeba říct, že budoucnost světové i národní energetiky se nepředpovídá snadno, protože už delší dobu není tento trh ovlivněn technickými a cenovými aspekty, ale z větší či menší části zde hrají svou roli politické lobby, populismus a energetická móda. Jelikož u nás je největší energetická společnost ČEZ a.s. v majoritním vlastnictví státu, tak i rozhodnutí o směřování národní energetiky stojí na politicích. Jistotu pro predikce v oblasti energetiky nedává ani trh s emisními povolenkami, který je v současnosti silně deformován a prakticky nefunguje (povolenek je nadbytek).

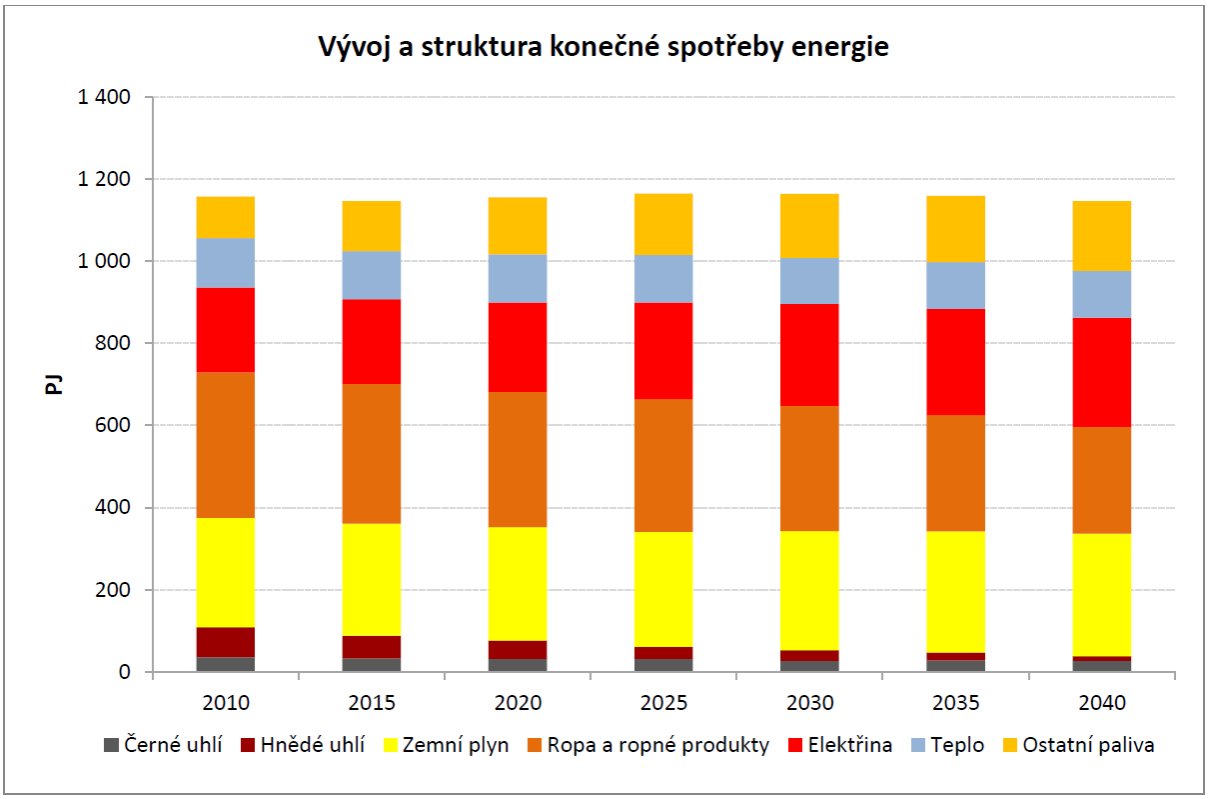
Státní energetickou koncepci vypracovává na žádost ministerstva průmyslu a obchodu skupina přibližně 20 odborníků. V jejich čele stojí Václav Pačes a Dana Drábová. Ze státní energetické koncepce by mělo být jasné, jakým směrem se česká energetika v následujících letech bude ubírat. Poslední vydaná a schválená SEK pochází z roku 2004. Její aktualizovaná verze (ASEK) byla vydána v prosinci 2013 a schválena 18. 5. 2014. Zveřejněné informace mluví o plánu zvyšovat zastoupení alternativních, jaderných a plynových elektráren. Naopak od černého a hnědého uhlí by chtěla vláda pomalu ustupovat, jak znázorňuje tabulka níže. Procentuální zastoupení jednotlivých zdrojů pro rok 2012 byly čerpány z předběžných údajů Mezinárodní agentury pro energii (IAE) a pro rok 2040 z „optimalizovaného“ scénáře SEK.

Tabulka 1: Srovnání zastoupení zdrojů v energetickém mixu podle SEK [16]

	2012	2040
Černé uhlí	10	7
Zemní plyn	15	22
Průmyslové a komunální odpady	1	1
Jádro	17	28
Hnědé uhlí	28	8
Ropa	19	17
Obnovitelné zdroje	7	16

Některé scénáře mluvily až o 50 % podílu jaderných elektráren a 25 % podílu alternativních zdrojů v energetickém mixu ČR. Takto masivní zvýšení kapacit jmenovaných zdrojů by při nerozvážné realizaci mohlo napáchat mnoho škod. Historie ukázala, že energetice svědčí konzervativní přístup s plynulým vývojem. Možný vývoj, by ale mohl proběhnout v oblasti energetického využití komunálního odpadu (KO). Vysoký podíl vzniklého komunálního odpadu v současné době končí na skládkách odpadu, kam je nenávratně uložen. Kromě ekologické zátěže životního prostředí přicházíme i o energii, kterou bychom mohli využít. Navíc i nařízení EU stanovují snížení podílu skládkovaného KO do roku 2020 na hodnotu pouze 35 % hmotnosti odpadku skládkovaného v roce 1995. Tohoto cíle lze dosáhnout důkladnějším tříděním odpadu a jeho následným spalováním a spolu spalováním (cementárny) ve spalovnách, nebo využitím biologické složky v kompostárnách a bioplynových stanicích.

Dne 18. 5. 2015 byla schválena Aktualizovaná státní energetická koncepce, která volí optimalizovaný scénář. Vláda si stanovuje za cíl snižovat výrobu z uhelných zdrojů a naopak posilovat zastoupení jádra, zemního plynu a obnovitelných zdrojů v energetickém mixu ČR.



Obrázek 4: Graf vývoje a struktury konečné spotřeby energie dle schválené Státní energetické koncepce [10]

Elektráren spalující uhlí je u nás slušný počet. Některé z nich byly postaveny již v 50. letech minulého století, jiné později. V posledních několika letech proběhla obnova některých z nich. S dalším stárnutím budou postupně některé z nich odstavovány a jejich energetickou produkci převezme jiný typ elektráren. Význam uhlí pro „velkou“ energetiku by se tak měl snižovat a jeho využití se plánuje zachovat především u zdrojů vyrábějících současně elektrickou energii a tepelnou energii pro vytápění domácností. Nově budovanou uhelnou elektrárnou na území ČR je Elektrárna Ledvice 770 MW s nadkritickými parametry páry (více než 600 °C), vysokou účinností (42,5 %) a nízkými emisemi. Její uvedení do provozu se po stavebních komplikacích očekává na rok 2015.

Důležité cíle při využívání uhlí jako energetické suroviny:

- Maximalizace účinnosti novými technologiemi a přechodem na kogeneraci elektřiny a tepla.
- Udržet si schopnost rozumně získávat uhlí těžbou a toto uhlí efektivně zpracovávat pro svoji potřebu.
- Minimalizovat dopady těžby na krajinu, ekologii a zdraví.
- Jasně stanovit vývoj v těžbě, plány nových těžebních lokalit a zajistit jistotu investic. Vytvářet stabilní prostředí srozumitelnými a dlouhodobě platnými předpisy.
- Uvědomit si důležitost uhlí i v ostatních průmyslových odvětví.

1.5 Elektrizační soustava ČR

Elektrizační soustava ČR se skládá z přenosové soustavy a distribuční soustavy. Do přenosové soustavy patří vedení 400 kV, 220 kV a vedení 110 kV vyvádějící výkon z elektráren do PS. Přenosová soustava zajišťuje dálkové přenosy a mezistátní propojení soustav. Výhradním provozovatelem je státní společnost ČEPS a.s., která spravuje 39 rozvoden s 67 transformátory, které převádí elektrickou energii z PS do DS. Dále udržuje trasy vedení 400 kV o délce 2979 km a trasy vedení 220 kV o délce 1371 km a zajišťuje přeshraniční přenosy pro export, import a tranzit elektřiny. ČEPS zajišťuje kromě rozvoje a provozu PS také řízení toků elektřiny a systémové služby na úrovni PS. Mimo jiné je povinen připojit a poskytnout přenos každému, kdo splňuje podmínky stanovené Pravidly provozování přenosové sousty (Kodex PS). Přičemž přednostní právo má elektřina z obnovitelných zdrojů a výroby tepla.

Systémové služby zajišťují bezpečný a spolehlivý provoz PS, kvalitu přenosu elektrické energie a plnění požadavků na provoz elektrizační soustavy vyplývající z mezinárodních dohod s ENTSO-E. Poplatek za systémové služby je regulován a je součástí ceny za elektřinu. Systémové služby zajišťované ČEPSem:

- Udržení výkonové zálohy pro primární regulaci frekvence
- Sekundární regulace frekvence a výkonu
- Sekundární regulace napětí
- Terciální regulace napětí
- Kvalita napěťové sinusovky
- Stabilita přenosu elektřiny
- Udržení výkonové rovnováhy v reálném čase
- Obnovení provozu ES
- Dispečerské řízení

Typy podpůrných služeb:

- Primární regulace frekvence (PR) – regulátor výkonu na turbíně sleduje frekvenci. V případě poklesu frekvence, regulace turbíny zvýší množství páry na stroj. Pokud frekvence roste, páru naopak ubere. Aby byla elektrárna schopna této regulace, musí být trvale provozována při sníženém výkonu (3 - 10 MW). Regulace probíhá v řádu vteřin.
- Sekundární regulace výkonu (SR) – na požadavek ČEPS sníží nebo zvýší provozovatel dodávaný výkon o 40 MW za účelem doregulování frekvence v síti. Sekundární regulace nastupuje po primární regulaci v případě, že není dostatečná.
- Rychle startující 15 minutová záloha (MZx) – Schopnost vodních a paroplynových elektráren najet v řádu desítek vteřin a dodávat smluvený výkon po dobu minimálně 15 minut
- Minutová záloha – do předem smluveného času elektrárna přidá nebo ubere nasmlouvané množství výkonu (např. MZ15 – do 15 minut zvyšte výkon o 66 MW)
- Snížení výkonu – do 30 minut od povelu sníží elektrárna svůj výkon minimálně o smluvenou hodnotu výkonu a garantuje, že tento provoz je schopna udržet minimálně 24 hodin (např. SV30 – do 30 min. snížení výkonu minimálně o 30 MW)
- Regulace na telefon – na požadavek dispečinku se změní pracovní bod elektrárny
- Ostrovní provoz – schopnost provozovat elektrárnu do vyčleněné části sítě, tzv. ostrova. Elektrárna automaticky přechází do regulačního režimu ostrovního provozu při poklesu frekvence pod 49,8 Hz nebo vzrůstu frekvence nad 50,2 Hz. U malých elektráren mohou být mezní frekvence přechodu do OP odlišné. Změny zatížení ostrova znamenají vysoké nároky na regulaci činného výkonu. Zatížení je proměnlivé a tím způsobené změny napětí a frekvence, musí elektrárna odpovídajícím způsobem řešit pomocí autonomní regulace.
- Start ze tmy (Blackstart) – najetí výroby elektřiny i bez dodávek z cizích zdrojů. Jde o důležitou schopnost pro vytvoření energetického ostrova při rozpadu ES.
- Redispečink – přerozdělení výroby na zdrojích a spotřeby buď v rámci ČR nebo v sousedních soustavách, či jejich kombinací s cílem odstranit přetížení vedení, nebo aktuální hrozby tak, aby celkový vyráběný výkon a salda regulačních oblastí zůstala stejná. Dochází k němu na základě oboustranných smluv mezi společností ČEPS a výrobci, nebo provozovateli zahraničních PS. Součástí smluv je i finanční vyrovnání obou zúčastněných stran. Platí, že náklady na redispečink hradí strana, která potřebuje redispečinkem řešit problém ve vlastní síti.

Distribuční soustavy rozvádí elektrickou energii k samotným spotřebitelům. Vedení funguje na napěťových hladinách 110 kV, 22 kV, 35 kV, 6 kV a sítích nn. Provozovateli DS jsou společnosti ČEZ a.s., E.ON a PRE.

1.6 Trh s emisními povolenkami

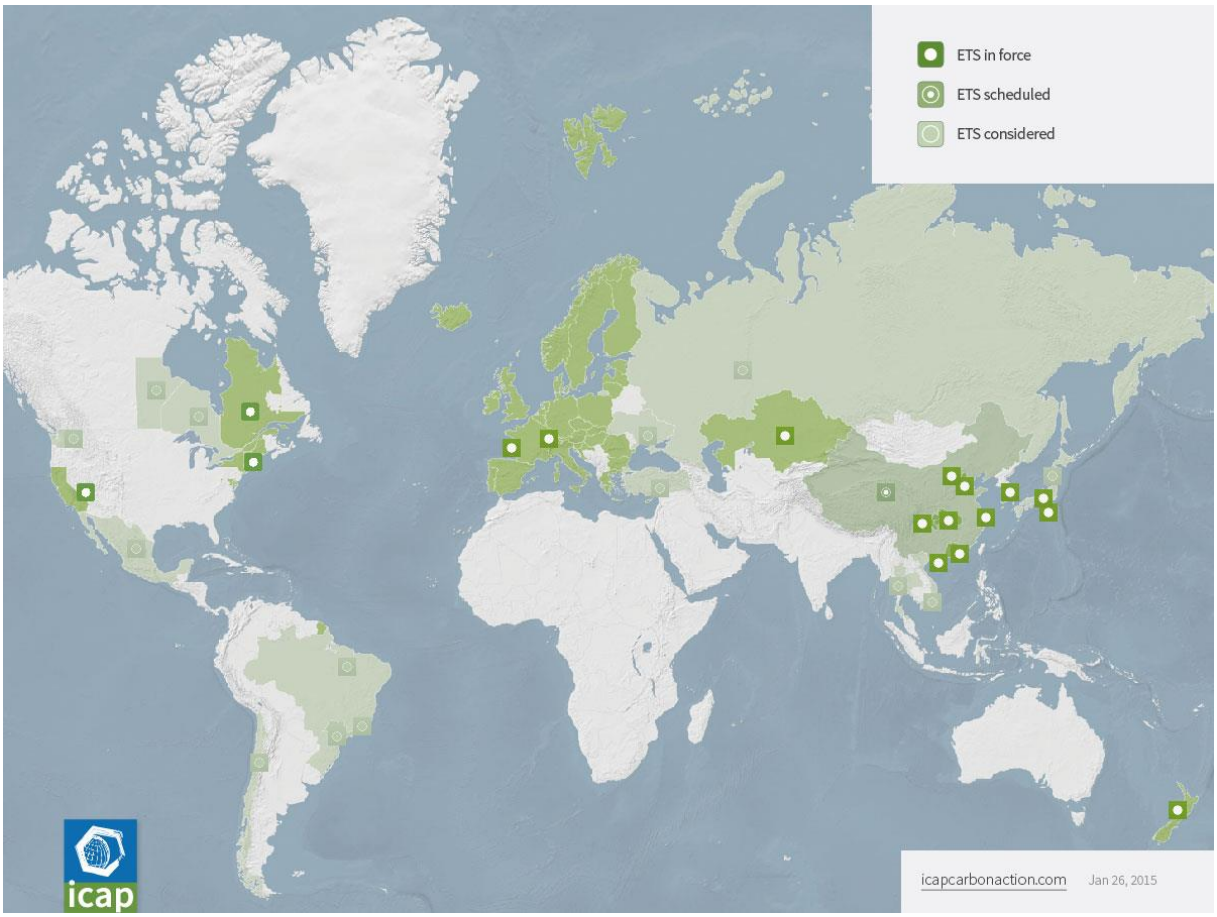
Princip emisních povolenek

V únoru roku 2005 vstoupil v platnost Kjótský protokol, který stanovuje cíl snížit produkci skleníkových plynů a řešit problematiku klimatických změn. V tomto dokumentu se uvedené země zavazují snížit emise skleníkových plynů do roku 2012 průměrně o 5,2 % oproti množství produkovaném v roce 1990. Evropská Unie vytvořila systém emisních povolenek a trh s nimi jako nástroj k realizaci tohoto snižování emisí skleníkových plynů a pro motivaci

podniků investovat do „čistší energetiky“. Tento projekt funguje od roku 2005 a byl rozčleněn do třech fází.

Evropská komise stanoví celkový objem skleníkových plynů. Na základě tohoto rozhodnutí rozdělí vlády členských států mezi stávající energetické podniky určité množství povolenek. Tyto povolenky podniky získají zdarma na základě historických emisí.

V prvních dvou obchodovacích období (2005 - 2007 a 2008 - 2012) přiděloval množství emisních povolenek sám daný stát. Ve třetím obchodovacím období (2013 - 2020) je omezeno přidělování emisních povolenek průmyslovým podniků a o přidělení rozhodují jednotné evropské benchmarky. Ostatní povolenky budou prodávány v aukcích. Konkrétně pro výrobu elektřiny by v tomto období neměly být bezplatně přiděleny žádné emisní povolenky. Podnik s těmito povolenkami může volně nakládat a například je i prodávat jiným producentům skleníkových plynů. Na konci sledovaného období však vykáže množství vyprodukovaného CO_2 a státu odevzdá daný počet emisních povolenek (1 emisní povolenka = 1 tuna vypuštěného CO_2 do ovzduší). Tato povinnost se týká všech producentů emisí, které stanovuje zákon č. 383/2012 Sb. Jde například o podniky energetické, chemické, ocelářské, papírenské a od roku 2012 i o podniky letecké dopravy. Emisní obchodování zahrnuje asi 12 000 zařízení, která mají podíl na cca 40 % produkce v EU. Trend snižování množství emisí CO_2 je určen snižováním objemu vydaných emisních povolenek na následující období (v současnosti jde o pokles 1,74 % ročně).



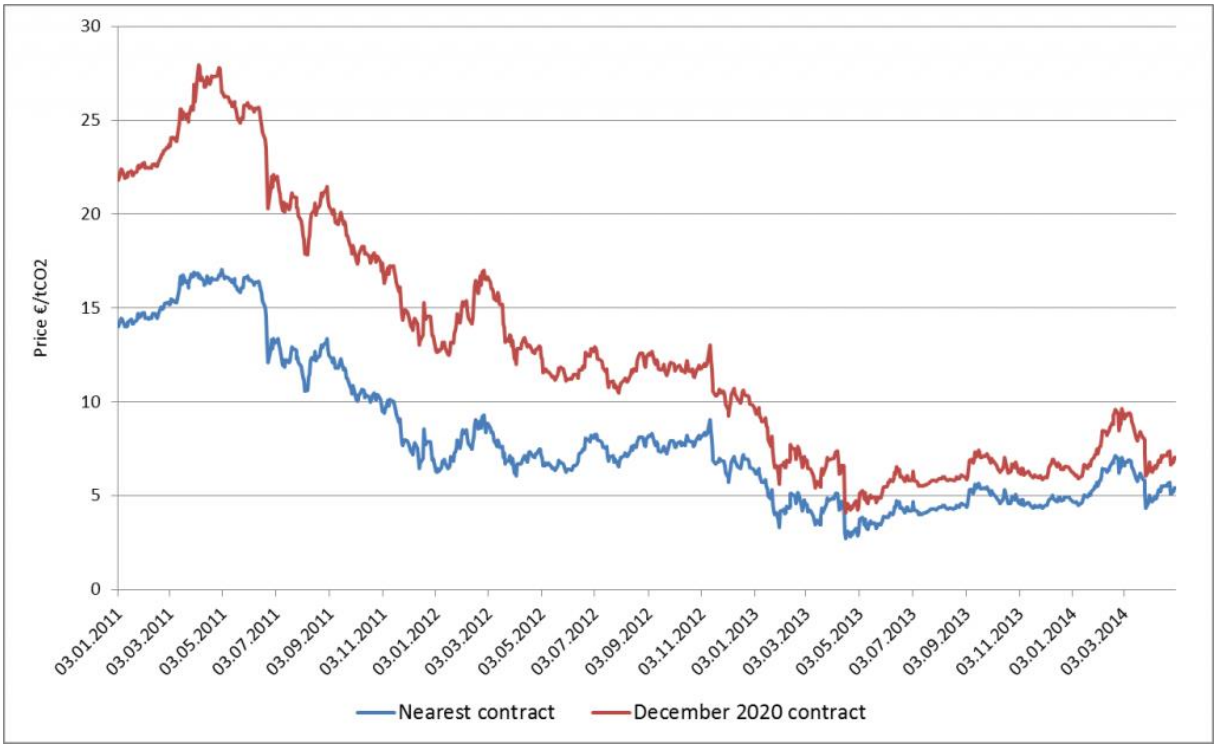
Obrázek 5: Mapa zemí využívajících principy emisních povolenek a zemí plánujících jejich zavádění [28]

Vliv na národní energetiku

Náklady na emisní povolenky se přímo promítají do ceny silové elektřiny. Tato položka spadá mezi tzv. „variabilní náklady“. Vysoká cena emisních povolenek motivuje firmu k provozu nízkoemisních zdrojů (provoz paroplynových elektráren namísto uhelných, nebo k modernizaci stávajících zdrojů s vysokými emisemi). Při vysokých cenách emisních povolenek lze urychlit návratnost investic a tím podpořit výstavbu některých projektů (paroplynové, jaderné elektrárny…).

Realita emisního trhu

V současnosti převládá názor, že trh s emisními povolenkami nefunguje. Celosvětově nadále stoupá produkce skleníkových plynů, i když se růst v posledních letech zpomalil. Směr tohoto trendu se v blízkých letech nejspíš nezmění, protože rozvojové země jako Indie a Čína rozvojem národních energetik zvyšují i produkci emisí skleníkových plynů.



Obrázek 6: EUA cena nejbližších kontraktů a kontraktů pro prosinec 2020 obchodovaných na ICE ECX platformě v časovém období 2011 – 2013 [24]

Od uvedení emisních povolenek na trh v roce 2011 klesla cena z původních 14 euro za povolenku (v dubnu 2011 dokonce cena vystoupala na téměř 17 euro) na současných cca 5 euro. Propad ceny povolenek je způsoben nadbytkem emisních povolenek na trhu. Ekonomická krize, utlumila průmyslovou výrobu a tím klesla produkce CO_2. Tento stav nevytváří motivaci pro producenty skleníkových plynů snižovat své emise, kupříkladu modernizací stávajících provozů.

Prostředky vybrané státem na prodeji emisních povolenek mají být minimálně z 50 % vloženy do programu Ministerstva životního prostředí „Nová zelená úsporám“.

2 ENERGIE VĚTRU

2.1 Úvod

Energie větru je nepřímou formou sluneční energie. Sluneční záření způsobuje na Zemi teplotní rozdíly a tyto teplotní rozdíly jsou původcem větru. Vítr sám o sobě lze využít technickými systémy. Může dosahovat mnohem vyšších výkonových hustot než sluneční záření: 10 kW/m^2 v průběhu prudké bouře a více než 25 kW/m^2 při hurikánu. V porovnání s maximálním terestriálním slunečním zářením, které dosahuje nejvýše 1 kW/m^2. Nicméně, jemný vánek o rychlosti 5 m/s (18 km/h) má výkonovou hustotu pouze 0,075 kW/m^2.

Historie větrné energie je známa již mnoho století. Energie větru byla využívána pro zavlažovací systémy již před 3000 lety. Historické zdroje uvádí využití energie větru v Afghánistánu pro mletí obilí již v 7. století. Tyto větrné mlýny byly velmi jednoduché a s nízkou účinností v porovnání s dnešními systémy.

V Evropě získávala větrná energie na důležitosti od 12. století. Větrné mlýny byly v průběhu let modernizovány až do dnešní podoby. V Holandsku na přelomu 17. a 18. století byly vybudovány desítky tisíc větrných mlýnů, které se využívaly k odvodňování půdy. Tyto mlýny byly velice propracované a dokázaly samostatně sledovat směr větru. V 19. století mnoho západních větrných mlýnů bylo využíváno pro čerpání vody v Severní Americe. Na počátku 20. století pomáhaly větrné stroje při konstrukcí parních strojů a zařízení s vnitřním spalováním. Elektrifikace nakonec učinila větrnou energii zcela nadbytečnou. Renesance větrné energie přišla spolu s ropnou krizí v sedmdesátých letech. Ve srovnání s mechanickými větrnými systémy z konce století, moderní větrné stroje produkovaly téměř výhradně elektrickou energii. V devadesátých letech byli Němci zemí s nejpokročilejšími technologiemi založenými na větrné energii. Nejmodernější větrné turbíny mají vysoké technické standardy a jejich výkon převyšuje 4 MW. Německý větrný energetický průmysl vytvořil více než 45 000 pracovních míst a dosahuje ročního obratu více než 3,5 miliardy euro.

Prudké tempo nárůstu toho průmyslového odvětví značí, že větrná energie bude dosahovat znatelného podílu na pokrytí energetických dodávek v následujících dvou desetiletí, a to neplatí pouze pro Německo a Dánsko. Hlavním atributem v tomto rozhodování o energetickém mixu bude nejspíš legislativa dané země. Politika Obnovitelných energetických zdrojů v Německu a Španělsku nastartovala boom větrné energetiky. Ve většině zemí je potenciál pro využití větrné energie obrovský. Německo i Velká Británie mohou teoreticky až 1/3 spotřeby elektrické energie pokrýt pomocí větrných elektráren.

Německo může být považováno jako příklad velkého rozvoje větrné energetiky a její integrace do stávajícího energetického průmyslu. Většina obav, srovnání a výtek na stranu větrné energetiky se zaměřuje na problematiku regulace, která pramení z fluktuace větru. Nicméně některá provedení demonstrují, že vylepšené předpovědi větru mohou tento problém vyřešit nebo alespoň minimalizovat. Důkazem přizpůsobivosti energetiky je i klesající pokles hodin, kdy je z důvodu přebytku elektřiny v síti její cena záporná přestože OZE přibývá.

Důvody protestů některých ekologických organizací proti novým instalacím VTE jsou především ochrana přírody a ochrana před hlukem. Některé jejich argumenty jsou odůvodnitelné. Na druhou stranu, větrná energetika je jednou z nejdůležitějších technologií

pro zastavení globálního oteplování. Není pochyb o tom, že větrné elektrárny mění krajinu. Pokud ale nedostaneme globální oteplování pod kontrolu, přímořské oblasti, které by mohly být chráněny sníženým působením globálního oteplování v důsledku instalace větrných elektráren v daleké budoucnosti, nejspíše nebudou existovat.

2.2 Větrné motory

Větrné motory jsou stroje, které dokáží přeměnit kinetickou energii větru na energii mechanickou a následně elektrickou. Základní typy lze rozdělit buď podle osy rotace turbíny, aerodynamického profilu, instalovaného výkonu či rychlostního součinitele.

Rozdělení:

a) Dle osy rotace
   - Horizontální
   - Vertikální
b) Aerodynamického profilu
   - Odporový
   - Vztlakový
c) Instalovaného výkonu
   - Malé
   - Střední
   - Velké
d) Rychlostního součinitele
   - Pomaloběžné
   - Rychloběžné

Odporové větrné motory

Větrné motory založené na odporovém principu jsou nejstarším využívaným typem větrných turbín. Jejich teoretická účinnost se pohybuje maximálně v rozmezí 20-25 %. Pro moderní energetiku je tato účinnost nedostatečná, proto se v energetickém průmyslu častěji setkáváme se vztlakovými motory. Plocha větrné turbíny je postavena ve směru proudění větru a vytváří větru odpor. Na lopatkách vzniká síla, která je přeměněna na rotační pohyb. Podmínkou pro vznik krouticího momentu je nižší obvodová rychlost než samotná rychlost větru. Odporovými konvertory jsou například mlýny, plachetní větrná kola či Savoniův rotor.

Savoniův rotor se skládá z vypouklé a vyduté plochy. Rotor je tvořen dvěma až třemi svislými lopatkami, které jsou ve středu předsazeny do protisměru. Lopatky mají ledvinový či polokruhovitý tvar. Určitá část větru působící v danou chvíli na vypouklou lopatku je směrována na aktuálně vydutou lopatku. Svisle umístěná Savoniova turbína pracuje nezávisle na směru větru. Kromě toho má jednoduchou konstrukci, krouticí moment přenáší přímo na hřídel a dokáže využívat širokého pásma větru, počínaje rychlostí 2 m/s.

Nevýhodou odporových motorů jsou jejich nízké otáčky, vysoký točivý moment a malý elektrický výkon.

Vztlakové větrné motory

Vyšší účinnosti lze dosáhnout využitím motorů na vztlakovém principu. Mezi tyto motory patří buď listové (2 - 4 listy), které mají osu otáčení kolmou ke směru větru, nebo motor Darrieus s vertikální osou. Proud vzduchu obtéká list vrtule tak, že nad vrchní stranou listu dochází ke zhuštění proudnic a v důsledku toho roste rychlost proudění vzduchu. Na spodní straně je naopak hustota proudnic nižší a rychlost proudění klesá. Díky rozdílným rychlostem proudění dochází k rozdílu tlaku a díky jeho působení vzniká síla, která pohání rotor. Tyto moderní větrné motory dosahují účinnosti okolo 40 %. Obvodové rychlosti u těchto typů lopatek mohou až desetkrát překonávat rychlost větru.

Výhodou vztlakových motorů je rychloběžnost, vysoká účinnost a nízká hmotnost. Proto se mnohem lépe hodí pro výrobu elektrické energie. Na rozdíl od odporových motorů potřebují pro svůj rozběh vyšší rychlosti větru (asi 5 m/s).

2.3 Schéma VTE

Hlava rotoru – slouží k převedení rotačního pohybu na tah, či naopak. Skládá se ze dvou nebo třech listů zasazených do rotoru. Jejich tvar poskytuje nejvyšší možnou efektivitu přenosu síly větru na rotor. Nejčastěji jsou listy vyrobeny ze sklolaminátu a jejich průměr se pohybuje v rozmezí 25 – 130 m.

Regulace rotoru – zařízení pro udržení otáček vrtule na cílové úrovni nebo pro její zabrzdění. Využívají se systémy s pevnou vrtulí a aerodynamickou brzdou, která se při vysokých otáčkách vychýlí, nebo systémy s nastavitelnou vrtulí a regulací úhlu natočení listů.

Gondola – vrchní část VTE umístěná na stožáru. Nachází se v ní strojovna.

Hřídel – přenáší krouticí moment z rotoru. Jsou zde umístěny další části. Je upevněna pomocí ložisek.

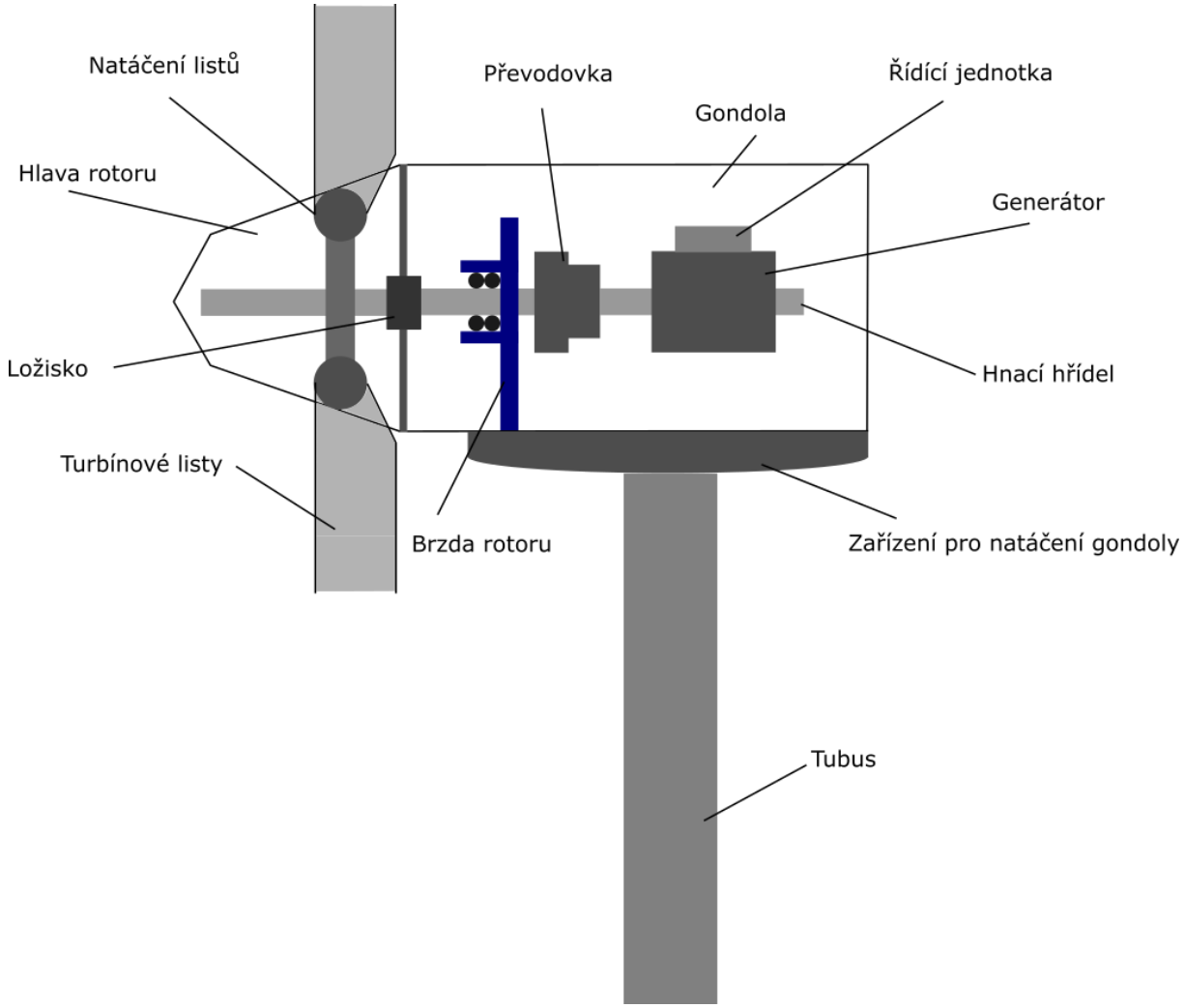
Převodovka – mění rychlost otáček v závislosti na požadavcích generátoru

Generátor – přeměňuje mechanickou energii na elektrickou

Systém měření a regulace – skládá se z ovládací elektroniky a programového vybavení.

Systém otáčení strojovny – zajišťuje správné natočení rotoru vůči směru větru a tím zabezpečuje maximální využití větrného potenciálu.

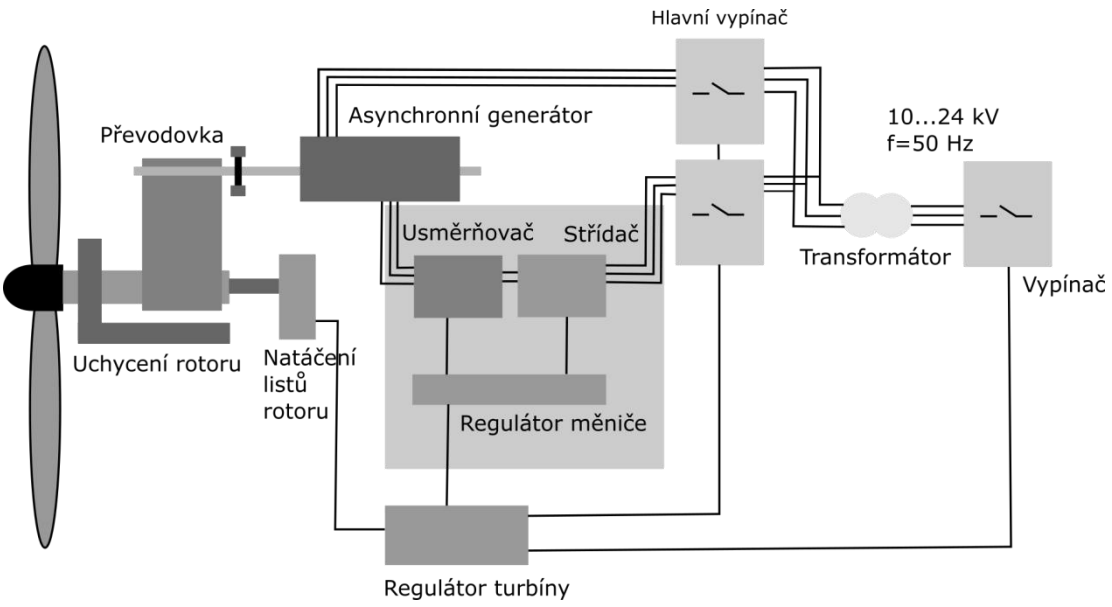
Stožár – nosný prvek elektrárny, na kterém je umístěna gondola s rotorem. Zabezpečuje umístění listů v projektované výšce, natáčení rotoru ve směru větru a stabilitu celého systému. Je umístěn na betonových základech. Konstrukce je provedena z betonu či oceli.



Obrázek 7: Schéma VTE

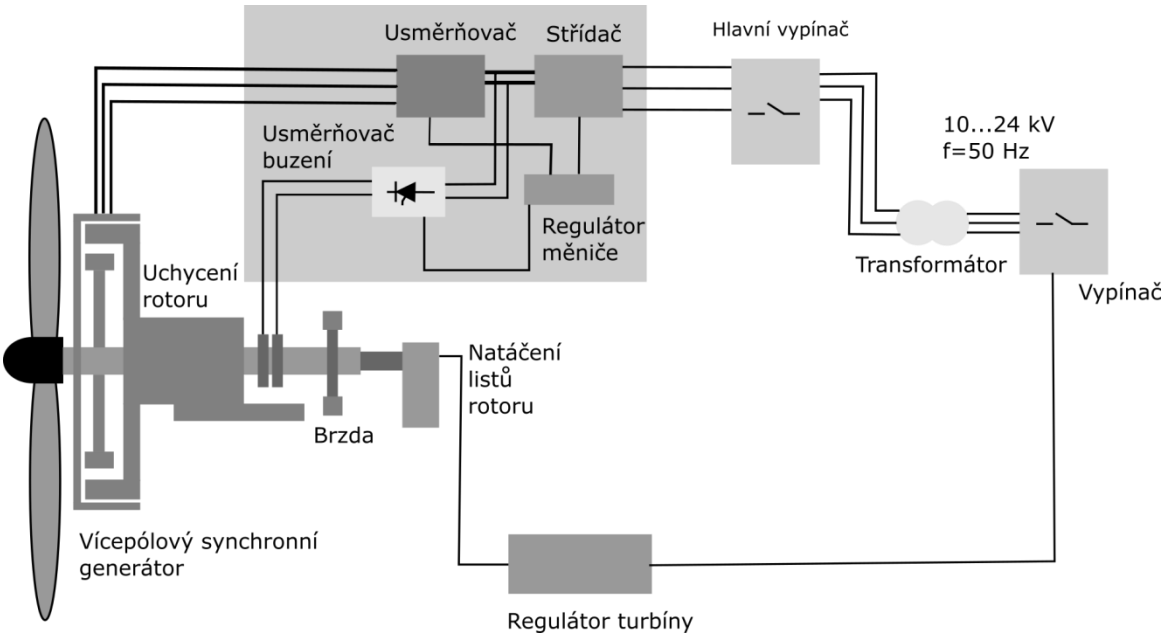
2.4 Elektrické zařízení VTE

Ve větrných elektrárnách vyrábí elektrickou energii synchronní nebo asynchronní generátor. Synchronní generátory jsou provozovány při synchronních otáčkách. Aby mohly být provozovány v širokém spektru otáček, jsou navíc vybaveny usměrňovačem a následně střídačem nastaveným na frekvenci sítě. Asynchronní generátory jsou levnější, spolehlivější a konstrukčně i provozně jednodušší než synchronní. Mají ale menší rozpětí otáček.



Obrázek 8: Asynchronní generátor s napájeným rotorem

Synchronní generátory se nejčastěji využívají pro elektrárny velmi malých a naopak velkých výkonů. Elektrárny malých výkonů disponují vícepólovými generátory s permanentními magnety a usměrňovačem, případně ještě střídačem. U velkých elektráren se v současnosti velmi často používá synchronní generátor s budícím vinutím na rotoru, který je bez převodovky připojen k turbíně. V tomto případě sice generátor nabyde na objemu, ale gondola se zmenší.



Obrázek 9: Synchronní generátor napájený turbínou

Asynchronní generátory s kotvou nakrátko se vyskytují u elektráren středních a velkých výkonů. Využitím podsynchronní kaskády pro napájení rotoru lze zvětšit rozsah otáček.

2.5 Regulace výkonu

Nejčastěji jsou větrné elektrárny konstruovány tak, aby maximálních výkonů dosahovaly při rychlostech větru 12 – 15 m/s. Tato maximální účinnost se nastavuje s ohledem na předpokládané umístění elektrárny a s tím spojenými povětrnostními podmínkami. Vyšší rychlosti větru se nevyskytují příliš často, proto by se takto nastavená VTE nevyplatila. Při rychlostech vyšších je elektrický výkon snižován s cílem zamezit poškození elektrárny. Podle principu fungování se využívají dva základní systémy regulace rotoru.

Elektrárny s malým instalovaným výkonem jsou nejčastěji vybaveny kormidlem, které rotor otáčí do směru větru. Tím je dosažena maximální projektovaná účinnost. Při dosažení mezní rychlosti větru dojde k úplnému odstavení VTE a osa rotoru směřuje kolmo ke směru větru. K brzdění rotorů, těchto nejčastěji malých rychloběžných jednotek, dochází působením pomaloběžných generátorů s usměrňovačem.

Elektrárny s instalovaným výkonem vyšším než 1,5 kW využívají většinou některý z následujících způsobů regulace:

- STALL
- PITCH
- ACTIVE STALL
- STALL-PITCH
- PITCH-STALL

STALL

Při této metodě regulace jsou lopatky připevněny k rotoru a v závislosti na působení větru se mění tvar lopatek, především jejich konce. Tímto způsobem dochází ke změně proudění vzduchu kolem lopatek a laminární proudění se mění na turbulentní. Mění se také vztlak a klesá moment hřídele. Při vysoké rychlosti větru v důsledku geometrické změny profilu lopatky klesá výkon rotoru a klesá i účinnost. Rotor není schopen samostatného rozběhu, což je nevýhodou u tohoto způsobu regulace. Rozběh proto musí zajistit přidaný elektromotor. V praxi se lze s touto regulací setkat u elektráren s instalovaným výkonem do 1 MW.

PITCH

Regulace PITCH je typem aktivní regulace. Pomocí signálu o výkonu generátoru je v případě překročení nastavených mezí uveden do provozu hydraulický systém, který vychýlí lopatky rotoru. Při vychýlení dochází ke snížení vztlaku na lopatkách, zvýšení jejich radiálního odporu a snížení momentu hřídele. Systém regulace při poklesu rychlosti větru funguje opačně a výkon se zvýší. Vychýlení lopatek provádí krokový motor.

Spolehlivost této regulace je kvůli náročnější konstrukci nižší než u regulace typu STALL. Využívá se při rozběhu větrné elektrárny a při jejím přetížení z důvodů vysoké rychlosti větru. Pokud je v daný moment rychlost větru blízká maximu a v krátkodobých intervalech je bezpečnostní limit překračován, není tento typ regulace dostačující. Regulace je relativně pomalá a nestíhá dostatečně rychle sledovat změnu rychlosti větru. V důsledku toho dochází k přetěžování generátoru.

Ve srovnání s metodou STALL dokáže tato metoda aktivně regulovat výkon v celé šířce rychlosti větru. Celkově vzato dokáže produkovat i více elektrické energie, lze ji snáze startovat pomocí natáčení lopatek. Rotorové listy jsou méně zatěžovány, což vede k jejich nižší hmotnosti a pro zastavení rotoru nejsou nutné tak silné brzdy.

ACTIVE-STALL

Na rozdíl od regulace PITCH se při překročení rychlostních limitů lopatky natáčí na opačnou stranu. Úhel náběhu se zvětší a dochází ke změně typu proudění a poklesu vztlaku. Není potřeba velké natáčení lopatek. Regulace je proto rychlejší a méně náchylná na znečištění lopatek. Rozběh elektrárny je podobný jako u regulace PITCH.

STALL-PITCH

Metoda využívá výhod metod STALL a PITCH a snaží se kompenzovat jejich nedostatky. Konstrukce listů je vyvedena podobně jako u regulace STALL. Pro rozběh a nízké výkony slouží regulace PITCH. Při překročení maximální rychlosti větru jsou lopatky systémem PITCH natáčeny, čímž jsou více zatěžovány a stejně jako u metody STALL se mění jejich geometrie. Pomocí natáčení lopatek je stabilně udržován výkon v oblasti maxima, což je největší předností této metody. Větší zátěž lopatek vytváří požadavky na pevnější konstrukci a projevuje se i vyšší hlučností.

PITCH-STALL

V oblasti nízkých otáček je opět využívána regulace PITCH. I při vysokých otáčkách je regulace podobná metodě PITCH. Až při velmi vysokých otáčkách, blížících se k bezpečnostnímu limitu, je zapojena změna rozměrů lopatek z metody STALL. Rychlost regulace však musí být vyšší než u metody STALL-PITCH. Lopatky ale nejsou tolik namáhány a provoz elektrárny je také méně hlučný.

2.6 Vliv VTE na provoz ES

Větrná energetika má svá určitá specifika. Na rozdíl od konvenčních zdrojů neposkytuje stabilní úroveň dodávky elektřiny a vyrábí, podle umístění, pouze 10 - 20 % roční doby. Mimo to lze vítr obtížně předpovídat, je nahodilý a nepravidelný. Tyto vlastnosti zvyšují požadavky na plánování, regulaci energetických toků v ES a kapacitu přenosových médií. Nemalým problémem může být i ekonomické hledisko, kvůli době využití větrného zdroje. Tuto problematiku v současnosti řeší státní dotace a povinnost provozovatele distribuční soustavy vykupovat vyrobenou elektřinu z VTE. Při vyšší koncentraci VTE v distribuční soustavě, musí provozovatel DS mít v záloze výkonovou rezervu v podobě rychle startujících zdrojů, pro pokrytí případného výpadku dodávky z důvodu změny povětrnostních podmínek. Podobné problémy se týkají i přenosové soustavy. Vlivy provozu VTE na elektrizační soustavu můžeme klasifikovat následovně:

- Lokální vlivy
- Systémové vlivy

Lokální vlivy na ES

Cílem operátora elektrizační soustavy je zajistit stabilní dodávku elektrické energie ke spotřebiteli za všech okolností. Proto provozovatel DS určuje, jakým způsobem bude elektrárna k síti připojena a jak bude provozována. S rostoucím instalovaným výkonem VTE v oblasti roste i jejich vliv na DS. Lokálními vlivy jsou:

- Přetěžování sítě
- Zvýšení zkratových poměrů
- Kolísání napětí
- Kvalita dodávky elektrické energie

Požadavky pro zamezení projevů lokálních vlivů tedy budou spočívat v dostatečném dimenzování sítě v místě připojení VTE, přepočtu zkratových vlivů při provozu VTE, vhodná regulace napětí a frekvence, sledování vyšších harmonických a možných zdrojů rušení.

U asynchronních generátorů je pro řízení DS obecně vhodnější využití typu s kroužkovou kotvou a frekvenčním měničem.

Systémové vlivy na ES

Využití většího množství VTE v dané oblasti může vést ke snížení schopností přenosu elektřiny a to i na mezinárodní úrovni. Česká republika má s těmito systémovými vlivy bohaté zkušenosti. V posledních letech především vinou větrných parků vybudovaných u Severního moře. Pozorujeme následující systémové vlivy:

- Vliv na stabilitu ES
- Využití VTE v diagramu zatížení
- Chování VTE při velkých poruchách a zkratech v PS

V případě nestability zapříčiněné systémovými vlivy je řešení situace komplexnější a často i komplikovanější než u lokálních vlivů. Velké instalované výkony ve VTE způsobují při změnách větru nebo poruše zásadní změny poměrů v síti. Je nutné dopředu plánovat výrobu a počítat s nestabilitou produkce z VTE. Porucha v některých případech může vést až k plošnému rozpadu elektrizační soustavy v oblasti.

Provoz VTE je tedy koordinován provozovatelem DS či PS do které je připojena. V případě vzniku nestandartní události může provozovatel sítě na základě kodexu požadovat změnu chování VTE. Například při vzniku vzdáleného zkratu by nemělo dojít k odpojení elektrárny ihned, neboť v případě větších větrných parku by se jednalo o značné odpojení výkonu. Proto při poklesu napětí v důsledku zkratu do 15 % U_n a času 0,7 s nesmí být VTE odpojeny od sítě.

Při kolísání frekvence se využívá mimo jiné i výkonu VTE pro stabilizaci sítě v rozmezí 49,5 - 50,5 Hz. V této frekvenční oblasti je provoz bez omezení. Při překročení frekvence 52 Hz je vydán požadavek na odpojení VTE a u frekvence pod 49,5 Hz je požadován provoz VTE při maximálním možném výkonu.

Tato pravidla vesměs platí pro většinu zdrojů připojených do elektrizační soustavy.

Provozovatel ES si může klást požadavky na připojovaný zdroj a to formou podpory udržení napětí v síti. Smluvené podmínky se liší podle druhu zdroje, jeho charakteristik, formou zapojení do DS či PS ale i na základě smlouvy. Nejčastěji se lze setkat se statickou a dynamickou podporou zdroje při udržování napětí v síti.

Statická podpora reaguje na pomalejší změny v soustavě a výrobna má dopředu stanovené meze napětí, ve který se bude podílet na regulaci.

Dynamické udržování napětí reaguje na rychlé změny napěťových a frekvenčních poměrů v síti. Jde o opatření pro zamezení výpadku či rozpadu sítě při poruchách méně (1- fázový zkrat), nebo více významných (2- a 3- fázové zkraty). Provozovatel sítě může požadovat garanci udržování napětí v přípojném uzlu v rozmezí 0,7 - 1 U_n po dobu minimálně 0,7 s, krátkodobě zamezit odpojení elektrárny od sítě, nebo přímý přechod energetického zdroje na vlastní spotřebu. V případě že tuto možností zdroj disponuje.

Jak vyplývá z výše uvedených požadavků, je primárním cílem provozovatele sítě udržet napětí a frekvenci v síti ve stanovených mezích. Napětí je ovlivňováno množstvím jalového výkonu, kmitočet souvisí s činným výkonem.

Regulace frekvence

Pro regulaci kmitočtu sítě se využívá zvýšení či snížení činného výkonu v síti. Činná složka výkonu je přeměňována spotřebiči na jinou formu energie a jejím primárním účelem je konat práci:

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T u(t) \cdot i(t)dt = U \cdot I \cdot \cos\varphi \tag{2.1}$$

P - střední hodnota výkonu
T – perioda
U - napěťová složka výkonu
I - proudová složka
cos φ - účiník

Jalová složka výkonu vytváří výkonové ztráty při přenosu elektrické energie a způsobuje vyhřívání vodičů. Uplatňuje se například pro zimní ochranu vedení a bez této složky by nefungovali některá elektrická zařízení (např. transformátory):

$$Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi \tag{2.2}$$

Dohromady tvoří tzv. zdánlivý výkon:

$$S = \sqrt{P^2 \cdot Q^2} \tag{2.3}$$

Elektrárny zapojené do sítě musí být schopny automaticky regulovat množství produkovaného činného výkonu podle frekvence sítě a požadavku dispečinku provozovatele sítě. Pro regulaci platí následující vzorec:

$$\Delta P = 20 \cdot P_o \cdot \frac{50{,}2 - f}{50} \tag{2.4}$$

Frekvence se pohybuje v rozmezí 50,2 - 51,5 Hz

P_o - okamžitý výkon
ΔP - snížený výkon
f - frekvence sítě

Při překročení frekvenčního rozmezí dochází k odpojení elektrárny od sítě. Tyto frekvenční rozsahy se mnou drobně lišit. Bývají uvedeny ve smlouvě, stejně jako systém a forma regulace. Stanovuje provozovatel DS/PS.

Důvody pro regulaci činného výkonu:

- Plánované odstávky zařízení za účelem údržby
- Udržení statické a dynamické stability
- Riziko přetížení sítě
- Nadměrný nárůst frekvence
- Zamezení vzniku či řešení stavu nouze
- Předběžné opatření proti vzniku ostrovního provozu

Regulace jalového výkonu

Množství dodávaného jalového výkonu je stanoveno podle velikosti a typu zdroje i sítě. U sítí s nižším nominálním napětím se rozsah pohybuje mezi 0,95 induktivní a 0,95 kapacitní složky. U sítí vyšších napěťových hladin je požadována možnost regulace jalového výkonu na požadavky dispečinku. Regulace probíhá následujícími metodami:

- Změnou podílu jalové složky
- Stanovením charakteristiky Q (U)
- Pomocí účiníku cos φ
- Charakteristikou cos φ = f (P)
- Zadaným napětím

U některých typů VTE dochází k rychlým výkonovým změnám, přitom musí být dostatečně rychle a účinně kompenzována jalová složka pohonu. Pro kompenzaci jsou voleny vhodné typy kompenzačních kondenzátorů, které jsou zapojeny při spuštění generátoru a odpojeny při jeho vypnutí.

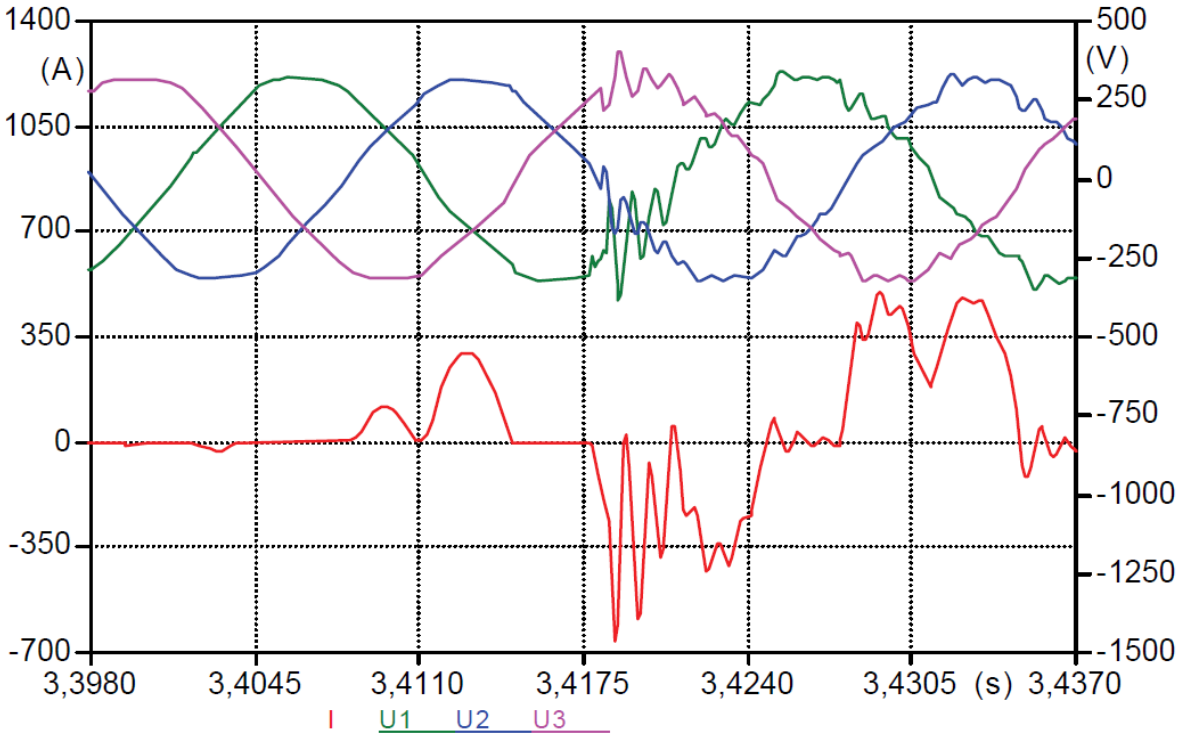
Pro připojování vyroben schopných ostrovního provozu a elektráren se synchronními generátory do sítě platí fázovací podmínky:

- Stejné napětí stroje a sítě
- Stejný kmitočet
- Minimální fázový posun mezi napětím sítě a generátoru
- Sled fází sítě a generátoru je stejný

Ostatní zdroje (asynchronní generátory, střídače, měniče kmitočtu,…) mohou být připojovány pouze v beznapěťovém stavu a někdy navíc v rozmezí ± 5 % n_n.

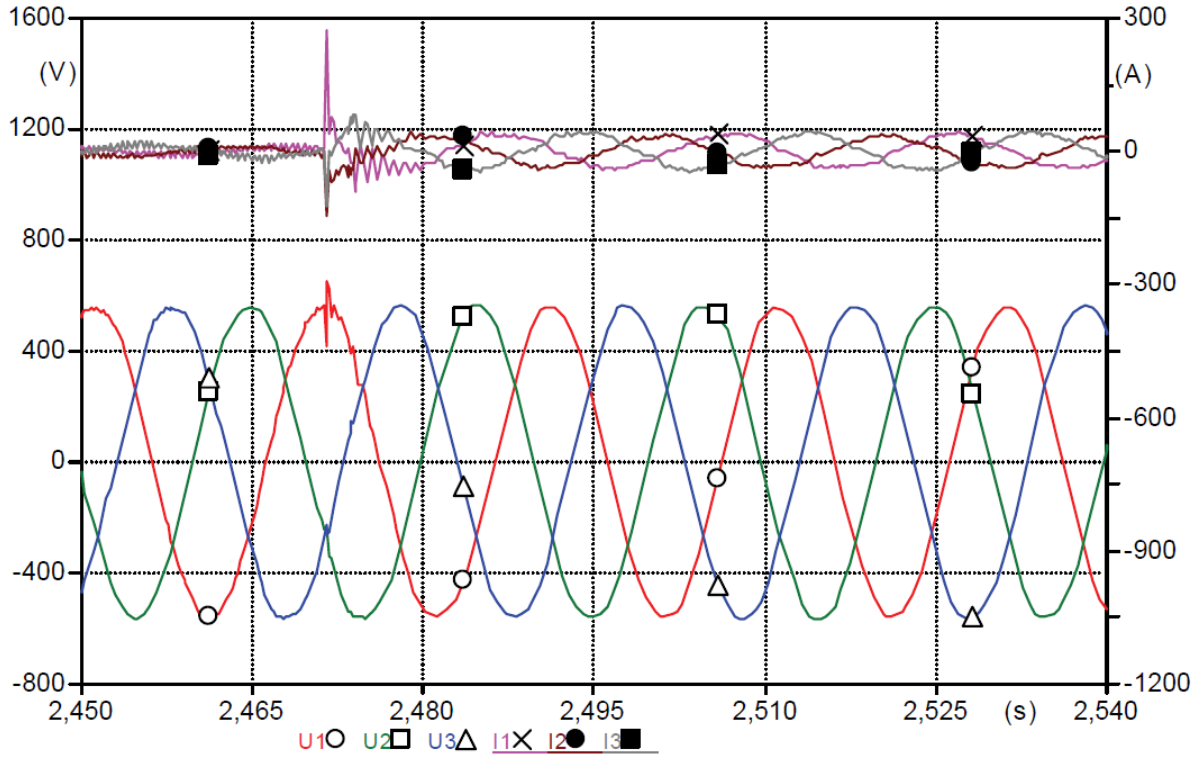
Vliv VTE při připojení do ES dle typu generátoru

U většiny elektráren instalovaných v ČR se setkáme s asynchronními generátory. Elektrárny s výkony do 350 kW jsou vybaveny asynchronním generátorem s kotvou nakrátko a tyristorovým spouštěčem, nebo asynchronním generátorem s přepínáním počtu pólů. Výhodou u těchto generátorů je díky jejich jednoduchosti konstrukce nenáročný provoz. Bohužel mají při nízkých rychlostech větru malou účinností, slabou kompenzaci jalového výkonu pomocí stupňovitého spínání a významné přechodové děje při spínání generátoru k síti. Pomocí tyristorového měniče tento lze proudový ráz zmírnit změnou řídícího úhlu. V případě výrazné změny momentu na hřídeli vlivem působení silného větru v době připojení VTE k síti, však není systém schopen tento jev dostatečně minimalizovat, připojení není ideální a jak proudová, tak i napěťová složka je deformována.



Obrázek 10: Průběh fázového napětí a proudu po připojení asynchronního generátoru s kotvou nakrátko k síti [7]

Systém s asynchronním generátorem a kroužkovou kotvou v kaskádě využívají především elektrárny velkých výkonů (od 600 kW). Rotor je v tomto případě napájen přes frekvenční měnič s rekuperační jednotkou. Generátor je připojen přímo do sítě. Tento způsob je mnohem složitější a nákladnější. O provoz elektrárny se stará procesorová jednotka, která vyhodnocuje rychlost větru a otáčky motoru. Na jejich základě nastavuje momentovou charakteristiku zařízení. Kromě toho se stará i o přifázování jednotky k síti bez nárazových dějů. Při tomto fázování nedojde k proudovému rázu většímu než 1/3 I_n. Napětí a proud jsou řízeny s cílem maximální účinnosti elektrárny. Díky tomuto systému se snižuje vliv elektrárny na elektrizační soustavu.



Obrázek 11: Průběh fázového napětí a proudu statoru po připojení asynchronního generátoru s kroužkovou kotvou v kaskádním zapojení k síti [7]

3 TEORIE MĚŘENÍ

Celkový větrný potenciál na Zemi je přibližně 3600 TW. Z toho se 35 % této energie vyskytuje ve výšce nižší než 1 km (1260 TW). Celosvětová spotřeba elektrické energie je přibližně 2 TW. Takovouto spotřebu lze pokrýt přibližně dvacetkrát při 10 % pokrytí pevniny větrnými elektrárnami.

Proudění vzduchu

Proudění tekutiny je definováno jako počet molekul, které prochází jednotkovou plochou kolmou ke směru proudění za jednotku času. Pokud n je koncentrace molekul (počet molekul na jednotku objemu) a v je objemová rychlost toku, pak je tok φ:

$$\varphi = n \cdot v \; ; [m/s] \tag{3.1}$$

V důsledku toho, celkový tok přes oblast A je:

$$\theta = \varphi \cdot A \; ; [s^{-1}] \tag{3.2}$$

Síla větru

Je-li průměrná hmotnost molekul plynu m, potom střední energie molekuly vzhledem k jejímu objemovému toku (bez vlivu tepelnému pohybu) bude $\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$. Množství energie transportované skrz jednotkovou plochu za jednotku času je výkonová hustota větru:

$$P_W = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \cdot \varphi = \frac{1}{2} \cdot m \cdot n \cdot v^3 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \; ; \; [\frac{W}{m^2}] \tag{3.3}$$

Hustota energie je úměrná třetí mocnině rychlosti větru. Kde ρ je hustota, tedy hmotnost na jednotku objem:

$$\rho = m \cdot n \; ; \; \left[\frac{kg}{m^3}\right] \tag{3.4}$$

Při referenční teplotě a tlaku bude hustota vzduchu:

$$\rho = \frac{0.2 \cdot 32 + 0.8 \cdot 28}{24.5} = 1.18 \approx 1.2 \; \frac{kg}{m^3} \tag{3.5}$$

Čitatel představuje průměrnou molekulovou hmotnost vzduchu, který pro zjednodušení obsahuje 20 % O_2 a 80 % N_2 z celkového objemu. Ve jmenovateli se nachází počet metrů krychlových na kilomole při referenčních podmínkách. Z rovnice pro ideální plyn:

$$V = \frac{R \cdot T}{p} = \frac{8314 \cdot 298.3}{1.013 \cdot 10^5} = 24.5 \; m^3 \tag{3.6}$$

Vzhledem k proměnlivosti tlaku vzduchu lze v této fázi výpočtu hustoty dosáhnou přesnosti na nejvýše dvě desetinná místa.

Dynamický tlak

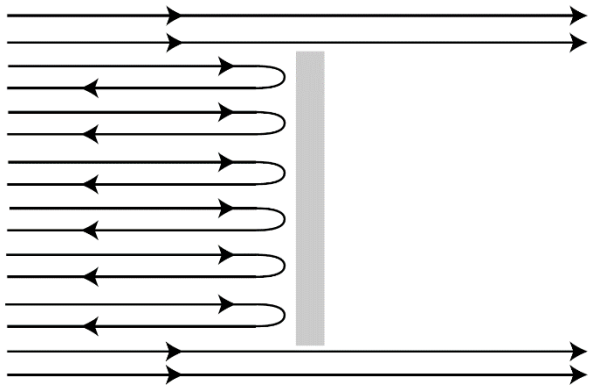
1 m^3 plynu obsahuje *n* molekul. Každá molekula nese $\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$ joulů energie objemového toku. Energetická hustota, tedy celková energie na jednotku objemu, bude:

$$W_d = \frac{1}{2} \cdot n \cdot m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \; ; \left[\frac{J}{m^3}\right] \; nebo \; \left[\frac{N}{m^2}\right] \tag{3.7}$$

Energie působící na jednotku objemu je síla na jednotku plochy, tedy tlak. Lze tedy W_d označit jako dynamický tlak.

Tlak vzduchu

Vítr vytváří tlak na jakýkoliv povrch, který mu je vystaven. Na obrázku je znázorněno ideální proudění větru přes překážku. Předpokládá, že jakákoliv molekula dopadající na povrch se odráží zpět proti větru, bez toho aby se srazila s dopadajícími molekulami.



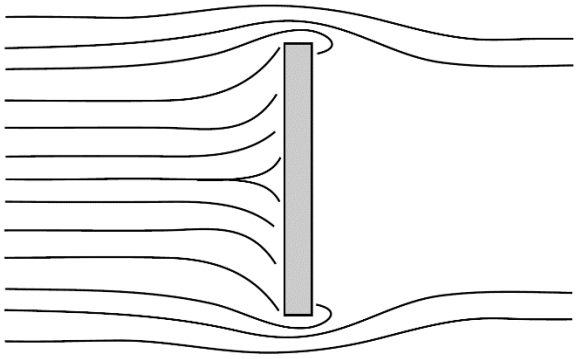
Obrázek 12: Ideální proudění vzduchu okolo překážky [2]

Při tomto zjednodušení, má každá molekula kinetickou energii *2mv*. Ovlivňuje ji rychlost dopadu *v*, a rychlost odrazu *-v*. Pokud je tok molekul *nv*, jde o míru hybnosti molekul na jednotkovou plochu a působící tlak se rovná:

$$2 \cdot m \cdot v \cdot n \cdot v = 2 \cdot \rho \cdot v^2 \tag{3.8}$$

Tento předpoklad je platný pouze při velmi nízké koncentraci plynu, kdy skutečně odrážející molekula míjí molekuly dopadající.

Při reálném toku molekul, budou odražené molekuly deformovat tok dopadajících molekul. Výsledný tok molekul tak bude vypadat podobně jako na následujícím obrázku. Výsledkem bude nižší tlak, než při ideálním proudění.

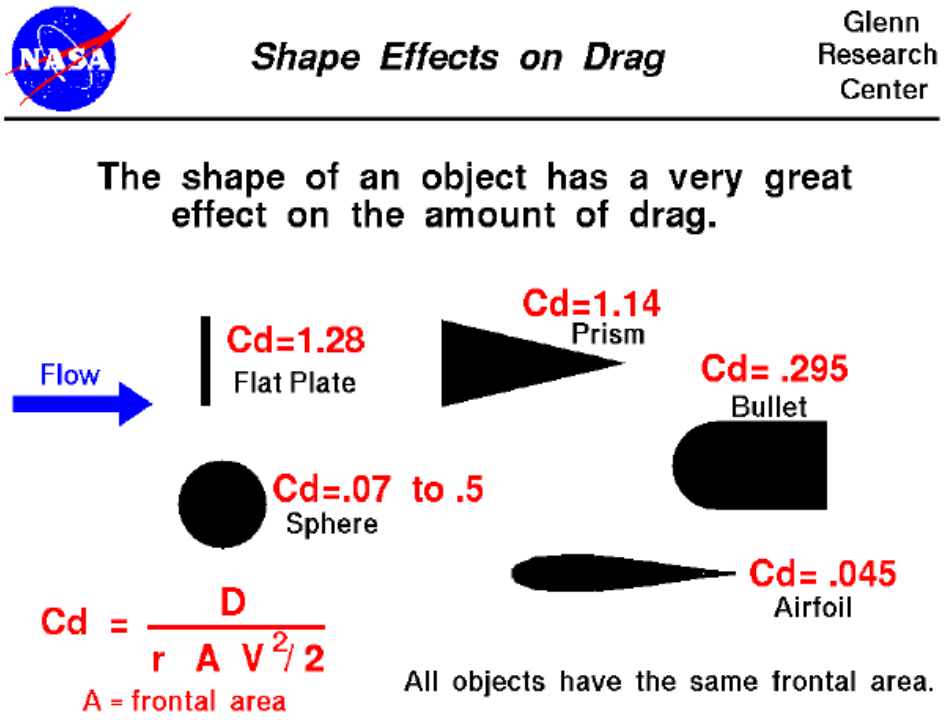


Obrázek 13: Reálné proudění vzduchu okolo překážky [2]

Hodnota tlaku závisí i na tvaru objektu, na který tlak působí. Pro řešení tohoto problému, lze zjednodušeně předpokládat, že se skutečný tlak je roven dynamickému tlaku vynásobenému experimentálně stanovenému korekčnímu faktoru C_D, který se nazývá součinitel odporu vzduchu:

$$p = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot C_D \tag{3.9}$$

Při stanovování součinitele odporu je důležitý tvar předmětu, jeho velikost a do jisté míry i rychlost proudění. To znamená, že tlak vyvíjený větrem na povrch není striktně úměrný velikosti v^2. Součinitel odporu u velké ploché desky při nízkých podzvukových rychlostech je obvykle stanoven na $C_D = 1{,}28$.



Obrázek 14: Vliv tvaru předmětu na součinitel odporu C_D [30]

Pevnost

V případě vrtulového typu turbíny, rotující listy opisují kruhovou plochu A_v, která zachycuje působící sílu větru. Nicméně, celková plocha zabraná samotnými lopatkami ($N \cdot A_p$, kde N je počet lopatek a A_p plocha každého listu) je mnohem menší, než A_v. Poměr mezi těmito dvěma plochami se nazývá pevnost S:

$$S = \frac{N \cdot A_p}{A_v} \tag{3.10}$$

Ve svislé ose turbíny, je ekvivalentní pevnost přesně definována. Síla větru působí na lopatky, čímž vytváří točivý moment na spojovací hřídeli. Tento moment je úměrný pevnosti. Přesto, v přiměřeném rozsahu pevnosti je účinnost turbíny na tomto parametru nezávislá - výkon, pro danou rychlost větru, závisí pouze na oblasti působení větru. To znamená, že zvýšením pevnosti se zvyšuje točivý moment, ale odpovídajícím způsobem se snižuje rychlost otáčení. Vysoko-pevnostní turbíny mají proto velký moment, ale malou rychlost otáčení.

U turbín s nízkou hodnotou pevnosti vznikají poruchy v proudění vzduchu. Při průchodu vzduchu přes lopatku je směr větru z jednoho listu na další strháván. U vysoko-pevnostních turbín mohou být mezi lopatkami značné interference, které snižují jejich individuální účinnost, a tím významně snižují krouticí moment. Tento fakt v podstatě potvrzuje nezávislost množství vyrobené elektrické energie na hodnotě pevnosti. Ekonomické ukazatele dávají přednost volbě několika štíhlých listů vrtule před velkým množstvím širokých listů.

Energie větru

Množství energie větru je možné vypočítat jako energii hmoty s určitou kinetickou energií:

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \; ; [J] \tag{3.11}$$

m – hmotnost proudícího vzduchu [kg]
v – rychlost větru [m/s].

Velikost hmotnosti lze rozepsat jako součin hustoty a objemu:

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot A \cdot s \; ; [kg] \tag{3.12}$$

ρ – hustota vzduchu [kg/m^3]
V - objem vzduchu [m^3]
A – plocha kolmá ke směru proudění [m^2]
s – vzdálenost uražená vzduchem ve směru proudění [m].

Rychlost pohybu větru se rozloží na podíl vzdálenosti (dráhy) za časový úsek:

$$v = \frac{s}{t} \; ; [{}^{m}/_{s}] \tag{3.13}$$

t – čas [s].

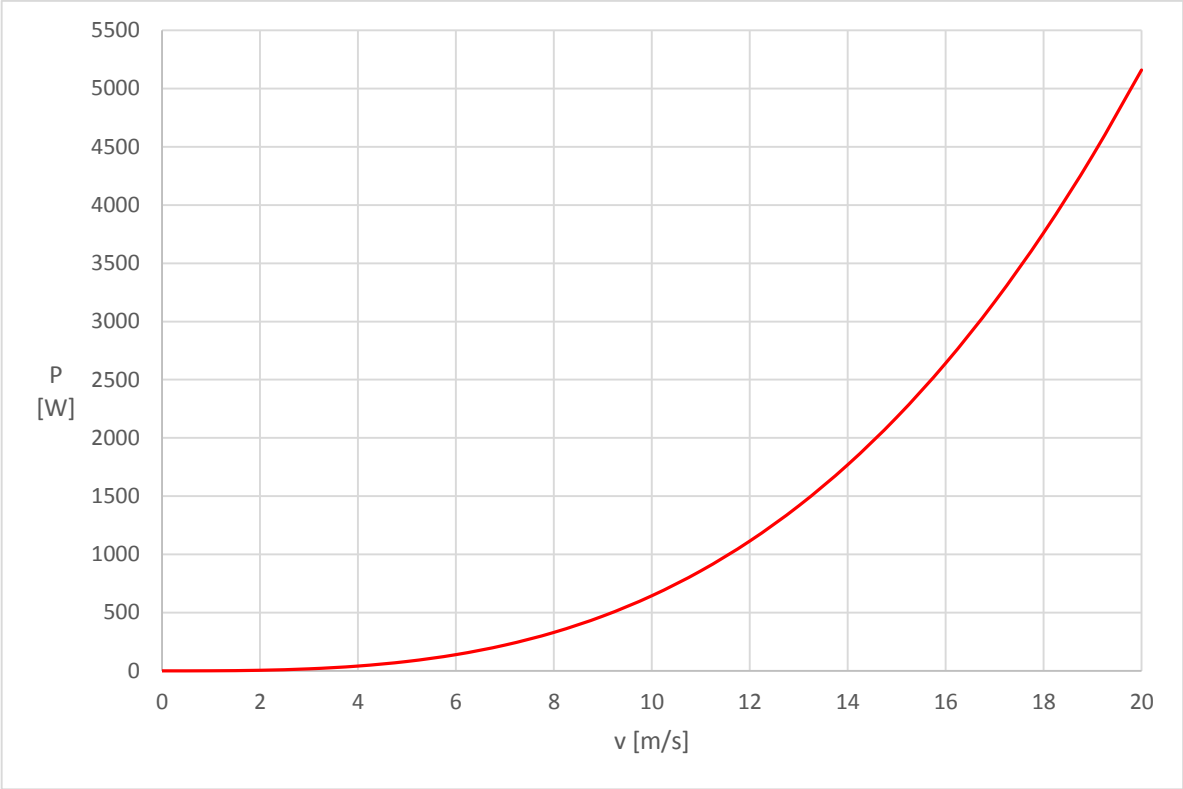
Takto vyjádřené veličiny je dosazena do vzorce pro výpočet energie větru a provede se úprava rovnice:

$$P_{max} = \frac{E}{A \cdot t} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{A \cdot s}{A \cdot t} \cdot v^2 \; ; [W] \tag{3.14}$$

$$P_{max} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \; ; [W] \tag{3.15}$$

Z odvozené rovnice vyplývá, že výkon větru je přímo úměrný jeho hustotě a třetí mocnině rychlosti. Grafickým znázorněním rovnice je zřejmé, že výkon větru s jeho rostoucí rychlostí prudce stoupá (použitá hustota větru při konstrukci grafu *ρ = 1,29 kg/m*^{3}). Hustota větru závisí na tlaku a teplotě:

$$\rho = \frac{p}{r \cdot T} \; ; [\frac{kg}{m^3}] \tag{3.16}$$



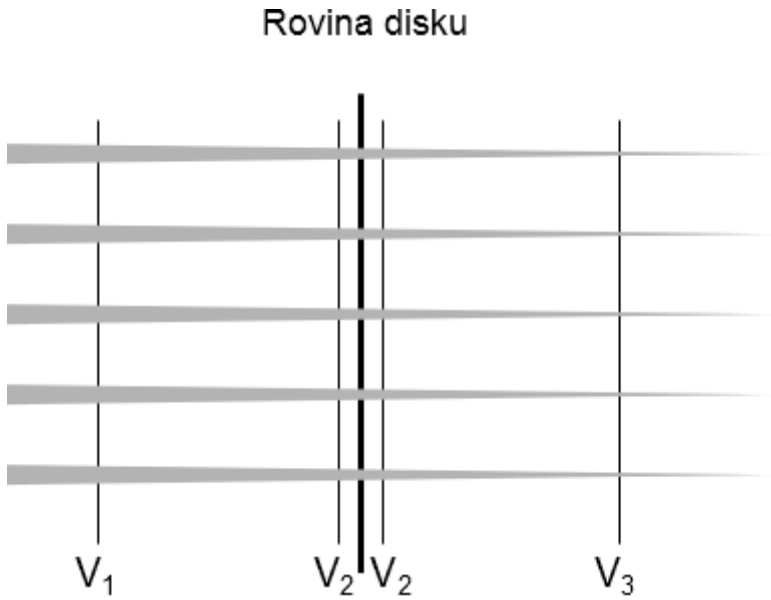
Obrázek 15: Závislost výkonu větru na jeho aktuální rychlosti

Princip výroby elektrické energie ve větrných elektrárnách je založen na odebrání energie větru pomocí větrné turbíny. Proudění vzduchu před turbínou nelze zcela zastavit, protože vzduch v případě kontaktu s překážkou se této překážce vyhne a proudí okolo. Existuje teoretický limit, jenž stanovuje množství energie větru, které lze na základě aerodynamických zákonů využít. Tento limit stanovil v roce 1919 Albert Betz a je to přibližně 59,3 %. Nemůže tedy existovat větrná turbína s účinností vyšší než tento „Betzův limit“.

Betzův limit

Máme horizontální větrnou turbínu, jejíž užitnou plochu tvoří pět listů vrtule. Tato plocha je symbolizována diskem. Disk je umístěn kolmo ke směru proudění vzduchu. V dostatečné vzdálenosti před diskem (vzdálenost, kdy existence disku neovlivňuje tok vzduchu) měříme rychlost proudění v_1 a stejně tak v dostatečné vzdálenosti za diskem měříme rychlost proudění vzduchu v_3. V oblasti disku, tedy fyzické překážky, je rychlost v_2. Rychlost v_2 je průměrem hodnot v_1 a v_3. Pro v_2 platí:

$$v_2 = \frac{v_1 + v_3}{2} \; ; [m/s] \tag{3.17}$$



Obrázek 16: Rozložení rychlosti větru po směru proudění [4]

Rankine – Froudův teorém potvrzuje, že průtokem vzduchu skrz disk nedochází ke změně rychlosti. V těsné blízkosti před a za rovinou je rychlost stejná a její velikost je v_2. Pokud je tento vztah uplatněn na pohyb hmoty, lze získat velikost energií vzduchu v dostatečných vzdálenostech před diskem a za diskem (v místech měření v_1 a v_3). Energie vzduchu před diskem bude:

$$E_1 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_1^2 \; ; \; [J] \tag{3.18}$$

A energie za diskem bude mít velikost:

$$E_3 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_3^2 \; ; \; [J] \tag{3.19}$$

Poměr hmoty procházející diskem o ploše *A*:

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot v_2 = \rho \cdot A \cdot \frac{v_1 + v_3}{2} \; ; [kg/s] \tag{3.20}$$

ṁ - hmotnostní tok [kg/s]

A – plocha disku vrtule [m^3]

Disk symbolizující větrnou turbínu odebral vzduchu energii o velikosti:

$$P_m = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot (v_1^2 - v_3^2) = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot (v_1 + v_3) \cdot (v_1^2 - v_3^2) \; ; [W] \tag{3.2}$$

Tato odebraná energii je vydělena energií větru se stejnou plochou *A*. Výsledek stanovuje maximálně možný odebíraný výkon:

$$\frac{P_m}{P_{max}} = \frac{\frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot (v_1 + v_3) \cdot (v_1^2 - v_3^2)}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^3} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{v_3}{v_1}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{v_3}{v_1}\right)^2\right] \; ; [-] \tag{3.22}$$

Poměr P_m/P_{max} je funkcí poměru v_3/v_1 a dosahuje maximální hodnoty, pokud je rychlost v_3 oproti rychlosti v_1 třetinová. Uplatnění této podmínky se získá velikost Betzova limitu:

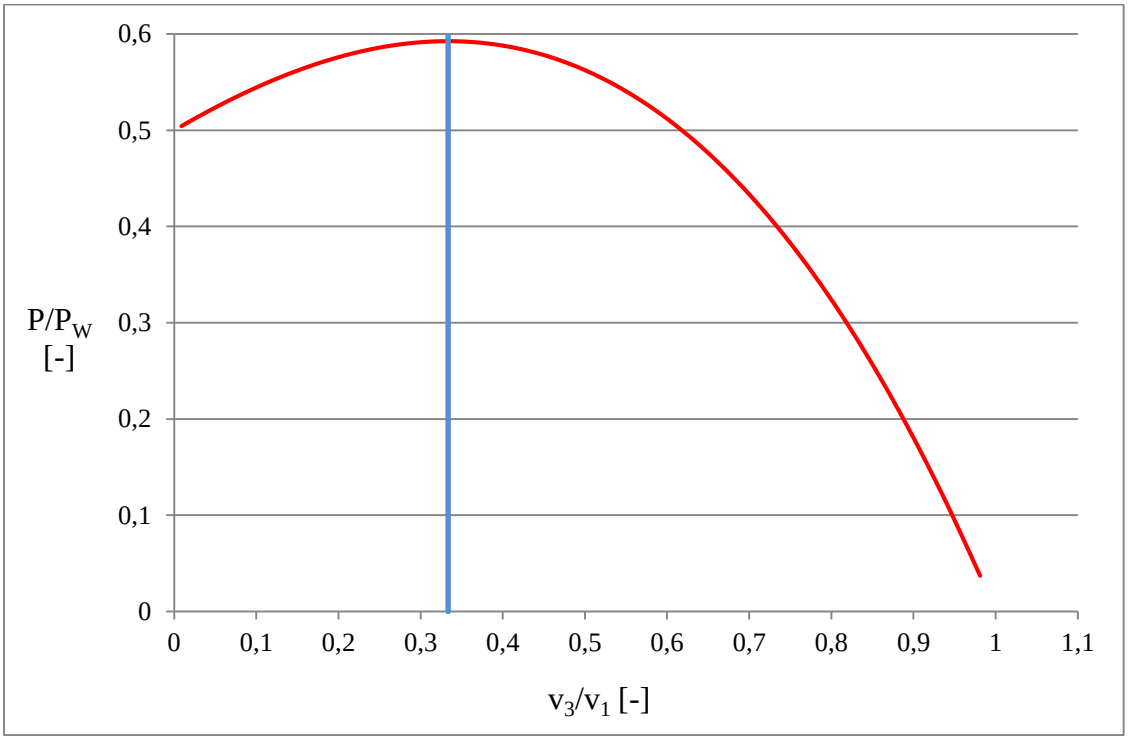
$$\frac{P_m}{P_{max}} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{1}{3}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{1}{3}\right)^2\right] = \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{3} \cdot \frac{8}{9} = \frac{16}{27} \tag{3.23}$$

Vynásobení výkonu větru Betzovým limitem, stanoví maximální teoretický výkon větrné turbíny:

$$P_{Betz} = \frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \; ; [W] \tag{3.24}$$

Při zohlednění plochy disku vrtule je výsledná hodnota dodávaného výkonu ideální větrné turbíny charakterizována takto:

$$P_A = \frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot A \; ; [W] \tag{3.25}$$



Obrázek 17: Funkce rychlostního poměru s maximem v 1/3

Důležitým ukazatelem pro hodnocení větrných turbín je účinnost přeměny kinetické energie větru na energii elektrickou. Její výpočet se provádí poměrem energie vystupující ze systému (vyráběný výkon P) a energie vstupující do systému (výkon větru P_W).

$$\eta = \frac{P}{P_W} = \frac{U \cdot I}{P_W} \cdot 100\% \; ; [\%] \tag{3.26}$$

Výpočet účinnosti větrné turbíny je také možný přes Betzův limit a účinnosti daného modelu turbíny:

$$\eta = \eta_{Betz} \cdot \eta_t \; ; [-] \tag{3.27}$$

η – celková účinnost větrného zařízení (turbíny)
η_{Betz} – Betzův limit (≈0,593)
η_t – poměrná účinnost vztažená k ideální Betzově turbíně

Dokumentace větrných turbín většinou udává účinnost turbíny, jako poměr výkonu turbíny k výkonu ideální větrné turbíny.

$$\eta_t = \frac{P}{P_A} = \frac{U \cdot I}{P_A} \cdot 100\% \; ; [\%] \tag{3.28}$$

V současnosti nejlepší větrné turbíny dosahují Betzovy poměrné účinnosti 70 %. Při dosazení do rovnice získáváme maximální celkovou účinnost okolo 41 %. Běžně používané větrné turbíny disponují poměrnou účinností η_t v rozmezí 0,4-0,6 (40-60 %).

Budící (startovací) rotace

Při odvození Betzova limitu je předpoklad proudění vzduchu na turbínu pouze v axiálním směru, tedy kolmo k užitné ploše. Při interakci vzduchu s vrtulí však dochází ke změně toku proti směru proudění. Podle Newtonova zákona vyvolává každá akce následnou reakci, a to platí i v tomto případě. Proudění vzduchu vyvolá na vrtuli odpovídající reakci a výsledkem je vznik odpovídajícího momentu hřídele, což způsobí roztočení vrtule. Tento vířivý pohyb zahrnuje energii, která není zachycena hnací hřídelí a představuje ztráty.

Generovaný výkon je roven množství točivého momentu Υ, krát úhlová rychlost ω:

$$P_g = \Upsilon \cdot \omega \; ; \; [W] \tag{3.29}$$

Čím je větší úhlová rychlost, tím menší krouticí moment a v důsledku toho jsou i nižší ztráty energie potřebné pro roztočení (probuzení) turbíny.

Se zvyšující se úhlovou rychlostí roste i poměr rychlostních špiček λ:

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{v_1} \; ; [-] \tag{3.30}$$

Z rovnice vyplývá, že čím větší λ, tím menší ztráty roztáčením stroje P_{wake}. Velikost P_{wake} lze teoreticky odhadnout pomocí složitých derivací. Ztrátový výkon je součástí výkonu, který turbína vytváří:

$$P_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^3 \cdot A_p \cdot \eta_{Schmitz} \; ; \; [W] \tag{3.31}$$

Pro výpočet η_{wake} definujeme Ψ:

$$\psi \equiv \arctan\left(\frac{1}{\lambda} \cdot \frac{R}{r}\right) ; [-] \tag{3.32}$$

Kde λ je poměr obvodové rychlosti, a r/R je normalizovaná variabilní integrace - vzdálenost od náboje dělená délkou listu rotoru. Poměr r/R má rozsah od 0 do 1.

$$\eta_{wake} = 4 \cdot \lambda \int_0^1 \left(\frac{r}{R}\right)^2 \cdot \frac{\sin^3\left(\frac{2}{3}\psi\right)}{\sin^2(\psi)} \cdot d\left(\frac{r}{R}\right) \; ; [-] \tag{3.33}$$

Pro velké hodnoty poměrů rychlostních špiček se účinnost rozběhu blíží Betzově křivce. Rozběhové ztráty se zmenšují v případě že λ je velké.

Ostatní ztráty

Betzova účinnost je zcela nezávislá na typu turbíny. Rozběhové ztráty se vztahují pouze na vrtulové stroje a u nich záleží na poměru rychlostních špiček.

Stejně jako u jakýchkoliv jiných zařízení, vyskytují se u větrných turbín i další ztráty. Například ztráty na špičkách listů, které s rostoucím počtem listů klesají. Kromě nich zde existují ztráty mechanické, elektrické, ložiskové a další.

Definice síly větru

V meteorologii je Beaufortova stupnice často používána k popisu síly větru. Tato stupnice umožňuje přibližný odhad rychlosti větru bez použití složitých měřících systémů. Nicméně není příliš vhodná pro technické účely. Pro ně se častěji využívá rychlost větru uvedená v tabulce jednotek SI s rozměrem *m/s*. V následující tabulce jsou porovnány úrovně větru podle Beauforta s příslušnými rychlostmi větru.

Tabulka 2: Rozšířená Beaufortova stupnice [35]

Stupeň	Vítr	Rychlost [km/h]	Vizuální projevy větru na pevnině	Projevy na hladině moře	Výška vln [m]
0	bezvětří	< 1	kouř stoupá kolmo vzhůru	zrcadlo	< 0,03
1	vánek	1 - 5	směr větru lze poznat podle pohybu kouře	vlnky	asi 0,03
2	větřík	6 - 11	listy stromů šelestí	světlejší hřbety vln	asi 0,13
3	slabý vítr	12 - 19	listy stromů a větvičky jsou v trvalém pohybu	lom vln	0,3 - 0,7
4	mírný vítr	20 - 28	vítr zvedá prach a útržky papíru	bílé hřebeny	0,6 - 1,2
5	čerstvý vítr	29 - 39	listnaté keře se začínají hýbat	nad vlnami vodní tříšť	1,2 - 2,4
6	silný vítr	40 - 49	telegrafní dráty sviští, používání deštníků je nesnadné	silná vodní tříšť	2,4 - 4
7	mírný vichr	50 - 61	chůze proti větru je obtížná, celé stromy se pohybují	bílá pěna na vlnách	4 - 6
8	čerstvý vichr	62 - 74	ulamují se větve, chůze proti větru je normálně nemožná	bílá pěna na vlnách	4 - 6
9	silný vichr	75 - 88	vítr strhává komíny, tašky a břidlice ze střech	vysoké rolující vlny	asi 6
10	plný vichr	89 - 102	vítr strhává komíny, tašky a břidlice ze střech	přepadávající hřebenatky	6 - 9
11	vichřice	103 - 116	vítr působí rozsáhlá pustošení	vlny pokryté pěnou	9 - 14
12-17	orkán	> 117	ničivé účinky (vítr odnáší střechy, hýbe těžkými hmotami)	vlnobití, pěna ve vzduchu	> 14

Distribuce větru

Zastoupení rychlosti větru se běžně využívá k charakteristice větrného potenciálu v daném ročním období. Toto rozložení rychlosti větru je odhadováno na základě měření, větrných map či počítačových analýz. Pro jejich konstrukce se někdy využívají tabulky a statistické funkce. Grafy rozložení rychlosti větru v daném období zobrazují, jak často se konkrétní rychlost větru v oblasti vyskytuje. Podle nich, lze odvodit energetický potenciál větru. Při měření rychlosti větru jsou důležité intervaly mezi měřenými veličinami, které mohou způsobit nejistoty v odhadu. V případě že je rychlost zaznamenávána pouze každých 10 minut, nebo dokonce jednou za hodinu, mohou být další výpočty pro umístění větrné turbíny zatíženy značnou chybou. Větrná energie nezávisí lineárně na rychlosti větru. Této chybě se lze vyhnout zaznamenáním průměrné rychlosti větru v jednom metru krychlovém. Průměrnou rychlost větru lze vypočítat takto:

$$\bar{v} = \sum h(v) \cdot v \ ; \ [\tfrac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}] \tag{3.34}$$

Nicméně, průměrná rychlost větru může jen částečně popsat potenciál lokality, protože rozložení distribuce větru může být kontinuální, nebo střídavé. Při střídavé distribuci větru se střídají období velmi vysokých rychlostí větru s obdobími klidného vánku. V obou

případech je energetický potenciál krajiny naprosto odlišný. Přesto se průměrná rychlost větru často používá pro hodnocení energetické kvality sledované lokality.

Pro většinu zemí existují větrné mapy, které ukazují průměrnou rychlost větru. V pobřežních oblastech dosahuje vítr průměrné rychlosti 6 m/s i více. Ve vnitrozemí může být průměrná rychlost větru nižší než 3 m/s. Hornaté regiony často poskytují dobré větrné podmínky. Dnes již existují i digitální větrné mapy, které dokáží odhadnout rychlost větru i v místech, kde nebyla provedena měření.

O větrných podmínkách lokality více než průměrná rychlost větru vypovídá frekvence distribuce dané rychlosti větru. Nejčastější statistickou metodou používanou pro výpočet síly větru jsou Weibullovy a Rayleighovy distribuce.

$$f_{Weibull}(v) = \frac{k}{a} \cdot \left(\frac{v}{a}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{a}\right)^{k}} \tag{3.35}$$

Parametry tvaru a rozsahu jsou především závislé na místě. Následující tabulka znázorňuje příklady parametrů pro některé oblasti na území Německa.

Tabulka 3: Parametry tvaru a rozsahu ve městech na území Německa [6]

Lokalita	k	a	rychlost [m/s]
Berlín	1.85	4.4	3.9
Hamburk	1.87	4.6	4.1
Hannover	1.78	4.1	3.7
Helgoland	2.13	8.0	7.1
Kolín n. Rýnem	1.77	3.6	3.2
Mnichov	1.32	3.2	2.9
Norimberk	1.36	2.9	2.7
Saarbrücken	1.76	3.7	3.3
Stuttgart	1.23	2.6	2.4
Wasserkuppe	1.98	6.8	6.0

Průměrnou rychlost větru je možné odhadnout podle Weibullových parametrů:

$$\bar{v} = a \cdot \left(0.568 + \frac{0.434}{k}\right)^{\frac{1}{k}};\ [\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}] \tag{3.36}$$

Parametr *a* pro *k = 2* může být získán z průměrné rychlosti větru:

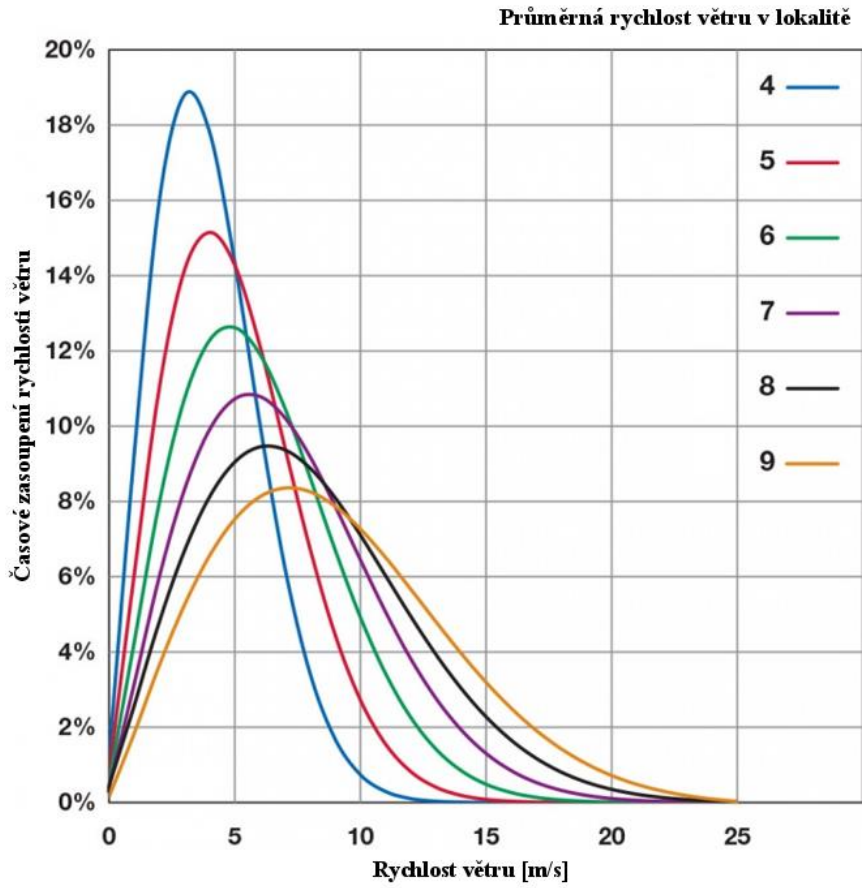
$$a_{k=2} = \frac{\bar{v}}{0.886} \approx \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \bar{v}\ ;\ [-] \tag{3.37}$$

Dosazením do Weibullovy distribuční funkce a použitím *k = 2* vznikne Rayleighova distribuční funkce:

$$f_{Rayleigh}(v) = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{v}{\bar{v}^2} \cdot e^{-\frac{\pi}{4}\frac{v^2}{\bar{v}^2}} \tag{3.38}$$

Rayleighova distribuční funkce potřebuje jako parametr pouze průměrnou rychlost větru.

Výsledek pak lze vynést do grafu:



Obrázek 18: Graf sestrojený na základě Rayleighovy distribuční funkce [31]

Vliv výšky a prostředí

Rychlost větru je obvykle zaznamenávána ve výšce 10 m. I rozdíly pár set metrů v nadmořské výšce mohou změnit rychlost větru. Kopce či hory také významně ovlivňují rychlost větru. Na vrcholu hory nebo na větrné straně, která je kolmá k proudění větru, může rychlost větru stoupnout až na dvojnásobek. Naopak na závětrné straně kopce je rychlost větru mnohem nižší.

Překážky, jako například rostliny nebo kopce v blízkosti větrné elektrárny dokáží významně zpomalit proudění větru. Jednotlivé překážky nevytváří problém, pokud je plocha rotoru více než třikrát vyšší než překážka nebo je vzdálenost mezi překážkou a větrnou turbínou dostatečná. Nicméně, tato vzdálenost může být až 35 krát větší než výška překážky. Bez vhodné čistoty terénu mohou větrné turbulence snížit využitelný energetický potenciál větru.

Rychlost větru se s rostoucí výškou od povrchu země zvyšuje, protože se snižuje účinek zpomalení vlivem drsnosti terénu. Větrné generátory obvykle mají výšky strojoven více než 10 m vysoko. Pro přesný odhad větrného potenciálu jsou nezbytná dodatečná měření rychlosti větru v ostatních výškách. Pokud však známe druh porostů ve sledované lokalitě, můžeme rychlost větru v různých výškách přibližně vypočítat.

Rychlost větru $v(h_2)$ ve výšce h_2 může být přímo vypočtena z hodnoty drsnosti terénu z_0 a rychlosti větru $v_1(h_1)$ ve výšce h_1:

$$v(h_2) = v(h_1) \cdot \frac{\ln\left(\frac{h_2-d}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_1-d}{z_0}\right)};\ [\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}] \tag{3.39}$$

Překážky mohou způsobit posunutí mezní vrstvy od země. Toto posunutí lze nazvat parametrem *d*. Pro široce rozptýlené překážky, je parametr nula. V jiných případech může být *d* odhadnuto jako 70 % výšky překážek.

Hodnota drsnosti terénu z_0 popisuje výšku do které je vítr zpomalen na nulu. Jinými slovy, povrchy s velkou hodnotou drsnosti mají velký vliv na rychlost větru. Tabulka uvádí klasifikaci různých tříd povrchů pro koeficient drsnosti z_0.

Tabulka 4: Klasifikace tříd povrchů podle jejich drsnosti [6]

Třída povrchu	z_0	Popis
1 - Moře	0.0002	Otevřené moře
2 - Hladký	0.005	Mokřiny
3 - Otevřený	0.03	Otevřený rovný terén, pastviny
4 - Otevřený hrubý	0.1	Zemědělská půda s nízkým osídlením
5 - Hrubý	0.25	Zemědělská půda s vysokým osídlením
6 - Velmi hrubý	0.5	Krajinné parky s křoví a stromy
7 - Uzavřený	1	Pravidelné překážky (lesy, vesnice, předměstí)
8 - Střed města	2	Centra velkých měst s vysokými a nízkými budovami

Následující příklad znázorňuje vliv koeficientu drsnosti povrchu. Vítr má rychlost $v_1(h_1) = 10\ m/s$ ve výšce $h_1 = 50\ m$. Dosazením do výše uvedené rovnice provedeme výpočet rychlosti větru $v_2(h_2)$ nad různými povrchy ve výšce $h_2 = 10\ m$. Posunutí *d* pro mezní vrstvu od povrchu musí být bráno pro vyšší překážku s pozemní třídou 6 - 8.

Tabulka 5: Změna rychlosti větru ve výšce 10 m [6]

Třída povrchu	z_0 [m]	d [m]	Rychlost ve výšce h_2 = 10m [m/s]
1	0.0002	0	8.71
2	0.005	0	8.25
3	0.03	0	7.83
4	0.1	0	7.41
5	0.25	0	6.96
6	0.5	3	5.81
7	1	5	4.23
8	2	6	2.24

Tabulka výše zobrazuje výsledky. Rychlost větru se výrazně snižuje s rostoucím koeficientem drsnosti povrchu. To ukazuje na nevhodnost umístění větrné elektrárny do zastavěných oblastí nebo rozsáhlých lesů. Rychlost větru se rovněž razantně zvyšuje s výškou. Například rychlost větru je u pozemní třídy 4 ve výšce 50 m o 30 % vyšší než ve výšce 10 m. Tato fakta je třeba

brát v úvahu při výstavě velkých větrných elektráren. Využitelná rychlost větru na vrcholu velkých větrných elektráren je mnohem vyšší než ve výšce 10 m, kde se provádí běžná měření. Větrné turbíny s výkony přes 1 MW mají náboj umístěný ve výškách 50 - 70 m v pobřežních oblastech (pozemní třídy 1 - 3). Ve vnitrozemských oblastech s vyšším koeficientem drsnosti povrchu je náboj VTE umístěn ještě výš. Rychlost větru se stává nezávislou na výšce až v oblastech tzv. geostrofického větru, ve výškách přesahujících 100 m nad povrchem. Na závěr je vhodné doplnit Hellmannův výkonový zákon, který je dalším vztahem pro vertikální rozložení rychlosti větru.

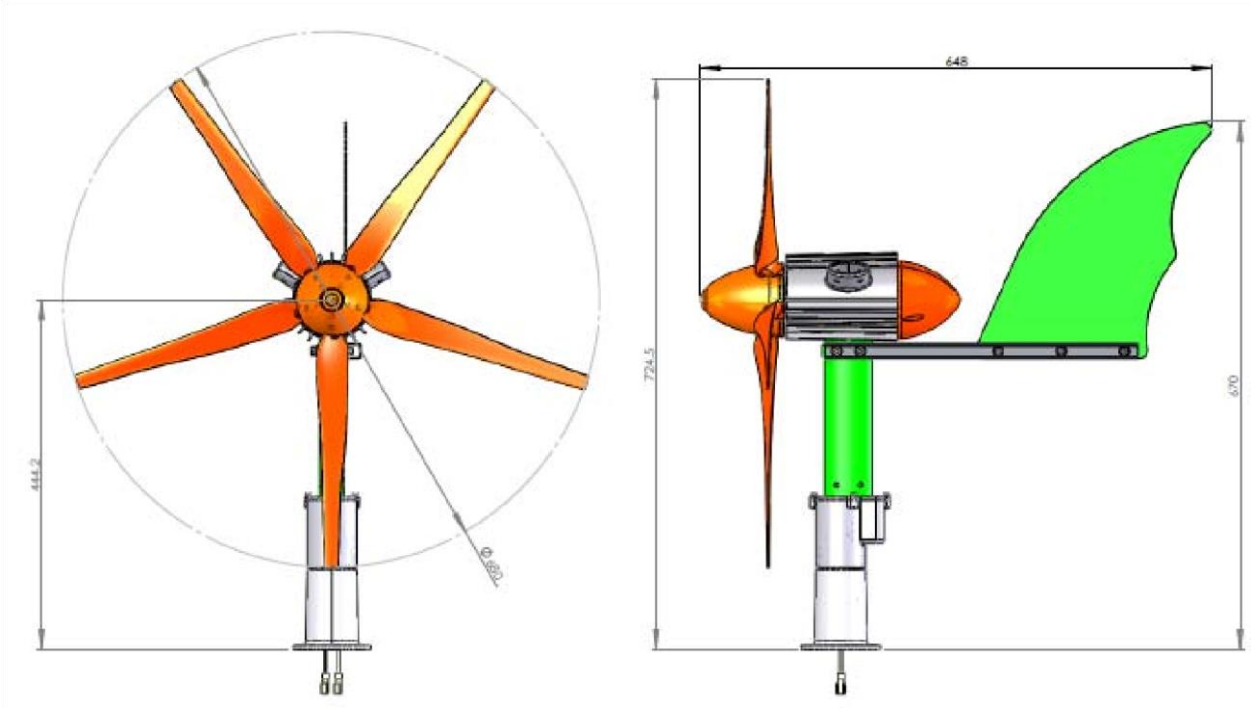
Pokud je $z = \sqrt{h_1 \cdot h_2}$ a $a = \frac{1}{\ln\frac{z}{z_0}}$ přechází předchozí vztah do tzv. Helmannova vztahu:

$$\frac{v(h_2)}{v(h_1)} = \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^a \; ; [-] \tag{3.40}$$

Pro $z = 10\ m$ a $z_0 = 0{,}01\ m$ je parametr pouze sedminový. Lze jej tedy označit jako 1/7 silového zákona. Přestože je tento zákon platný pouze v případě, kdy posunutí mezní vrstvy od země d je rovno nule.

4 MALÁ VĚTRNÁ TURBÍNA JPT-100

Pro naše experimentální měření jsme použili větrnou turbínu JPT-100 od společnosti Jetpro Technology, Inc. Rotor má pět listů, které jsou umístěny horizontálně. Jmenovitý výkon turbíny činí 100 W při rychlosti větru 12 - 20 m/s. Výstupní napětí je 12 V, stejnosměrné. Vypínací rychlost je nastavena na 20 m/s. Při překročení vypínací rychlosti je detekováno přepětí a aktivována elektromagnetická brzda, která otáčky rotoru sníží. Celková hmotnost turbíny činí 6 kg.

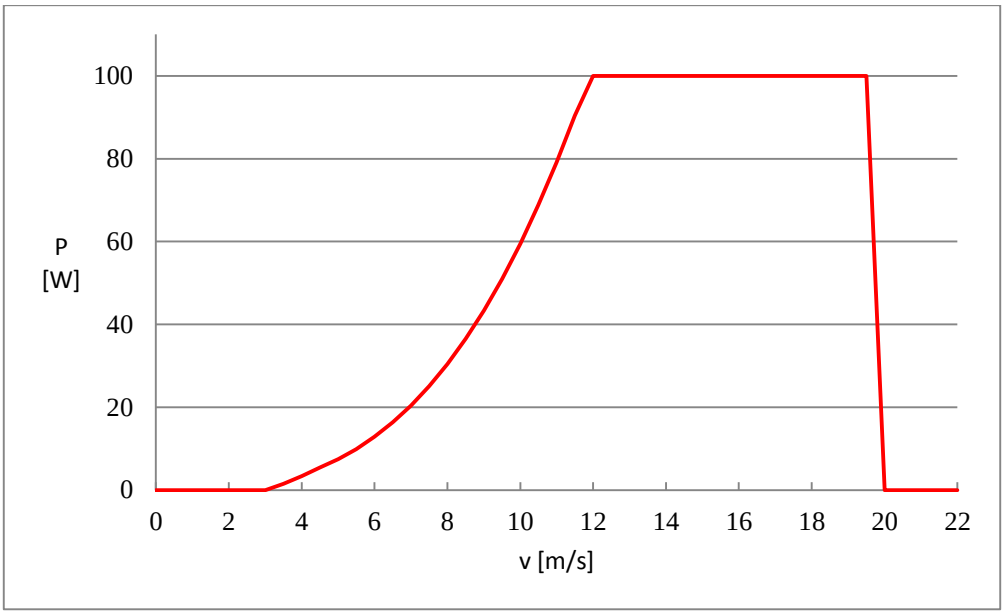


Obrázek 19: Větrná turbína JPT-100 [5]

Tabulka 6: Technické specifikace větrné turbíny JPT-100 [5]

Jmenovitý výkon	[W]	100
Výstupní napětí	[V=]	12
Průměr rotoru	[m]	0,68
Počet listů	[-]	5
Spouštěcí rychlost větru	[m/s]	3
Jmenovitá rychlost větru	[m/s]	12
Mezní rychlost větru	[m/s]	20
Rozměry	[mm]	680x648x725
Váha	[kg]	6
Brzda	[-]	Elektromagnetická

Nejvhodnější oblast provozu větrné turbíny JPT-100 je v rozmezí rychlosti větru 12 - 19 m/s. Startovací rychlost elektrárny je okolo 3 m/s, jmenovitého výkonu dosahuje od 12 m/s. Působení elektromagnetické brzdy je znázorněno v grafu níže.



Obrázek 20: Grafická závislost produkovaného výkonu turbíny JPT-100 na rychlosti větru

Principem činnosti větrné elektrárny je působení větru na lopatky, které roztáčí rotor umístěný uprostřed statorového vinutí. Otáčení rotoru vytváří ve statoru elektrický proud. Generátor převádí mechanickou energie na elektrickou. Jde o synchronní generátor s permanentními magnety. Součástí větrné turbíny je i integrovaný usměrňovač, který převádí vyrobené střídavé napětí na napětí stejnosměrné a zároveň hlídá přepětí, vzniklé nadměrnou rychlostí větru. V případě signalizace přepětí je vydán povel pro aktivaci elektromagnetické brzdy. V podstavci turbíny je umístěn otočný kroužek, který umožňuje přenášet vyrobenou energii do vodičů a současně volné otáčení turbíny. Pro neustálé natočení turbíny kolmo ke směru proudění větru slouží směrovka, která je připojena za modul turbogenerátoru.

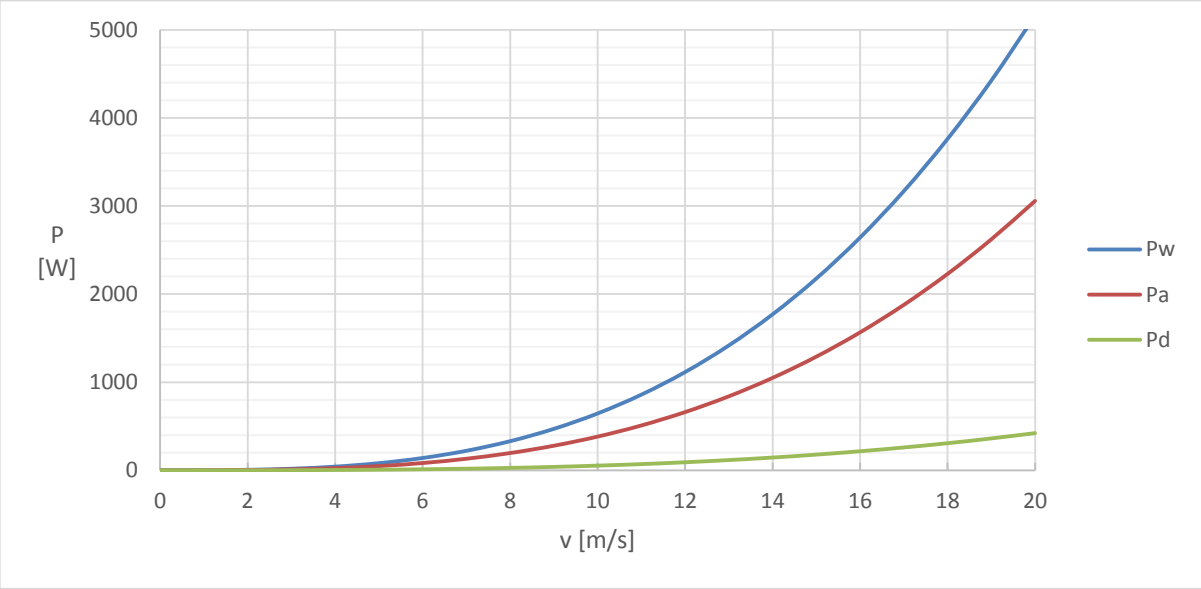
Poměrnou účinnost elektrárny výrobce udává 38 %. Plocha disku vrtule je přibližně 0,363 m^2. Stejně jako v předchozím případě je hustota větru 1,29 kg/m^3. Jestliže jsou známy tyto hodnoty, lze teoreticky stanovit velikosti produkovaného výkonu při konkrétní rychlosti větru:

$$P_D = \frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot A \cdot \eta_t \; ; [W] \tag{4.1}$$

Vypočítané výkony jsou pro srovnání uvedeny v následující tabulce. Protože však je maximální výkon větrné turbíny JPT-100 pouze 100 W, jsou hodnoty výkonu turbíny P_D při rychlosti větru nad 12 m/s pouze ilustrační.

Tabulka 7: Teoretické hodnoty výkonů v závislosti na rychlosti větru [5]

P_W [W]	P_A [W]	P_D [W]	v [m/s]	P_W [W]	P_A [W]	P_D [W]	v [m/s]
0	0	0	0	858,5	508,7	70,2	11
0,65	0,38	0,05	1	1115	660	91,1	12
5,16	3,06	0,42	2	1417	840	115,8	13
17,4	10,3	1,42	3	1770	1049	144,7	14
41,3	24,5	3,37	4	2177	1290	177,9	15
80,6	47,8	6,59	5	2642	1566	216,0	16
139,3	82,6	11,4	6	3169	1878	259,0	17
221,2	131,1	18,1	7	3762	2229	307,5	18
330,2	195,7	27,0	8	4424	2622	361,6	19
470,2	278,6	38,4	9	5160	3058	421,8	20
645,0	382,2	52,7	10				



Obrázek 21: Grafická závislost hodnot výkonů na rychlosti větru

4.1 Zařízení pro měření rychlosti větru – anemometr

Proudění větru je v podstatě tok tekutiny v prostoru. Tok větru směřuje z místa vyššího tlaku do místa nižšího tlaku. Pro měření rychlosti proudění se využívají zařízení, která se nazývají anemometry. Existuje mnoho druhů anemometrů, které fungují na různých fyzikálních principech.

Mechanický anemometr

Jde o jednu z nejstarších metod pro měření rychlosti větru. V současnosti se na trhu vyskytují miskové a vrtulové anemometry. Miskový anemometr disponuje 3 - 4 miskami, které jsou upevněny na hřídeli. Vítr působící na misky roztáčí hřídel a rychlost otáčení hřídele sleduje

snímač. Díky jeho nízké ceně a relativně vysoké přesnosti jde o nejběžnější typ anemometru. Tento anemometr ale nedokáže měřit proudění větru a při měření mohou vzniknout nepřesnosti kvůli třecímu odporu roztáčené hřídele (důvod proč nelze měřit malé rychlosti větru) a setrvačnosti rotujících misek.

U lopatkových anemometrů je působení větru vystavena vrtule s různým počtem listů. Vrtule převádí sílu větru na hřídel, kterou pohání. Pohyb hřídele je opět snímán a výstupem jsou hodnoty rychlosti větru.

Oba typy mechanických anemometrů mohou být navíc vybaveny směrovým kormidlem, které navíc dokáže zaznamenávat směr působení větru. Nevýhodou kormidla je časová prodleva, po kterou se kormidlo natáčí do směru větru. Při rychlých změnách ve směru působení větru může docházet k chybám měření. Obecně se měří směr, ze kterého vítr vane.

Ultrazvukový anemometr

Způsob měření je založen na ultrazvukových vlnách v prostoru, na které působí vítr a mění jejich trajektorii. Ultrazvukové anemometry nemají na rozdíl od mechanických žádné pohyblivé části a jsou většinou menších rozměrů.

Rezonanční anemometry vytváří pomocí ultrazvukových měničů pole stojatých vln v oblasti, kterou prochází vítr. Působením větru vzniká posun stojatých vln, který je snímán a podle jeho velikosti lze stanovit rychlost a směr větru. Přesnost tohoto typu anemometru záleží na kvalitě samotného produktu. Obecně jsou však méně přesné, ale díky konstrukci mají vyšší odolnost, delší životnost a nevyžadují údržbu.

Jiným typem ultrazvukových anemometrů je měření rychlosti šíření ultrazvukových vln mezi piezoelektrickými měniči. Působení větru způsobuje změnu trajektorie vln a dobu jejich letu. Výhody a nevýhody tyto anemometry sdílí s rezonančními. Občas se vlivem konstrukce vytváří v okolí anemometru turbulence a aerodynamické jevy, které mohou ovlivňovat měření. Jejich vliv závisí na rychlosti proudění větru.

Ultrazvukových anemometrů je celá řada a liší se měřící metodou, která je volena s ohledem na předpokládanou aplikaci.

Metody měření ultrazvukového anemometru:

- Měření doby letu vlny
- Metoda opakovací frekvence (elektroakustická smyčka)
- Měření fázového posunu mezi frekvencemi
- Měření fázového posunu mezi měniči

Tepelný anemometr

Tepelné anemometry (Termoanemometry) pracují s elektricky vyhřívaným čidlem (sondou), které je ochlazováno prouděním tekutiny. Rychlost proudění větru je stanovena na účinnosti odběru tepla z vyhřívané sondy. Tepelné anemometry mohou mít sondu vyhřívanou na konstantní teplotu, která je udržována, nebo sondu s konstantně udržovaným proudem, nebo se může jednat o termoanemometr se žhavenými dráty.

Anemometry využité pro měření

Pro měření je použit Ethernetový miskový anemometr TX20ETH od firmy Papouch s.r.o. sídlící v Praze. Jedná se o anemometr vrtulkového typu se třemi listy a snímačem, který

dokáže měřit směr i rychlost větru. S počítačem nebo počítačovou sítí komunikuje přes ethernetové rozhraní. Snímací senzor je s elektronikou propojen telefonním kabelem s koncovkou RJ 11. Elektronika se připojuje do počítače přes nekřížený ethernetový kabel s koncovkou RJ 45. Údaje lze následně zpracovávat strojově i lidsky. Aktuální naměřená rychlost a směr větru je zobrazena v interním webovém rozhraní. Zařízení disponuje schopností zasílat upozornění prostřednictvím e-mailu při překročení nastavených mezí.

Obrázek 22: Elektronika a senzor ethernetového anemometru TX20ETH [26]

Anemometr měří rychlost větru až do 50 m/s (180 km/h) a přesností 0,1 m/s. Směr větru měří v 16 polohách v rozsahu 360°. Použitý snímač je mechanický. Připojení k síti je realizováno zmíněným ethernetovým kabelem a data jsou přenášena přes standardní protokol TCP/IP 10/100 Mb. Komunikace může také probíhat pomocí XML, HTTP GET, SNMP, MODBUS, ASCII, Spinel a e-mailem. Konfigurace přístroje se provádí přes webové rozhraní. Zásuvkový adaptér zajišťuje napájení 7 - 30 V. Elektronická část zařízení je umístěna v kovové krabici z eloxovaného hliníku. Mechanický senzor snímání rychlosti a směru větru je vyroben z plastu.

Tento typ anemometru se hojně využívá v meteorologii. Je vhodný především pro dlouhodobá měření a stanovování povětrnostních podmínek v průběhu ročního období či celého roku.

Umístění snímače anemometru a pozice větrné turbíny JPT-100 je k dispozici v obrázkové příloze.

Anemometr s žárovou sondou

Jako alternativní zařízení pro měření rychlosti větru byl využit anemometr na odlišném fyzikálním principu. Metoda měření je založena na vyhřívaném senzoru, který je ochlazován

proudící tekutinou. Podmínkou pro správnost měření je, že teplota žhavené sondy musí být vyšší než teplota prostředí, ve kterém měření probíhá. Senzor je žhaven na 100 - 300 °C.

Rychlost ochlazování sondy závisí na materiálových vlastnostech sondy a fyzikálních vlastnostech měřeného média (teplota, tlak, tepelná vodivost, rychlost proudění, viskozita…).

Mezi výhody této metody patří:

- Vysoká citlivost a přesnost
- Malé rozměry sondy
- Široký rozsah měření
- Schopnost měřit více veličin (teplota, tlak, koncentrace plynů)
- Vysoká frekvence
- Poměrně nízká cena

Nevýhody žárové sondy:

- Citlivost na nečistoty
- Sonda je křehká
- Nelze měřit směr proudění
- Nutnost kalibrace při změně parametrů prostředí

Metoda je vhodná pro přesné bodové měření rychlostí proudění tekutin, především při nižších rychlostech. Lze ji také použít v oblastech turbulencí, v mezních vrstvách a při kombinovaných měřeních.

Vztah mezi rychlostí proudění média a výstupním napětím z anemometru udává ochlazovací zákon. Tepelná rovnováha žárové sondy:

$$d\dot{Q}_e = d\dot{Q}_f + d\dot{Q}_c + d\dot{Q}_r + d\dot{Q}_s \tag{4.1}$$

$d\dot{Q}_e$ – množství tepla generované elektrickým proudem
$d\dot{Q}_f$ – teplo odvedené nuceným ochlazováním
$d\dot{Q}_c$ – teplo odvedené vedením
$d\dot{Q}_r$ – teplo odvedené sáláním
$d\dot{Q}_s$ – naakumulované teplo

Žárová sonda byla připojena k analyzační jednotce TESTO 350 M/XL na které docházelo k převodu naměřených veličin a následné uložení do datového souboru.

Analyzační jednotka TESTO 350 M/XL

Zařízení Testo 350 M/XL je měřící systém, který se skládá z měřící jednotky, dokovací stanice a připojené sondy. Podle připojené sondy lze pomocí měřící jednotky sledovat na displeji až 6 veličin v reálném čase. Zaznamenaná data lze ihned vytisknout na integrované tiskárně. Měřící jednotka disponuje vnitřní pamětí a umožňuje zaznamenat i měření o velikosti několik tisíc hodnot. Měření lze časově naplánovat, čímž lze zaznamenávat parametry prostředí i bez přítomnosti obsluhy. Při zadání parametrů prostředí dokáže jednotka vypočítat i dodatečné parametry sledované tekutiny. Přiložený software umožňuje data uložená v měřící jednotce pohodlně přenést do PC ve formátu .xml a .pdf. Nejvyšší četnost měření je 1 měření/1 sec. To představuje 10 krát vyšší rozlišovací schopnost než už předchozího ethernetového anemometru TX20ETH. Tento anemometr lze úspěšně využívat

pro krátkodobá měření a v prostředí, kde se podmínky rychle mění. Jeho nevýhodou může být konstrukce, která není určena pro venkovní použití a není odolná vůči dešti a působení venkovních vlivů.

Analyzační box dokáže měřit všechny důležité parametry, jako koncentrace O_2, CO, CO_2, NO_x, SO_2… Záleží pouze na příslušenství a použité sondě. Většinu těchto systémových komponent lze vzájemně kombinovat. Veškerá naměřená data mohou být zobrazena na kontrolní jednotce. Případně mohou být všechny měřené kanály zobrazeny online na PC. Tento způsob poskytuje možnost ukládání měření do archívů s různou délkou měření a kombinací odlišných měřících kanálů. Podle připojeného příslušenství je možné získávat každou vteřinu informace z více než 50 různých kanálů. Každý kanál měří s přesností na 4 platné číslice a lze jej pojmenovat.

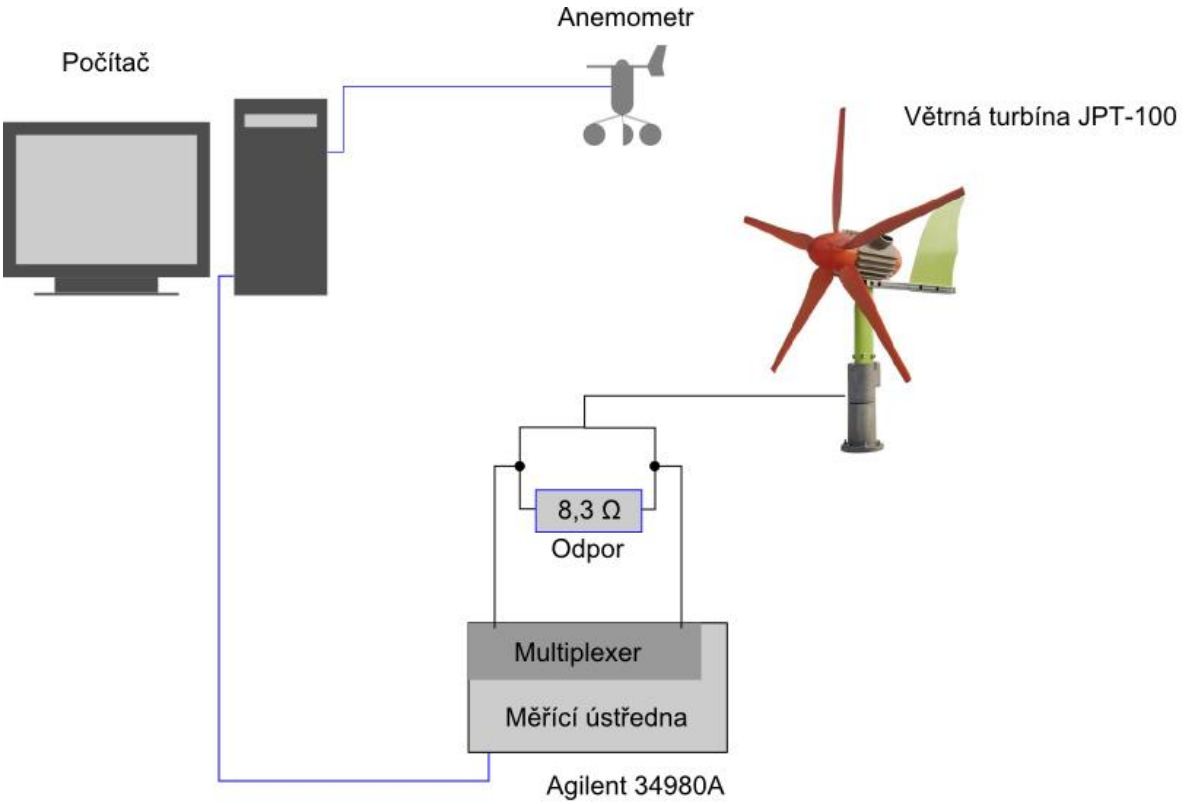
Propojení s PC je možné realizovat pomocí softwarového rozhraní TESTO, PCMCIA plug-in karty a RS - 232 konektoru s COM portem připojeným do PC.

Každá z naměřených hodnot je převedena z výstupního proudového výstupu 4 - 20 mA.

Obrázek 23: Kontrolní jednotka analyzačního přístroje TESTO 350 M/XL [36]

5 ZAPOJENÍ MĚŘÍCÍHO STANOVIŠTĚ

Měřící stanoviště bylo vytvořeno s ohledem na potřeby měření. Z větrné turbíny jsou vyvedeny dva vodiče (kladný a záporný pól), které jsou zapojeny do odporu o známé rezistenci (8,3 Ω). Odpor je umístěn v měřící laboratoři, takže na něj nepůsobí teplotní změny okolí a předpokládáme u něj nulovou změnu parametrů. K odporu je paralelně připojena přes svorkovnici měřící ústředna Agilent 34980A. Měřící ústředna zpracovává vstupní hodnoty a převádí je na digitální signál. Digitální signál je veden (GPIB - USB) do počítače.



Obrázek 24: Schéma zapojení měřícího stanoviště

Data z anemometru TX20ETH jsou zpracována elektronickou jednotkou TX20ETH dodávanou spolu s anemometrem. Součástí této jednotky je webserver, který dokáže zapisovat data do HTML a XML souboru. XML soubor je umístěn na webserveru. Pro čtení tohoto souboru je vytvořen čtecí skript v jazyce php, který z XML souboru opakovaně čte směr větru a rychlost větru a údaje zapisuje do souboru na disku počítače. Ze souboru čte program HP VEE, který data zpracovává a zobrazuje ve vytvořeném uživatelském rozhraní.

Měřící ústředna Agilent 34980A komunikuje s počítačem přes rozhraní GPIB - USB. IO knihovny slouží ke zprostředkování komunikace mezi počítačem, měřící ústřednou a daty z anemometru TX20ETH. Výsledné hodnoty z anemometru a větrné turbíny jsou zde zpracovány a zobrazeny v uživatelském rozhraní.

Náhled uživatelského rozhraní pro zobrazení naměřených hodnot v programu HP VEE je umístěn v příloze.

Z naměřeného napětí na odporu a velikosti samotného odporu je pomocí Ohmova zákona vypočítán proud:

$$I = \frac{U}{R}\ ; [\Omega] \tag{5.1}$$

Výkon větrné turbíny je poté vypočítán upraveným Ohmovým zákonem:

$$P = U \cdot I\ ; [W] \tag{5.2}$$

Souhrnem všech dat z měření lze vypočítat teoretickou hodnotu vyrobené elektrické energie:

$$W = U \cdot I \cdot t = P \cdot t\ ; [J] = [W \cdot s] \tag{5.3}$$

V případě známého výkonu a vypočítaného výkonu ideální větrné turbíny se stanoví účinnost. Tento výpočet je popsán rovnicí (2.15).

Záznamy z měření na ethernetovém anemometru a větrné turbíně jsou exportována do tabulkového procesoru Excel. Data jsou řazena podle času měření s periodou 10 vteřin. Z dat naměřených anemometrem jsou vypočítány hodnoty teoretického výkonu větru a výkonu ideální větrné turbíny. Z dat měřící ústředny Agilent je v tabulce zobrazeno napětí a vypočítaný proud a aktuální výkon větrné turbíny. V posledním sloupci se nachází údaj o směru větru.

Data z alternativního přístroje TESTO 350 M/XL byla exportována do samostatného dokumentu programu Excel. Měření proběhlo dne 20. 4. 2015 v době 11:56:15 – 13:29:52. Perioda měření byla nastavena na nejnižší možnou hodnotu, tedy 1 vteřina. Žárová sonda nedisponuje směrovým kormidlem, proto zde není uveden směr působení větru. Oproti měření miskovým anemometrem je zde navíc parametr teplota a změna tlaku v měřený okamžik. Ze zaznamenaných údajů o rychlosti větru je v posledních dvou sloupcích vypočítán teoretický výkon větru a výkon ideální větrné turbíny.

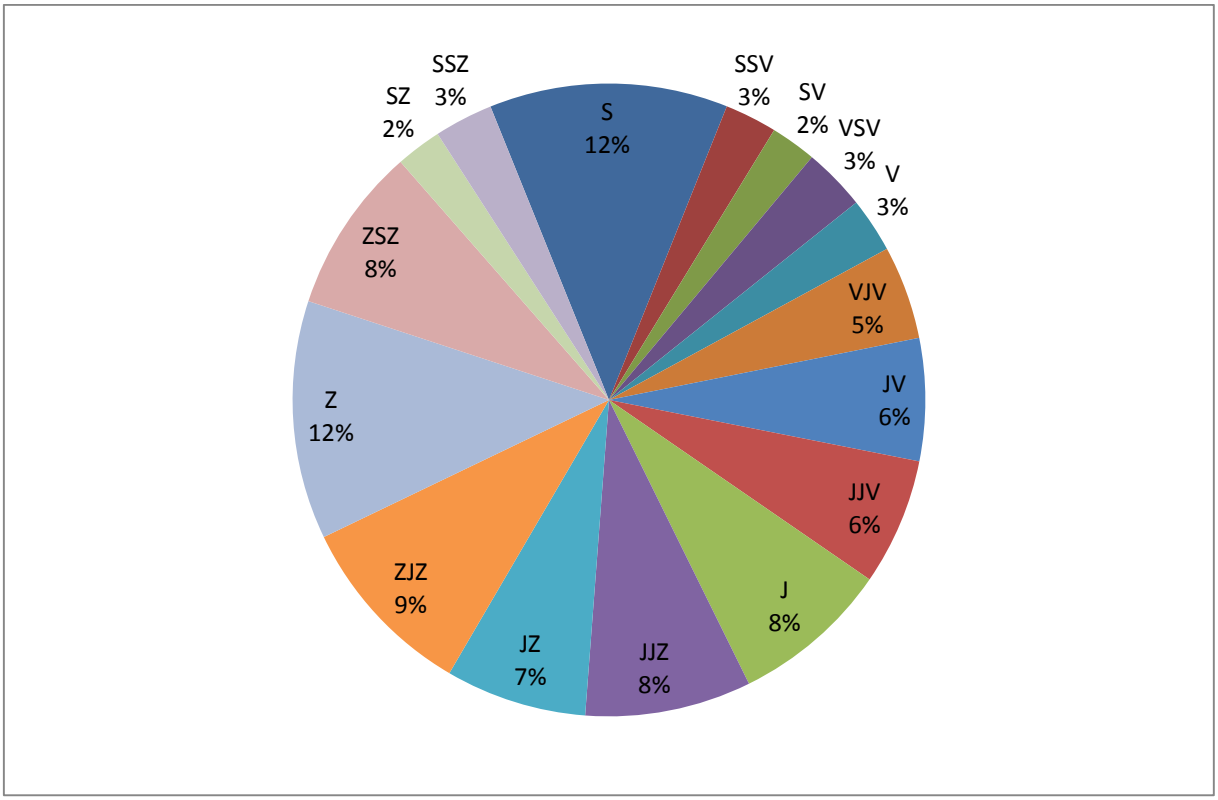
Pro porovnání anemometrických metod proběhlo současně měření i na miskovém anemometru TX20ETH. Před začátkem měření byla provedena synchronizace času všech měřících zařízení, aby bylo možné reálně porovnat vlastnosti měřících přístrojů a jejich vliv na výsledky měření. Žárový anemometr byl umístěn ve výšce větrné turbíny, přibližně 3 metry před hlavou rotoru. Místo bylo zvoleno s ohledem na minimalizaci změn proudění větru na turbínu. Dále bylo při instalaci zohledněno zastoupení působení směru větru z předchozích měření a dle meteorologické předpovědi pro měřící den.

Na ethernetovém miskovém anemometru TX20ETH proběhlo celkem 6 měření v období 5. 11. 2014 až 20. 4. 2015. Měření probíhala v době, kdy byla zaznamenána vyšší rychlost větru. Pomocí analyzačního přístroje TESTO 350 M/XL zapůjčeného z Ústavu techniky prostředí VUT FSI bylo provedeno jedno měření dne 20. 4. 2015. V tento den byla po dobu měření zaznamenána nejvyšší maximální i průměrná rychlost větru ze všech měřených dnů. Výsledky měření zobrazují sestrojené grafy a vybrané ukazatele.

6 NAMĚŘENÉ HODNOTY A GRAFY

Dne 5. 11. 2014 bylo spuštěno první měření v 7:40:48 a skončilo 6. 11. 2014 v 7:40:36. Tento den se vyznačoval proměnlivým směrem větru. Nejvyšší zaznamenaná rychlost větru byla 5. 11. v 9:20:11 a to 8 m/s. Průměrná rychlost větru však za celý den nepřesahovala 3 m/s, proto lze říci, že podmínky pro provoz a měření na větrné turbíně nebyly příliš vhodné. Na turbíně byl naměřen nejvyšší výkon 31,41 W. Vzhledem k podprůměrným větrným podmínkám, nepřesáhl průměrný výkon celého měření 0,1 W. To znamená, že většinu doby větrná turbína stála a elektřinu vyráběla pouze nárazově. Koeficient využití byl v tomto případě velmi nízký.

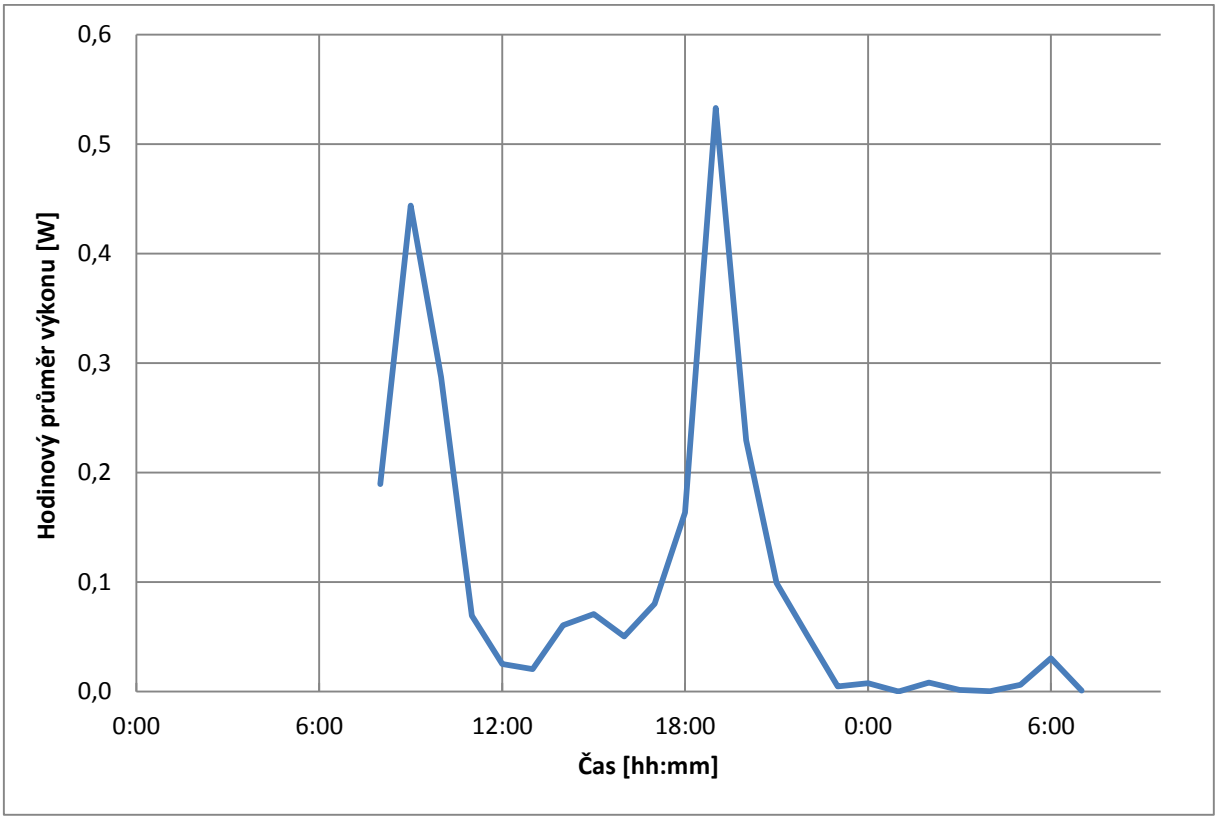
Na grafu je patrná proměnlivost směru větru, která znesnadňuje měření pomocí směrového kormidla na anemometru.



Obrázek 25: Koláčový graf rozložení směru větru pro měření z 5. 11. 2014

Maximální hodinové výkony turbíny byly naměřeny první den měření v období 9:00 - 10:00 a 19:00 – 20:00. V tomto období se výkon průměrně pohyboval kolem 0,5 W. Celé měření trvalo 86 388 vteřin (necelý den) a za tu dobu turbína vyrobila 2,42 Wh elektrické energie.

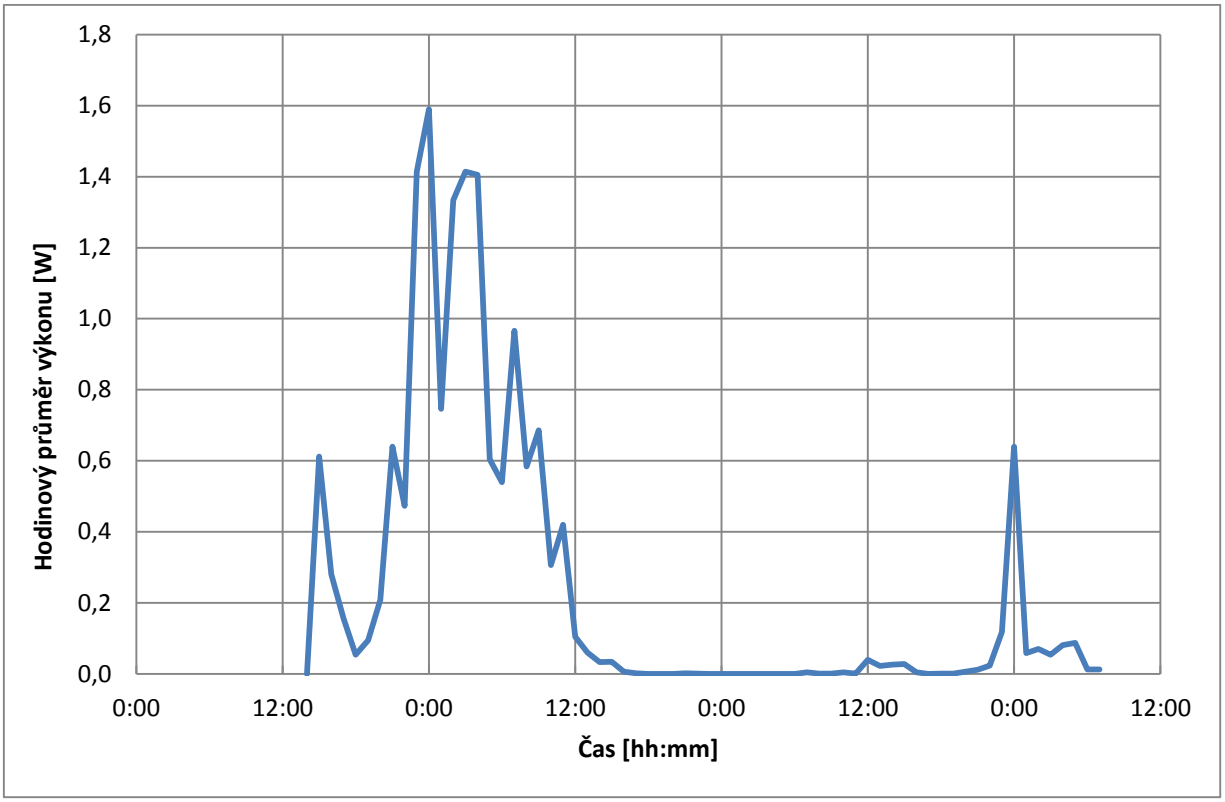
Ze záznamu anemometru je také patrné, že téměř 88 % celkové doby měření nepřesáhla rychlost větru 3 m/s, což je startovací rychlost větrné turbíny udávaná výrobcem. Pouze 1 % z celkové provozu měřícího zařízení přesáhla rychlost větru 5 m/s. Zmíněným údajům odpovídá i napětí zaznamenané měřící ústřednou a z něj vypočítaný výkon. Výkon 92 % z celkové doby měření nepřekročil hodnotu 0,1 W. Nižší hodnoty výkonu byly zanedbány s ohledem na měřící odchylku. Tento den a umístění větrné turbíny se pro výrobu elektrické energie jeví jako nevhodné. Naproti tomu došlo k ověření funkce všech komponent měřícího stanoviště, včetně programového vybavení.



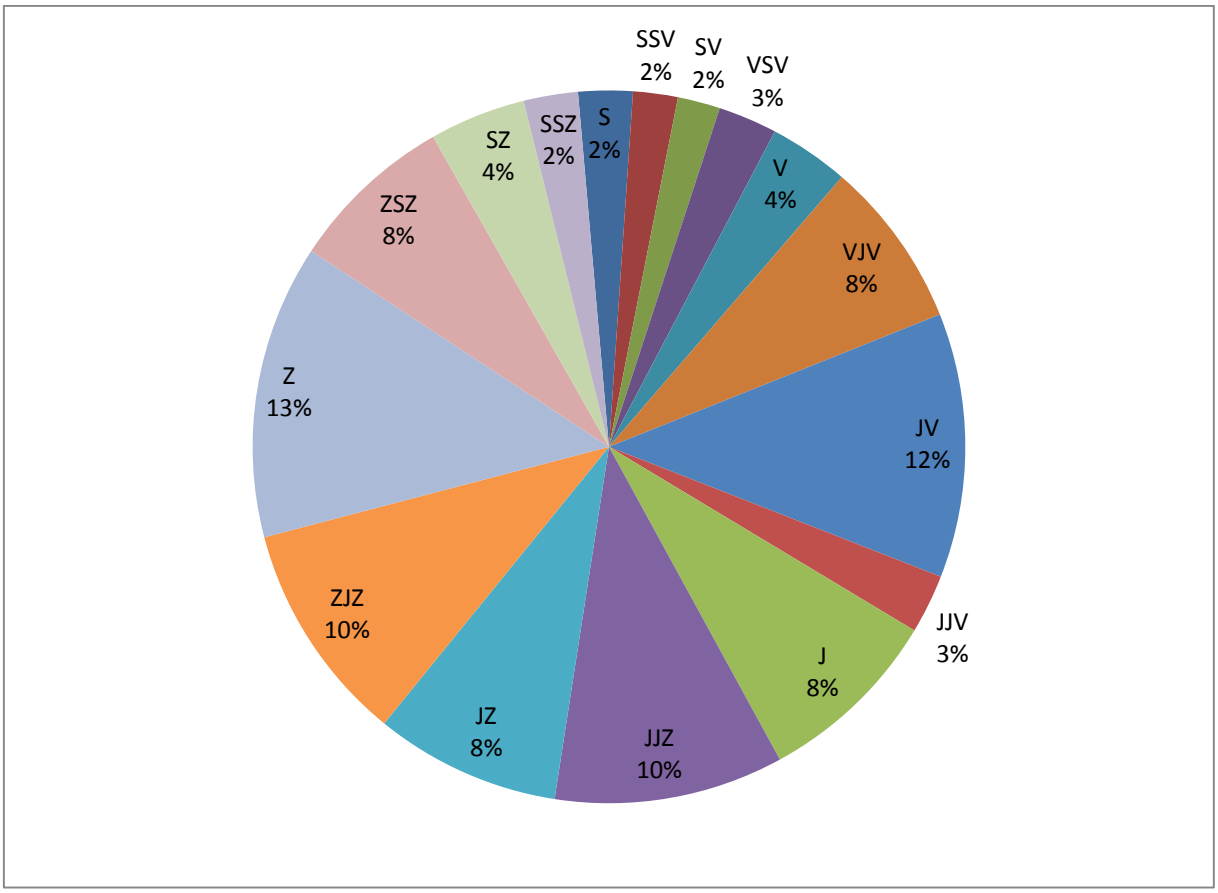
Obrázek 26: Graf rozložení výkonu na turbíně v průběhu měření od 5. 11. 2014

Další měření bylo provedeno v době 15. 11. 2014 od 12:06:21 do 18. 11. 2014, 08:03:54. Měření obsahovalo více než 46 000 záznamů. Rozdělení distribuce větru bylo opět velmi pestré. Tentokrát však tato pestrost byla způsobena délkou měření. Směr větru se měnil postupně. Rychlost větru však byla po dobu měření opět nízká (průměrně 1,7 m/s). Rychlost větru byla 85 % doby pod úrovní 3 m/s a více než 98 % doby pod 5 m/s. Nejvyšší rychlosti větru se vyskytly v noci z 15. na 16. listopadu. Šlo především o jižní a jihovýchodní vítr. Výkon produkovaný větrnou turbínou se pohyboval 89 % doby pod úrovní 0,1 W a dokonce 96 % času pod hranicí 1 W.

Na grafu je zobrazen výkonový nárůst první den měření v době od 19:00 do 03:00. Následující den od 12:00 foukal pouze slabý vítr a až na přelomu dne hodinový výkon turbíny překročil 0,5 W. Celé měření trvalo přesně 244 653 vteřin. Za tu dobu bylo vyrobeno 17,14 Wh energie.

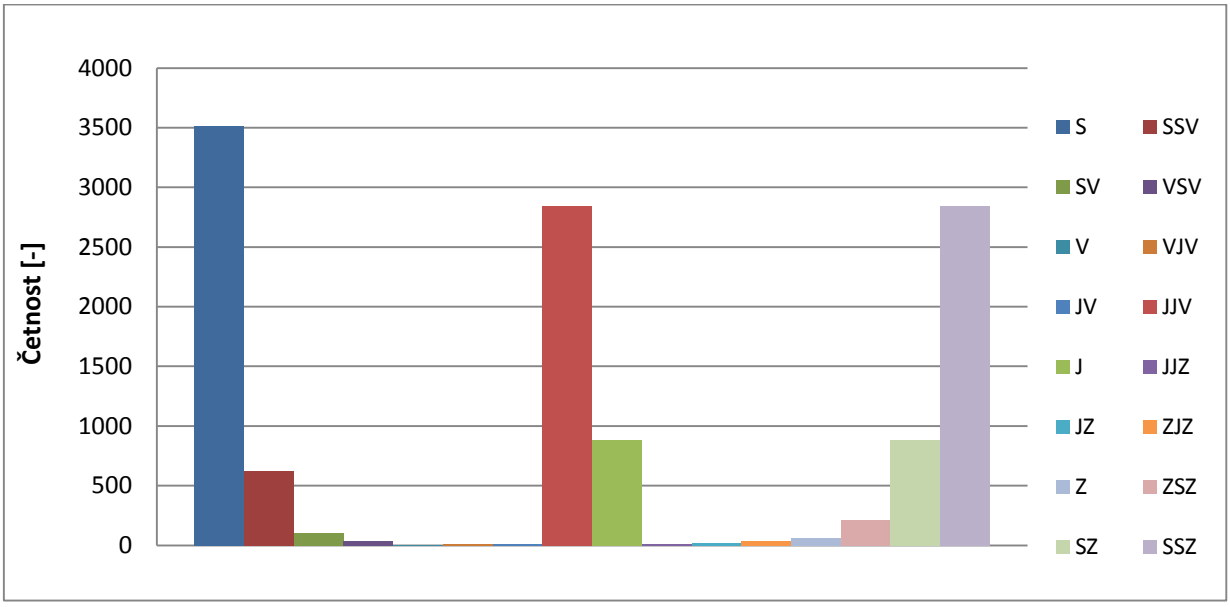


Obrázek 27: Graf rozložení výkonu na turbíně v průběhu měření od 15. 11. 2014

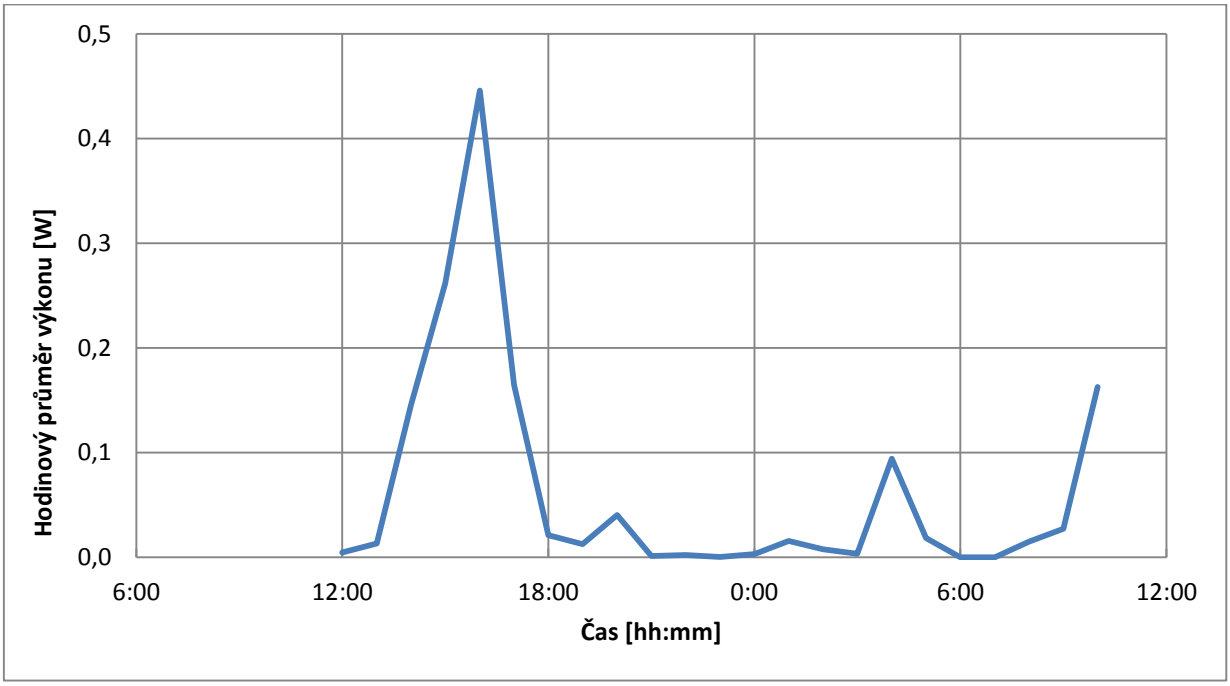


Obrázek 28: Koláčový graf rozložení směru větru pro měření z 15. 11. 2014

Měření č.3 bylo provedeno 25. 2. 2015 od 11:45:02 do 26. 2. 2015, 11:41:52. Toto měření se vyznačuje významnou převahou třech směrů působení větru. Vítr většinu času (76 %) vál ze severu, severoseverozápadu a jihojihovýchodu. Přes 71 % hodnot měření zaznamenala rychlost větru pod 3 m/s a 99 % záznamů uvádí rychlost větru pod 5 m/s. Maximální rychlost větru byla při tomto měření dokonce nejnižší a to pouze 6,7 m/s. I přesto že průměrná rychlost větru byla oproti předchozím měřením vyšší (2,35 m/s) byla hodnota maximálního výkonu turbíny zdaleka nejnižší (20,32 W). Zimní období je tedy možné hodnotit jako větrně nedostatečné pro efektivní provoz větrné turbíny umístěné na střeše budovy T10. V tomto měření turbína vyprodukovala 1,55 Wh elektřiny.

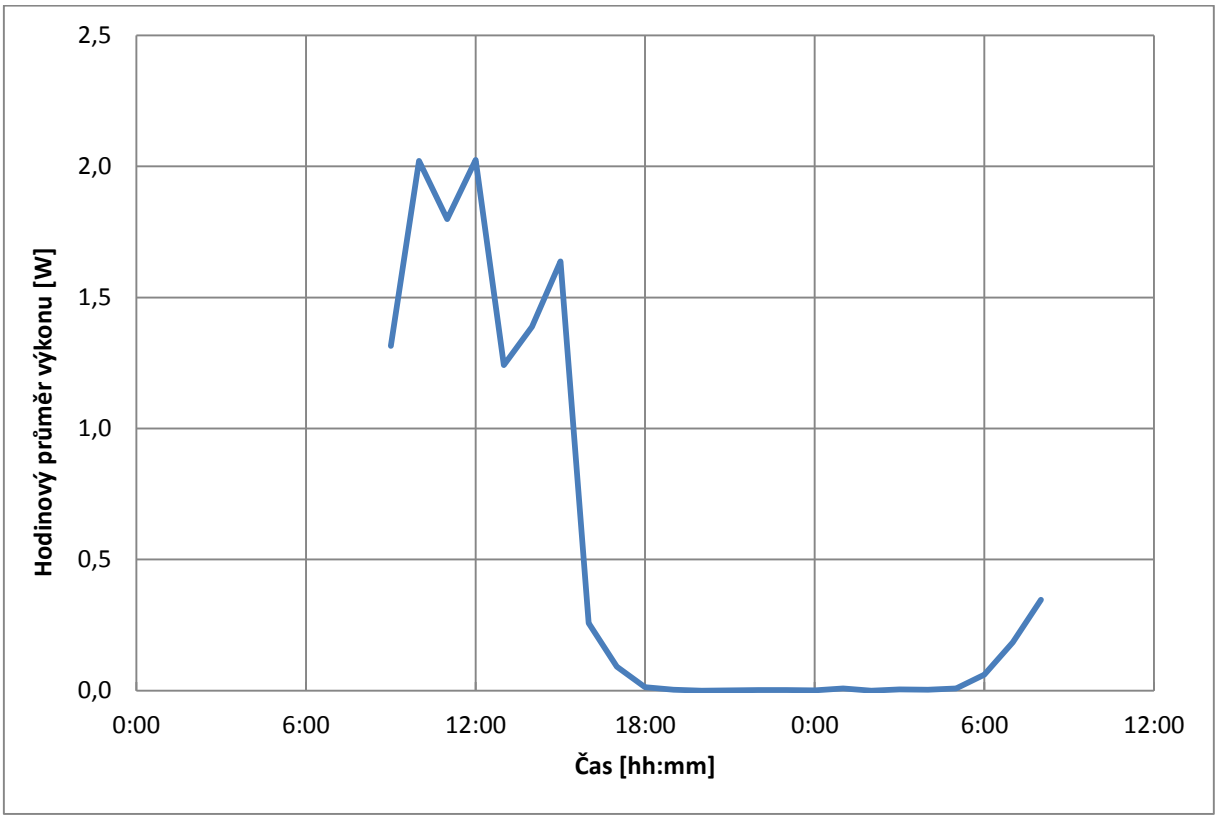


Obrázek 29: Graf četnosti rozložení směru větru od 25. 2. 2015



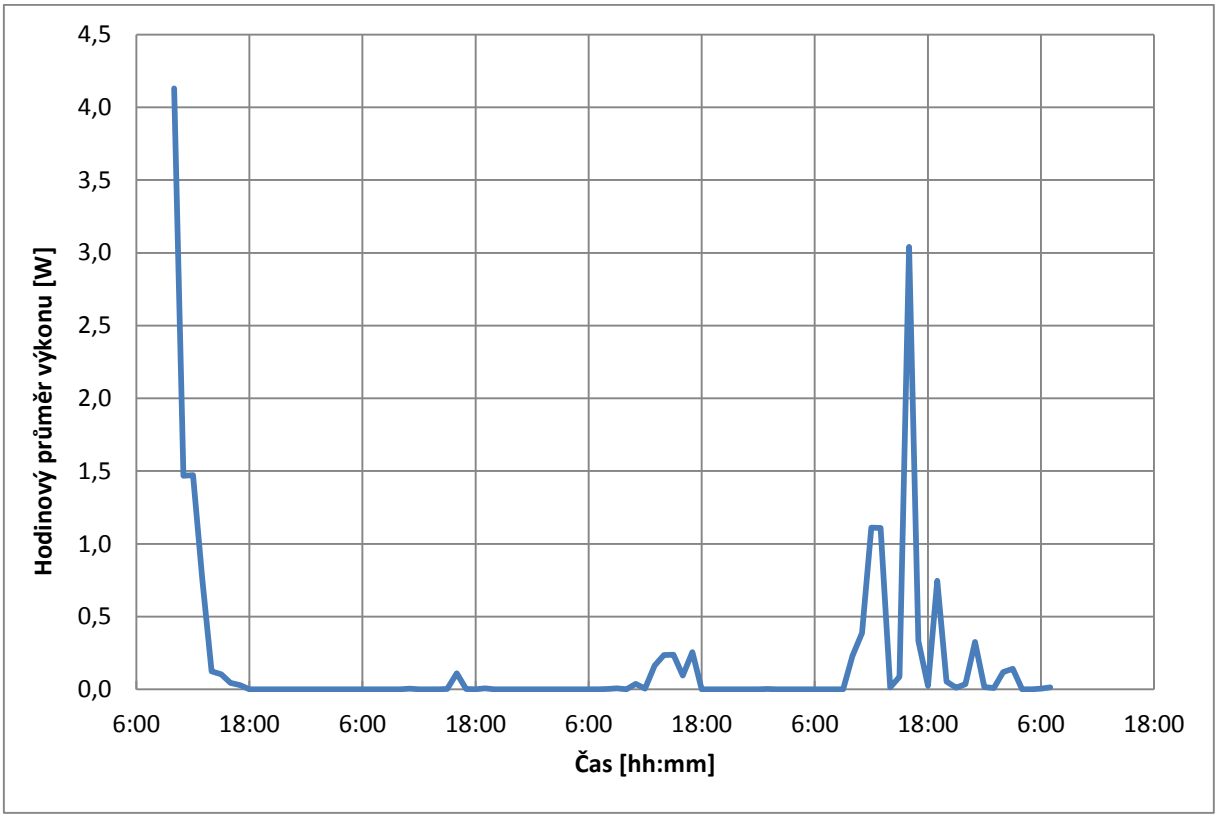
Obrázek 30: Graf rozložení výkonu na turbíně v průběhu měření z 25. 2. 2015

16. 3. 2015 proběhlo čtvrté měření v době od 8:34:00 do následujícího dne 9:30:53. Období do 16:00 bylo výkonově nadprůměrné a hodinový výkon dosahoval až 2 W. Zbytek dne se vyznačoval téměř nulovým hodinovým výkonem. Většina z 12,68 Wh tak byla vyrobena v době do 16:00. Průměrná rychlost větru celého měření nepřekonala 2 m/s. Dne 16. 3. 2015 byl zaznamenán nejvyšší produkovaný výkon o hodnotě 67,15 W. Rychlost se pohybovala na hranici 11 m/s. Směr větru byl smíšený. Převládal pouze západní vítr s podílem 16 %.



Obrázek 31: Graf rozložení výkonu na turbíně v průběhu měření od 16. 3. 2015

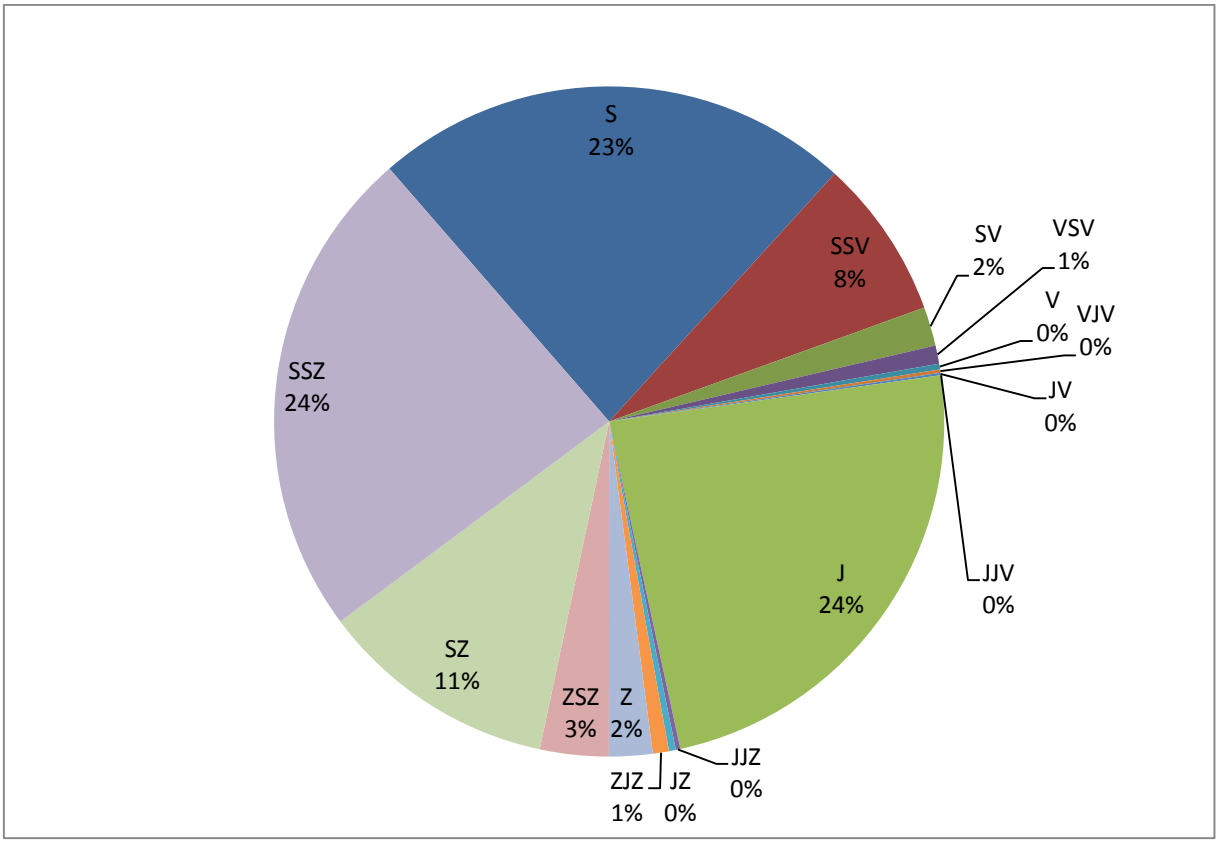
Páté měření začalo 3. 4. 2015 v 9:56:47 a skončilo 7. 4. 2015 v 13:34:18. Vítr foukal především severní a severozápadní (78 % doby). Nejvyšší průměrný i celkový výkon byl dosažen hned v počátku měření. Průměrný výkon v době 10:00 - 11:00 překročil 4 W. Následující dva dny byly výkonově nevýznamné. Až čtvrtý den měření byl větrný a výkon se vyšplhal průměrnou hodnotu 3 m/s v době od 16:00 do 17:00. Celkové měření trvalo 339 767 sekund a bylo tedy nejdelším měřením, které bylo provedeno. Za tuto dobu větrná turbína JPT-100 vyprodukovala 17,25 Wh energie.



Obrázek 32: Graf rozložení výkonu na turbíně v průběhu měření od 7. 4. 2015

Poslední měření bylo provedeno pomocí dvou anemometrů pro porovnání naměřených hodnot dne 20. 4. 2015. Měření se uskutečnilo v době od 11:56:15 do 13:29:52. V tento den panovaly velmi dobré větrné podmínky. Vítr foukal především ze severoseverozápadu, severu a jihu. Průměrná teplota v době měření byla 15,4 °C. Podle údajů ČHMÚ byla po dobu měření v oblasti Brno - Žabovřesky průměrná teplota 14,5 °C, rychlost větru 4,4 m/s v nárazech až 11,3 m/s, tlak vzduchu 1019,6 hPa a vlhkost 39,4 %.

Maximální naměřený výkon na větrné turbíně byl 59,74 W. Průměrná rychlost proudění větru byla miskovým anemometrem změřena 3,5 m/s. Podle Tabulky 7 by tak v době měření měl být průměrný výkon turbíny v rozmezí 1,42 – 3,37 W. Vypočítaný průměr změřeného výkonu je 2,44 W. Tabulkové hodnoty pro oblast malých rychlostí větru nemusí být naprosto přesné, protože v této oblasti se nezanedbatelně uplatňuje vliv mechanických ztrát turbíny.

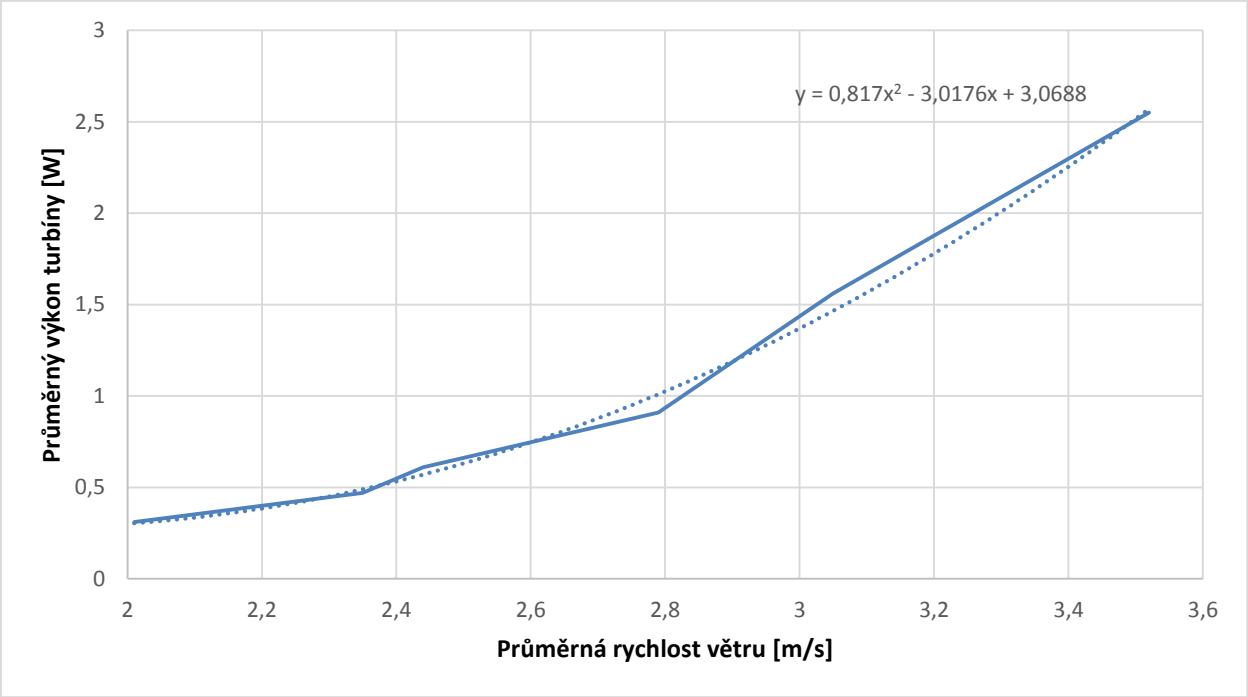


Obrázek 33: Graf rozložení směru větru od 20. 4. 2015

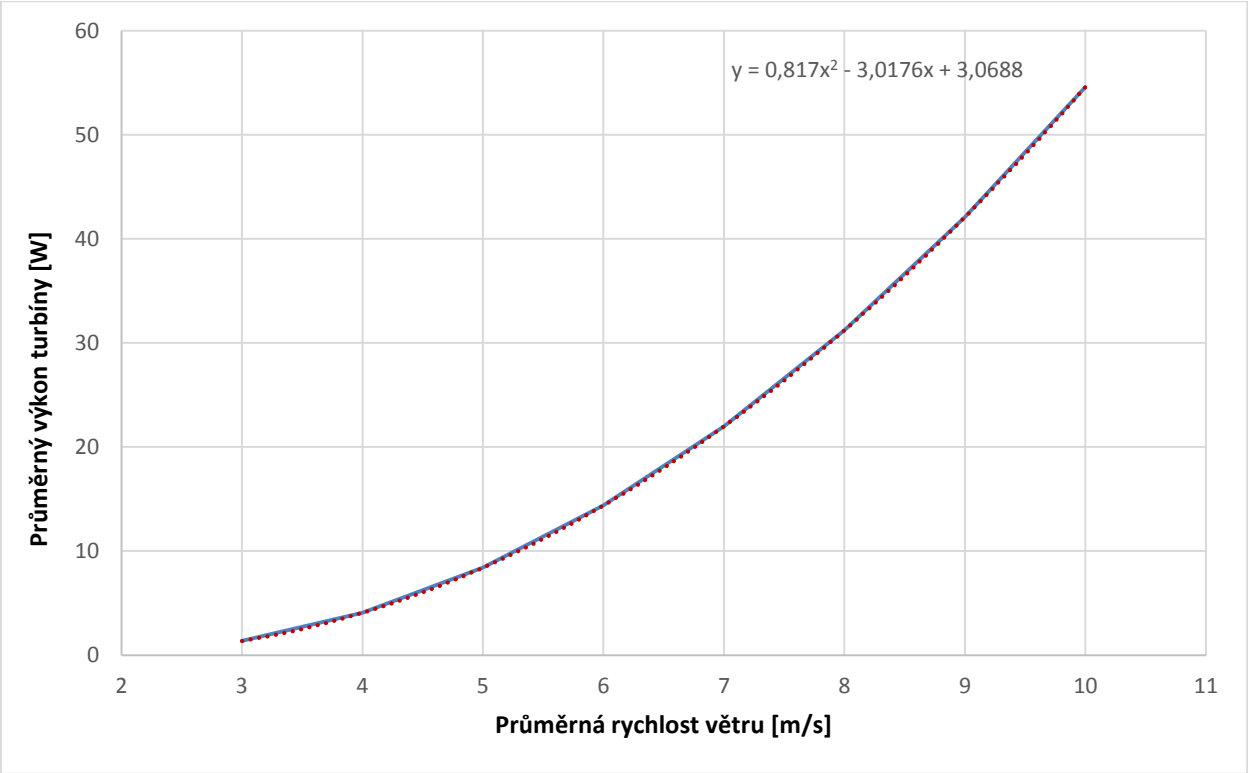
Následující graf zobrazuje závislost výkonu větrné turbíny na průměrné rychlosti větru ve všech měřených období. Před konstrukcí byly záznamy s velmi nízkými rychlostmi větru vyřazeny, pro minimalizaci chyby měření. I přesto není graf stejný jako na obrázku 23. Takového výsledku by bylo možné dosáhnout v případě laboratorních podmínek, nebo stabilních povětrnostních podmínek spolu s minimální změnou směru větru v průběhu měření. Vypočítané hodnoty však zásadně nevybočují z předpokladů. Vyšší přesnost by byla jednoznačně dosažena větším zastoupením rychlostí větru nad 5 m/s v měření. Body grafu byly proloženy polynomickou křivkou a zobrazena rovnice regrese. Tato rovnice je využita pro předpověď výkonu turbíny při vyšších rychlostech větru. Srovnání výkonu predikovaného na základě vytvořené rovnice regrese a výkonu uváděného výrobcem větrné turbíny zobrazuje následující tabulka.

Tabulka 8: Srovnaní predikovaného výkonu s výkonem uváděným výrobcem

Rychlost větru [m/s]	Výkon predikovaný [W]	Výkon uvedený výrobcem [W]
3	1,37	1,42
4	4,07	3,37
5	8,41	6,59
6	14,4	11,4
7	22,0	18,1
8	31,2	27,0
9	42,1	38,4
10	54,6	52,7

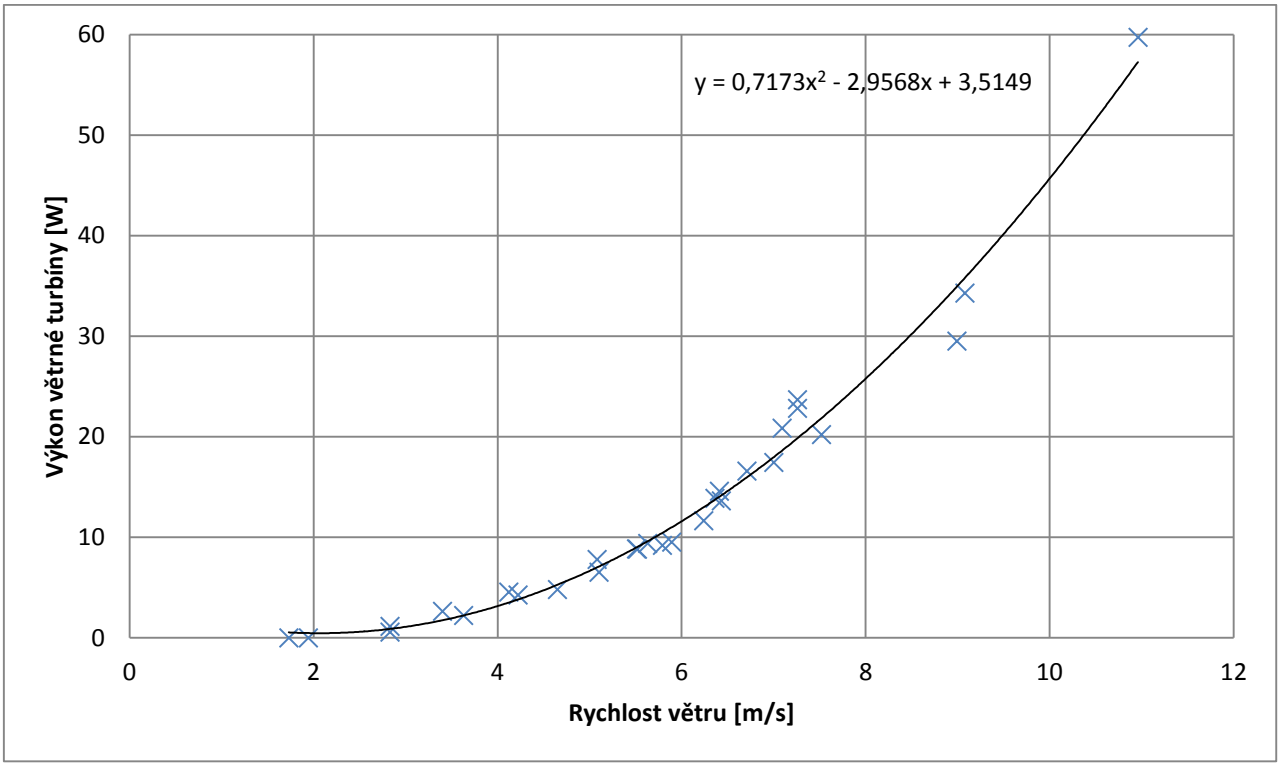


Obrázek 34: Graf závislosti průměrných naměřených hodnot výkonu větrné turbíny ve všech obdobích na rychlosti větru



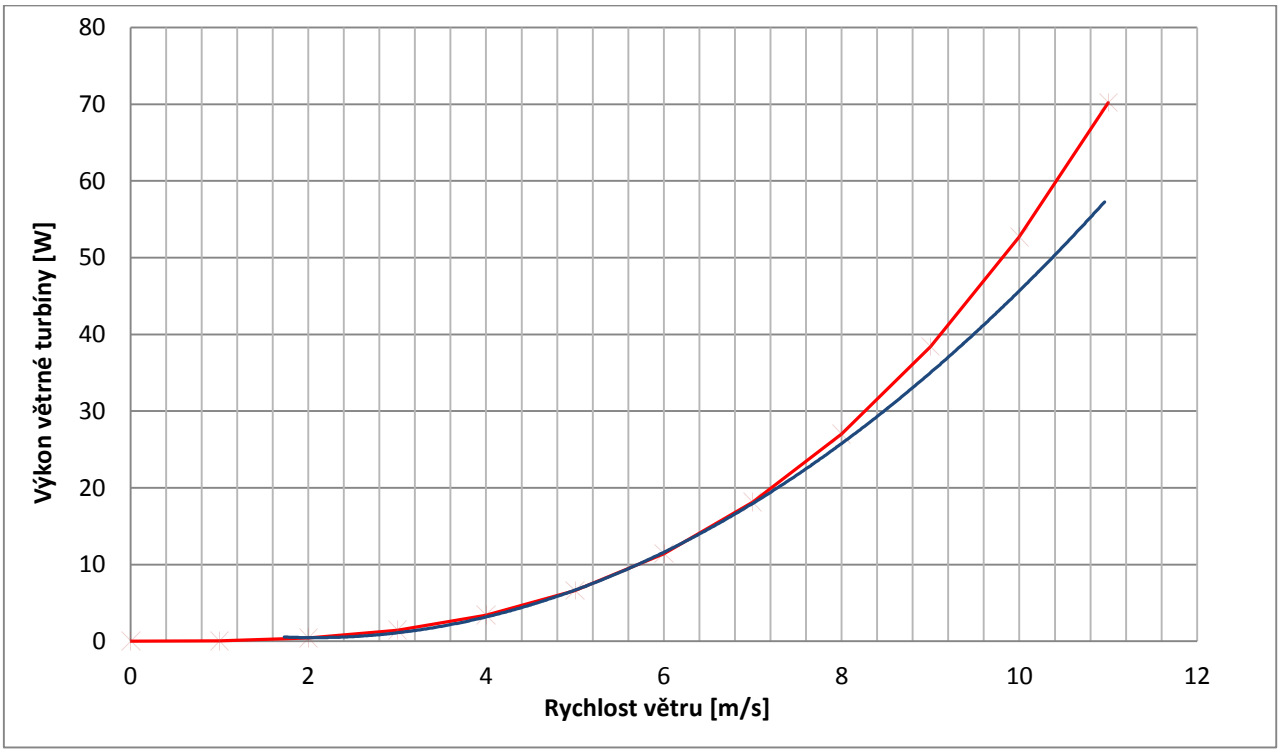
Obrázek 35: Graf predikce výkonu větrné turbíny s rostoucí rychlostí větru

V posledním měření bylo navíc díky využití druhého anemometru zaznamenávat rychlost větru v kratší periodě. Anemometr byl umístěn ve stejné výšce jako hlava rotoru větrné turbíny. Z tohoto měření byly zaznamenané údaje vyneseny do grafu a proloženy polynomickou křivkou o uvedené rovnici regrese.



Obrázek 36: Znázornění hodnot měření ze dne 20. 4. 2015 proložené polynomickou křivkou

Pro názornost je regresní křivka (modrá) vynesena do grafu spolu s křivkou závislosti výkonu turbíny na rychlosti větru podle výrobce (červená).



Obrázek 37: Porovnání křivky sestrojené proložením naměřených hodnot s údaji výrobce

7 ZÁVĚR A ZHODNOCENÍ

Diplomová práce je zaměřena na využití větrné energie pro výrobu energie elektrické. K experimentu byla použita větrná turbína JPT-100 od společnosti Jetpro Technology, Inc. První část definuje problematiku energetiky na území České republiky. Předkládá analýzu současného stavu a skladbu elektrárenství na území státu v době dosud nejvýznamnějšího přechodu od konvenční energetických zdrojů ke zdrojům alternativním. Poukazuje na některá úskalí energetiky související s tímto přechodem. Při tvorbě teoretické části se autor podrobně seznámil s nejčastěji využívanými energetickými zdroji, jejich principy a potenciálem na příští desetiletí. Vzhledem k tomu, že energetika je konzervativní obor, nedochází ke změnám v její koncepci a využití skokově. Jedná se spíše o plynulý proces, který je ale ovlivněn řadou technických a především netechnických faktorů. V současné době se mnoho států ubírá odlišnými směry zajištění energetických požadavků a mnoho rozvojových států teprve své základy energetiky rozvíjí. Je tedy velmi složité predikovat budoucí vývoj energetiky světa. Přesto se autor této práce snaží nastínit možný krátkodobý vývoj alespoň v měřítku našeho státu. Kapitola také obsahuje základní informace o elektrizační soustavě ČR, jejím fungováním, regulaci a uplatňovaných principech regulace energetických toků za účelem udržení stability sítě. V závěru kapitoly je popsán systém fungování trhu s emisními povolenkami, který má zásadní vliv na zavádění nízkoemisních zdrojů do energetického mixu.

Vlastnosti větrné energie, historie využívání síly větru a možnosti rozvoje větrných elektráren charakterizuje následující kapitola. Detailně jsou popsány druhy větrných motorů spolu s vysvětlením jejich principu fungování a zařazením dle oboru využití. Pro názornost je na vytvořeném obrázku popsáno schéma větrné elektrárny současného typu. Převod mechanické energie na elektrickou má na starosti mimo jiné elektrické zařízení elektrárny. V současné době jsou využívány asynchronní a synchronní generátory. Jejich využité se liší dle instalovaného výkonu a požadovaných vlastností. Asynchronní motory mohou být navíc řešeny s kotvou nakrátko či s kroužkovou kotvou. Oba způsoby se vyznačují jinými vlastnostmi a jinými průběhy napětí při připojení k síti. Jak je uvedeno v kapitole 2.6. Každá větrná elektrárna musí být schopna regulovat svůj výkon kvůli změnám povětrnostních podmínek za účelem maximálního výkonu či ochraně před poškozením, nebo z důvodu regulace frekvence a napětí v síti. Schémata regulace výkonu VTE podrobně popisuje kapitola 2.5.

Pro účely laboratorního i průmyslového měření větru je potřeba definovat jeho vlastnosti a možnosti. Vítr je v podstatě proudění tekutiny z oblasti vyššího tlaku do oblasti tlaku nižšího, čímž se vyrovnávají tlakové poměry na Zemi. Důležité měřící parametry při návrhu a konstrukci VTE je síla větru, dynamický tlak, tlak vzduchu, rychlost větru a další. Při analýze využití energetického potenciálu větru je důležité počítat s omezením maximálního teoretického větrného potenciálu, který stanovuje Betzův limit. Jeho zjednodušené odvození a aplikace pro sledovanou problematiku je uvedena v třetí kapitole této diplomové práce. Omezení využití větrného potenciálu jsou zobrazena v sestrojených grafech. Jak popisuje kapitola 3, není důležitá pouze rychlost větru v dané oblasti, symbolizovaná hodnotou průměrné rychlosti větru ve sledovaném období, ale také rozložení distribuce větru. Pro umístění VTE hraje také významnou roli charakter krajiny, který může v případě hrubého terénu výrazně snižovat dodávaný elektrický výkon. Tyto ukazatele energetického potenciálu větru v dané lokalitě popisují parametry drsnosti povrchu z_0, šířka mezní vrstvy d, Rayleighovy a Weibullovy distribuční funkce a další.

Použitá větrná turbína se podle údajů výrobce typově řadí mezi turbíny s nižší účinnosti (0,38). Její využití je určeno spíše pro experimentální, nebo domácí použití a pro napájení zařízení ve špatně dostupných či neelektrifikovaných místech. Pro většinu měření byl použit ethernetový anemometr TX20ETH od firmy Papouch s.r.o. který je vhodný pro dlouhodobá měření větrných podmínek a signalizaci nadměrných rychlostí větru. Pro krátkodobá měření není příliš vhodný kvůli 10 sekundové prodlevě mezi měřeními. V dlouhodobých měřeních lze ocenit jeho konstrukci, kdy po dobu všech měření v zimním období byl schopen podávat výsledky. Zajímavostí je také, že při měření se 10 vteřinová perioda občas prodloužila na 11 vteřinovou. Tento jev se opakoval v pravidelných intervalech. S největší pravděpodobností nebyla doba mezi načtenými hodnotami přesně 10 vteřin, ale přibližně 10,15 vteřiny. Dalším zdrojem chyb se mohl stát časový nesoulad mezi komunikací zařízení s PC. Anemometr je k PC připojen přes ethernetový port, tedy síťové rozhraní. Měřící ústředna je naproti tomu k PC připojena přes GPIB - USB rozhraní, které má odlišná pravidla komunikace a jiné časy příjmu a odesílání dat. V tomto případě by bylo řešením využití zařízení se stejnými komunikačními porty a nastavením komunikačních pravidel pro obě zařízení. Při sestavení měřícího pracoviště je důležité na tento problém myslet ještě před investicí do měřícího vybavení. Do měření mohly být zaneseny chyby způsobené nerovnoměrným rozložením rychlosti a směru větru v prostoru. To platí jak v malém měřítku (cm^2 až m^2) tak i v měřítku globálním. V malém měřítku lze tento jev pozorovat na padajících vločkách, které padají k zemi z jiných směrů a pod jinými úhly. Globální jev je jasně patrný na druhém měření, kdy v grafu byly téměř rovnoměrně zastoupeny všechny sledované světové strany. Změna směru větru působí jak na kormidlo anemometru, které častou změnou směru snižuje svou informační hodnotu, tak především na listy větrné turbíny a misky anemometru. Může se proto stát že vítr působící na větrnou turbínu má jiné parametry než vítr působící na anemometr. V technické praxi se provádí dlouhodobá měření v místě zamýšlené VTE a především ve více výškových úrovních, aby směr a síla větru byla podrobně zmapována. Pro analýzu se navíc používají matematické distribuční funkce. V laboratorní praxi je možné vliv rozdílného působení větru eliminovat využitím větrného tunelu se statickým zdrojem větru, nastavitelnou rychlostí a izolací od okolního prostředí. V takovýchto podmínkách se stanovuje účinnost větrné turbíny. Vyšší přesnosti měření lze dosáhnout přesnějším popisem působícího větru. To znamená stanovit navíc jeho aktuální hustotu, která je závislá na vlhkosti, teplotě a tlaku. Pro tato měření je zapotřebí meteorologická stanice. Aby hustota větru vstupovala i do výpočtů účinnosti větrné turbíny, musí tato meteorologická stanice disponovat datovým výstupem (např. ethernetový port).

Výpočet účinnosti větrné turbíny JPT-100 v našich podmínkách byl spíše informativní, neboť nedisponujeme větrným tunelem. Hodnoty rychlosti větru a výkonu turbíny byly využity z posledního měření. Vlastnosti vzduchu (tlak 1020 hPa, teplota 15,4 °C, vlhkost 39,4 %) byly získány z analyzátoru spalin a informací z meteostanice Brno-Žabovřesky. Toto měření rychlosti větru probíhalo se zapůjčeným anemometrem TESTO s žárovou sondou. Díky tomu byly naměřeny hodnoty s periodou 1 s a tím i vhodnější pro výpočet účinnosti. Vypočítaná hustota vzduchu ρ byla 1,228 kg/m^3. Při těchto podmínkách vzrostla účinnost udávaná výrobcem na téměř 40 %. Vypočítaná účinnost dosáhla 43,24 %. Vyšší účinnost je způsobena nepřesnostmi měření při nízkých rychlostech větru. Setrvačnost větrné turbíny je vyšší než setrvačnost miskového anemometru i žárové sondy a proto při rychlém poklesu rychlosti větru je generátorem vytvářen vyšší výkon než, který by bylo možné naměřit při dlouhodobě snížené rychlosti větru.

Dlouhodobá měření rychlosti větru a výkonu turbíny přibližně odpovídala údajům výrobce. Při výpočtech tvořily hlavní zdroj chyb hodnoty naměřené při nízkých rychlostech větru, kdy se projevoval vliv mechanických ztrát a setrvačnosti hřídelí turbíny a anemometru. Pro

krátkodobá měření, například laboratorní úloha, je použitý ethernetový anemometr nevhodný. Při měření byla často pouze 10 - 20 % celé doby rychlost větru vyšší než udávaná startovací rychlost větrné turbíny 3 m/s a pouze několik jednotek procent vyšší než 5 m/s. Zvolené místo není pro větrnou turbínu ideální. Při provozu elektrárny v době nejvyšší průměrné rychlosti větru bylo vyrobeno pouze 13,7 kJ za 1,5 h. Průměrný zaznamenaný výkon větrné turbíny nepřekračoval 2,44 W. Vyššího výkonu by bylo možné dosáhnout umístěním turbíny do vyšší výšky nad městkou zástavbu, nebo do volného prostranství. V příloze je uvedena mapa se zaznamenanými směry nejčastějšího působení větru. Severní vítr, který byl při měření nejhojněji zastoupen, působil směrem od budov VUT FSI, které fungují jako větrolam a snižují energetický potenciál větru. I přes to měl severní vítr průměrně vyšší rychlost než vítr z ostatních směrů. V příloze H je tabulka záznamu z měření zařízením TESTO a ethernetovým anemometrem. Ve sloupcích je kromě času měření, uvedena změna tlaku prostředí (sloupec C), rychlost větru, teplota prostředí, vypočítaný výkon větru a výkon ideální větrné turbíny P_A. V druhé části záznamu lze nalézt naměřené napětí na odporu, vypočítaný výkon a směr větru. Příloha I obsahuje graf rychlosti větru (modře), zaznamenaný přístrojem TESTO po dobu celého měření a změnu tlaku (zeleně). Růžová křivka je v tomto měření nevýznamná. Graf je generován přístrojem automaticky a není možné zvolit jen některé hodnoty.

Podle tabulky klasifikace drsnosti povrchu spadá umístění větrné turbíny do třídy 8, s koeficientem drsnosti $z_0 = 2$ a posunutím od mezní vrstvy $d = 6\ m$. Průměrná rychlost větru ve výšce 10 m nad zemí je 2,44 m/s. Dosazením do Hellmanova vztahu byly vypočítány teoretické rychlosti větru v různých výškách nad povrchem. Výsledky výpočtů jsou zaznamenány v tabulce

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

Tištěné zdroje

[1] DRÁBOVÁ, D., PAČES, V. *Perspektivy české energetiky.* Vyd. 1. PRAHA: Novela bohemica, 2014, 348 s. ISBN 978-80-87683-26-2.

[2] DA ROSA, Aldo V., *Fundamentals of renewable energy processes*. Vyd. 2. CALIFORNIA: Academic press, 2009, 827 s. ISBN 978-0-12-374639-9

[3] ERÚ. *Národní zpráva Energetického regulačního úřadu o elektroenergetice a plynárenství v České republice za rok 2013.* Vyd. 1. PRAHA, červenec 2014, 40 s.

[4] MÁCA, J., ABRAHAM, P., BAČA, P. *Využití větrné elektrárny ve výuce*. Článek. BRNO: FEKT VUT, 2012, 7 stran.

[5] JETPRO TECHNOLOGY, INC., *JPT-100 Wind Turbine User Manual*, duben 2011, 35 s.

[6] QUASCHING, V., *Understanding Renewable Energy Systems*, Vyd. 1. LONDON: Earthscan, 2005, 272 s. ISBN 1-84407-128-6

[7] MASTNÝ, P., DRÁPELA, J., MIŠÁK, S., MACHÁČEK, J., PTÁČEK, M., RADIL, L., BARTOŠÍK, T., PAVELKA, T. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*, Vyd. 1. PRAHA: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 256 s. ISBN 978-80-01-04937-2

[8] ČEZ a.s., *Energy Outlook 2014*, listopad 2014, 50 s.

[9] HÚLKA, Jan. *Diplomová práce: Ultrazvukový anemometr,* BRNO: Vysoké učení technické v Brně, 2015, 93 s.

[10] MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU, *Aktualizace státní energetické koncepce České republiky*, PRAHA, prosinec 2014, 145 s.

[11] TESTO AG, *TESTO 350 M/XL Instruction manual*, 2003, 285 s.

Elektronické zdroje

[12] ČEPS a.s. *Data do kapsy 2013* [online]. 2014, 2 s. http://www.ceps.cz/CZE/Media/Ke-Stazeni/Documents/Data%20do%20kapsy%202013.pdf

[13] ČEPS, a.s., *Kodex přenosové soustavy - Část IV* [online]. revize 12, leden 2012. 15 stran. http://www.ceps.cz/CZE/Data/Legislativa/Kodex/Documents/2012/CastV_12_fin01.pdf

[14] ÚSTAV FYZIKY ATMOSFÉRY AV ČR [online]. 2009 [cit. 2014-12-12]. http://www.ufa.cas.cz/struktura-ustavu/oddeleni-meteorologie/projekty-egp/vetrna-energie/vetrna-mapa.html

[15] BOLDIŠ, Z. *Blackout je pouze otázkou času* [online]. 2009, poslední změna 7. 4. 2009 [cit. 2014-11-12]. http://www.euractiv.cz/energetika/clanek/zbynek-boldis-blackout-je-pouze-otazkou-casu-005844

[16] ADMIN. *Energetickou koncepci projedná vláda, Mládek ji podepsal* [online]. 2014, poslední změna 11. 12. 2014 [cit. 2014-12-12]. http://atominfo.cz/2014/12/energetickou-koncepci-projedna-vlada-mladek-ji-podepsal/

[17] CIESLAR, S. Ostrovní provoz - řešení budoucnosti. *All for power* [online]. duben 2012, [cit. 2012-11-12]. Strana 119-120. http://www.allforpower.cz/clanek/ostrovni-provoz-

reseni-budoucnosti/

[18] KOUBOVÁ, K. *Energetická koncepce počítá s dostavbou tří jaderných reaktorů. Kdo je zaplatí?* [online]. 2014, poslední změna 15. 12. 2014 [cit. 2014-12-16]. http://www.rozhlas.cz/radiozurnal/dvacetminut/_zprava/energeticka-koncepce-pocita-s-dostavbou-tri-jadernych-reaktoru-kdo-je-zaplati--1432677

[19] ACTUM. *Energetika a geografie ČR* [online]. 2014, [cit. 2014-12-16]. http://www.vodni-tepelne-elektrarny.cz/energetika-geografie-cr.htm

[20] ČEZ a.s., *Biomasa* [online]. 2014, [cit. 2014-12-16]. http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/biomasa.html

[21] MALIK, S. *Blackout for 19 states, more than 600 million Indians* [online]. 2012, [cit. 2014-12-16]. http://www.ndtv.com/article/india/blackout-for-19-states-more-than-600-million-indians-249537

[22] KRÁLOVÁ, Milena. *Emisní povolenky* [online]. 2010, poslední změna 09. 08. 2010 [cit. 2014-03-10]. http://wiki.rvp.cz/Knihovna/1.Pedagogicky_lexikon/U/Udržitelný_rozvoj/Emisní_povolenky

[23] SUTLOVIČOVÁ, Klára. *Co s krachujícím trhem s emisními povolenkami?* [online]. 2013, poslední změna 08. 07. 2013 [cit. 2014-03-10]. http://oze.tzb-info.cz/10117-co-s-krachujicim-trhem-s-emisnimi-povolenkami

[24] KNOPF, Brigitte., EDENHOFER, Ottmar. *Save the Emissions Trading Scheme: set a price band* [online]. 2014, poslední změna 21. 10. 2014 [cit. 2014-03-10]. http://www.energypost.eu/eu-emissions-trading-scheme-can-saved-price-band/

[25] URUBA, Václav. *ANEMOMETRIE - ŽHAVENÉ SENZORY* [online]. 2004, 53 s. http://www.it.cas.cz/~uruba/docs/HW/PA.pdf

Obrázky

[26] http://www.meteoshop.pl/produkt/miernik-predkosci-i-kierunku-wiatru-anemometr-do-podlaczenia-do-sieci-lan-tx20eth/396/

[27] http://www.wind-systems.eu/images/jpt100-vetrna-turbina.jpg

[28] https://icapcarbonaction.com/ets-map

[29] https://www.ceps.cz/_layouts/15/Ceps/_Pages/GraphZoom.aspx?from=12.%205.%202015%2017:00:00&to=13.%205.%202015%2016:59:59&hasinterval=True&sol=1&lang=CZE&agr=MI&fnc=AVG&ver=RT&mode=graf

[30] http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/VirtualAero/BottleRocket/airplane/Images/shaped.gif

[31] http://www.homepower.com/sites/default/files/styles/article_image_main/public/articles/images/HP163_pg24_ATE-3.jpg?itok=usvlqUv1

[32] http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kompas_ruzica_slovencina.svg

[33] http://maps.google.com

[34] http://www.qpro.cz/Vlastnosti-vlhkeho-vzduchu

[35] http://pocasi-decin.cz/beufortova_stupnice.php

[36] http://ipul.lv/main/?nav=Facilities

REJSTŘÍK ZKRATEK

ASEK – Aktualizovaná statní energetická koncepce

AZE – Alternativní zdroje energie

ČEPS a.s. – Česká přenosová soustava, akciová společnost

ČEZ a.s. – České energetické závody, akciová společnost

ČR – Česká republika

DS – Distribuční soustava

ES – Elektrizační soustava

ENTSO-E – Evropská síť provozovatelů elektroenergetických přenosových soustav (European Network of Transmission System Operators for Electricity)

EUR – Euro (měna)

E.ON - Energetická společnost

GWh – gigawatthodina (jednotka energie)

HP VEE (Agilent VEE) – software pro grafické vývojové prostředí od firmy HP/Agilent

HTML - HyperText Markup Language (značkovací jazyk pro hypertext používaný pro vytváření internetových stránek)

Kč – Koruna česká (měna)

KO – Komunální odpad

kV – kilovolt (jednotka napětí)

MW – megawatt (jednotka výkonu, také Joule/sec. tedy množství práce za sekundu)

OP – Ostrovní provoz

OZE – Obnovitelné zdroje energie

PHP - Hypertext Preprocessor (skriptovací dynamický jazyk)

PRE, a.s. – Pražská energetika, a.s.

PS – Přenosová soustava

SEK – Státní energetická koncepce

USD – Americký dolar

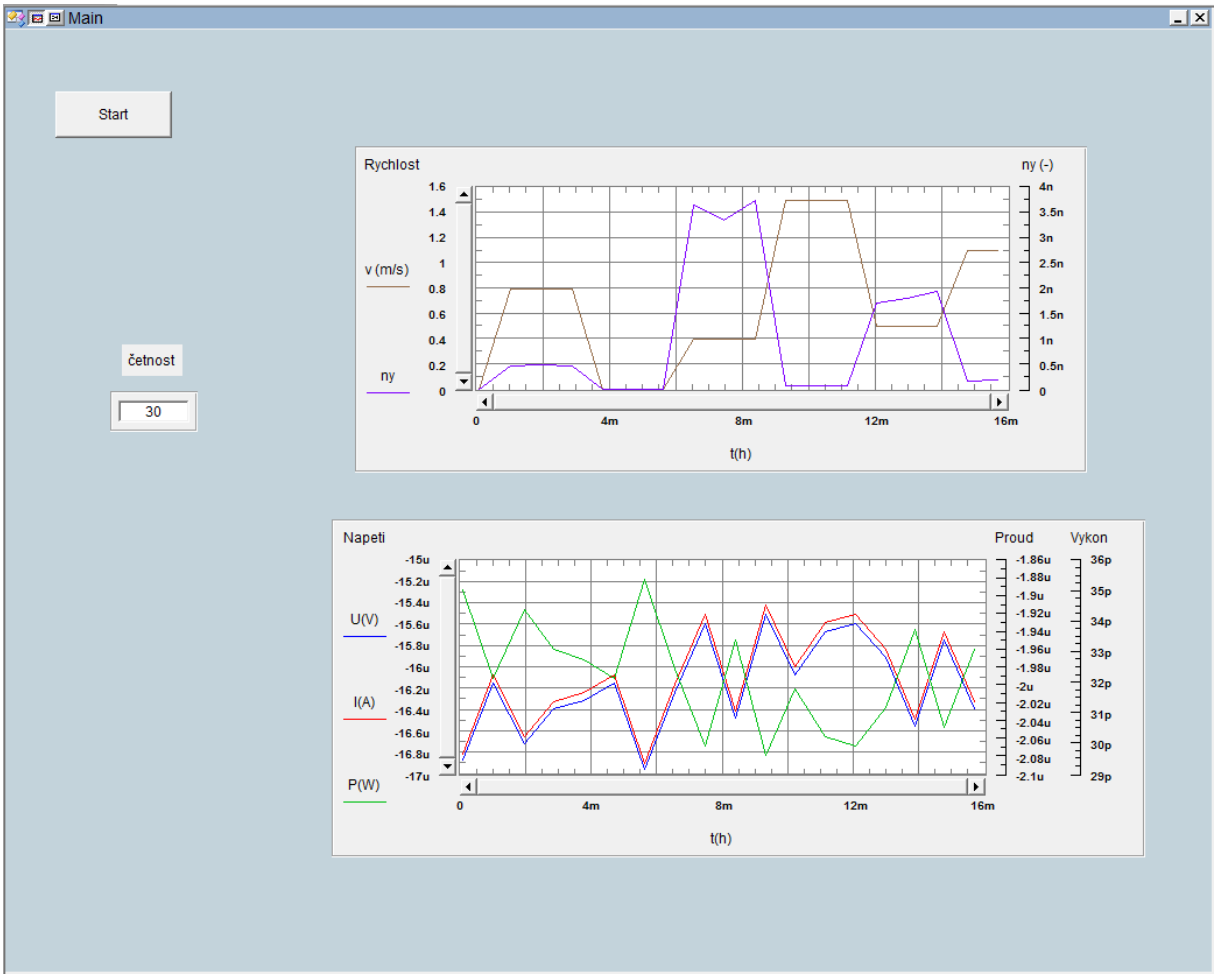
XML - Extensible Markup Language (obecný značkovací jazyk)

PŘÍLOHY

Příloha A

Obrázek 38: Pozice větrné turbíny JPT-100 a ethernetového anemometru TX20ETH

Příloha B



Obrázek 39: Uživatelské prostředí v programu HP VEE

Příloha C

Tabulka 9: Výpočet rychlosti větru podle Hellmanna

Třída povrchu	z_0	d [m]	v_1 [m/s]	h_1 [m]	h_2 [m]	z	a	$v_2(h_2)$ [m/s]
8	2	6	2,44	10	20	14,142	0,511	3,478
					25	15,811	0,484	3,801
					30	17,321	0,463	4,059
					35	18,708	0,447	4,273
					40	20,000	0,434	4,455
					45	21,213	0,423	4,613
					50	22,361	0,414	4,752

Příloha D

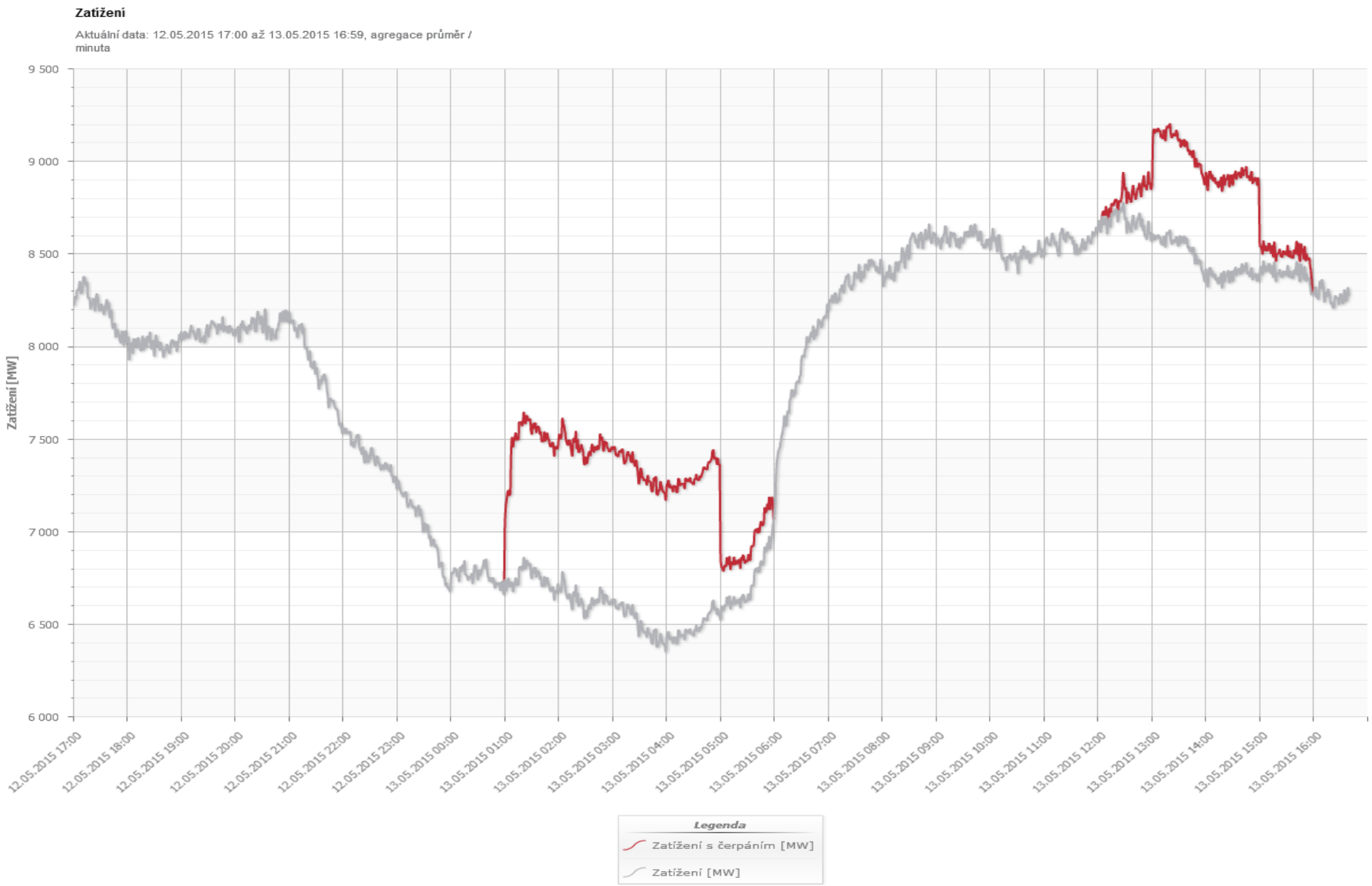
Tabulka 10: Porovnání předpokládaného výkonu s výkonem uvedeným výrobcem - příloha k Obrázku 29

Rychlost větru [m/s]	Výkon predikovaný [W]	Výkon uvedený výrobcem [W]
3	1,37	1,42
4	4,07	3,37
5	8,41	6,59
6	14,4	11,4
7	22,0	18,1
8	31,2	27,0
9	42,1	38,4
10	54,6	52,7

Příloha E

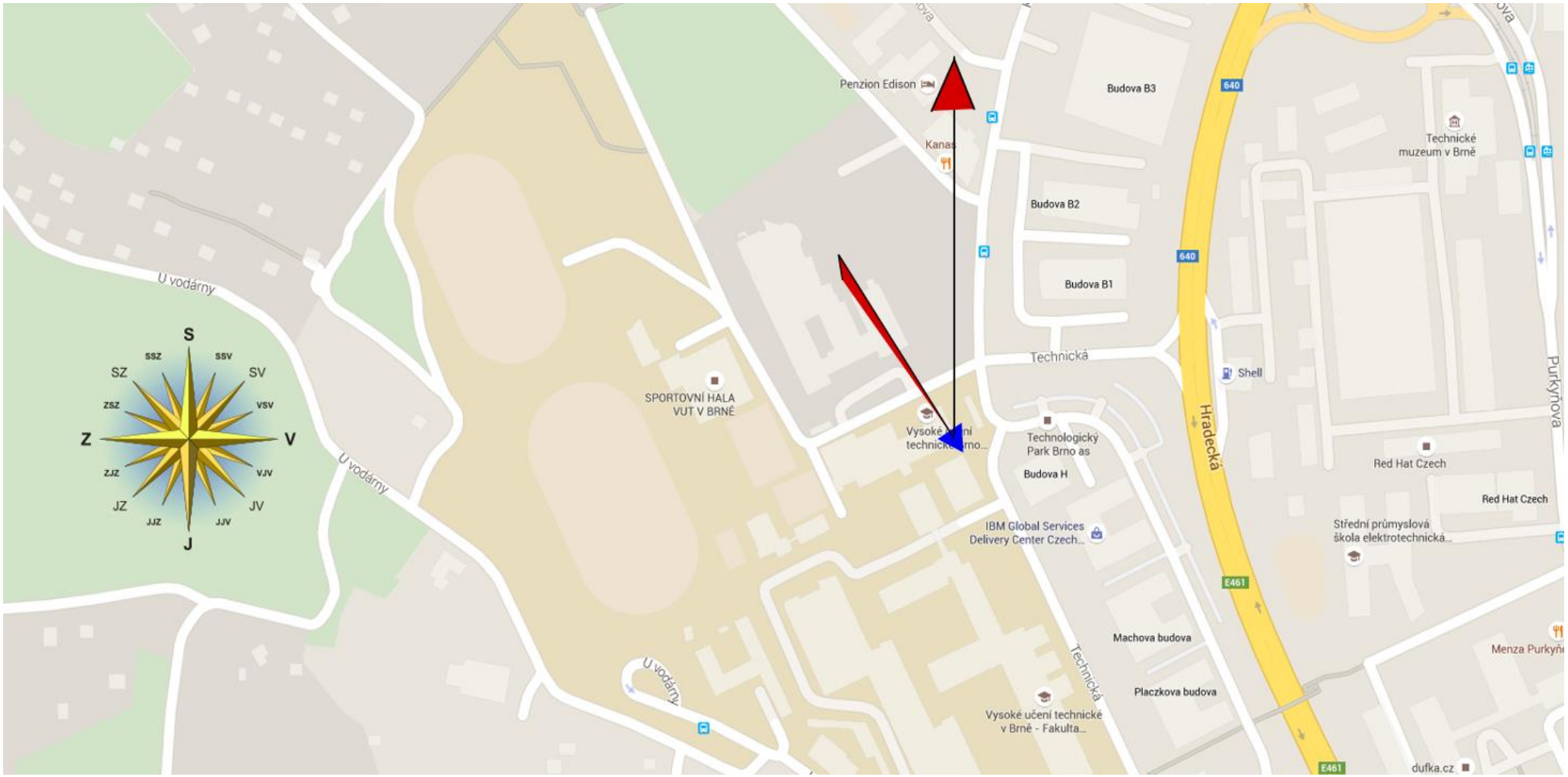
Obrázek 40: Vlastnosti vzduchu pro stanovení účinnosti větrné turbíny JPT-100 [34]

Příloha F



Obrázek 41: Diagram denního zatížení ES ČR [12]

Příloha G



Obrázek 42: Nejčastější směry působení větru [32][33]

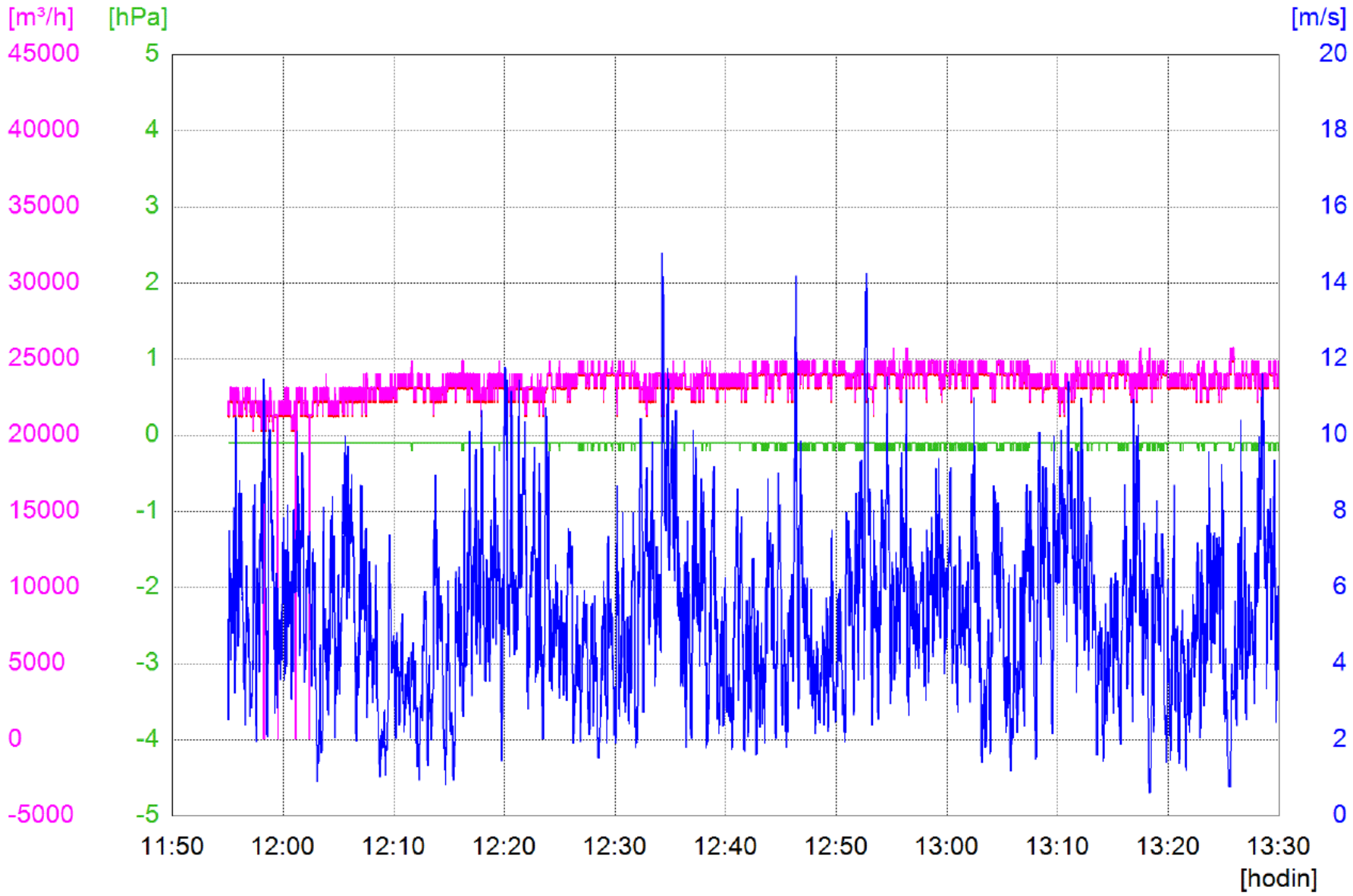
Příloha H

Tabulka 11: Záznam měření v programu Excel

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1	**Datum/čas**	**sec doba**	**hPa**	**m/s**	**°C**	Pmax (W)	Pa (W)		hodina	minuta	sekunda	čas (h)	U (V)	v (m/s)	I (A)	P (W)	Pmax (W)	Pa (W)	směr
2	20. 4. 2015 11:56:15	74	-0,1	6,90	14,0	211,888	45,580		11	56	15	2,29722	8,65472	6,7	1,06585	9,22464	194,443	41,7299	SSV
3	20. 4. 2015 11:56:25	84	-0,1	3,92	14,0	38,852	8,358		11	56	25	2,30006	8,46716	4,8	1,04275	8,82916	71,4977	15,3443	S
4	20. 4. 2015 11:56:35	94	-0,1	3,74	14,4	33,742	7,258		11	56	35	2,3029	0,41879	3,9	0,05157	0,0216	38,3497	8,23031	S
5	20. 4. 2015 11:56:45	104	-0,1	5,48	14,5	106,145	22,833		11	56	45	2,30574	2,09114	3,7	0,25753	0,53853	32,7472	7,02793	SSV
6	20. 4. 2015 11:56:56	115	-0,1	4,50	14,7	58,776	12,643		11	56	56	2,30858	0,24667	4	0,03038	0,00749	41,376	8,87979	SZ
7	20. 4. 2015 11:57:06	125	-0,1	3,24	15,1	21,938	4,719		11	57	6	2,31142	0,06995	4	0,00861	0,0006	41,376	8,87979	SZ
8	20. 4. 2015 11:57:16	135	-0,1	5,30	15,2	96,026	20,656		11	57	16	2,31426	0,08955	1,6	0,01103	0,00099	2,64806	0,56831	J
9	20. 4. 2015 11:57:26	145	-0,1	6,09	14,6	145,684	31,338		11	57	26	2,3171	2,43308	4,6	0,29964	0,72905	62,9277	13,505	SZ
10	20. 4. 2015 11:57:37	156	-0,1	5,74	15,0	121,982	26,240		11	57	37	2,31994	1,12577	3,5	0,13864	0,15608	27,7187	5,94876	S
11	20. 4. 2015 11:57:47	166	-0,1	5,59	14,9	112,667	24,236		11	57	47	2,32278	0,13227	3,4	0,01629	0,00215	25,41	5,4533	S
12	20. 4. 2015 11:57:57	176	-0,1	7,06	14,6	226,973	48,824		11	57	57	2,32562	0,36606	4	0,04508	0,0165	41,376	8,87979	SSZ
13	20. 4. 2015 11:58:07	186	-0,1	6,29	14,2	160,514	34,528		11	58	7	2,32846	2,07827	3,4	0,25594	0,53192	25,41	5,4533	SSZ
14	20. 4. 2015 11:58:17	196	-0,1	9,75	14,1	597,824	128,599		11	58	17	2,3313	3,2285	4,4	0,3976	1,28365	55,0715	11,819	SSZ
15	20. 4. 2015 11:58:27	206	-0,1	5,71	14,2	120,079	25,830		11	58	27	2,33414	10,8816	4,5	1,3401	14,5823	58,9123	12,6433	SSV
16	20. 4. 2015 11:58:38	217	-0,1	4,22	14,7	48,473	10,427		11	58	38	2,33698	4,27382	2,6	0,52633	2,24945	11,3629	2,43861	SSV
17	20. 4. 2015 11:58:48	227	-0,1	9,38	14,3	532,314	114,507		11	58	48	2,33982	2,54585	5,1	0,31353	0,7982	85,7589	18,4049	VJV
18	20. 4. 2015 11:58:58	237	-0,1	7,04	14,0	225,049	48,411		11	58	58	2,34266	1,81917	4,1	0,22404	0,40756	44,5574	9,56256	S
19	20. 4. 2015 11:59:08	247	-0,1	6,03	14,1	141,420	30,421		11	59	8	2,3455	2,65606	4,1	0,3271	0,8688	44,5574	9,56256	SZ
20	20. 4. 2015 11:59:18	257	-0,1	3,81	14,5	35,673	7,674		11	59	18	2,34834	1,17332	4,1	0,1445	0,16954	44,5574	9,56256	SSZ
21	20. 4. 2015 11:59:28	267	-0,1	2,83	14,6	14,619	3,145		11	59	28	2,35118	3,0703	3,9	0,37812	1,16093	38,3497	8,23031	SSZ
22	20. 4. 2015 11:59:38	277	-0,1	4,44	14,6	56,456	12,144		11	59	38	2,35402	0,71754	4,1	0,08837	0,06341	44,5574	9,56256	SSZ
23	20. 4. 2015 11:59:49	288	-0,1	5,06	14,7	83,562	17,975		11	59	49	2,35686	1,74063	5	0,21436	0,37313	80,8125	17,3433	SSZ
24	20. 4. 2015 11:59:59	298	-0,1	6,95	14,7	216,528	46,578		11	59	59	2,3597	0,79136	2,5	0,09746	0,07712	10,1016	2,16792	SSZ
25	20. 4. 2015 12:00:09	308	-0,1	4,24	14,5	49,165	10,576		12	0	9	2,36254	1,58174	4,4	0,1948	0,30812	55,0715	11,819	SSZ
26	20. 4. 2015 12:00:19	318	-0,1	4,23	14,5	48,818	10,501		12	0	19	2,36538	3,41128	4,9	0,42011	1,43311	76,0601	16,3234	SSZ
27	20. 4. 2015 12:00:29	328	-0,1	5,05	14,4	83,068	17,869		12	0	29	2,36822	5,4089	5,2	0,66612	3,60297	90,9031	19,5089	SSZ
28	20. 4. 2015 12:00:39	338	-0,1	5,31	14,4	96,570	20,773		12	0	39	2,37106	0,00137	3,3	0,00017	2,3E-07	23,2333	4,98614	Z
29	20. 4. 2015 12:00:50	349	-0,1	4,29	14,6	50,925	10,955		12	0	50	2,3739	0,27763	2,3	0,03419	0,00949	7,86597	1,68813	SSZ
30	20. 4. 2015 12:01:00	359	-0,1	7,21	14,6	241,749	52,003		12	1	0	2,37674	10,6197	5,6	1,30785	13,889	113,536	24,3661	SSZ
31	20. 4. 2015 12:01:10	369	-0,1	6,85	14,6	207,315	44,596		12	1	10	2,37958	7,2955	5,1	0,89846	6,55472	85,7589	18,4049	SSZ
32	20. 4. 2015 12:01:20	379	-0,1	6,64	14,4	188,827	40,619		12	1	20	2,38242	8,73435	5,2	1,07566	9,39518	90,9031	19,5089	SSZ
33	20. 4. 2015 12:01:30	389	-0,1	4,31	14,3	51,641	11,108		12	1	30	2,38526	2,18214	5,4	0,26874	0,58642	101,8	21,8476	SZ
34	20. 4. 2015 12:01:40	399	-0,1	7,26	14,5	246,814	53,092		12	1	40	2,3881	1,22997	3,8	0,15147	0,18631	35,4747	7,61331	SSZ
35	20. 4. 2015 12:01:50	409	-0,1	7,91	14,1	319,219	68,668		12	1	50	2,39094	1,39293	4,4	0,17154	0,23895	55,0715	11,819	SZ
36	20. 4. 2015 12:02:01	420	-0,1	4,79	14,2	70,887	15,249		12	2	1	2,39378	6,2E-05	1,7	7,7E-06	4,8E-10	3,17625	0,68166	SZ
37	20. 4. 2015 12:02:11	430	-0,1	6,27	14,3	158,987	34,200		12	2	11	2,39662	0,00017	1,6	2E-05	3,4E-09	2,64806	0,56831	ZSZ
38	20. 4. 2015 12:02:21	440	-0,1	5,84	14,5	128,469	27,635		12	2	21	2,39946	5,8E-05	3,8	7,1E-06	4,1E-10	35,4747	7,61331	S
39	20. 4. 2015 12:02:31	450	-0,1	4,85	14,4	73,584	15,829		12	2	31	2,4023	4,64944	5,1	0,57259	2,66223	85,7589	18,4049	S
40	20. 4. 2015 12:02:41	460	-0,1	7,05	14,4	226,010	48,617		12	2	41	2,40514	5,97878	4,9	0,7363	4,40219	76,0601	16,3234	S
41	20. 4. 2015 12:02:52	471	-0,1	5,44	14,5	103,838	22,337		12	2	52	2,40798	0,69357	3,3	0,08541	0,05924	23,2333	4,98614	SSZ
42	20. 4. 2015 12:03:02	481	-0,1	2,07	15,0	5,721	1,231		12	3	2	2,41082	0,00228	2,5	0,00028	6,4E-07	10,1016	2,16792	S
43	20. 4. 2015 12:03:12	491	-0,1	1,45	15,6	1,966	0,423		12	3	12	2,41366	6,8E-05	1,7	8,3E-06	5,6E-10	3,17625	0,68166	JJV

List1 List2 List3

Příloha I



Obrázek 43: Záznam z měření anemometrem TESTO. Rychlost větru – modře, změna tlaku – zeleně.