

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta  
elektrotechniky a  
komunikačních  
technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2016

Bc. David Dočekal



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A  
KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

MĚŘICÍ PRACOVIŠTĚ PRO SYSTÉM VZDÁLENÉ  
DODÁVKY ENERGIE

MEASURING STATION FOR THE SYSTEM OF THE REMOTE ENERGY SUPPLY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. David Dočekal

II

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Křivák, Ph.D.

II

BRNO-2016



# Semestrální práce

magisterský navazující studijní obor **Elektrotechnická výroba a materiálové inženýrství**  
Ústav elektrotechnologie

**Student:** Bc. David Dočekal      **ID:** 134292 **Ročník:** 2      **Akademický rok:** 2015/16

## NÁZEV TÉMATU:

### Měřicí pracoviště pro systém vzdálené dodávky energie

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s používanými obnovitelnými zdroji energie - malou větrnou turbínou a fotovoltaickým panelem. Vytvořte měřicí pracoviště a software ke sběru dat z malé větrné elektrárny a fotovoltaického panelu včetně dat z anemometru a pyranometru. Ve zvoleném časovém období proveďte experimentální měření a ze získaných údajů určete množství vyrobené elektrické energie malé větrné turbíny a fotovoltaického panelu.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 23.9.2015

**Termín odevzdání:** 17.12.2015

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Petr Křivík, Ph.D.

**Konzultant semestrální práce:**

**doc. Ing. Petr Bača, Ph.D., předseda oborové rady**

#### UPOZORNĚNÍ:

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální 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**

Diplomová práce je zaměřena na vytvoření měřicího pracoviště pro systém vzdálené dodávky energie. Jedná se o měřicí pracoviště, zabývající se zpracováním měřených údajů výroby elektrické energie pomocí fotovoltaického panelu a větrné turbíny. V teoretické části je seznámen čtenář s problematikou obnovitelných zdrojů energie. První kapitola pojednává o energii větru. Je zde popsán vznik větru, základní rozdělení větrných elektráren, přes výrobu elektrické energie až po samotné měření. Druhá kapitola pojednává o energii slunce. V této kapitole je popsán vznik sluneční energie, fotoelektrický efekt, popis voltampérové charakteristiky a s tím související hodnocení fotovoltaických panelů. Čtenář se zde dozví základní rozdělení fotovoltaických panelů a jejich výrobou. Třetí kapitola je věnována početním metodám a určením základních podmínek pro vyhodnocování provozu větrné elektrárny a fotovoltaického panelu. Ve čtvrté kapitole jsou popsány základní údaje o jednotlivých komponentech, které byly vybrány pro tuto diplomovou práci a zapojení měřicího pracoviště. Je zde zahrnuta větrná turbína JPT-100, fotovoltaický panel A-130, anemometr TX20ETH, pyranometr SG420 a teplotní čidlo PT100. Měřicí software je popsán v páté kapitole. V poslední kapitole obsahuje experimentální měření ve zvoleném časovém intervalu a samotné vyhodnocení.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Fotovoltaika, A-130, větrná turbína JPT-100, pyranometr, anemometr, energie větru, energie slunce, teplotní čidlo, PT100, Betzův limit, alternativní zdroje energie, fotoelektrický efekt, rozdělení větrných motorů, měřicí software.

## **ABSTRAKT**

This thesis is focused on the creation of measuring workplace for remote power supply system. This is the measuring of the workplace, engaged in the processing of measured data, the production of electrical energy made by a photovoltaic panel and wind turbines. In the theoretical part, the reader is familiar with the issue of renewable energy sources. The first chapter is about the energy of the wind. Here is described the emergence of the wind, the basic division of wind power, through the production of electrical energy to the measurement itself. The second chapter deals with the solar energy. This chapter describes the emergence of the solar energy, photoelectric effect, description of characteristic features and related evaluation of the photovoltaic panel. The reader learns the basic distribution photovoltaic panels here and their manufacturing. The third chapter is devoted to measurement methods and specifying the basic conditions for the evaluation of the operation of wind turbines and photovoltaic panel. In the fourth chapter describes the basic data on individual facilities, which have been selected for this thesis and the involvement of the measuring site. There is also included wind power JPT-100 photovoltaic panels A-130 anemometer TX20ETH, pyranometer SG420 and temperature sensor PT100. Measuring software is described in the fifth chapter. In the last chapter, contains the experimental measurements in the selected time interval and the actual evaluation.

## **KEYWORDS**

Photovoltaics, A-130, wind turbine JPT-100, anemometer, wind energy, solar energy, temperature sensor, PT100, Betz's limit, alternative sources of energy, the photoelectric effect, the distribution of wind engines, measuring software.

DOČEKAL, D. *Měřicí pracoviště pro systém vzdálené dodávky energie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 69 s., 9 s přílohy diplomová práce. Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Petr Křivík, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma „Měřicí pracoviště pro systém vzdálené dodávky energie“ 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 doc. Ing. Petru Křivíkovi Ph.D. za odborné vedení, trpělivost, účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne .....

.....  
(podpis autora)

# OBSAH

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Úvod	1
<b>1 Energie větru</b>	<b>2</b>
1.1 Úvod .....	2
1.2 Vznik větru .....	2
1.3 Měření směru a rychlosti větru .....	3
1.4 Rozdělení větrných motorů .....	6
1.4.1 Odporové větrné motory .....	7
1.4.2 Vztlakové větrné motory (s vodorovnou osou otáčení) .....	7
1.5 Základní části vrtulové větrné elektrárny .....	11
1.6 Elektrické zařízení větrné elektrárny .....	13
1.6.1 Synchronní generátory .....	13
1.6.2 Asynchronní generátory .....	13
1.7 Regulace výkonu .....	14
<b>2 Energie slunce</b>	<b>17</b>
2.1 Sluneční energie .....	17
2.2 Fotoelektrický efekt .....	18
2.3 Voltampérová charakteristika fotovoltaického článku .....	19
2.4 Základní typy fotovoltaických článků .....	21
2.4.1 První generace .....	21
2.4.2 Druhá generace .....	21
2.4.3 Třetí generace .....	21
2.5 Konstrukce fotovoltaických panelů .....	21
<b>3 Teorie měření</b>	<b>23</b>
<b>4 Měřicí pracoviště</b>	<b>27</b>
4.1 Větrná turbína JPT-100 .....	27
4.2 Fotovoltaický panel A-130 .....	31
4.3 Anemometr TX20ETH .....	31
4.4 Pyranometr SG420 .....	32
4.5 Teplotní čidlo PT100 .....	34

4.6	Zapojení měřicího pracoviště .....	35
<b>5</b>	<b>Měřicí Software</b>	<b>37</b>
5.1	Panel měřicího software .....	37
5.2	Funkce programu .....	38
<b>6</b>	<b>Vyhodnocení naměřených hodnot</b>	<b>44</b>
6.1	Vyhodnocení naměřených hodnot z šesti období.....	44
6.1.1	Vyhodnocení naměřených hodnot v 1. období .....	44
6.1.2	Vyhodnocení naměřených hodnot ve 2. období .....	47
6.1.3	Vyhodnocení naměřených hodnot ve 3. období .....	49
6.1.4	Vyhodnocení naměřených hodnot ve 4. období .....	51
6.1.5	Vyhodnocení naměřených hodnot v 5. období .....	54
6.1.6	Vyhodnocení naměřených hodnot v 6. období .....	56
6.1.7	Vyhodnocení naměřených dat v rámci šesti období .....	59
6.2	Výběr dvou nejefektivnějších dnů pro výrobu elektrické energie na malé větrné turbíně a fotovoltaickém panelu.....	60
6.2.1	Nejefektivnější den pro výrobu elektrické energie na malé větrné turbíně.....	61
6.2.2	Nejefektivnější den pro výrobu elektrické energie na fotovoltaickém panelu .....	62
	<b>Závěr</b>	<b>64</b>
	<b>Literatura</b>	<b>66</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>68</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>69</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Všeobecná cirkulace atmosféry na Zemi [26] .....	3
Obr. 1.2: Robinsonův kříž [4] .....	6
Obr. 1.3: Tří miskový anemometr s korouhví [21].....	6
Obr. 1.4: Savoniův větrný motor [3].....	7
Obr. 1.5: Typy vztlakových motorů a) Jednolisté b) Dvoulisté c) Třílisté [3] .....	7
Obr. 1.6: Princip funkce vztlakového rotoru [3].....	8
Obr. 1.7: Profil listu rotoru otákaného proudem vzduchu .....	9
Obr. 1.8: Rozdělení proudu vzduchu na profilu lopatky VTE [21] .....	10
Obr. 1.9: Vznik podtlaku a přetlaku na profilu lopatky VTE [21] .....	10
Obr. 1.10: Vznik tlakové a odporové síly [21] .....	11
Obr. 1.11: Změna úhlu nabírajícího proudu vzduchu VTE [21] .....	11
Obr. 1.12: Schéma VTE [27] .....	12
Obr. 1.13: Synchronní generátor poháněný přímo turbínou [6] .....	13
Obr. 1.14: Asynchronní generátor s napájeným rotorem [5].....	14
Obr. 1.165: Princip regulace STALL, PITCH a ACTIVE-STALL [7] .....	15
Obr.1.15: Princip regulace PITCH [29].....	15
Obr. 1.177: Princip regulace STALL [30].....	16
Obr. 2.1: Celková intenzita slunečního záření na vodorovnou plochu [11] .....	18
Obr. 2.2: Vznik fotovoltaického napětí na struktuře s přechodem PN [14] .....	19
Obr. 2.3: V-A charakteristika osvětleného FV článku [19].....	20
Obr. 2.4: Schéma konstrukce fotovoltaického panelu [12] .....	22
Obr. 3.1: Rozložení rychlosti větru před větrnou turbínou a za ní .....	24
Obr. 4.1: Větrná turbína JPT-100 [31].....	27
Obr. 4.2: Graf závislosti výkonu na rychlosti větru [8] .....	28
Obr. 4.3: Graf závislosti teoretických výkonů na rychlosti větru. ....	30
Obr. 4.4: Možnosti přístupu k modulu TX20ETH [23].....	32
Obr. 4.5: Anemometr TX20ETH [32] .....	32
Obr. 4.6: Spektrální rozsah pyranometru SG420.....	33
Obr. 4.7: Termočlánek .....	33
Obr. 4.8: Schéma zapojení měřicího pracoviště .....	36
Obr. 5.1: Panel měřicího softwaru .....	37
Obr. 5.2: From file pro směr a rychlost větru .....	38
Obr. 5.3: Přepočítání rychlosti na m/s.....	38
Obr. 5.4: Bloky výpočtů pro výkon větru, maximálně dosažitelného výkonu VT a účinnost větrné turbíny .....	39
Obr. 5.5: Přepočítání VT_I a VT_P .....	39
Obr. 5.6: Nastavení časového intervalu, odečet aktuálního času a data .....	40
Obr. 5.7: Rozřídění hodnot data a času v bloku čas .....	40
Obr. 5.8: Ukládání naměřených hodnot v To File_VT do souboru data.txt.....	41
Obr. 5.9: Načtení a přepočítání teploty z teplotního čidla PT100.....	41
Obr. 5.10: Přepočítání FV_I a FV_P.....	42
Obr. 5.11: Výpočet intenzity slunečního záření pomocí bloku Intenzita_přepočítání.....	42
Obr. 5.12: Výpočet účinnosti fotovoltaického panelu bloku FV_účinnost .....	43
Obr. 5.13: Ukládání naměřených hodnot v To File_VT do souboru data.txt.....	43
Obr. 6.1: Rozložení směrovosti větru v 1. období .....	44

Obr. 6.2: Závislost rychlosti větru v 1. období .....	45
Obr. 6.3: Graf rozložení výkonu na VT v 1. období.....	45
Obr. 6.4: Graf závislosti aktuální intenzity dopadajícího záření na pyranometru v 1. období .....	46
Obr. 6.5: Graf závislosti aktuální intenzity dopadajícího záření na pyranometru v 1. období .....	46
Obr. 6.6: Rozložení směrovosti větru ve 2. období .....	47
Obr. 6.7: Závislost rychlosti větru ve 2. období .....	47
Obr. 6.8: Graf rozložení výkonu na VT ve 2. období.....	48
Obr. 6.9: Graf závislosti aktuální intenzity dopadajícího záření na pyranometru ve 2. období.....	48
Obr. 6.10: Graf rozložení výkonu na FV panelu ve 2. období .....	49
Obr. 6.11: Rozložení směrovosti větru ve 3. období .....	49
Obr. 6.12: Závislost rychlosti větru ve 3. období .....	50
Obr. 6.13: Graf rozložení výkonu na VT ve 3. období.....	50
Obr. 6.14: Graf závislosti aktuální intenzity dopadajícího záření na pyranometru ve 3. období .....	51
Obr. 6.15: Graf rozložení výkonu na FV panelu ve 3. období .....	51
Obr. 6.16: Rozložení směrovosti větru ve 4. období .....	52
Obr. 6.17: Závislost rychlosti větru ve 4. období .....	52
Obr. 6.18: Graf rozložení výkonu na VT ve 4. období.....	53
Obr. 6.19: Graf závislosti aktuální intenzity dopadajícího slunečního záření na pyranometru ve 4. období .....	53
Obr. 6.20: Graf rozložení výkonu na FV panelu ve 4. období .....	54
Obr. 6.21: Rozložení směrovosti větru v 5. období.....	54
Obr. 6.22: Závislost rychlosti větru v 5. období .....	55
Obr. 6.23: Graf rozložení výkonu na VT v 5. období.....	55
Obr. 6.24: Graf závislosti aktuální intenzity dopadajícího záření na pyranometru v 5. období .....	56
Obr. 6.25: Graf rozložení výkonu na FV panelu v 5. období .....	56
Obr. 6.26: Rozložení směrovosti větru v 6. období.....	57
Obr. 6.27: Závislost rychlosti větru v 6. období .....	57
Obr. 6.28: Graf rozložení výkonu na VT v 6. období.....	58
Obr. 6.29: Graf závislosti aktuální intenzity dopadajícího záření na pyranometru v 6. období .....	58
Obr. 6.30: Graf rozložení výkonu na FV panelu v 6. období .....	59
Obr. 6.31: Závislost výroby elektrické energie na VT v jednotlivém období .....	59
Obr. 6.32: Závislost výroby elektrické energie na FV v jednotlivém období .....	60
Obr. 6.33: Rozložení směrovosti větru za 36 dnů.....	60
Obr. 6.34: Rozložení směrovosti větru v 6. období dne 7. 5. 2016 .....	61
Obr. 6.35: Závislost rychlosti větru v 6. období dne 7. 5. 2016 .....	61
Obr. 6.36: Graf rozložení výkonu na VT v 6. období dne 7. 5. 2016.....	62
Obr. 6.37: Graf závislosti aktuální intenzity dopadajícího záření na pyranometru v 6. období dne 8. 5. 2016.....	62
Obr. 6.38: Graf rozložení výkonu na FV panelu v 6. období dne 8. 5. 2016 .....	63
Obr. 0.1: Mapa umístění FV panelu na budově Technická 10 [28].....	70
Obr. 0.2: Průměrné měsíční produkce elektřiny z FV panelu A-130 (skutečné nastavení) [25].....	72
Obr. 0.3: Průměrná intenzita slunečního záření pro FV panel A-130 (skutečné nastavení) [25].....	72

Obr. 0.4: Závislost výšky slunce pro zimní a letní slunovrat [25].....	73
Obr. 0.5: Průměrné měsíční produkce elektřiny z FV panelu A-130 (ideální nastavení) [25].....	74
Obr. 0.6: Průměrná intenzita slunečního záření pro FV panel A-130 (ideální nastavení) [25].....	74
Obr. 0.7: Závislost výšky slunce pro zimní a letní slunovrat [25].....	75
Obr. 0.8: Větrná turbína JPT100 na střeše budovy Technická 10 ve 4. poschodí.....	75
Obr. 0.9: Solární panel A-130 na střeše budovy Technická 10 ve 4. poschodí.....	76
Obr. 0.10: Pyranometr na střeše budovy Technická 10 ve 4. poschodí.....	76
Obr. 0.11: Měřicí pracoviště v laboratoři MOZE/MAZE.....	77
Obr. 0.12: ethernetový anemometr TX20ETH .....	77

# SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1: Převod anglického značení směru větru na číselnou stupnici [2].....	4
Tab. 1.2: Hodnoty exponentu pro různé drsnosti povrchu [3].....	4
Tab. 1.3: Hodnoty korekčního součinitele $k_h$ [16].....	4
Tab. 1.4: Beaufortova stupnice rychlosti větru [22] .....	5
Tab. 2.1: Hodnoty součinitele znečištění Z [3].....	17
Tab. 2.2: Typické hodnoty intenzit celkového záření [11]. .....	18
Tab. 4.1: Technické parametry modulu JPT-100 [8].....	28
Tab. 4.2: Vypočítané teoretické hodnoty výkonů v závislosti na rychlosti větru [8] .....	29
Tab. 4.3: Katalogové hodnoty FV panelu A-130.....	31
Tab. 4.4: Technické parametry pyranometru SG420.....	33
Tab. 4.5: Výstupní parametry závislé na intenzitě dopadajícího záření .....	34
Tab. 0.1: Teoreticky získatelná intenzita záření za rok .....	71
Tab. 0.2: Ideální teoretická intenzita slunečního záření .....	73
Tab. 0.3: Ukázka tabulky z měření v programu Exce .....	77

# ÚVOD

V dnešní době se lidstvo zabývá čím dál tím více alternativními či obnovitelnými zdroji energie. Nazývají se tak, protože se přirozeně obnovují v průběhu jejich využívání, proto je z hlediska lidské existence můžeme brát jako nevyčerpatelné. Do skupiny obnovitelných zdrojů je možné zařadit sluneční záření, geotermální energii, větrnou energii, vodní energii, energii přílivu a energii získávanou z biomasy.

Důležitým faktem je, že lidská populace stále narůstá. S narůstajícím počtem obyvatel samozřejmě narůstají energetické požadavky. Energii v dnešní době převážně získáváme z fosilních paliv, kterých však máme omezené množství. Používání fosilních paliv vede například k nárůstu skleníkových plynů v atmosféře, které mají trvalý dopad na životní podmínky. Tyto negativní vlivy přináší spousty otázek. Jaký zdroj energie budeme využívat v případě vyčerpání fosilních paliv? A jestliže takový bude, jak velký vliv bude mít na znečišťování přírody? Jak velké náklady to s sebou ponese přejít z fosilních paliv na jiné zdroje energie?

Pomalu a jistě lidstvo přechází k využívání obnovitelných zdrojů. Používání obnovitelných zdrojů oproti fosilním palivům nedochází ke znečišťování přírody ani ovzduší. Například solární energie má dostatečně velký potenciál pokrýt dlouhodobě energetické potřeby lidstva. Za jediný den přichází na zem tolik energie, že by stačila pokrýt lidské potřeby na víc, jako 5475 dní.

Tato práce se právě zabývá využíváním obnovitelných zdrojů energie a jejich měřením. Práce je rozdělená na dvě části, teoretickou a praktickou. V teoretické části začneme obecně popisem větrné a solární energie a možnosti jejich využití až po samotnou výrobu elektrické energie. Dále jsou zde zahrnuty jednotlivé komponenty měřicího pracoviště pro systém vzdálené dodávky energie. Praktická část se věnuje vytvoření měřicího softwaru, monitorování a vyhodnocení měřených dat z malé větrné elektrárny s jednotkovým výkonem 100 W, solárního panelu se špičkovým výkonem 130 Wp, teploty z teplotního čidla PT100, směrovosti a rychlosti větru naměřené elektronickým anemometrem TX20ETH a intenzity dopadu slunečního záření měřené pomocí pyranometru SG420.

# 1 ENERGIE VĚTRU

## 1.1 Úvod

Do skupiny obnovitelných zdrojů energie patří kromě Slunce, vody a geotermální energie i vítr, který je prakticky jedním z nejdůležitějších zdrojů energie pro naši planetu. Větrné elektrárny společně s vodní energií patří mezi člověkem nejdéle využívané. Po stovky a tisíce let to byly právě tyto dva zdroje energie. Během posledních tří tisíciletí bylo postaveno bezpočet různých forem větrných kol. Neustálé hledání výkonných, jednoduše sestavitelných a odolných větrných zařízení umožnilo vznik mnoha inovativních forem. Přitom se prosadily takové typy, které využívaly větrnou energii ve stávající řemeslné výrobě a současně se integrovaly do pracovního procesu. Nejefektivnější oblasti pro využití větrné energie v Evropě se nacházejí v přímořských oblastech, kde pravidelně vanou silné větry až 80 % dnů v roce. [3] [10]

Historikové uvádí, že první zmínky o větrném motoru pochází z 3. století před n.l. z Egypta, kde se jednalo o větrný motor s vodorovnou osou. V Evropě se začala větrná energie využívat až od 13. století v podobě větrných mlýnů. V této době nastal velký rozmach v této oblasti především v Nizozemsku, které se dostalo ve 14. na první pozici ve využívání této energie. Větrná energie se využívala k nahrazení lidské práce především pro mletí obilí, zpracování dřeva a k čerpání vody. Pro odvodňování či zavlažování pozemků se využívalo větrného rotoru s Archimédovým šroubem. [3],[10]

Až teprve na začátku 19. století došlo k první realizaci větrné energie na energii elektrickou (Paul la Cour 1891). Ve stejné době docházelo k velkému rozvoji využívání elektrické energie v USA. Bylo vybudováno více než 5 milionů malých mnoho lopatkových větrných motorů, které byly využívány k čerpání vody. [3] [10]

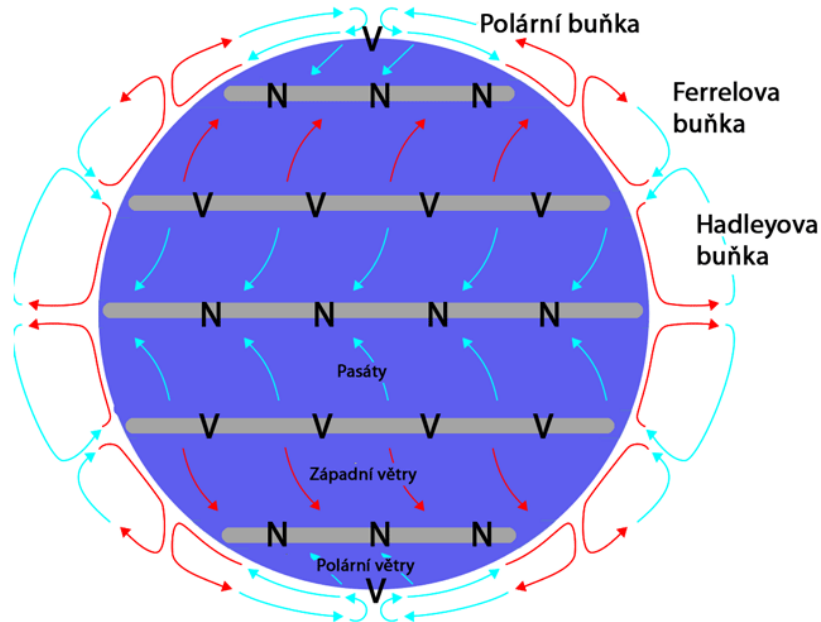
V posledních letech jsme svědky velkého nárůstu využívání větrné energie, a to právě v oblasti výroby elektrické energie, což souvisí se snahou omezení nárůstu nepříznivých vlivů při využívání fosilních paliv pro výrobu energie. Dále s tímto souvisí snaha o snížení emisí skleníkových plynů v atmosféře. [3] [10]

## 1.2 Vznik větru

Vítr je možné definovat tak, že vlivem nerovnoměrného ohřevu zemského povrchu slunečním zářením dochází k pohybu vzduchu z jednoho místa na druhé. Celý děj také ovlivňuje vznik tlakových rozdílů v zemské atmosféře, která je ovlivněna střídáním dne a noci a rotací Země. Vítr vzniká v důsledku vyrovnání tlakových rozdílů, tedy od tlakové výše k tlakové níži. Jinými slovy, vlivem ohřátého povrchu se také ohřívá přilehlá vrstva vzduchu a teplý vzduch o nižším tlaku stoupá vzhůru, jelikož je lehčí. Na jeho místo, tedy do tlakové níže se tlačí studený vzduch. V opačném případě studený vzduch o vyšším tlaku klesá a tím vznikne oblast vysokého tlaku, do které se tlačí teplý vzduch. Vlivem rozdílů těchto atmosférických tlaků mezi dvěma oblastmi vzniká vítr. Čím větší bude rozdíl atmosférických tlaků v určitém místě, mezi dvěma oblastmi, tím silnější bude i vítr. Situaci lze popsat jednodušeji při pohledu na zeměkouli. Na zem v oblasti rovníku dopadá více slunečních paprsků, než v jiných částech. Vlivem těchto dopadajících paprsků se ohřívá vzduch, který poté spoutá do určité výšky, kde vzniká tzv. bezvětrnostní pásmo. Jakmile vzduch vystoupí dostatečně vysoko, ochladí se a klesá zpět na zem (přibližně

30° severně a jižně od rovníku) a proudí směrem k rovníku a také na druhou stranu směrem k pólům. [3] [10]

Na obou polokoulích se vytvářejí tři samostatně, příčně rotující prstence vzduchu. Hadleyova buňka se nachází v tropickém pásmu, Druhá, Ferrellova buňka se nachází nad mírným pásmem a třetí buňka Polární se nachází ve stejně jmenných oblastech. [3] [10]



Obr. 1.1: Všeobecná cirkulace atmosféry na Zemi [26]

### 1.3 Měření směru a rychlosti větru

Z hlediska využívání větrné energie lze mezi nejdůležitější faktory zařadit: směr a rychlost větru, stálost a nárazovost větru. Jednotlivé faktory hrají velkou roli při volbě vhodných lokalit pro výstavbu větrných elektráren. Při výstavě větších skupin VE (větrných elektráren) je třeba počítat s tím, aby nedocházelo k jejich vzájemnému ovlivňování.

V České republice se měření rychlosti a směru větru spolu s jinými klimatickými faktory provádí asi 200 meteorologických stanic Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ). Mezinárodní standardy pro měření směru a rychlosti udávají pro zjištění těchto údajů výšku 10 m nad zemským povrchem. Naměřené hodnoty jsou poté kontrolovány a archivovány.

#### Směr větru

Směr větru se určuje, z jaké světové strany vítr vane. K měření směru větru se obvykle používá větrná směrovka, která bývá ve většině případů součástí rychloměru (anemometru). Lze ji popsat, jako svislou desku otáčející se kolem své horizontální osy rotace v rozmezí 360°. V metrologii se udává anglickými zkratkami, se kterými jsou vázány desítky stupňů azimutu. Je tedy možné rozlišit až 36 směrů větru (0-36). Pro jednotlivé světové strany je označení následující: severní vítr N s označením 36, východní vítr E 09, jižní vítr W 18 a západní vítr W 27.

V některých případech se údaje o směru větru převádí na číselnou stupnici. Tabulka pro převod anglického označení směru větru na číselnou stupnici je uvedena níže.

Tab. 1.1: Převod anglického značení směru větru na číselnou stupnici [2].

SSV	SV	VSV	V	VJV	JV	JJV	J	JJZ	JZ	ZJZ	Z	ZSZ	SZ	SSZ	S	Bez-větrí
NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N	Calm
2	4	7	9	11	13	16	18	20	22	25	27	29	31	34	36	0

### Rychlost větru

Rychlost větru je úměrná velikosti tlakového rozdílu a je možné ji popsat jednotkou v  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Obecně platí, že rychlost větru klesá v blízkosti zemského povrchu, a proto ji můžeme popsat vztahem: [1]

$$v_h = v_0 \cdot \left( \frac{h}{h_0} \right)^n \quad (1.1)$$

Kde:

$v_h$  – je průměrná rychlost větru ve výšce  $h$  nad zemským povrchem [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

$v_0$  – je průměrná rychlost větru v referenční výšce  $h_0$  [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

$h_0$  – je výška, ve které se provádí měření [m]

$n$  – je exponent závisující na drsnosti povrchu, vertikálním profilu teplot a výšce nad zemským povrchem; (viz Tab. 1.2)

Tab. 1.2: Hodnoty exponentu pro různé drsnosti povrchu [3]

Druh povrchu	Popis	n
a	hladký povrch (vodní hladina, písek)	0,14
b	louka s nízkým travnatým porostem, oranice	0,16
c	vysoká tráva, nízké obilné porosity	0,18
d	porosity vysokých kulturních plodin	0,21
e	lesy	0,28
f	vesnice a malá města	0,48

Pro ulehčení výpočtu rychlosti větru je možné tyto exponenty vyjádřit pomocí korekčního součinitele  $k_h$ .

$$v_h = k_h \cdot v_{10}; [\text{m}\cdot\text{s}^{-1}] \quad (1.2)$$

Tab. 1.3: Hodnoty korekčního součinitele  $k_h$  [16]

Typ povrchu	Výška $h$ [m]									
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
a	0,91	1	1,06	1,1	1,14	1,17	1,19	1,21	1,23	1,25
b	0,9	1	1,07	1,12	1,16	1,19	1,22	1,25	1,27	1,29
c	0,88	1	1,08	1,13	1,18	1,22	1,25	1,28	1,31	1,34
d	0,86	1	1,09	1,16	1,21	1,26	1,3	1,34	1,37	1,4
e	0,82	1	1,12	1,21	1,29	1,36	1,42	1,47	1,52	1,57
f	0,72	1	1,21	1,39	1,55	1,69	1,82	1,95	2,06	2,17

Existují dva způsoby, jak měřit rychlost větru. První možností je vizuální způsob, kde rychlost větru je možné odhadnout podle Beaufortovy stupnice rychlosti větru. Tato stupnice od svého původu prošla změnami a v dnešní době popisuje 17 stupňů rychlosti větru. Tabulka níže popisuje reakci prostředí na rychlosti větru. [10]

Tab. 1.4: Beaufortova stupnice rychlosti větru [22]

Stupeň	Vítr	Rychlost [km.h-1]	Reakce na prostředí
0	bezvětrí	< 1	kouř stoupá kolmo vzhůru
1	vánek	1 – 5	směr větru je poznatelný podle pohybu kouře
2	větrík	6 – 11	listy stromů šelestí
3	slabý vítr	12 – 19	listy stromů a větvičky jsou v trvalém pohybu
4	mírný vítr	20 – 28	začínají se pohybovat i listnaté keře
5	čerstvý vítr	29 – 39	listnaté keře se začínají hýbat
6	silný vítr	40 – 49	pohybují se větší větve stromů, vítr sviští po telegrafních drátech
7	mírný vichr	50 – 61	pohybují se celé stromy, chůze proti větru je nesnadná
8	čerstvý vichr	62 – 74	lámou se větve stromů, chůze proti větru je velice obtížná
9	silný vichr	75 – 88	vítr poškozují střechy domů
10	plný vichr	89 – 102	vyvrací stromy, působí škody na obydlích
11	vichřice	103 – 114	vítr působí rozsáhlé škody na velkých plochách
12-17	orkán	> 117	vítr má ničivé až devastující účinky (odnáší střechy, hýbe těžkými hmotami)

Dalším způsobem, jak sledovat rychlost větru je pomocí anemometru. Jeho název pochází z řeckého slova anemos = vítr, tedy větroměr. Anemometr neměří nejen samotnou rychlost větru, ale i jeho směr. Provádí se v mnoha variantách, jakou jsou tepelné a tlakové anemometry, ale nejznámější jsou mechanické anemometry.

**Do skupiny mechanických anemometrů můžeme například zařadit:**

- 1) Miskové anemometry
- 2) Lopatkové anemometry
- 3) Kyvadlové anemometry

### Miskové anemometry

Anemometr tvoří čtyři horizontální ramena, na která jsou přidělané čtyři polokulové misky viz Obr. 1.2. Tyto ramena mezi sebou svírají úhel 90° a jsou přidělaná na vertikální hřídel. Otáčení rameny je způsobeno prouděním vzduchu na polokulové misky, kdy na konkávní kulové ploše se vytváří větší odpor než konvexní. Samotný anemometr může měřit pouze rychlost větru, jelikož ramena se budou otáčet stále ve stejném směru v horizontální poloze. Pro měření směru větru je možné anemometr dovybavit výkyvnou korouhví.[4]

### Tří miskový anemometry

Tento typ rychloměru je velmi podobný konstrukčně předešlému (miskovému), s tím rozdílem že ho tvoří pouze 3 polokulové misky, které mezi sebou v horizontálním směru svírají úhel 45° viz Obr. 1.3. Každá polokulová miska pak vytvoří maximální točivý moment. Výhody tří-miskového anemometru jsou, rychlá reakce na změnu proudění a konstantní točivý moment. Délka ramen, velikost i tvar misek, souvisí s poměrem rychlosti otáčení ramen a rychlosti proudění vzduchu. Z čehož vyplývá, že pro každý anemometr může být tento poměr rozdílný. [4]



Obr. 1.2: Robinsonův kříž [4]



Obr. 1.3: Tří miskový anemometr s korouhví [21].

## 1.4 Rozdělení větrných motorů

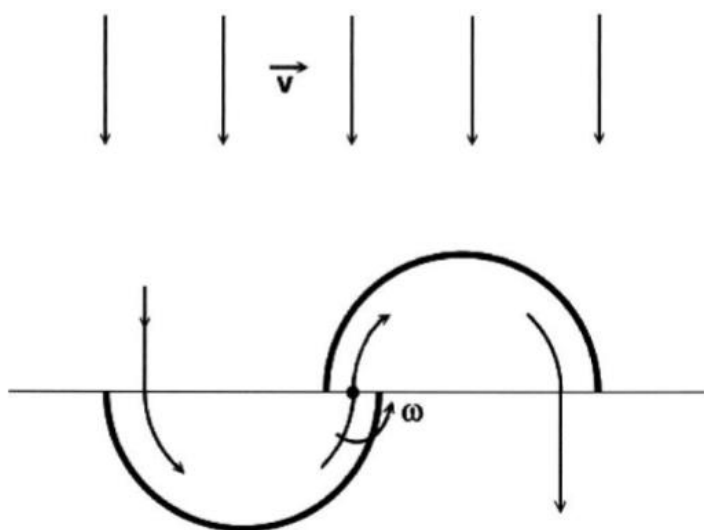
Větrné motory jsou stroje měnící kinetickou energii větru na mechanickou, která je následně pomocí generátoru převedena na energii elektrickou. Základní rozdělení podle typů je buď podle osy rotace, Instalovaného výkonu, rychlostního součinitele, aerodynamického profilu.

### Rozdělení:

- 1) Podle osy rotace
  - a. Vertikální
  - b. Horizontální
- 2) Instalovaný výkon
  - a. Malý
  - b. Střední
  - c. Velký
- 3) Rychlostí součinitel
  - a. Pomaloběžné
  - b. Rychloběžné
- 4) Aerodynamický profil
  - a. Odporový
  - b. Vztlakový

### 1.4.1 Odporové větrné motory

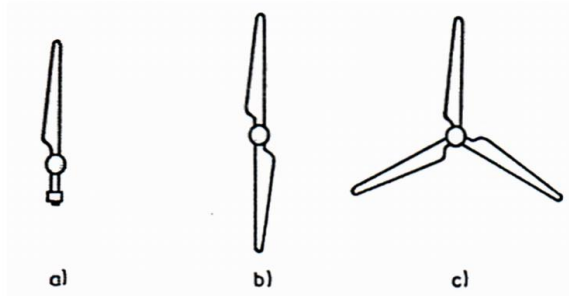
Tato kategorie větrných motorů patří mezi nejstarší. Jejich princip spočívá v nastavení plochy proti větru a tím se vytváří aerodynamický odpor. Na této ploše se tedy vytvoří síla, která se přemění na rotační pohyb. Podmínkou je, aby obvodová rychlost byla vždy menší než rychlost větru. Jestliže by nastal případ, kdy by nedocházelo k odběru energie z hřídele, budou otáčky úměrné rychlosti větru. Tedy, zdvojnásobí-li se rychlost větru, tak se zvýší i otáčky dvojnásobně. Jejich účinnost se pohybuje v rozmezí 15-23 %. To je právě důvodem jejich nízkého výskytu. Mezi větrné odporové motory je možné zařadit Savoniův rotor viz obr.1.4., který se skládá ze dvou svislých lopatek. Lopatky jsou konstruovány tak, že jsou uprostřed přesazeny do protisměru. Mezi výhody je možné zařadit nezávislost na směru větru, využití širokého pásma síly větru a především jejich jednoduchou konstrukci. [10] [14] [15]



Obr. 1.4: Savoniův větrný motor [3]

### 1.4.2 Vztlakové větrné motory (s vodorovnou osou otáčení)

Jsou to větrné motory, které pracují na vztlakovém principu. Do této kategorie patří větrná kola s vodorovnou osou otáčení, jejich osa otáčení je kolmo ke směru větru. Ve většině případů jsou konstruována jako dvoulisté nebo třílisté. Rychloběžné motory byly v poslední době modernizovány a jejich účinnost se pohybuje přes 40 %. Mezi výhody rychloběžných kol patří například jejich relativně nízká hmotnost. Nevýhodou je rozběh při nízkých rychlostech větru. Rozběhová rychlost se pohybuje okolo 5 m.s<sup>-1</sup>. Typy větrných motorů jsou uvedeny níže na Obr. 1.5. [10] [14] [15]

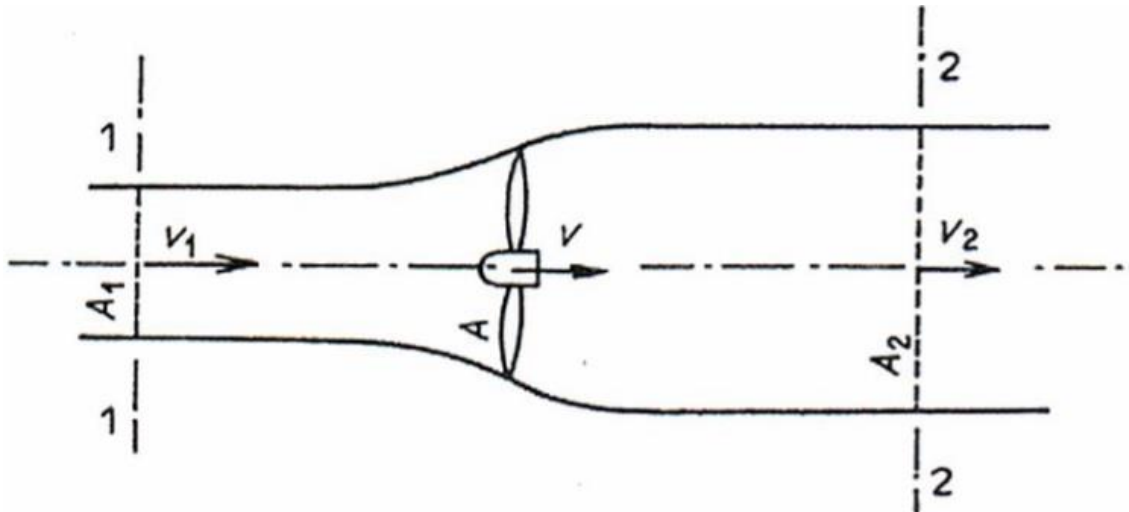


Obr. 1.5: Typy vztlakových motorů a) Jednolisté b) Dvoulisté c) Třílisté [3]

### Princip vztlakových motorů:

Lopatky větrných elektráren jsou velmi podobné lopatkám vrtulí u letadel. Větrné motory přeměňují kinetickou energii větru na mechanickou práci. Rozdíl mezi VTE a vrtulí u letadel je takový, že vrtule u letadel okolní vzduch urychlí a opačným směrem ho uvedou do pohybu. U VTE je tomu naopak, zde se zpomalí proud vzduchu, protékající přes pracovní plochu a tím větru odebere určitou část energie. Tímto způsobem se roztočí poháněcí mechanismus, který vyrobí v generátoru elektrickou energii.

Základní princip vzniku vztlaku na lopatkách vychází ze zákona o zachování hmoty a bývá vyjádřen rovnicí kontinuity. Rovnice (1.3a) popisuje proudění ideální tekutiny v prostoru omezeném proudovými plochami, jak je uvedeno na obr. 1.6. [15] [17].



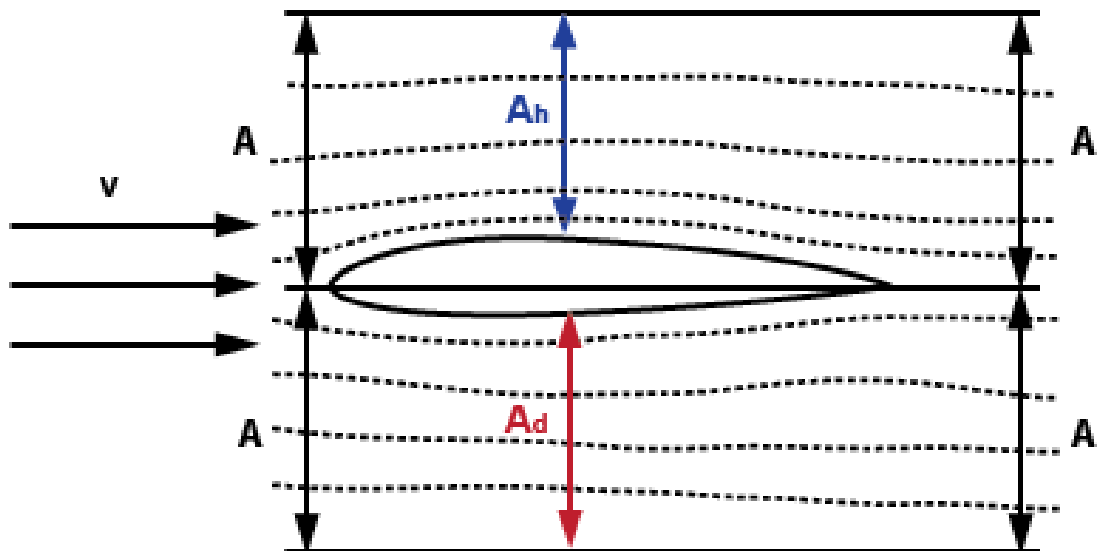
Obr. 1.6: Princip funkce vztlakového rotoru [3]

Proudění vzduchu kolem větrné turbíny řadíme mezi malé rychlosti tekutin. Díky tomu je považujeme jako nestlačitelné, tedy prakticky ideální, kde  $\rho = \text{konst}$ . Pro rovnici kontinuity pak platí:

$$v_1 \cdot A_1 = v \cdot A = v_2 \cdot A_2. \quad (1.3)$$

$$v \cdot A = \text{konst} \quad (1.3a)$$

Z této rovnice (1.3) tedy plyne, sníží-li se rychlost vzduchu, zvětší se plocha procházejícího se vzduchu. Tento princip je také možné využít při přezkoumávání listů rotoru, jak poukazuje obrázek obr. 1.7. [17].



Obr. 1.7: Profil listu rotoru otékaného proudem vzduchu

Princip uvedený na tomto obrázku je obdobný. Jestliže je proudící vzduch nestlačitelný a neovlivnitelný v dostatečné vzdálenosti, pak je možné uvést rovnici kontinuity, jak pro část nad tělivou, tak pod tělivou. [17]

$$A \cdot v = A_h \cdot v_h = A_d \cdot v_d \quad (1.4)$$

Zákon o zachování kinetické energie je možné popsat Bernoulliho rovnicí, vyjadřující vztah mezi tlakovou, kinetickou a potenciální energií plynu. Níže uvedený vztah je upraven do podoby pro ustálené proudění ideální tekutiny.[17]

$$p + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot h = c \quad (1.5)$$

Pro zjednodušení je možné psát:

$$p_{stat} + p_{dyn} + E_p = c \quad (1.6)$$

Kde:

- $p_{stat}$  - je statický tlak
- $p_{dyn}$  - je dynamický tlak
- $E_p$  - je potenciální energie
- $h$  - je výška profilu
- $g$  - je gravitační zrychlení
- $c$  - je konstanta

Veličiny  $h$ ,  $\rho$  a  $E_p$  nabývají velmi nízkých hodnot, a proto je můžeme ve třetím členu opomenout. Po úpravě dostaneme Bernoulliho rovnici v této podobě: [17]

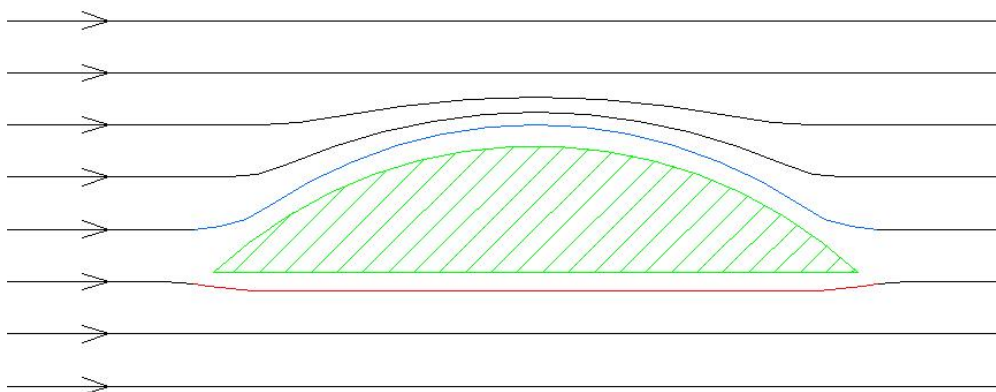
$$p + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 = c \quad (1.7)$$

Z tohoto vztahu je možné vyčíst, že vzroste-li nám rychlost proudění, dochází k nárůstu dynamického tlaku a snížení statického tlaku. Jestliže položíme tyto vztahy rovnosti, zjistíme, že  $v_h > v_d$  a  $p_d > p_h$ . Vytváří se nám tedy rozdíl tlaku pod i nad profilem listu, což vede ke vzniku vztlaku. [17]

$$p_h + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_h^2 = p_d + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_d^2 \quad (1.8)$$

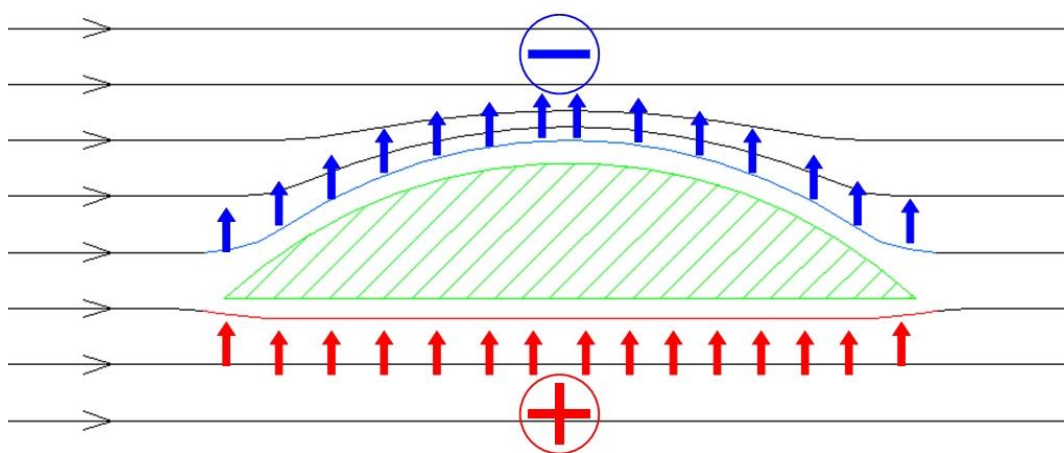
### Celou situaci je možné vysvětlit jinak:

Do proudu vzduchu umístíme list rotoru viz obr.1.8. Proud vzduchu se před profilem listu ve stejný okamžik rozdělí a za profilem opět spojí. [21]



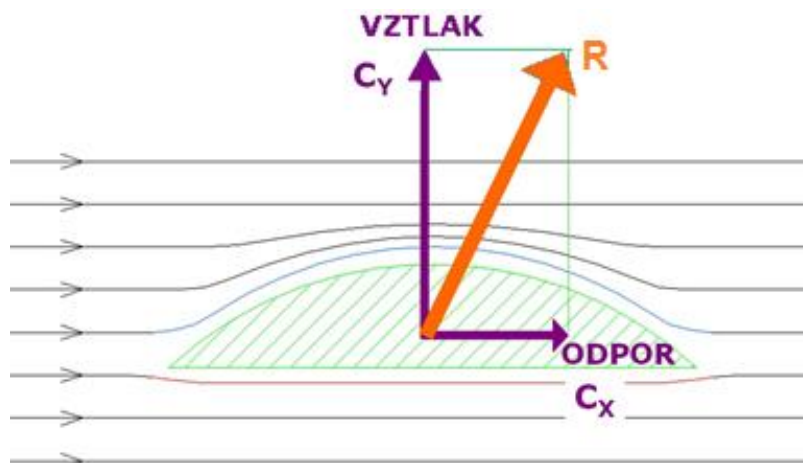
Obr. 1.8: Rozdělení proudu vzduchu na profilu lopatky VTE [21]

Rychlost proudění vzduchu nad profilem je poněkud vyšší s nižším tlakem než pod ním. Je tedy možné říci, že stoupá-li rychlost proudění, klesá hodnota tlaku. Vytvoří se nám tedy dvě oblasti s rozdílným tlakem. V oblasti nad lopatkou vzniká podtlak a pod ním přetlak obr. 1.9. [17]



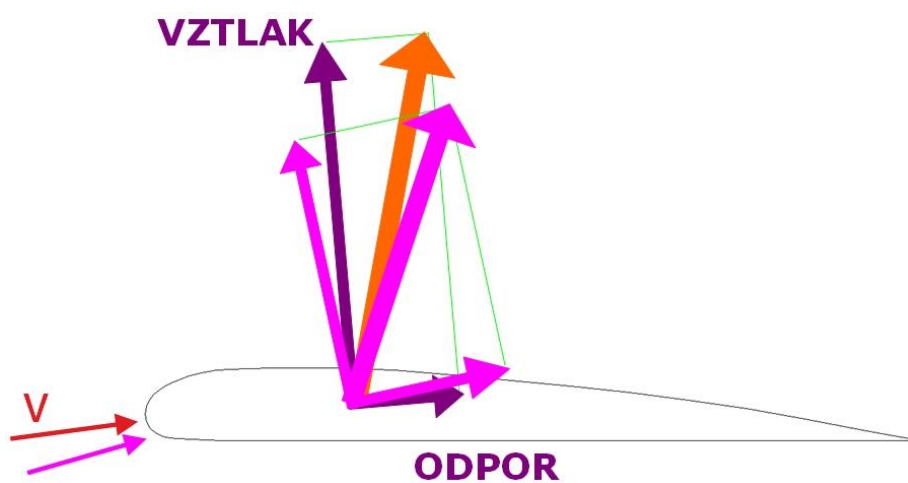
Obr. 1.9: Vznik podtlaku a přetlaku na profilu lopatky VTE [21]

Výslednicí těchto dvou polí pak bude pouze jedna síla, kterou nazýváme vztlakovou silou a označíme jako  $C_y$  [N]. Na profilu lopatky umístěné v proudu vzduchu vzniká i odporová síla  $C_x$ [N], která má podstatně menší sílu než vztlaková. Výslednice těchto aerodynamických sil se nazývá výsledná síla  $R$  [N] viz obr. 1.10. Tato síla je příčinou vzniku krouticího momentu, který uvádí rotor větrné elektrárny do pohybu.[17]



Obr. 1.10: Vznik tlakové a odporové síly [21]

Vztlaková síla vzniká vždy kolmo na nabíhající proud vzduchu, jak je možné vidět na obrázku níže. Jestliže se bude změnit úhel nabíhajícího proudu vzduchu na profil lopatky VTE, bude se měnit i velikost vztlaku  $C_y$  a odporu  $C_x$ . Pro dosažení maxima pro vztlakovou sílu je třeba, aby profil byl ofukován pod správným úhlem, který je různý u jiných profilů. Dopadá-li pod jiným úhlem nabíhací proud vzduchu, jak je zakresleno na obrázku fialovou barvou, dojde ke změně velikosti a směru vztlakové (je vždy kolmá na nabíhací proud vzduchu) a odporové síly. Tato výsledná síla, která má stejné působíště jako v předešlém případě, bude mít jinou velikost a směr obr. 1.11. [17]



Obr. 1.11: Změna úhlu nabíhajícího proudu vzduchu VTE [21]

## 1.5 Základní části vrtulové větrné elektrárny

### Hlava rotoru

Úkolem hlavy rotoru je převod rotačního pohybu na tah. Obvykle bývá složena ze dvou nebo třech listů zasazených do rotoru. Tvar listu poskytuje nejvyšší možnou efektivitu přenosu síly větru na rotor. Nejčastěji se vyrábí ze sklolaminátu a jejich průměr se pohybuje okolo 25 – 130 m.

### **Regulace rotoru**

Slouží k udržení otáček vrtule na cílové úrovni či její zabrzdění. Využívají se systémy s pevnou vrtulí a aerodynamickou brzdou. Tato brzda se při vysokých otáčkách vychýlí. Další metodou systémy s nastavitelnou vrtulí a regulací úhlu natočení listů.

### **Gondola**

Je část větrné elektrárny umístěna na stožáru, kde se nachází strojovna.

### **Hřídel**

Je část VE, která přenáší krouticí moment z rotoru. Je upevněna pomocí ložisek.

### **Převodovka**

Prizpůsobuje rychlost otáček na požadavcích generátoru.

### **Generátor**

Přeměňuje mechanickou energii na elektrickou

### **Systém otáčení strojovny**

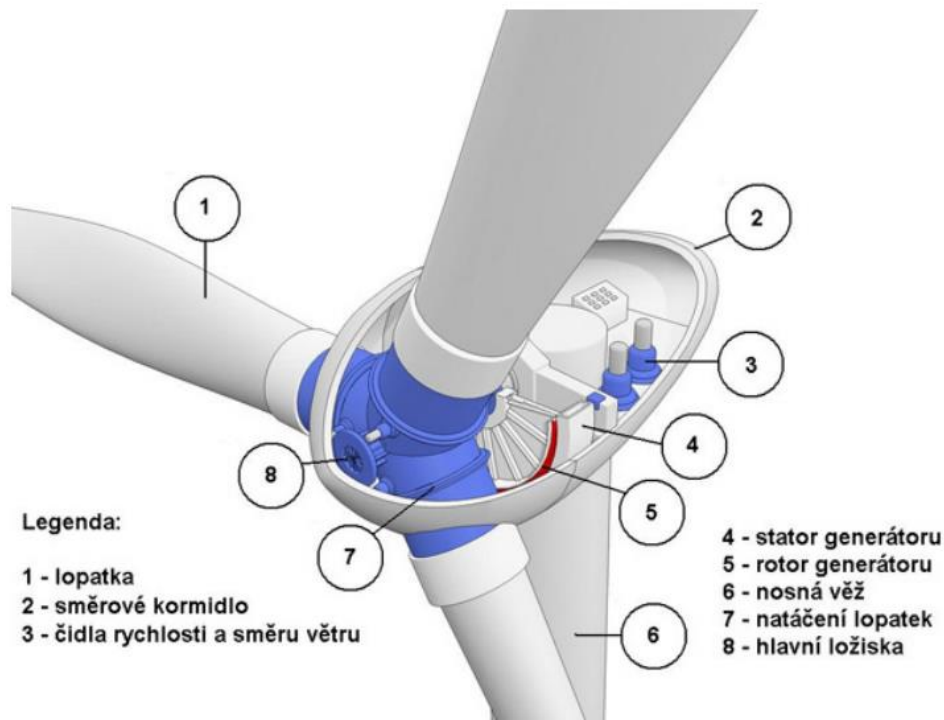
Jeho úlohou je správné natočení rotoru vůči směru větru a tím zabezpečuje maximální využití větrného potenciálu.

### **Systém měření a regulace**

Obvykle bývá složen ze dvou částí a to ovládací elektroniky a programového vybavení.

### **Stožár**

Slouží jako nosný prvek elektrárny, na němž je umístěna gondola s rotorem. Úkolem stožáru je zabezpečit správné umístění listů v projektované výšce, stabilitu celého systému a natáčení rotoru ve směru větru.



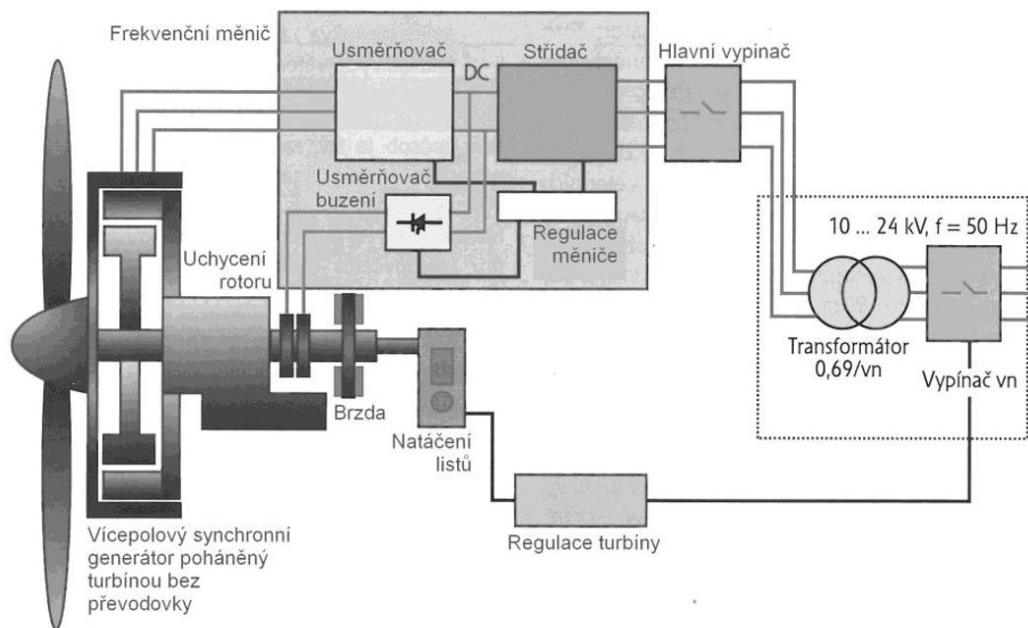
Obr. 1.12: Schéma VTE [27]

## 1.6 Elektrické zařízení větrné elektrárny

Elektrickou energii ve větrných elektrárnách vyrábí asynchronní a synchronní generátor.

### 1.6.1 Synchronní generátory

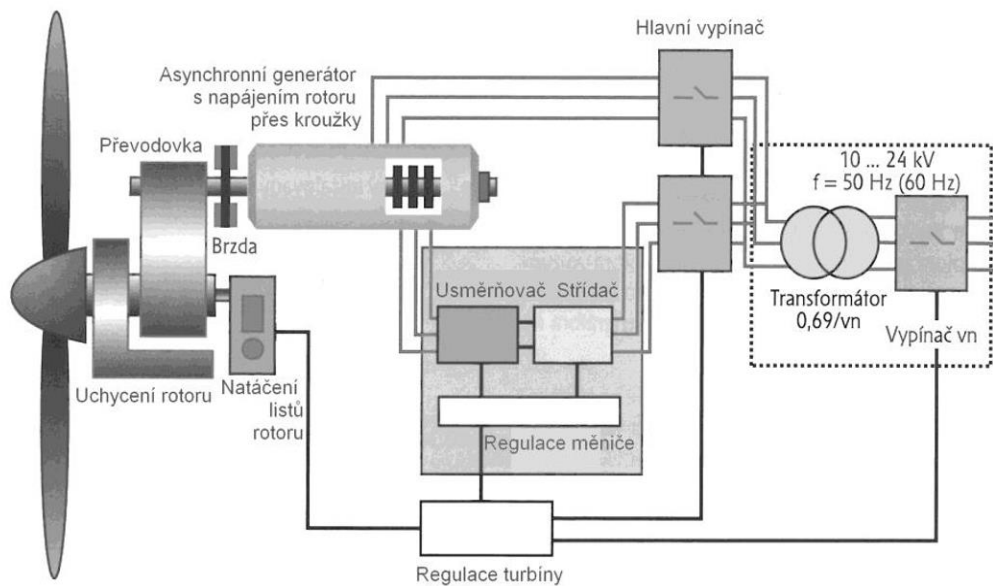
Synchronní generátory jsou vybaveny usměrňovačem a střídačem nastaveným na frekvenci sítě z důvodu použitelnosti v širokém spektru otáček. Tyto typy generátorů se využívají pro elektrárny velmi malých i velkých výkonů. Pro elektrárny malých výkonů je typické, že jsou tvořeny více pólovými generátory s permanentními magnety, usměrňovačem a v některých případech i střídačem. Elektrárny velkých výkonů tvoří synchronní generátor s budícím vinutím na rotoru a bývá připojen bez převodovky k turbíně. Celkový rozdíl je tedy v tom, že se zmenší objem gondoly, ale vzroste objem generátoru.[6]



Obr. 1.13: Synchronní generátor poháněný přímo turbínou [6]

### 1.6.2 Asynchronní generátory

Tyto typy generátorů jsou oproti synchronním spolehlivější, levnější, konstrukčně i provozně jednodušší. Asynchronní generátory mají však také své nedostatky, mezi něž patří například menší rozpětí otáček. U elektráren středních a velkých se používají generátory s kotvou nakrátko. Pro zvětšení rozsahu otáček se využívají pod synchronní kaskády pro napájení rotoru. [6]



Obr. 1.14: Asynchronní generátor s napájeným rotorem [5]

## 1.7 Regulace výkonu

### PITCH = regulace natáčením listů

Jsou založeny na principu, že elektronický regulátor neustále měří výkon zařízení. V případě překročení nastavitelných mezí je uveden do provozu hydraulický systém, který nastaví dle potřeby lopatky rotoru. Jestliže je výkon velký než povolená mez, dochází k situaci, kdy při vychýlení dojde ke snížení vztlaku na lopatkách, a tím zvýšení jejich radikálního odporu a snížení momentu hřídele (natočení listů rotoru ze směru větru). Pokud zeslábnou, listy rotoru se natočí lehce do směru větru, z čehož plyne, že listy rotoru musí být otočné kolem své podélné osy. Natáčení listů slouží k využití maximálního výkonu při každé rychlosti větru. [15] [24]

### STALL = regulace odtržením proudu vzduchu

Jedná se o konstrukčně jednodušší typy než předchozí turbíny PITCH. Nemají regulovatelné natáčení listů, tudíž listy rotoru jsou pevně ukotveny k hlavě s nastaveným úhlem. Regulace výkonu je zde řešena elastickými změnami, které vnikají na koncích lopatek, vznikající nárůstem rychlosti větru. Následkem je pak zvýšení úhlu náběhu na konce lopatek a dochází k postupnému odtržení proudu vzduchu od lopatek. Při odtržení proudu dochází ke změně laminárního proudění na turbulentní. Dochází k snížení vztlakové síly, která pohání rotor. Mezi výhody můžeme zařadit například jednoduchý princip konstrukce, která neobsahuje pohyblivý díl (natáčení listů) a s tím vázanou komplikaci systému regulace. Spolehlivě regulují výkon a mají nenáročnou údržbu. Jejich nevýhodou je, že vrtule není schopna samovolně startovat a bývá uváděna do pohybu elektrickým motorem. [15] [24]

### ACTIVE STALL

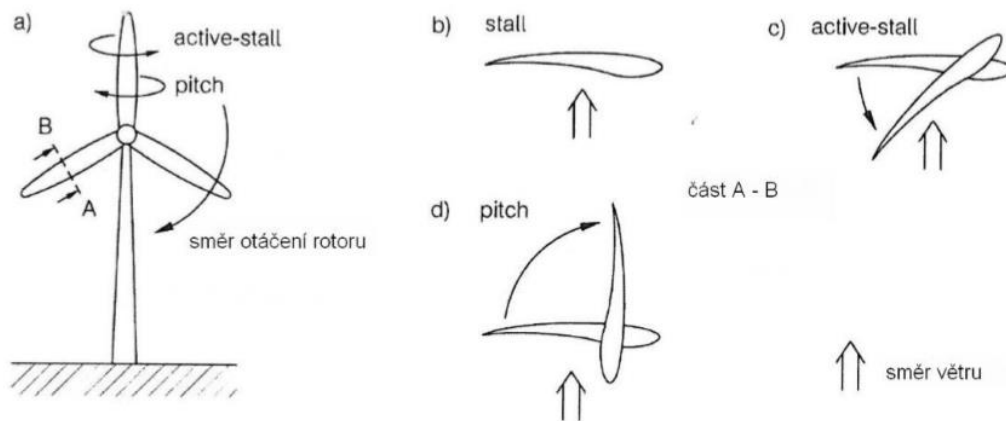
Regulace výkonu je podobná regulaci PITCH, jak při rozběhu turbíny tak při malých rychlostech proudění vzduchu, avšak jejich rozdíl spočívá v tom, že při dosažení jmenovitého výkonu se listy otáčejí proti směru větru. To způsobí zvýšení úhlu náběhu větru a také k zesílení odtržení proudu vzduchu od lopatek a dojde k poklesu vztlaku na listech rotoru. Tímto způsobem se odrazí přebytečná energie větru a lze reagovat mnohem rychleji na neočekávané nárůsty rychlosti větru. [15] [24]

## STALL-PITCH

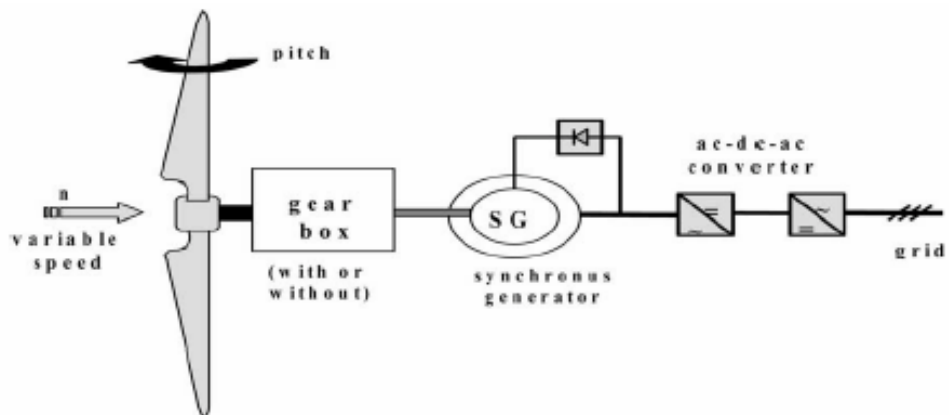
Jedná se o kombinovanou regulaci STALL-PITCH, tato regulace vyžaduje, aby turbína umožnila natáčení lopatek a přitom splňovala konstrukční požadavky pro regulaci STALL. Systém regulace PITCH probíhá při rozběhu a při nízkých rychlostech turbíny. Při zvýšení rychlosti dochází k přetěžování listů a pomocí regulace STALL dochází ke změně geometrie listů rotoru a tím ke snížení moment otáčení. Při vyšších rychlostech se pomocí natáčení listu ze směru větru udržuje maximální výkon, což je velkou výhodou této kombinované regulace. [15]

## PITCH-STALL

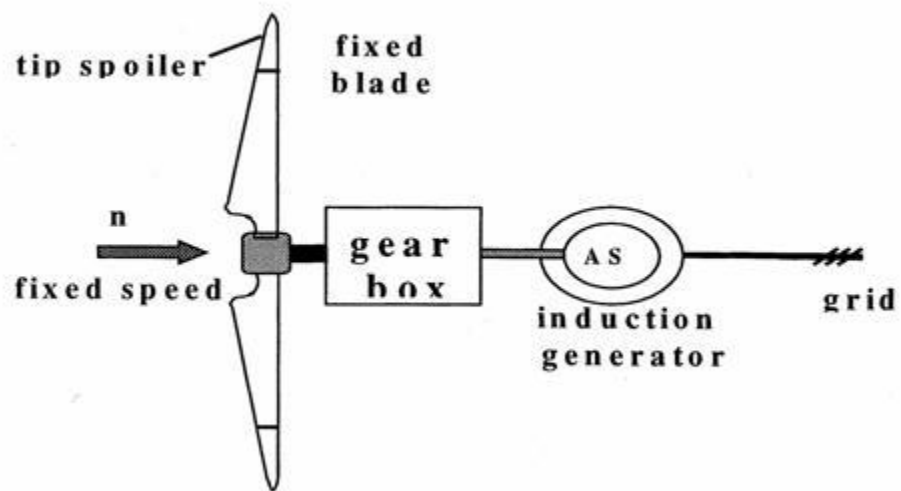
Princip této regulace je obdobný jako u předešlé kombinované regulace STALL-PITCH. Při nízkých otáčkách se využívá regulace PITCH. Při vysokých otáčkách dochází k natáčení listů a tím k udržování optimálního výkonu. Jestliže nastane ještě větší zvýšení rychlosti větru, dojde k sepnutí regulace STALL. Mezi výhody je možné zařadit snížení deformace lopatek a snížení hlučnosti. [15]



Obr. 1.165: Princip regulace STALL, PITCH a ACTIVE-STALL [7]



Obr.1.15: Princip regulace PITCH [29]



Obr. 1.177: Princip regulace STALL [30]

## 2 ENERGIE SLUNCE

### 2.1 Sluneční energie

Sluneční záření je možné zařadit mezi nejdostupnější, nejčistší obnovitelný zdroj energie na Zemi a také je velmi příznivý vůči životnímu prostředí. Sluneční energie je ve skutečnosti elektromagnetické záření. Rozsah zářivé energie se pohybuje od nejmenších vlnových délek až po délky metrové, tedy od rentgenového či ultrafialového záření až po rádiové délky záření. Mezi nejčtenější záření je možné zařadit infračervené a světelné, jejichž vlnová délka záření se pohybuje o vlnové délce v rozsahu 0,2-3  $\mu\text{m}$ . Lidské oko je schopno vnímat pouze záření v rozsahu 380 – 780 nm. Solární záření rozdělujeme prakticky do dvou složek. První složkou je přímé sluneční záření ( $I_p$ ) a druhou složkou je rozptýlené (difuzní) sluneční záření ( $I_D$ ). Pro intenzitu difuzního solárního záření platí, že vzrůstá se součinitelem znečištění ( $Z$ ). Tabulka hodnot součinitele znečištění je uvedena níže. [15]

Tab. 2.1: Hodnoty součinitele znečištění  $Z$  [3]

Typ oblasti	Součinitel znečištění $Z$
místa nad 2000 m.n.m.	2,0
místa nad 1000 m.n.m.	2,5
venkov bez průmyslových exhalací	3,0
města a průmyslová střediska	4,0
silně znečištěné prostředí	$\geq 5,0$

Intenzita slunečního přímého záření, která dopadá na plochu kolmou k paprskům ( $I_{PN}$ ), lze popsat rovnicí (2.1).

$$I_{PN} = I_0 \cdot A^{-Z} \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (2.1)$$

Kde:

- $I_0$  - je solární konstanta ( $1360 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ )
- $A^{-Z}$  - je součinitel závislý na výšce Slunce nad obzorem
- $Z$  - je součinitel znečištění

**Pro přímé sluneční záření ( $I_p$ ) platí:**

Poté můžeme odvodit vztah pro výpočet přímé intenzity slunečního záření pro obecně položenou plochu (2.2).

$$I_p = I_{PN} \cdot \cos \gamma \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (2.2)$$

Kde:

- $\gamma$  – je úhel od normály osluněné plochy ke slunečním paprskům

**Pro difuzní sluneční záření platí [11]:**

$$I_D = 0,5 \cdot (1 - \cos \alpha) \cdot I_{Dh} + 0,5r \cdot (1 + \cos \alpha) \cdot (I_{Ph} - I_{Dh}) \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (2.3)$$

$$I_{Ph} = I_{PN} \cdot \sin h \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (2.4)$$

$$I_{Dh} = 0,33 \cdot (I_0 - I_{PN}) \cdot \sin h \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (2.5)$$

$$h = 90^\circ - \theta \quad [^\circ] \quad (2.6)$$

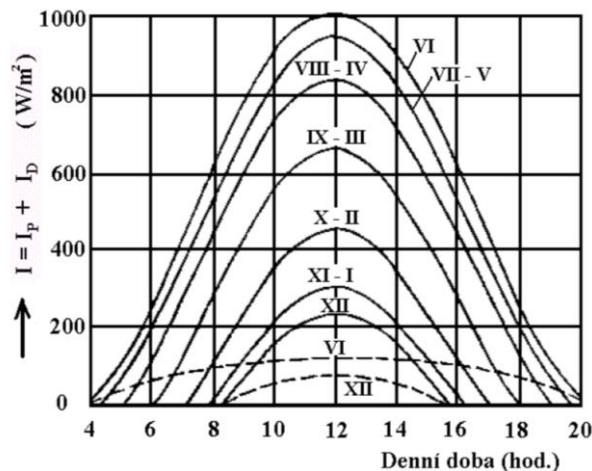
Kde:

- $I_D$  - je intenzita slunečního záření
- $I_{Dh}$  - je intenzita slunečního záření na vodorovnou plochu
- $I_{Ph}$  - je intenzita přímého záření na vodorovnou plochu
- $r$  - je reflexivní schopnost okolních ploch (albedo)
- $h$  - je výška slunce nad obzorem
- $\alpha$  - je úhel sklonu plochy od vodorovné roviny

**Pro celkové (globální) záření platí:**

$$I = I_D + I_p \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (2.7)$$

Pro výpočty intenzity slunečního záření existuje řada způsobů, z nich nejpřesnější započítávají součinitele znečištění  $Z$  a refrakcí (zakřivení slunečních paprsků při průchodu atmosférou). Obrázek níže popisuje celkový průběh intenzity slunečního záření dopadající na vodorovnou plochu v čase, při  $Z=3$  (součiniteli znečištění). Zakreslené hodnoty jsou typické pro oblast zeměpisné šířky  $50^\circ$ , kde jednotlivé křivky znázorňují den v měsíci za jasného a slunečného dne. Difuzní záření je zakresleno čerchovanou čarou v měsících červen a prosinec. Tato hodnota nepřekročí hodnoty  $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ . [11]



Obr. 2.1: Celková intenzita slunečního záření na vodorovnou plochu [11]

Tab. 2.2: Typické hodnoty intenzit celkového záření [11].

Počasi	Intenzita	Difuzní podíl
[ - ]	[ W/m2 ]	[ % ]
Modré nebe	800-1000	10
Zamlžené nebe	600-900	až 50
Mlhavý podzimní den	100-300	100
Zamračený zimní den	50	100
<b>Celkový roční průměr</b>	<b>600</b>	<b>50-60</b>

## 2.2 Fotoelektrický efekt

Fotovoltaický článek využívá fotoelektrického jevu. Vzniká při vzájemném působení elektromagnetického záření a hmoty, při čemž dochází k pohlcování kvazi-částic světla „fotonů“ hmotou a následným uvolněním elektronů do vodivostního pásu atomu. Abychom transformovali energii proudu fotonů ze slunečního záření do energie

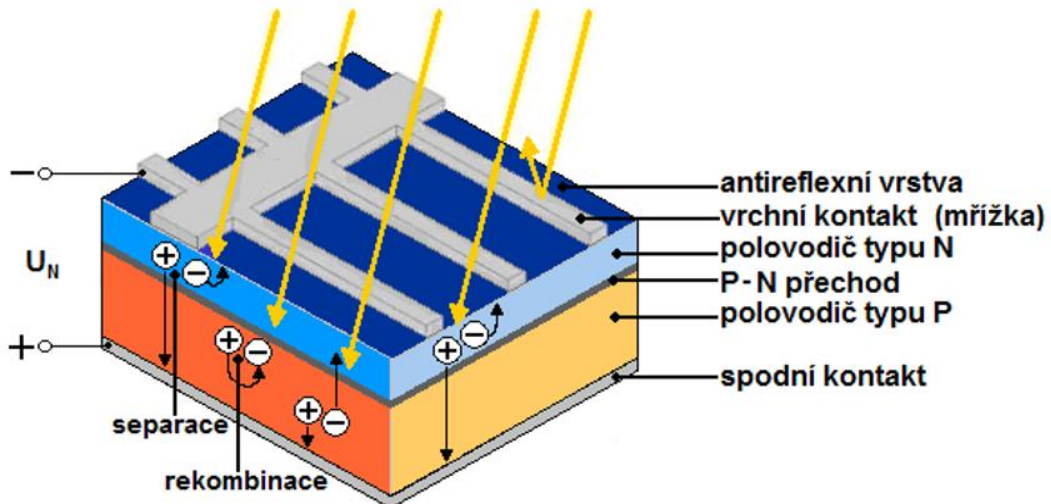
pohybujících se elektronů, tedy elektrického proudu, je zapotřebí:

- a) Dostatečný počet volných elektronů
- b) Elektrický potenciál, který je uvede do pohybu (pole)

Fotony slunečního záření mohou předat svoji energii elektronu v kovu či polovodiči. Jestliže budeme mít dostatečnou energii, dojde k vyražení elektronu z povrchu materiálu a tím po sobě zanechá díru, což vede ke vzniku kladného náboje. Tento jev se nazývá fotoelektrický jev.

Fotovoltaické články jsou vlastně polovodičové diody s velkou plochou P-N přechodu, orientovaný kolmo na plochu článku. Jsou to elektrochemické struktury, které umožňují nábojovou separaci. Jejich princip spočívá v tom, že materiál absorbuje energii z dopadajícího fotonu a vytvoří pár elektron-díra, tedy při dopadu slunečního záření o dostatečně velké energii, která musí být větší než šířka zakázaného pásu, dojde k uvolnění elektronu a k němu odpovídající množství vznikne děr a zbytek energie se přemění na teplo. Pokud by nastala situace, kdy energie fotonu bude mít menší energii než šířka zakázaného pásu fotovoltaického článku, ke generaci pár elektron-díra nedojde. V dalším kroku přichází na řadu nábojová separace (separace vygenerovaného elektronu a díry). Prostřednictvím elektrického pole se elektrony z polovodiče typu N přemisťují do polovodiče typu P. Elektron je přitahován vnitřním elektrickým polem P-N přechodu k jedné elektrodě a díry jsou přitahovány k druhé elektrodě.

Pro maximální proudovou hustotu  $J_{ph}$  pak platí, že energie dopadajícího fotonu bude větší, než energie zakázaného pásu  $E_{GAP}$ . Z toho tedy vyplývá, čím větší bude šířka zakázaného pásu, tím lépe se transformuje energie elektronového páru elektron-díra a nedochází k samovolnému zániku tohoto páru. Vhodná hodnota pro  $E_{GAP} = 1,1$  eV. [9] V této hodnotě energie generuje páry elektron-díra a asi polovina solární energie se přemění na elektrickou energii. [10]

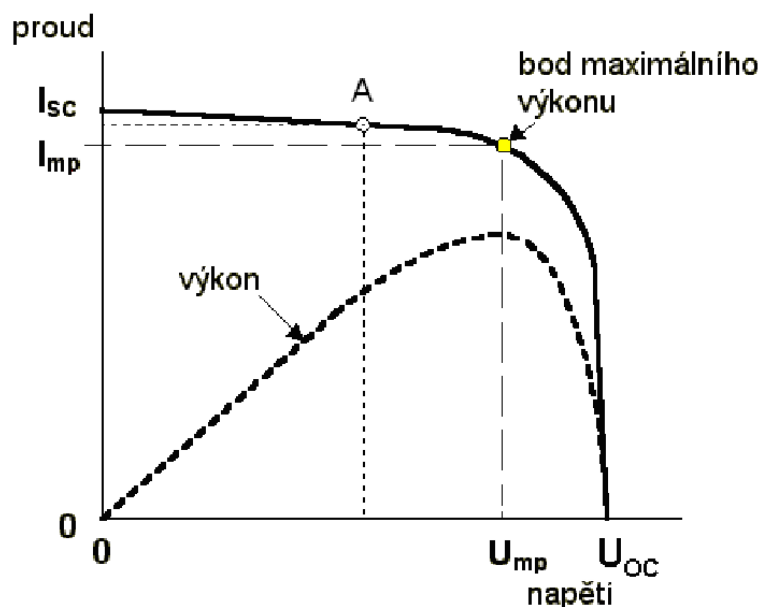


Obr. 2.2: Vznik fotovoltaického napětí na struktuře s přechodem PN [14]

### 2.3 Voltampérová charakteristika fotovoltaického článku

Z voltampérové charakteristiky je možné vyčíst základní informace o FV článku. Mezi hraniční veličiny, které se na této křivce nachází, je možné zařadit proud nakrátko ( $I_{sc}$ ) a napětí naprázdno ( $U_{oc}$ ). Proud nakrátko nám znázorňuje tzv. zkratový proud (maximální proud). Velikost tohoto proudu je dána intenzitou slunečního záření, dodávaného ze solárního článku. Jestliže ke článku nebude připojen žádný spotřebič,

je možné naměřit maximální napětí na článku, tedy napětí na prázdko  $U_{OC}$ . Výkon solárního článku se pak počítá jako součin napětí a proudu. Největší dosažitelný výkon se nazývá maximální výkon, označován MPP o hodnotě proudu  $I_{MP}$  a napětí  $U_{MP}$ . Průběh výkonu FV článku je ovlivněn teplotou článku, spektrem světla a výkonovou hustotou slunečního záření, proto se výkon článků měří při definovaných podmínkách (uváděno i výrobcí), které jsou následující: teplota SČ (solárního článku)  $STC=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , spektrum záření (Air Mass)  $AM = 1,5$  a výkonové hustotě slunečního záření (intenzitě)  $I = 1000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . [14] [15]



Obr. 2.3: V-A charakteristika osvětleného FV článku [19]

Výkon FV článku je možné popsat rovnicí (2.8).

$$P_{MPP} = U_{MP} \cdot I_{MP} \quad (2.8)$$

Mezi charakteristické hodnoty FV článku je dále možné zařadit činitel plnění FF (Fill Factor) a účinnost ( $\eta$ ). [15]

Rovnice pro výpočet FF (2.9).

$$FF = \frac{U_{MP} \cdot I_{MP}}{U_{OC} \cdot I_{SC}} [-] \quad (2.9)$$

Kde:

- $U_{MP}$  - je napětí maximálního výkonu ve (V)
- $I_{MP}$  - je proud maximálního výkonu v (A)
- $U_{OC}$  - je napětí na prázdko (nulový proud) ve (V)
- $I_{SC}$  - je proud na krátko (nulové napětí) v (A)

**Fill Factor** představuje elektrickou účinnost FV panelu a je závislý na řadě hledisek, které souvisí i s technologickou kvalitou výroby např.: morfologie materiálu, odpor aktivní plochy, kvalita kontaktů aj. Při změření, vynesení V-A charakteristiky a výkonového průběhu je možné stanovit činitel plnění FF, z čehož získáme představu o kvalitě proměřovaného FV panelu či článku. [15] [14]

Rovnice pro výpočet účinnosti fotovoltaického článku (2.10).

$$\eta = \frac{U_{MP} \cdot I_{MP}}{P_{in}} \cdot 100 = \frac{FF \cdot U_{OC} \cdot I_{SC}}{P_{in}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.10)$$

Kde:

$P_{in}$  - je výkon dopadajícího záření

## 2.4 Základní typy fotovoltaických článků

### 2.4.1 První generace

Do první generace se řadí fotovoltaické články, které se vyrábí z destiček monokrystalického křemíku, kde je vytvořen velkoplošný P-N přechod. Vyznačuje se dobrou účinností, která se pohybuje okolo 14-17 % a dlouhodobou stabilitou. V současné době je stále hojně využívanou generaci FV článků pro fotovoltaické systémy (velké instalace). Mezi velké nevýhody první generace můžeme zařadit spotřebu velkého množství čistého křemíku a s tím spojenou náročnou a nákladnou výrobu. [15]

### 2.4.2 Druhá generace

Jedná se o fotovoltaické články, jejichž snahou je snížení potřebného množství čistého křemíku při výrobě, a tím snížit i celkové náklady a náročnost výroby. Články druhé generace se vyznačují tenčí aktivní polovodičovou vrstvou. K výrobě tenkovrstvých článků se využívá polykrystalický (poly-Si), amorfni (a-Si) a mikrokystalický ( $\mu$ c-Si) křemík. Jejich výhodou je pružnost ohebnost. Nicméně jejich velkou nevýhodou je znatelně snížená účinnost oproti první generaci článků, tedy asi 10 %, která s narůstajícím časem klesá a také jejich stabilita. [15]

### 2.4.3 Třetí generace

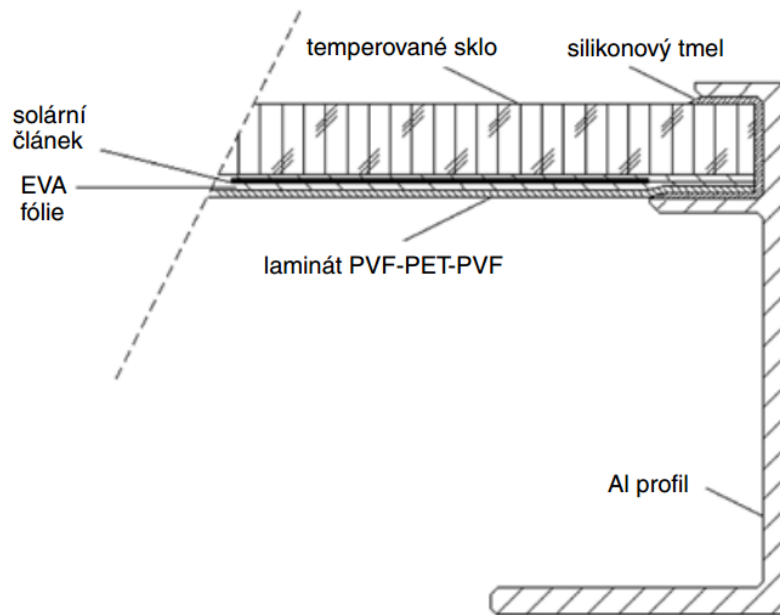
Třetí generace se vyznačuje tím, že se snaží využít k nábojové separaci jiné metody než P-N přechod. Do této generace je možné zařadit organické články, tandemové články, Grätzelove články aj. Tandemové články možné popsat jako vícevrstvé fotovoltaické články, které jsou schopny využívat širokou část slunečního spektra. Jednotlivé vrstvy efektivně využívají světlo v určitém rozsahu vlnových délek a zbylou část propouští do další vrstvy fotovoltaického článku. Vyznačují se vysokou účinností a nízkou cenou. [15]

## 2.5 Konstrukce fotovoltaických panelů

Fotovoltaický panel se skládá z velmi citlivých fotovoltaických článků. Proto, aby tyto články plnily svoji funkci, zapouzdřují se do fotovoltaických panelů nebo modulů, které je chrání před povětrnostními vlivy (mechanické poškození, koroze, kroupy aj.). Přední strana panelu bývá zpravidla pokryta tvrzeným sklem, které slouží jako prevence před povětrnostními vlivy a také má výbornou propustnost světelného záření (prakticky neovlivňuje funkčnost FV článků). Na tvrzené sklo se zpravidla nanáší tzv. fólie EVA (etylvinylacetát) a na ni se skládají propojené články, které mohou být buď v sériovém, nebo paralelním zapojení. U sériového zapojení spojuje kovový pásek přední část jednoho článku se zadní částí druhého článku. Na propojené články se opět nanáší EVA fólie.

Zadní strana je tvořena z laminátové kompozice PVF-PET-PVF (polyvinylidenfluorid-olyetyléntereftalát-polyvinylidenfluorid). Jakmile je vše připravené a urovnané, vyčerpá se vzduch mezi těmito vrstvami a celý panel se poté zahřeje na teplotu tání EVA fólie, která se roztaví a následně zaplní prostor kolem článků (prostor mezi předním a zadní laminátovou stěnou). Nakonec se panel orámuje hliníkovým rámem, utěsní silikonovým tmelem a nakonec se opatří rozvodovou skříňkou s výstupními kontakty. Panely zhotovené touto metodou jsou pak vodotěsné a prachu vzdorné. [12] [13]

**řez fotovoltaickým panelem**



Obr. 2.4: Schéma konstrukce fotovoltaického panelu [12]

# 3 TEORIE MĚŘENÍ

## Energie a výkon větru

Energii pohybující se hmoty, je možné vyjádřit dle její kinetické energie (3.1).

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2; [J] \quad (3.1)$$

Kde:

- $E_k$  - je kinetická energie
- $m$  - je hmotnost proudícího vzduchu [kg]
- $v$  - je rychlost větru [ $m \cdot s^{-1}$ ].

Pro hmotnost proudícího vzduchu pak platí (3.2).

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot S_k \cdot s; [kg] \quad (3.2)$$

Kde:

- $\rho$  - je hustota vzduchu [ $kg \cdot m^{-3}$ ]
- $V$  - je objem vzduchu [ $m^3$ ]
- $S_k$  - je plocha kolmá ke směru proudění [ $m^2$ ]
- $s$  - je vzdálenost, kterou urazí vzduch ve směru proudění [m]

Rychlost větru je možné spočítat, jako podíl dráhy za jednotku času (t), tedy (3.3).

$$v = \frac{s}{t}; [m \cdot s^{-1}] \quad (3.3)$$

Z výše uvedených vztahů, je možné odvodit rovnici pro výkon větru protékajícího jednotkovou plochou, ale nejdříve si pro lepší pochopení vyjádříme všeobecnou rovnici pro výkon větru (3.4).

$$P = \frac{E_k}{t}; [W] \quad (3.4)$$

Po dosazení kinetické energie dostaneme rovnici (3.5).

$$P_w = \frac{E}{S_k \cdot t} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{S_k \cdot s}{S_k \cdot t} \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3; [W] \quad (3.5)$$

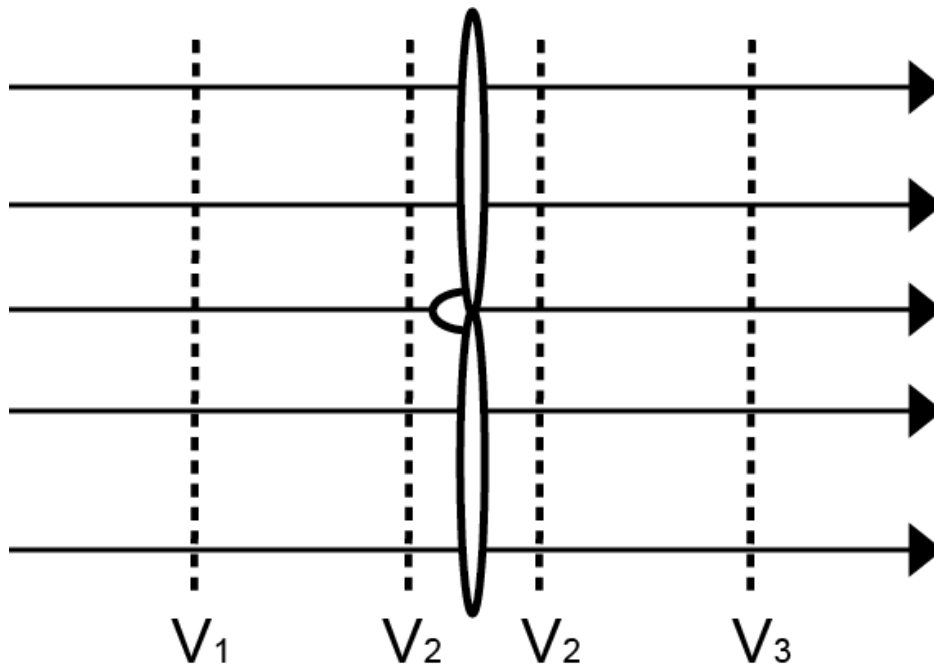
Kde:

- $\rho$  - hustota větru, která má hodnotu  $1,2931 kg \cdot m^{-3}$
- $t$  - čas [s]

Z výsledné rovnice  $P_w$  vyplývá, že výkon větru protékající jednotkovou plochou je přímo úměrný hustotě vzduchu (závislá na tlaku a teplotě) a třetí mocnině rychlosti větru. Výrobu elektrické energie zajišťuje turbína, která odebírá energii větru. Ideální by bylo přeměnit tuto energii stoprocentně na užitečnou, což v reálném případě není možné, protože proudící vítr se před překážkou nezastaví, nýbrž proudí kolem ní. Na maximálně možný stupeň využití větrných zařízení přišel v roce 1919 Albert Betz, zkoumáním aerodynamických sil. Betzův limit se pohybuje okolo 59,3 % a platí pro všechny větrem poháněné stroje. Není tedy možné, aby účinnost větrné turbíny byla vyšší, než tento stanovený limit. V případě, že budeme mít větrnou turbínu otáčející se v horizontální rovině s definovanou plochou a listy vrtule, orientovanou kolmo na směr protékajícího vzduchu, tak rychlost větru  $v_1$  bude v dostatečné vzdálenosti před touto turbínou neměnná a rychlost  $v_3$  v opačné vzdálenosti za rotorem. Z oblasti rotoru neboli disku pak vyplývá,

že rychlost toku vzduchu  $v_2$  se vypočítá, jako aritmetický průměr hodnot  $v_1$  a  $v_3$ , tedy podle vzorce (3.6):

$$v_2 = \frac{v_1 + v_3}{2} \quad (3.6)$$



Obr. 3.1: Rozložení rychlosti větru před větrnou turbínou a za ní

Tuto skutečnost popisuje Rankine – Froudeův teorém, který říká, že při průchodu vzduchu diskem nedochází ke změnám rychlosti a to proto, aby docházelo k hromadění vzduchu nebo vzniku vakua. Rychlost  $v_2$  je konstantní, jak těsně před diskem tak i za diskem. Celou situaci lze rozepsat numericky následovně:

Mějme energii vzduchu před diskem jako  $E_1$  (3.7) a energii za diskem jako  $E_3$  (3.8) a poměr hmoty, která prochází diskem o ploše  $S$ .

$$E_1 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_1^2; [J] \quad (3.7)$$

$$E_3 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_3^2; [J] \quad (3.8)$$

Určení hmotnostního toku (3.9).

$$m = \rho \cdot S \cdot v_2 = \rho \cdot S \cdot \frac{v_1 + v_3}{2}; [kg \cdot s^{-1}] \quad (3.9)$$

Kde:

- $m$  - hmotnostní tok [kg/s]
- $\rho$  - hustota větru, která má hodnotu  $1,2931 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- $S$  - plocha disku vrtule [m<sup>2</sup>]

Potom lze dosadit do vzorce pro výpočet odebraného výkonu větrné turbíny  $P$ , hmotnostní tok a po odvození dostaneme rovnici (3.10).

$$P_{MAX} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (v_1^2 - v_3^2) = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot S \cdot (v_1^2 - v_3^2) \cdot (v_1 + v_3); [W] \quad (3.10)$$

Položíme-li odebraný výkon ku výkonu nenarušeného větru o stejné ploše disku  $S$ , pak dostaneme rovnici (3.11). Jestliže podělíme  $P_{MAX}$  a  $P_w$ , tak dostaneme maximálně možný

odebíraný výkon, kde poměr rychlostí před diskem  $v_1$  ku rychlosti  $v_2$  musí být roven  $1/3$ , což znamená že rychlost větru bude trojnásobně větší před rovinou disku, než za ní (3.12).

$$\frac{P_{MAX}}{P_W} = \frac{\frac{1}{4} \rho \cdot S \cdot (v_1^2 - v_2^2) \cdot (v_1 + v_2)}{\frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot v_1^3} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2\right]; [-] \quad (3.11)$$

Jestliže tomu tak bude, dostaneme rovnici pro Betzův limit, tedy maximální výkon podle (3.12).

$$\frac{P_{MAX}}{P_W} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{1}{3}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{1}{3}\right)^2\right] = \frac{16}{27} \quad (3.12)$$

Maximální teoretický výkon VTE ( $P_{BETZ}$ ) dostaneme tak, že Betzův limit vynásobíme výkonem větru (3.13) a známe-li i plochu disku platí rovnice (3.14), ze které dostaneme ideální maximální výkon.

$$P_{Betz} = \frac{P_{MAX}}{P_W} = \frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 = \frac{16}{54} \cdot \rho \cdot v^3; [W] \quad (3.13)$$

$$P_i = \frac{P_{MAX}}{P_W} = \frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 = \frac{16}{54} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3; [W] \quad (3.14)$$

Kde:

$P_{Betz}$  - je Betzův maximální teoretický výkon

$P_i$  - je ideální maximální teoretický výkon

### Účinnost VE

Účinnost se řadí mezi významné ukazatele pro hodnocení větrných turbín. Je daná poměrem vyráběného výkonu ku výkonu větru, tedy výkonu  $P$ , který se dodává do zátěže ku výkonu referenční zátěži  $P_W$ .

$$\eta = \frac{P}{P_W} \cdot 100 = \frac{U \cdot I}{\frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot v_1^3} \cdot 100; [%] \quad (3.15)$$

Účinnost jakéhokoliv větrného zařízení bývá omezena Betzovým limitem  $\eta_{Betz}$  (přibližně 59,3 %). Provedeme-li součin Betzova limitu a účinnosti dané turbíny  $\eta_{turbíny}$ , dostaneme celkovou účinnost  $\eta$ , podle rovnice (3.16).

$$\eta = \eta_{turbíny} \cdot \eta_{Betz}; [%] \quad (3.16)$$

$$\eta_{Betz} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v_1^3 \cdot 100; [%] \quad (3.17)$$

$$\eta_{Turbíny} = \frac{P}{P_i} = \frac{U \cdot I}{\frac{16}{54} \rho \cdot S \cdot v^3} \cdot 100; [%] \quad (3.18)$$

Kde:

$\eta_{Turbíny}$  - je účinnost udávaná v dokumentaci větrné turbíny (vztažená k ideální Betzově turbíně)

### Budící rotace

Pro generovaný výkon tedy platí (3.19).

$$P_{gen} = M \cdot \omega; [W] \quad (3.19)$$

Kde:

$P_{gen}$  - je generovaný výkon

$M$  - je krouticí moment [Nm]

$\omega$  - je úhlová rychlost [rad]

Krouticí moment vyjadřuje působení síly na vzdálený bod od osy otáčení (hřídele) a udává se v jednotkách Nm, což znamená, že při 1 Nm působí hřídel na vzdálený bod 1 m od osy silou 1 N.

Jestliže dochází ke snižování krouticího momentu, dojde k nárůstu úhlové rychlosti, což vede ke snížení ztrát energie, která je potřeba pro uvedení turbíny do pohybu. S nárůstem úhlové rychlosti také souvisí poměr rychlostních špiček  $\lambda$  dle (3.20).

$$\lambda = \frac{R \cdot \omega}{v_1}; [-] \quad (3.20)$$

## 4 MĚŘICÍ PRACOVISŤE

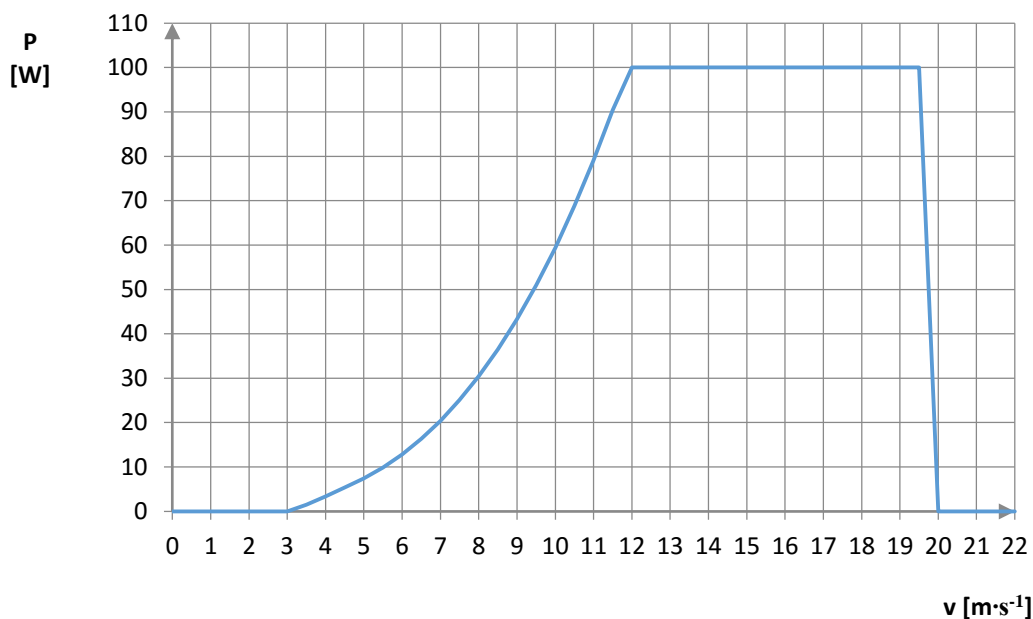
Měřicí pracoviště se skládá z jednoho fotovoltaického modulu A-130, větrné elektrárny JPT-100 a měřicích přístrojů. Všechny tyto komponenty jsou spolu propojeny a naměřené hodnoty jsou posílány do PC a zpracovány v programu HP VEE.

### 4.1 Větrná turbína JPT-100

Malá větrná turbína JPT-100, vyrobená společností Jetpro Technology, Inc efektivně přeměňuje větrnou energii k výrobě elektřiny a disponuje pětistou vrtulí optimálního provedení. Spolehlivou a vysokou účinnost výkonu zajišťuje permanentní magnetický generátor. Z obecné specifikace vyplývá, že jmenovitý výkon činí 100 W. Této hodnoty výkonu je možné dosáhnout při rychlosti větru v rozmezí 12 - 20 m/s. Spouštěcí rychlost větru, která roztočí turbínu je 3 m/s. Mezní neboli vypínací rychlost byla nastavena na hodnotu 20 m/s. Jestliže dojde k překročení této rychlosti, dojde k přepětí, které aktivuje elektromagnetickou brzdu, která sníží otáčky rotoru. Výstupní napětí je uváděno 12 V (stejnoseměrného). Celková hmotnost malé větrné turbíny je 6 kg. [8]



Obr. 4.1: Větrná turbína JPT-100 [31]



Obr. 4.2: Graf závislosti výkonu na rychlosti větru [8]

Tab. 4.1: Technické parametry modulu JPT-100 [8].

Počet PM generátorů	[-]	1
Počet listů	[-]	5
Jmenovitý výkon	[W]	100
Výstupní napětí	[Vdc]	12
Spouštěcí rychlost větru	[m/s]	3
Jmenovitá rychlost větru	[m/s]	12
Mezní rychlost větru	[m/s]	20
Brzda	[-]	Elektromagnetická
Průměr rotoru	[m]	0,68
Rozměry	[mm]	680x648x725
Váha	[kg]	6

**Malá větrná turbína se skládá z následujících šesti částí:**

- 1) Vrtule
- 2) Generátor
- 3) Gondola
- 4) Směrovka
- 5) Kluzný kroužek
- 6) Jednotka pro regulaci výkonu

Princip činnosti malé větrné turbíny spočívá v působení aerodynamických sil na listy rotoru. Po roztočení rotoru se přemění větrná energie na mechanickou rotační sílu, což má za následek otáčení rotoru uvnitř generátoru. Pro výrobu elektrické energie se používá více pólový synchronní generátor s permanentními magnety, kde se mechanická rotační síla převádí na elektrickou energii. Uvnitř větrné gondoly se nachází integrovaný okruh (IC), který byl implementován za generátor. Jeho hlavní úlohou je, aby usměrňoval vyrobený střídavý proud na stejnosměrný. Při detekci nadproudu se odesílá signál zkratu,

který spustí elektromagnetickou brzdou, aby nedošlo k havárii či destrukci větrné turbíny. Další součástí VTE je sběrací kroužek, který je instalován v podstavci turbíny. Jeho hlavní úlohou je minimalizovat čelní nápor větru. U malé větrné elektrárny je maximální účinnosti transformace dosahováno orientací do směru větru. V případě, že dojde k nedodržení této podmínky, dochází ke ztrátám výkonu. Směrové kormidlo se natáčí do směru větru a je připojeno za modul turbogenerátoru. Jednotka pro regulaci výkonu reguluje napětí v rozmezí 0~25 Vdc. Teoretickou účinnost malé větrné elektrárny, udává výrobce okolo 38 % ( $\eta_t=0,38$ ). [8]

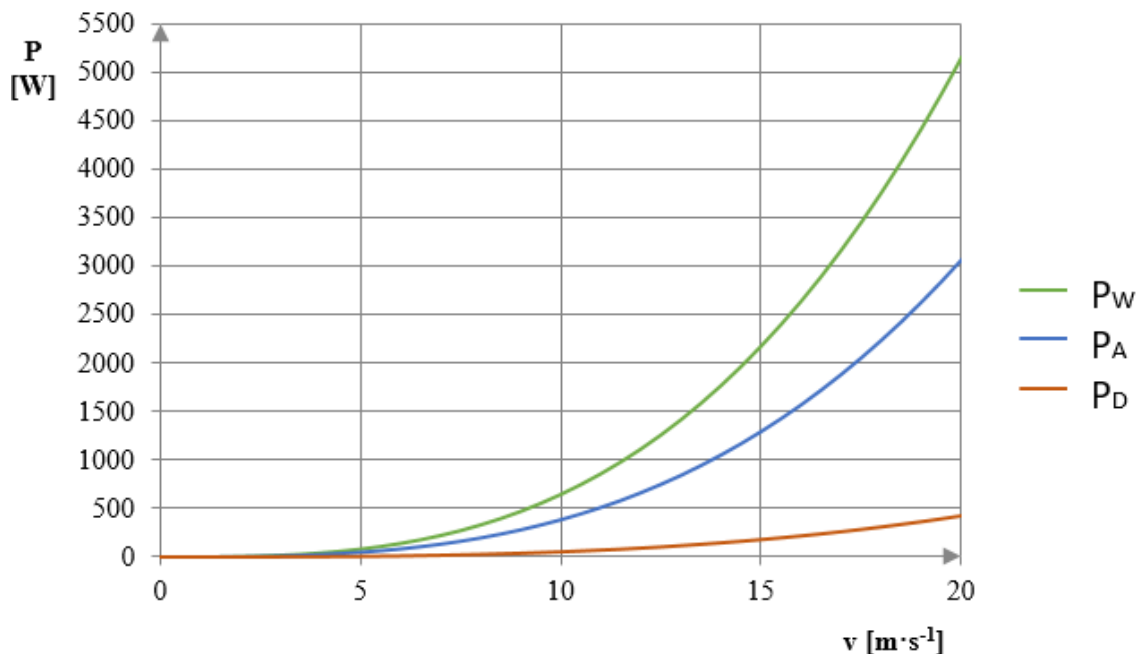
V případě, že známe hodnotu hustoty větru  $\rho_v = 1,29 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , plochu vrtule  $S = 0,363 \text{ m}^2$  a Betzův limit ( $16/27$ ), je možné vypočítat teoretickou velikost jmenovitého výkonu rotoru  $P_D$  při určité rychlosti větru pomocí rovnice (4.1):

$$P_D = \frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_v \cdot v^3 \cdot S \cdot n_t; [W] \quad (4.1)$$

Tabulka pro srovnání jednotlivých výkonů je uvedena níže. Maximální výkon větrné turbíny JPT-100 je však stanovena pouze na 100 W a proto následující dopočtené hodnoty můžeme brát pouze jako inspirativní. Na Obr. 4.3 je pak uvedeno grafické znázornění jednotlivých výkonů.

Tab. 4.2: Vypočítané teoretické hodnoty výkonů v závislosti na rychlosti větru [8]

Rychlost větru [m·s <sup>-1</sup> ]	P <sub>D</sub>	P <sub>W</sub>	P <sub>A</sub>
0	0,000	0,000	0,000
1	0,053	0,647	0,383
2	0,423	5,172	3,065
3	1,428	17,457	10,345
4	3,384	41,379	24,521
5	6,609	80,819	47,893
6	11,421	139,655	82,758
7	18,136	221,767	131,417
8	27,072	331,034	196,168
9	38,546	471,335	279,310
10	52,875	646,550	383,141
11	70,377	860,558	509,960
12	91,368	1117,238	662,067
13	116,166	1420,470	841,760
14	145,089	1774,133	1051,338
15	178,453	2182,106	1293,100
16	216,576	2648,269	1569,344
17	259,774	3176,500	1882,370
18	308,366	3770,680	2234,477
19	362,669	4434,686	2627,962
20	422,999	5172,400	3065,126



Obr. 4.3: Graf závislosti teoretických výkonů na rychlosti větru.

### Terénní průzkum

Terénní průzkum je možné rozdělit do čtyř kroků, pomocí kterých můžeme analyzovat optimální místo a výšku, pro správnou funkci turbíny. [8]

V prvním kroku je nutné provést analýzu výskytu proudění větru v daném místě. Před instalací malé turbíny je třeba provést aktuální průzkum směru a proudění větru v různé výšce (10 m, 30 m, 50 m). Jestliže nastane situace, kdy rychlost větru bude vyšší než 4 m/s, tak můžeme konstatovat, že se jedná o ideální místo pro naši malou větrnou turbínu a to z důvodu spouštěcí rychlosti větru, která je 3 m/s. [8]

Dalším krokem je měření směru a rychlosti větru v námi určeném místě. Pomocí anemometru se provede analýza, která nám napomůže vyhodnotit rychlost a směrnost větru v daném místě a výšce. [8]

Třetím krokem je topologický průzkum místa a určení výšky věže  $H_v$  (specifikovaná výška). Nejdříve musíme najít nejvyšší bod  $H_b$  v okruhu 170 m a poté k němu přičíst 10 m, pro získání představy o výšce věže. [8]

Rovnice pro výpočet výšky věže:

$$H_v = H_b + 10 \text{ m} \quad (4.2)$$

Odhad průměrné rychlosti větru ve výšce  $H_v$  je možné vypočítat pomocí rovnice (4.3). Z hodnot distribuce větrné energie (podle větrné mapy) jsme schopni odhadnout průměrnou rychlost větru v definované výšce 10 m. [8]

$$V_v = V_{10} \cdot \left(\frac{H_v}{H_{10}}\right) \cdot (\log^{-1} \alpha) \quad (4.3)$$

Kde:

- $V_v$  - je rychlosti větru v uvažované výšce
- $V_{10}$  - je rychlost větru vytažená z údajů větrné mapy ČR ve výšce 10 m
- $H_v$  - je specifikovaná výška
- $H_{10}$  - je výška 10m
- $\alpha$  - je efekt stříhu větru (změny ve směru a rychlosti větru)

## 4.2 Fotovoltaický panel A-130

Pro diplomovou práci byl vybrán fotovoltaický panel A-130 od firmy ATERSA. Při volbě fotovoltaických panelů je důležité zohlednit orientaci a sklon střechy. Ideální případ by byla orientace FV panelů na jih při sklonu 35°. V tomto případě je fotovoltaický panel připevněný na hliníkové konstrukci se sklonem úhlu 45° a orientovaný -65° JJV. Jedná se o monokrystalický panel o výkonu 130 Wp s účinností (STC) 13,3 %. Obsahuje 36 článků o velikosti 150 x 150 mm. Celý panel má rozměry 1475x659x34 mm. Katalogové hodnoty FV panelu jsou uvedeny v tabulce níže:

Tab. 4.3: Katalogové hodnoty FV panelu A-130

Model	A-130
STC Power Rating Pmp (W)	130
Short Circuit Current Isc (A)	8,1
Open Circuit Voltage Voc (V)	21,30
Current at Maximim Power Imp (A)	7,54
Voltage at Maximim Power Vmp (V)	17,20
Fill Factor (%)	75,3
Panel Efficiency (%)	13,30
Maximum Systém Voltage Vmax (V)	600
Serial number	Q00010344

## 4.3 Anemometr TX20ETH

Pro diplomovou práci byl zvolen ethernetový anemometr TX20ETH viz Obr. 4.5, který umí měřit nejen rychlost větru, ale také jeho směr. Anemometr vyrobila firma Papouch s.r.o., která sídlí v Praze. Skládá se ze dvou částí, a to vlastního anemometru a elektronické části. Konstrukčně se řadí mezi anemometry vrtulníkového typu se třemi listy. Komunikace se zařízením je umožněna počítačovou sítí (Ethernet) přes webové rozhraní. Základem jsou webové stránky, na kterých se zaznamenávají hodnoty o směru a rychlosti větru. Jestliže dojde k překročení nastavených mezí, zařízení upozorní obsluhu e-mailem. Naměřené údaje jsou k dispozici, jak pro strojovou, tak lidskou obsluhu. Strojová komunikace probíhá datovým kanálem TCP, protokoly SNMP a MODBUS TCP. Výhodou této komunikace je, že umí odesílat naměřené hodnoty na vzdálený server pomocí jednoduchých požadavků HTTP GET. Nastavení i výstupní hodnoty jsou ukládány ve formátu XML.

Anemometr je schopný měřit směr větru v 16 horizontálních polohách v rozsahu 360°. Rychlost větru je možné měřit až do 180 km/h (50 m/s) s přesností 0,1 m/s. Snímač, použitý u TX20ETH je mechanický. Konfiguraci zařízení je možné provést přes webové rozhraní, jak si můžeme povšimnout na obr. 4.4. Jedná se o komunikaci WEB, http GET, XML, SNMP (UDP), MODBUS TCP, ASCII (TCP), Spinel (TCP), E-mail (SMTP). Připojení k síti je realizované pomocí nekříženého ethernetového kabelu, v případě připojení přímo k jednomu PC se využívá křížený kabel (RJ 45). Propojení snímačícího senzoru s elektronikou je realizované přes telefonní kabel RJ 11. Zásuvkový adaptér dodává napájení v rozmezí 7~30 Vdc. Senzor pro měření směru a rychlosti větru se vyrábí z plastu. Elektronická část je vložena do kovové krabice z eloxovaného hliníku. Uchycení elektroniky je realizováno s úchytem na lištu DIN 35 mm nebo bez úchyty (standardní

provedení). V našem případě se jedná o standardní provedení a modul se nachází v laboratoři. [23]



Obr. 4.4: Možnosti přístupu k modulu TX20ETH [23]



Obr. 4.5: Anemometr TX20ETH [32]

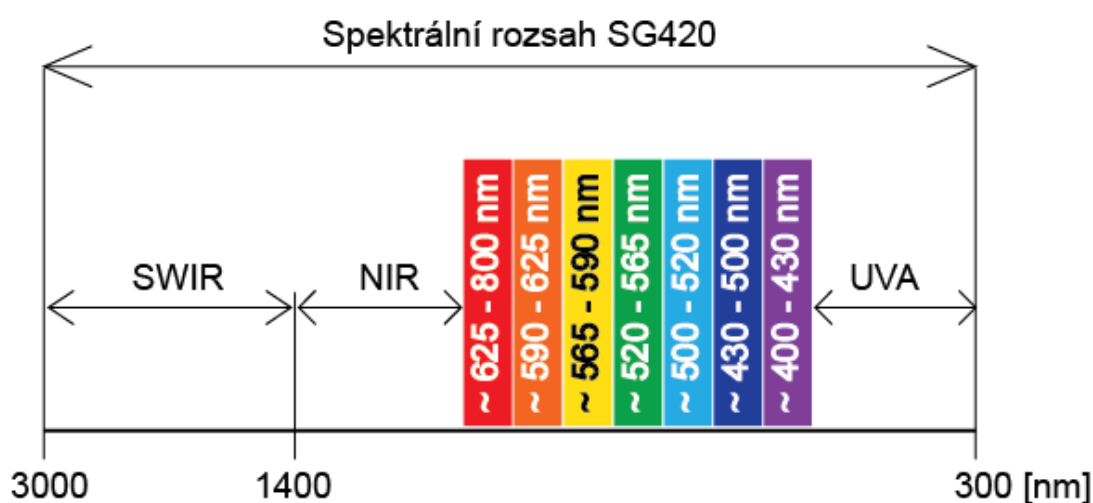
#### 4.4 Pyranometr SG420

Pyranometr SG420 vyrobený firmou J. Tlust'ák Praha splňuje požadavky pro tuto diplomovou práci. Měření spočívá na principu teplotní difrakce, která vzniká dopadem záření na černou a bílou plochu. Černá barva absorbuje světlo jinak než bílá barva a stejně tak jej odráží. Ideálně černá barva pohltí sluneční záření, bílá barva zas úplně odráží sluneční záření. Ve skutečnosti tomu však není, protože nedochází k úplné absorpci či odrazu slunečního záření. Během absorpce světla dochází k zahřívání jednotlivých segmentů. Pod každým segmentem je umístěn termočlánek. Intenzita slunečního záření je poté úměrná elektrickému napětí na připevněných termočláncích.

Pyranometr disponuje dvanácti termočlánci, které jsou zapojeny do série a jsou umístěné pod jednotlivými barevnými segmenty završené skleněnou kopulí. SG420 je vybaven na spodní straně šroubovací vysoušecí vložkou s barevným indikátorem účinnosti a přípojovací konektor. Důležité je, aby vysoušecí vložka byla vždy modrá, což znamená, že pyranometr má ideální podmínky pro měření. V případě navlhnutí vysoušecí vložky dochází ke změně jeho barvy (od zelené přes růžovou až bílou) a poté je nutné vložku vyšroubovat a vysušit suchým vzduchem, za podmínky že teplota nesmí překročit 80 °C. Po vysušení vložka indikuje opět modrou barvu. Výrobce je doporučeno provést vysoušení alespoň jednou za rok. Tabulka technických parametrů je uvedena níže.

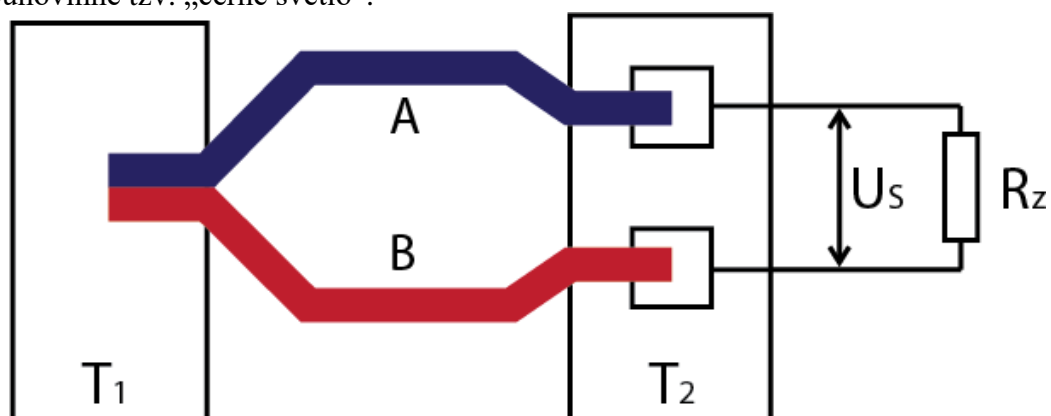
Tab. 4.4: Technické parametry pyranometru SG420

Název parametru	Hodnota
spektrální rozsah	300-3000 nm
měřící rozsah	0 - 1200 W/m <sup>2</sup>
časová konstanta	50 s pro 95%
citlivost	-
chyba vlivem nelinearity v rozsahu 100– 1000 W/m <sup>2</sup>	0,25% max
chyba měření v rozsahu 50 – 1150 W/m <sup>2</sup>	± 3%
max. zatěžovací impedance	500 Ω
výstup - proudový	4 - 20 mA
rozsah pracovních teplot	-30 až +60°C
napájecí napětí	9 - 30 V DC



Obr. 4.6: Spektrální rozsah pyranometru SG420

Spektrální rozsah SG420 je zobrazen na Obr. 4.6. Rozsah, který je tento pyranometr schopen pokrýt se pohybuje v rozsahu 300 až 3000 nm. SWIR v tomto rozsahu značí infračervené záření krátké vlnové délky, NIR blízké infračervené záření, UVA dlouhovlnné tzv. „černé světlo“.



Obr. 4.7: Termočlánek

Termočlánek tvoří dva různé vodivé materiály A a B viz Obr. 4.4. Použité materiály pro termočlánek mohou být, jak polovodiče, tak kovy, které jsou na jednom konci spojeny s teplotou  $T_1$  a na druhém konci ramena nejsou spojeny a mají teplotu  $T_2$ . Rozdílem teplot

vznikne na každém spoji rozdílný elektrický potenciál, který je zdrojem proudu. Na vývodech vzniká Seebeckovo napětí  $U_s$ . [18].

Na výstupu pyranometru SG420 je možné naměřit výstupní proud (4-20mA). Tento proud je nutno přepočítat na napětí, protože bude docházet k měření napětí na odporu 100  $\Omega$ , který je připojen k pyranometru.

Tab. 4.5: Výstupní parametry závislé na intenzitě dopadajícího záření

Výstupní proud	Výstupní napětí	Intenzita dopadajícího slunečního záření
4 - 20 mA	0,404 - 2,020 V	0-1200 W/m <sup>2</sup>

Příklad výpočtu převodu výstupního proudu na výstupní napětí (4.4):

$$U = R \cdot I = 101 \cdot 0,004 = 0,404 \text{ V} \quad (4.4)$$

Odvození vzorce pro výpočet dopadající intenzity slunečního záření (4.5):

$$\begin{aligned} y &= ax + b & (4.5) \\ 0 &= a \cdot 0,404 + b \\ 1200 &= a \cdot 2020 + b \end{aligned}$$

Z těchto výše uvedených rovnic určíme konstanty (a, b):

$$\begin{aligned} b &= -a \cdot 0,404 \\ 1200 &= 1,616a \end{aligned}$$

$$a=742,574$$

$$b=300$$

Vzorec pro výpočet dopadající intenzity slunečního záření:

$$I = (742,574 \cdot U) - 300 \quad (4.6)$$

## 4.5 Teplotní čidlo PT100

Teplotní čidlo PT100 je vyrobeno z příměsi platiny, jak vypovídá samotný název. Číselná hodnota 100 udává, že při teplotě 0 °C je hodnota odporu čidla 100  $\Omega$ . Tato číselná hodnota může být však různá (Pt500, Pt1000 aj.), ale pokaždé tento číselný údaj představuje hodnotu odporu čidla při 0 °C. Důležitým údajem pro měření je relaxační čas.

Pro teploty  $\vartheta < 0$  °C v rozsahu -200 °C až  $\vartheta = 0$  °C je možné využít pro výpočet teplotní závislosti elektrického odporu vztah (4.7) [20].

$$R_{\vartheta} = R_0 \cdot [1 + A\vartheta + B\vartheta^2 + C\vartheta^3 \cdot (\vartheta - 100)] \quad (4.7)$$

Pro teploty  $\vartheta \geq 0$  °C (0-850 °C) dle vzorce (4.8) [20].

$$R_{\vartheta} = R_0 \cdot [1 + A\vartheta + B\vartheta^2] \quad (4.8)$$

Kde:

- $R_{\vartheta}$  - je elektrický odpor [ $\Omega$ ] při teplotě  $\vartheta$  [°C]
- $R_0$  - je odpor čidla při teplotě 0°C, v našem případě  $R_0=100$   $\Omega$
- A - je konstanta  $3,9083 \cdot 10^{-3}$  K<sup>-1</sup>
- B - je konstanta  $-5,775 \cdot 10^{-7}$  K<sup>-2</sup>
- C - je konstanta  $-4,183 \cdot 10^{-12}$  K<sup>-4</sup> pro  $t < 0$  °C
- $\alpha$  - je konstanta 0,00385055 [ $\Omega$ /K]

## 4.6 Zapojení měřicího pracoviště

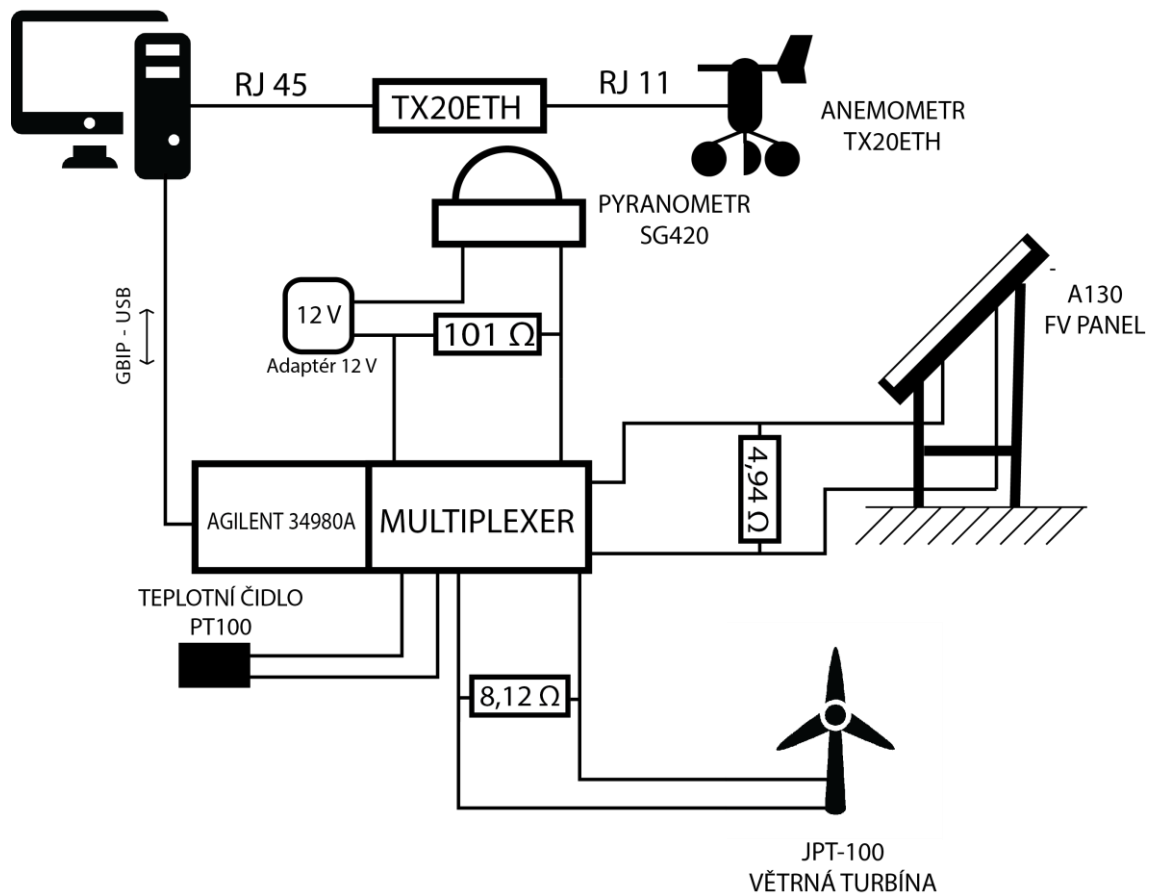
Zapojení měřicího stanoviště pro diplomovou práci je následující. Anemometr, umístěný na střeše budovy Technická 10 je propojen s elektronickou jednotkou TX20ETH, nacházející se v laboratoři, pomocí telefonního kabelu RJ 11. Elektronická jednotka komunikuje s PC ethernehotovým kabelem s koncovkou RJ 45. Naměřená data z anemometru zpracovává elektronická jednotka TX20ETH a ta je odesílá na webserver, který zapíše data, jak do XML, tak do HTML souboru. Pro zobrazení souboru XML, který je umístěn na webserveru, byl vytvořen skript v jazyce PHP. Skript načítá data každých 30 s a zapisuje je do souboru v PC.

Komunikace mezi počítačem a měřicí ústřednou Agilent 34980A je řešena pomocí kabelového rozhraní USB-GBIP. Pro komunikaci, mezi jednotlivými komponenty, kterými jsou měřicí ústředna, PC a data z anemometru TX20ETH, slouží IO knihovna. Naměřené hodnoty, jak z anemometru, tak větrné turbíny jsou zde zpracovány a zobrazeny v uživatelském rozhraní.

Větrná turbína JPT-100 se nachází v blízkosti anemometru a jsou z ní vedeny dva vodiče, tedy kladný a záporný pól. Tyto vodiče, na které je připojen rezistor 8,12  $\Omega$ , prochází do laboratoře. Rezistor je umístěn v laboratoři, aby na něj nepůsobily teplotní vlivy okolí, a předpokládáme, že v laboratoři nedochází k rázným teplotním výkyvům. Rezistor je připojen ke svorkovnici měřicí ústředny Agilent 34980A paralelně, která vyhodnocuje data a převádí je do digitální podoby. Ze známého odporu R a napětí U na rezistoru dopočítá měřicí ústředna proud I a celkový výkon P. Digitální signál je pak veden převodníkem GPIB-USB do PC.

Solární panel A-130 je řešen obdobným zapojením, jako v předešlém případě větrná turbína JT-100. Z FV panelu jsou vedeny dva vodiče (kladný a záporný pól), které prochází až do laboratoře, kde jsou připojeny na odpor o odporu 4,94  $\Omega$ . Odpor je zde umístěn, aby nedocházelo k teplotnímu ovlivňování, a bereme na vědomí, že v laboratoři je stálá teplota, která ho prakticky neovlivní. K multiplexoru je rezistor 4,94  $\Omega$  připojen paralelně, na kterém se odečítá napětí. Z naměřeného napětí U a známého odporu R je možné pomocí Ohmova zákona dopočítat proud I a určit celkový výkon FV panelu.

Dále je k měřicí ústředně připojeno platinové teplotní čidlo PT100 s odporem 100  $\Omega$  pro 0 °C. V závislosti na teplotě se mění jeho odpor, ze kterého pak můžeme určit teplotu okolí. Pyranometr SG420 je napájen z 12V adaptéru, v jehož sérii byl zařazen 101  $\Omega$  na kterém se odečítá napětí. Intenzita slunečního záření je poté úměrná odečtenému napětí na rezistoru. Schéma zapojení pracoviště je uvedeno na obrázku níže.



Obr. 4.8: Schéma zapojení měřicího pracoviště

Pro větrnou turbínu pak můžeme vypočítat proud  $I$  podle Ohmova zákona (4.9) pomocí naměřeného napětí  $U$  na odporu  $R=8,12 \Omega$ .

$$I = \frac{U}{R}; [A] \quad (4.9)$$

Z vypočteného proudu a známého napětí určíme výkon větrné turbíny podle (4.10).

$$P = U \cdot I; [W] \quad (4.10)$$

Pro výpočet teoreticky vyrobené elektrické energie platí rovnice (4.11).

$$W = U \cdot I \cdot t = P \cdot t; [W \cdot s] \quad (4.11)$$

Účinnost VTE pak počítáme, jako podíl výkonu turbíny  $P$  ku ideálnímu výkonu větrné turbíny  $P$  podle rovnice (3.15).

# 5 MĚŘICÍ SOFTWARE

Pro sběr dat byl vytvořen software, který ukládá jednotlivé naměřené a vypočtené hodnoty z fotovoltaického panelu A-130, větrné turbíny JPT-100, anemometru TX20ETH, pyranometru SG420 a teplotního čidla PT100 do souboru data.txt.



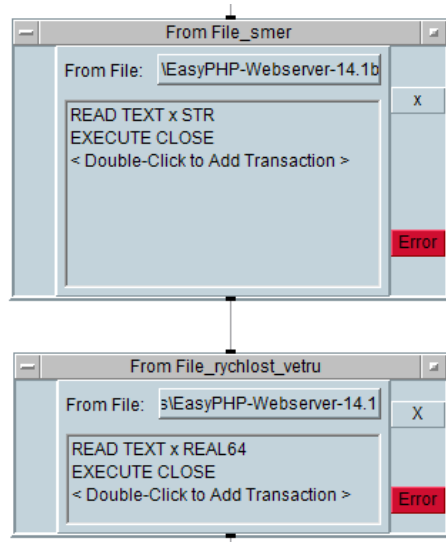
Obr. 5.1: Panel měřicího softwaru

## 5.1 Panel měřicího software

Pro jednodušší pozorování naměřených dat, byl vytvořen panel, který je možný rozdělit do tří zón. V první zóně je možné nastavit interval měření v sekundách, při kterém dochází k odečtu dat z měřicí ústředny a anemometru TX20ETH. V pravé horní části (ZÓNA 1) je umístěn datum (rok, měsíc, den) a čas (hodina, minuta, sekunda). Ve spodní části první zóny se nachází šest hodnot, naměřených na konci intervalu měření, ze kterých je možné posoudit, zda jsou vhodné podmínky pro výrobu elektrické energie na fotovoltaickém panelu nebo větrné turbíně. Druhá zóna je grafickým znázorněním naměřených hodnot pro větrnou turbínu JPT-100. Na levé straně je v grafu vynesena rychlost větru, která je měřena pomocí anemometru a v pravém grafu jsou zakresleny hodnoty pro napětí na rezistoru, dopočtený proud I a výkon  $P_{vt}$  větrné turbíny. V poslední zóně jsou vyneseny naměřené hodnoty pro fotovoltaický panel. V levém grafu je zakreslena intenzita slunečního záření z pyranometru a dále teplota z teplotního čidla PT100. Napětí z fotovoltaického panelu je odečítáno z paralelního rezistoru a je zaneseno do grafu na pravé straně, kde se nachází také dopočtený proud I a výkon  $P_{fv}$  fotovoltaického panelu.

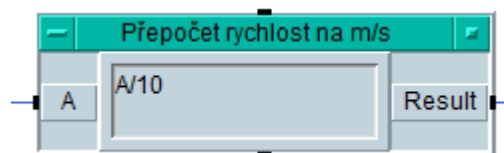
## 5.2 Funkce programu

Při zapnutí měřicího softwaru v programu Agilent VEE se spustí čas probíhaného měření. Elektronická jednotka anemometru TH20ETH zapisuje data ve stanoveném časovém intervalu 10 s do XML souboru. V PHP souboru byl vytvořen skript, který dokáže otevřít tento XML soubor, přečíst z něj informace o směru a rychlosti větru, a poté je uložit do vlastních souborů (smer, rychlost\_vetru). Program VEE čte tyto soubory jedenkrát za 30 s a ukládá do souboru data.txt.



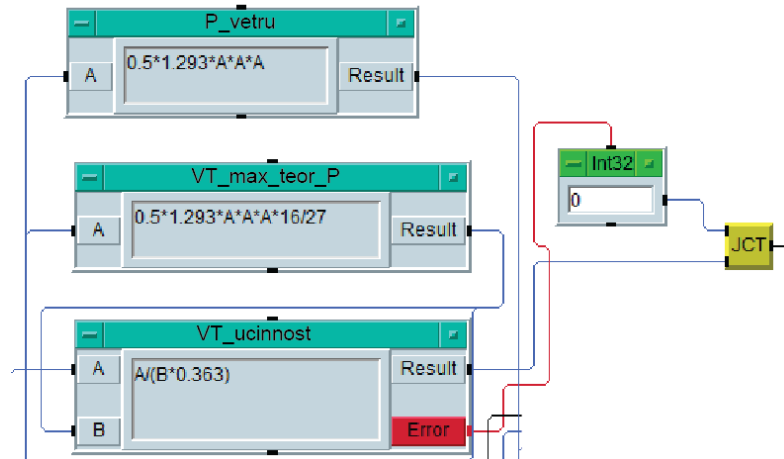
Obr. 5.2: From file pro směr a rychlost větru

V prvním souboru je načten směr větru a následně převeden do české podoby. Druhý soubor obsahuje údaje o rychlosti větru, které byly naměřeny pomocí anemometru, jako v předchozím případě hodnoty ze směru větru viz obrázek výše. Hodnoty o rychlosti větru jsou poté převedeny na m/s, abychom lépe mohli určit, zda je dostatečná rychlost větru k rozběhu větrné turbíny viz Obr. 5.3.



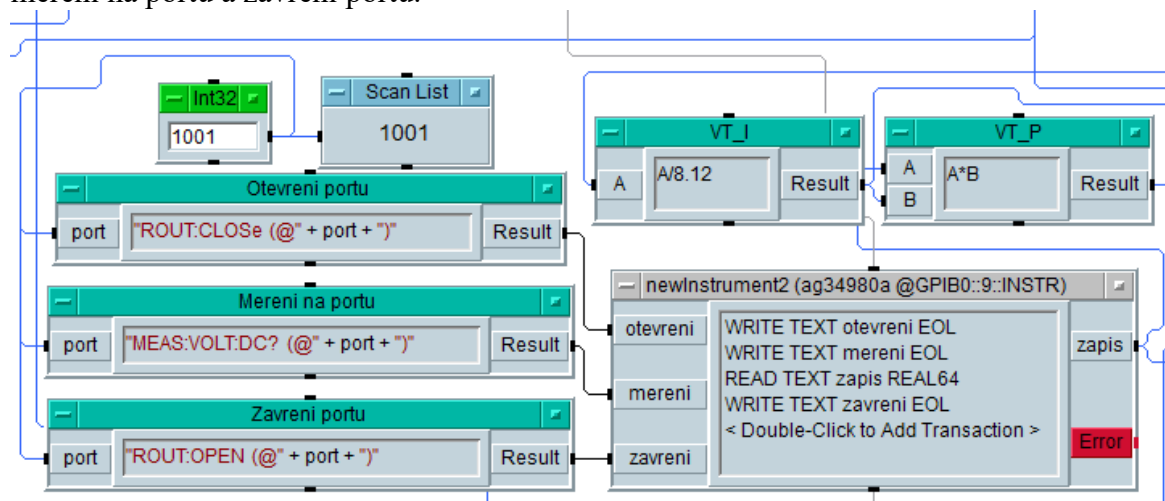
Obr. 5.3: Přepoččet rychlosti na m/s

Pomocí odečtené rychlosti se v blocích (P\_vetru, VT\_max\_teor\_P a VT\_ucinnost) dopočítávají hodnoty pro výkon větru podle vzorce 3.5, maximální teoretický výkon VT vypočtený podle vzorce 3.13 a účinnost větrné turbíny JPT-100. Do bloku VT\_ucinnost je na vstup A přiveden výkon větru a na vstup B maximální teoretický výkon VT. Hodnota 0,363 m<sup>2</sup> udává plochu vrtule větrné turbíny. Pro výpočet účinnosti byla nastavena podmínka pro ošetření dělení nuly, která zaručí, že program nezastaví a dále dopočítává další načtenou hodnotu bez jeho zastavení a chybové hlášky, jež je ukázáno na obrázku níže.



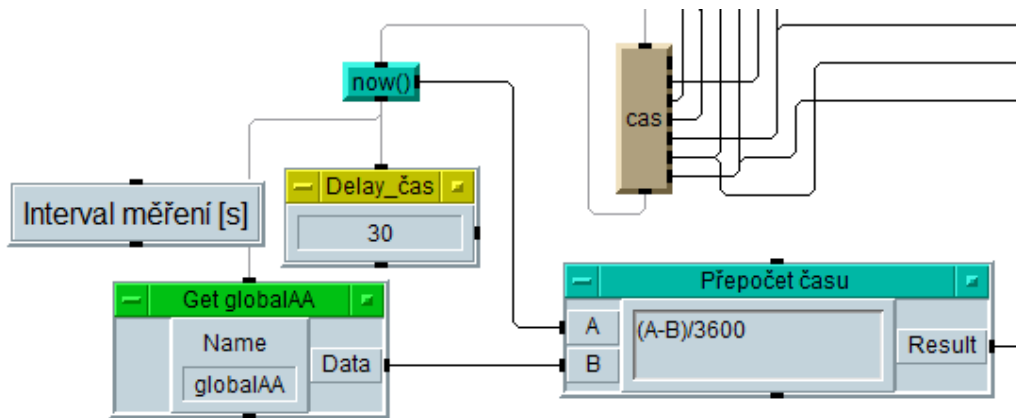
Obr. 5.4: Bloky výpočtů pro výkon větru, maximálně dosažitelného výkonu VT a účinnost větrné turbíny

Měření napětí větrné turbíny je uskutečněno na odporu na adresu 1001. V bloku newInstrument2 se provede odečtení napětí na rezistoru a ze známého odporu a napětí je vypočten proud pomocí bloku VT\_I a následně dopočten výkon větrné turbíny P<sub>VT</sub>, v bloku VT\_P, kde vstup A je napětí a B proud, jak je uvedeno na obrázku níže. Obrázek také znázorňuje, jakým způsobem proběhlo měření na adrese 1001 viz otevření portu, měření na portu a zavření portu.

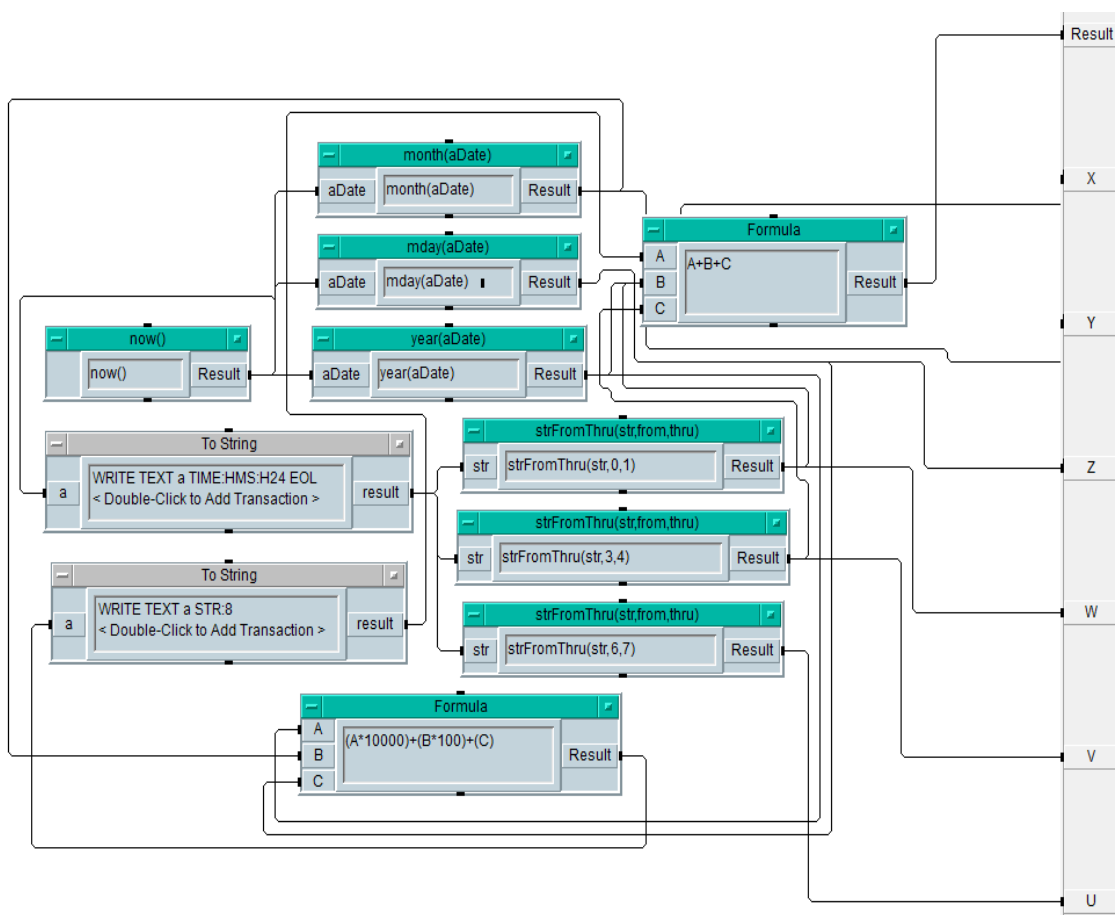


Obr. 5.5: Přepočet VT\_I a VT\_P

Pro načtení aktuálního data a času byl vytvořen blok (cas), který třídí jednotlivé informace (rok, měsíc, den, hodina, minuta, sekunda). Časový interval měření je možné nastavovat v sekundách v Delay\_čas. Z bloku now() se uloží hodnota času do globální proměnné (Get globalAA) a ta je pak odeslána na vstup B, bloku Přepočet času. Druhý čas, který se načítá v tomto případě každých 30 s (podle nastavení v Delay\_čas) je posílán na vstup A. V tomto bloku se tyto časové hodnoty odečtou a převedou na hodiny.

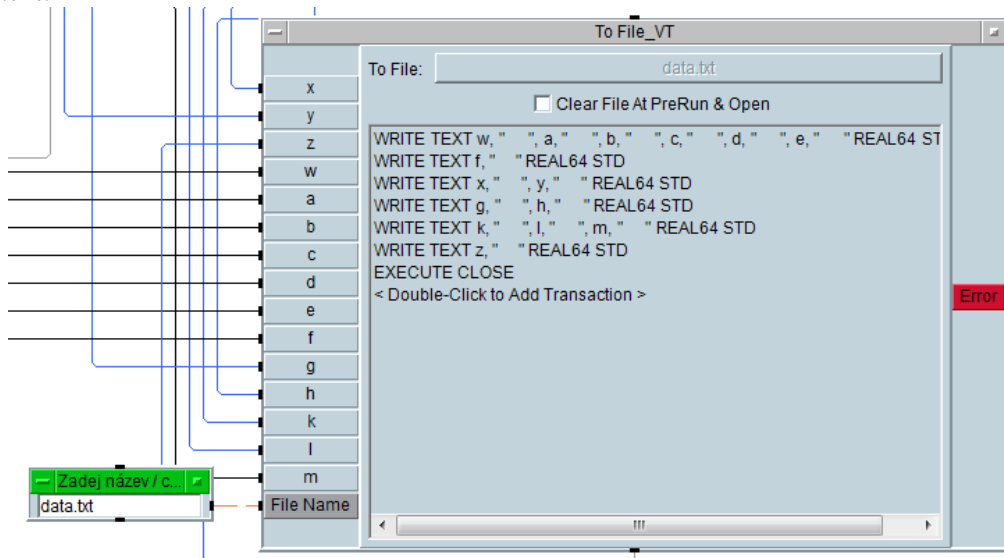


Obr. 5.6: Nastavení časového intervalu, odečet aktuálního času a data



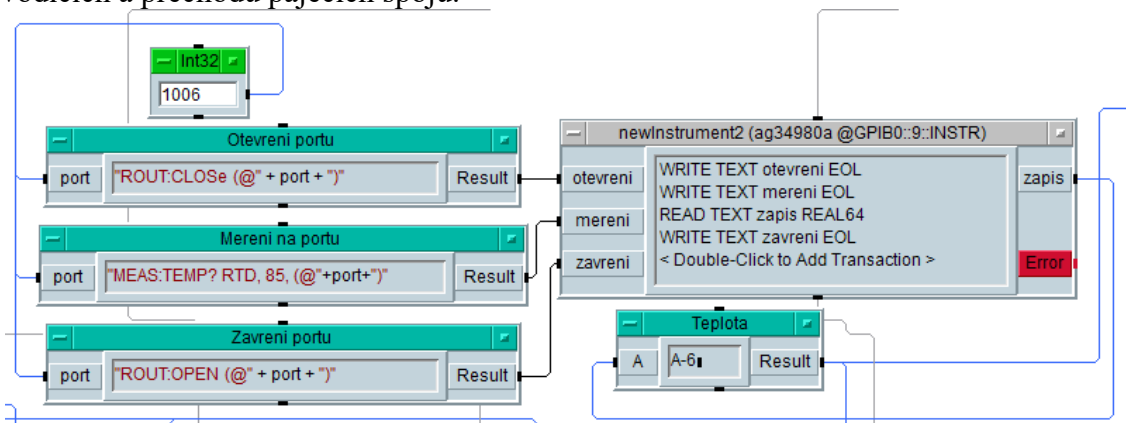
Obr. 5.7: Roztřídění hodnot data a času v bloku čas

Jednotlivé výše odečtené údaje jsou odeslány do bloku To File\_VT a uloženy do souboru data.txt.



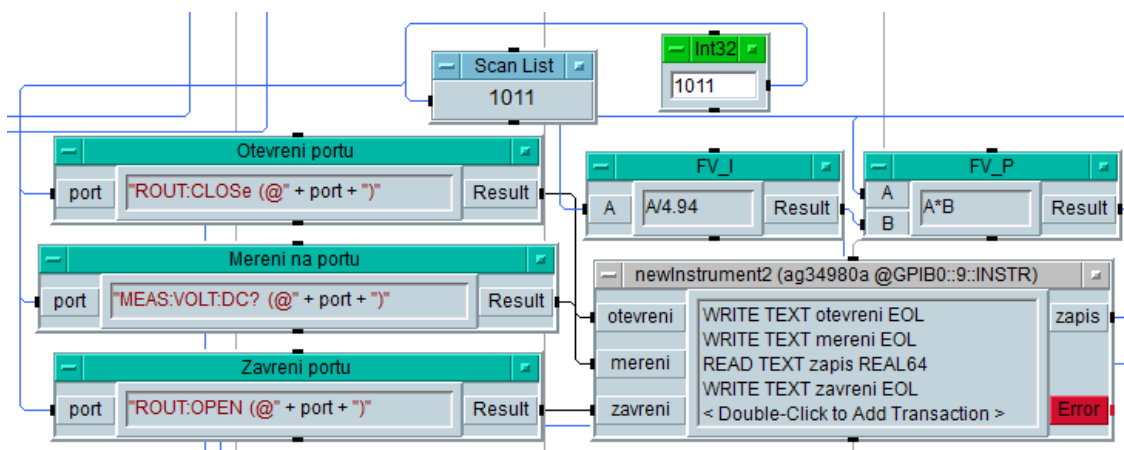
Obr. 5.8: Ukládání naměřených hodnot v To File\_VT do souboru data.txt

Navazující část programu věnuje pozornost fotovoltaickému panelu A-130, která je propojena souběžně s první částí. Nejdříve se provede měření hodnoty na teplotním čidlu PT100 na adresu 1006 a poté je přepočtena na skutečnou teplotu pomocí bloku Teplota. Odečet 6°C byl zapříčiněn odporem 23 mΩ, který vzniknul na přívodních vodičích a přechodu pájecích spojů.



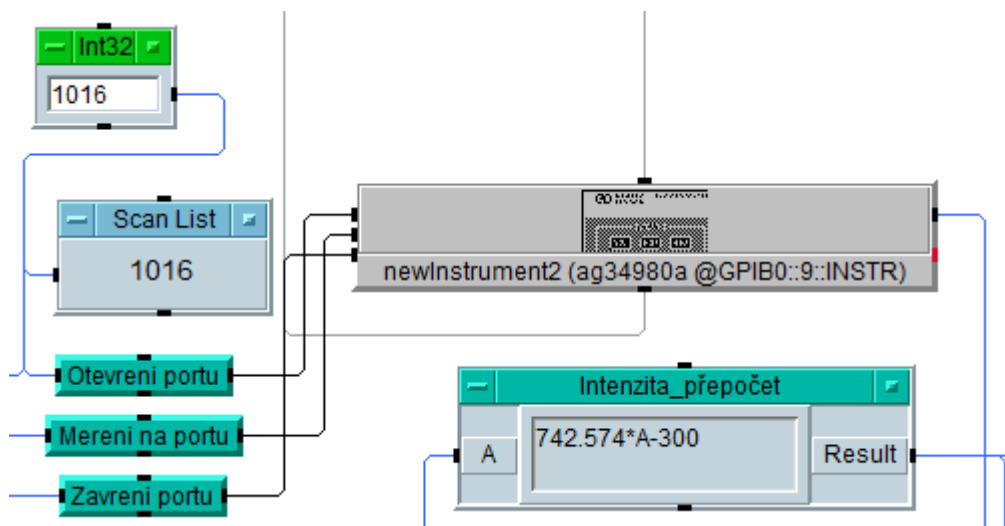
Obr. 5.9: Načtení a přepočet teploty z teplotního čidla PT100

Na odporu, který je připojen k fotovoltaickému panelu a multiplexoru, je odečteno napětí a odesláno na adresu 1011. Ze známého napětí a odporu je pomocí Ohmova zákona dopočten proud  $I$  v bloku FV\_I a dále výkon fotovoltaického panelu  $P_{FV}$  v bloku FV\_P, kde vstup A je napětí a vstup B proud viz Obr. 5.9.



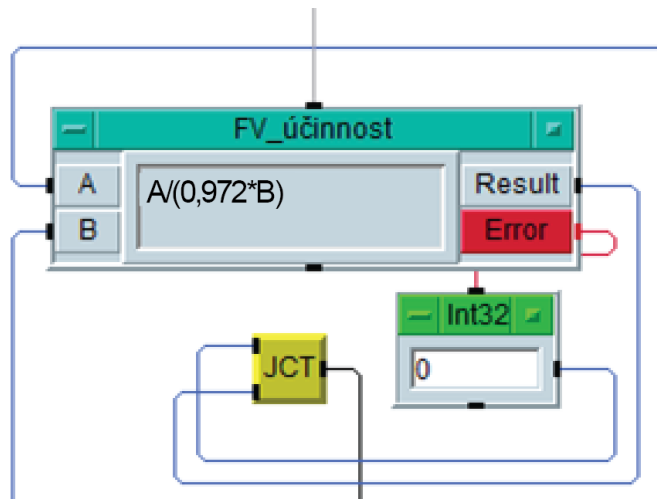
Obr. 5.10: Přepočet FV\_I a FV\_P

Z napětí naměřeného na odporu  $101 \Omega$ , který je připojen k multiplexoru a pyranometru, je možné dopočítat pomocí bloku Intenzita\_přepočet intenzitu slunečního záření viz vzorec 4.6, jak je uvedeno níže.



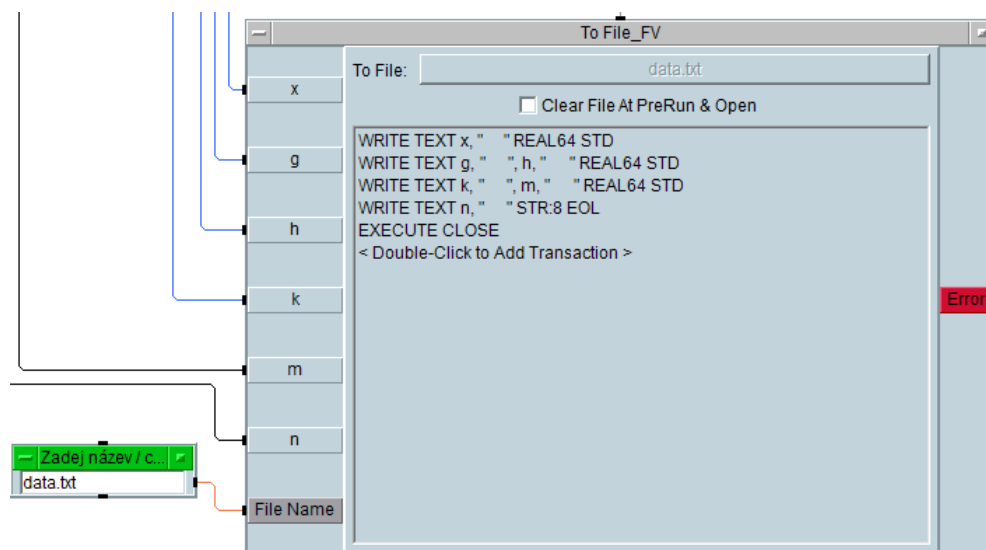
Obr. 5.11: Výpočet intenzity slunečního záření pomocí bloku Intenzita\_přepočet

Pro výpočet účinnosti na fotovoltaickém panelu A-130 byl vytvořen blok FV účinnost, kde je do vstupu A přiveden výkon fotovoltaického panelu z FV\_P a do vstupu B intenzita slunečního záření (Intenzita\_přepočet). Do vzorce je vnesena plocha fotovoltaického panelu, která činí  $0,972 \text{ m}^2$ . Tento blok je opět obstarán podmínkou, která zaručí, že v případě nulového vstupu B nedojde k chybě a program pojede dál viz obr. 5.11.



Obr. 5.12: Výpočet účinnosti fotovoltaického panelu bloku FV\_účinnost

Výše uvedené bloky jsou poté přivedeny na vstupy To File\_FV a uloženy do souboru data.txt.



Obr. 5.13: Ukládání naměřených hodnot v To File\_VT do souboru data.txt

Údaje z větrné turbíny a fotovoltaického panelu jsou uloženy do společného souboru data.txt. Program běží v nekonečném cyklu a ukončit ho může obsluha tlačítkem stop.

# 6 VYHODOCENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT

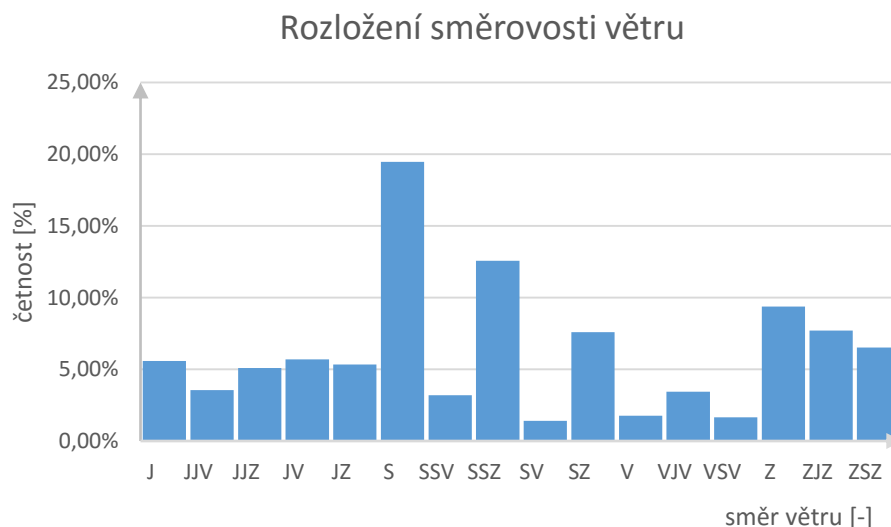
## 6.1 Vyhodnocení naměřených hodnot z šesti období

Ve zvoleném časovém období 36 dnů bylo provedeno experimentální měření, které bylo rozděleno do šesti období po 6 dnech. Jednotlivé měření probíhalo každých 30 s, ale pro vyhodnocení jednoho období bylo vybráno každé 20. měření, tedy jedenkrát za 10 minut.

### 6.1.1 Vyhodnocení naměřených hodnot v 1. období

První cyklus měření byl spuštěn dne 1. 4. 2016 v 0:03 hodin a ukončen dne 6. 4. 2016 ve 23:55. Celkový časový interval měření zabral 143,96 hod.

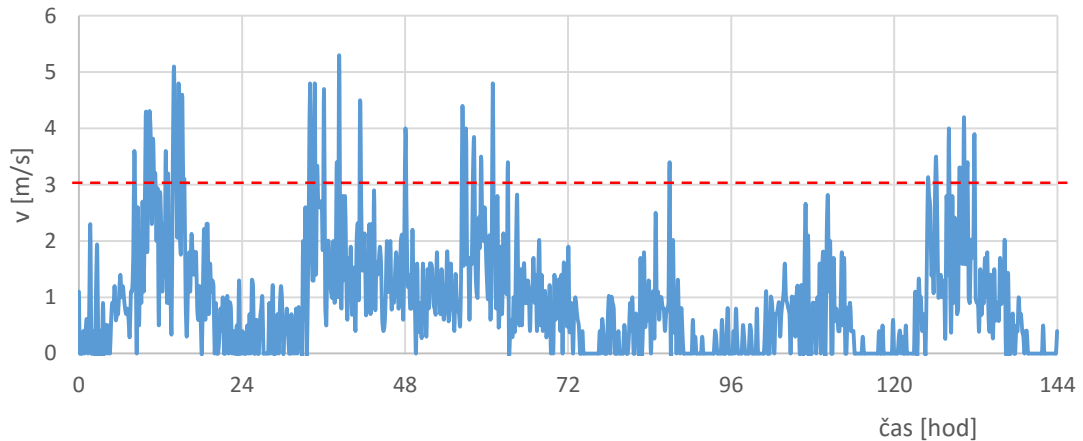
Pomocí otočného kormidla, které je součástí anemometru bylo možné proměřit průměrnou směrnost větru, kterou popisuje graf níže. Z grafu je možné usoudit, že převážná většina větru v tomto období vála od severu (19,45 %), severoseverozápadu (12,75 %) s proměnlivým směrem větru (<10 %).



Obr. 6.1: Rozložení směrnosti větru v 1. období

Závislost rychlosti větru v daném měřeném časovém intervalu je uvedena v grafu níže. Z grafu je možné posoudit, že maximální naměřené rychlosti větru 5,3 m/s bylo dosaženo dne 2. 4. 2016 v 14:30 (38,29. hodina od spuštění měření). Spouštěcí rychlost malé větrné turbíny JPT-100 jsou 3 m/s (zakresleno červenou čerchovanou barvou). Tato hodnota rychlosti větru byla překročena pouze ve 4,98 %, z toho vyplývá, že VT v 95,05 % větrná turbína stála z důvodu nepříznivých klimatických vlivů.

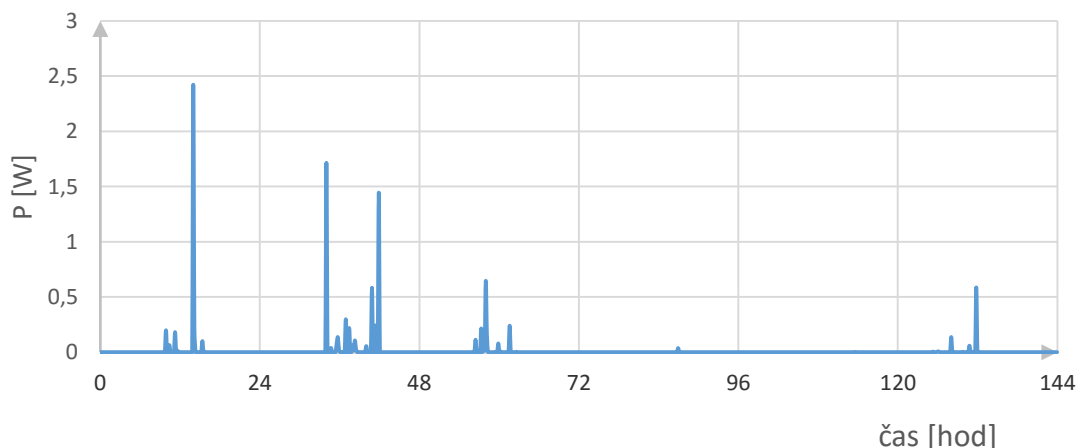
Závislost aktuální rychlosti větru



Obr. 6.2: Závislost rychlosti větru v 1. období

Z rozložení výkonu na větrné turbíně vyplývá, že VT produkovala elektrický proud pouze ve čtyřech dnech a to jen nárazově. Maximální hodnoty výkonu 2,42 W byla dosažena dne 1. 4. 2016 v 14:14 (13,98. hodina od spuštění prvního měření). Druhý den (2. 4. 2016) dosáhla hodnota výkonu VT pouze 1,71 W, jiné dny větrná turbína neprodukovala elektrickou energii z důvodů nevýhodných klimatických podmínek.

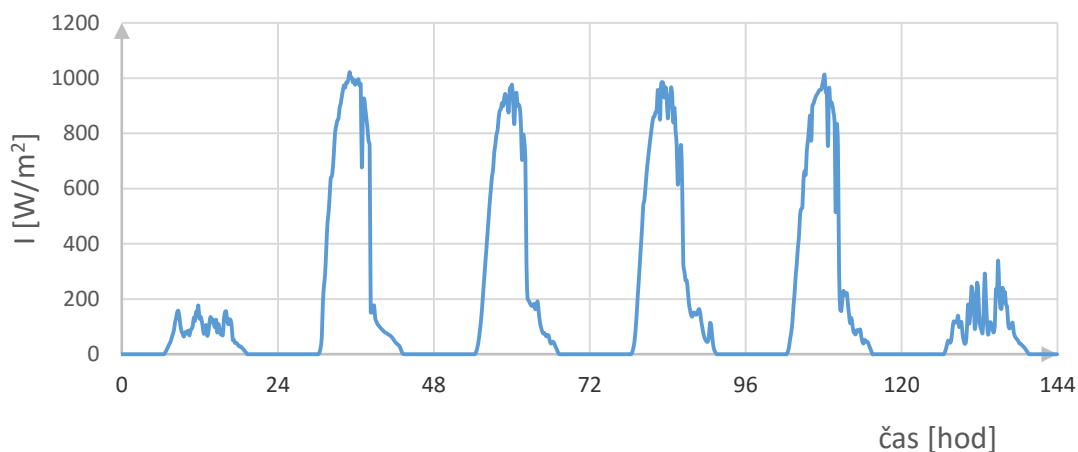
Graf rozložení výkonu na VT



Obr. 6.3: Graf rozložení výkonu na VT v 1. období

Závislost dopadající intenzity slunečního záření je uvedena v grafu níže. Nejnižší intenzity dopadajícího záření bylo naměřeno v prvním a šestém dnu. V tyto dny hodnota intenzity slunečního záření nepřekročila  $340 \text{ W/m}^2$ . Druhý až pátý den byl dopad slunečních paprsků o něco intenzivnější. Maximální naměřená intenzita slunečního záření byla  $1022 \text{ W/m}^2$  dne 2. 4. 2016 v 11:16 (35,04. hodina od spuštění měření).

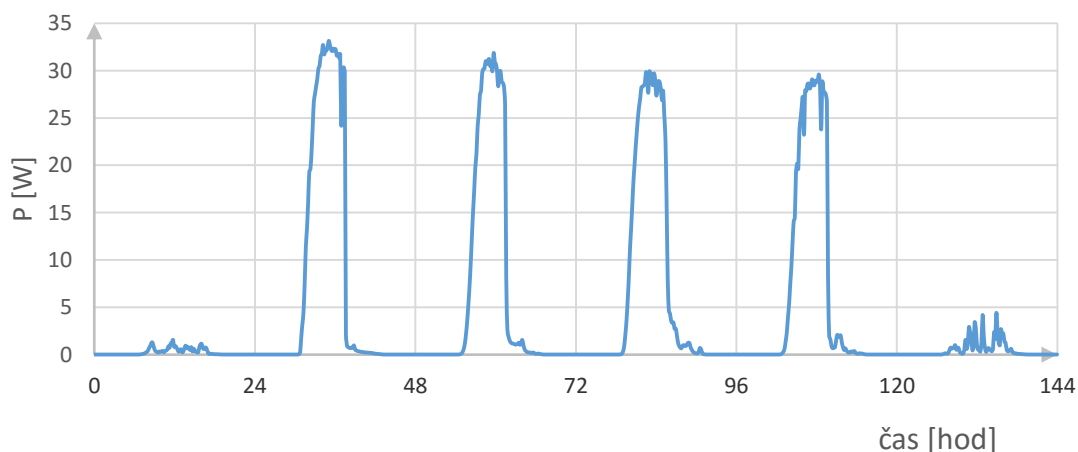
Závislost aktuální intenzity dopadajícího slunečního záření



Obr. 6.4: Graf závislosti aktuální intenzity dopadajícího záření na pyranometru v 1. období

Rozložení výkonu na fotovoltaickém panelu A-130 je zakresleno v grafu níže. Z grafu vyplývá podobná závislost viz graf výše. Maximální hodnota výkonu  $33,14 \text{ W}$  na FV panelu byla naměřena dne 2. 4. 2016 v 11:16 (35. hodina).

Graf rozložení výkonu na FV panelu

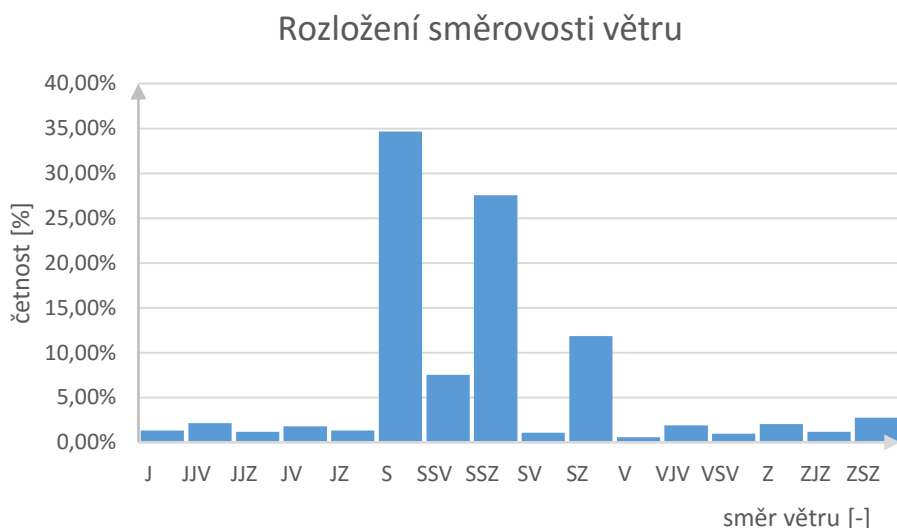


Obr. 6.5: Graf závislosti aktuální intenzity dopadajícího záření na pyranometru v 1. období

### 6.1.2 Vyhodnocení naměřených hodnot ve 2. období

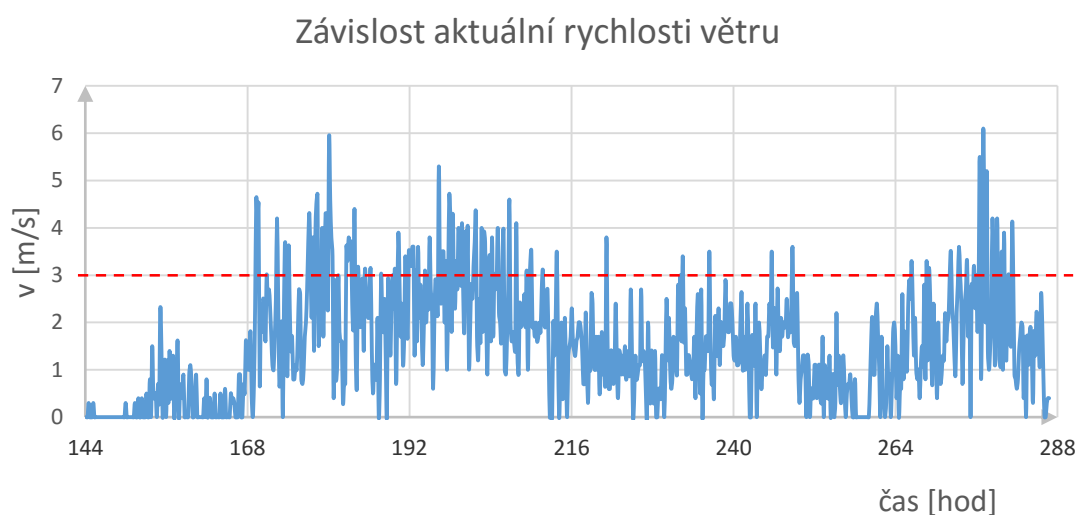
Druhé období měření bylo měřeno ve dnech 7.4-11. 4. 2016 a 14. 4. 2016. Měření bylo spuštěno dne 7. 4. 2016 v 0:05 (144,13 hod od začátku měření 1. cyklu) a ukončeno dne 14. 4. 2016 v 23:51 (286,78 hod).

Ze směrovosti větru vyplývá, že ve 2. období měření převažoval směr větru ze severu ve 34,65 % a severoseverozápadu v 27,58 %. Ze severozápadu vál vítr pouze v 11,87 % a ostatní směry větru nepřekročili 7,55 %.



Obr. 6.6: Rozložení směrovosti větru ve 2. období

Maximální rychlost větru byla naměřena 6,1 m/s dne 14. 4. 2016 v 14:07. Celkem se zaznamenalo 834 měření. Analýzou bylo zjištěno, že rychlost větru větší jak 3 m/s (spouštěcí rychlost turbíny, která je zakreslena červenou čerchovanou čárou v grafu) odpovídala pouze 12,7 % z celkového počtu měření.

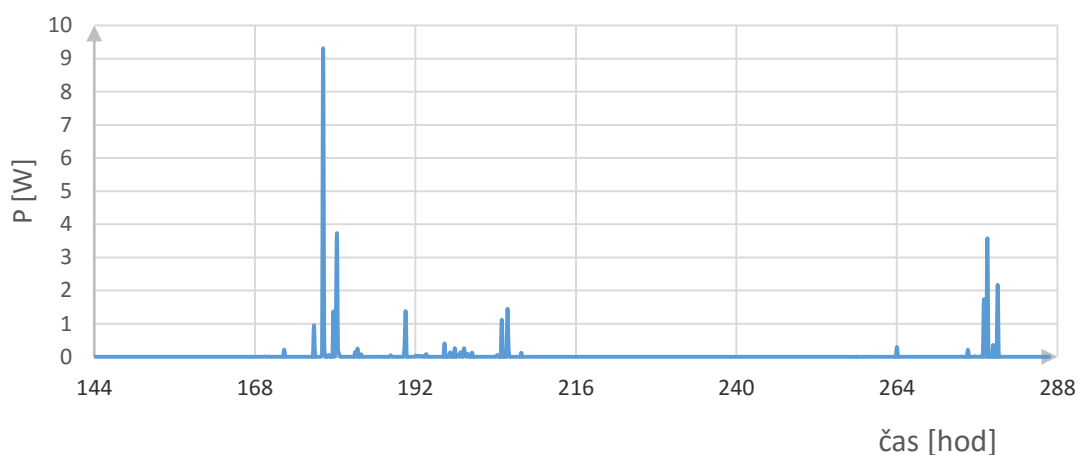


Obr. 6.7: Závislost rychlosti větru ve 2. období

Naměřené hodnoty výkonu větrné turbíny jsou zaneseny v grafu níže. Z uvedeného grafu vyplývá, že nejvyšší naměřený výkon byl naměřen 9,31 W dne 8. 4. 2016 v 11:29 (178,20. hodina od začátku celkového měření). Po většinu času větrná turbína JPT-100

stála a nevyráběla elektrickou energii. Celkem bylo vyrobeno v tomto období 5,44 Wh elektrické energie.

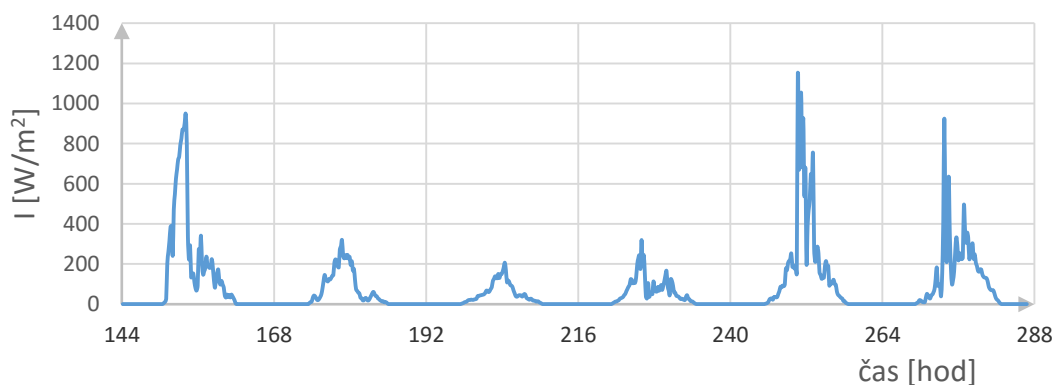
Graf rozložení výkonu na VT



Obr. 6.8: Graf rozložení výkonu na VT ve 2. období

Pro intenzitu dopadajícího slunečního záření byl vynesena graf, ze kterého vyplývá, že nejvyšší naměřené intenzity slunečního záření bylo naměřeno dne 11. 4. 2016 v 11:48 (250,64. hodina od začátku měření) a to 1153,81 W/m<sup>2</sup>. Z průběhu měření je také možné pozorovat, že vyšších hodnot dopadající intenzity slunečního záření bylo dosaženo v rozmezí 10-13. hodiny.

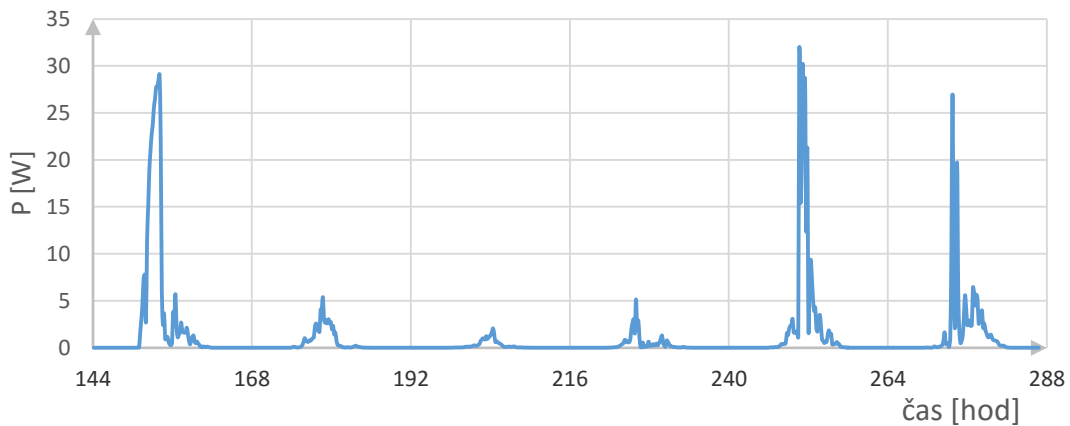
Závislost aktuální intenzity dopadajícího slunečního záření



Obr. 6.9: Graf závislosti aktuální intenzity dopadajícího záření na pyranometru ve 2. období

Graf rozložení výkonu na FV panelu prakticky kopíruje křivky naměřené pomocí pyranometru. Maximální hodnota výkonu 32,02 W byla naměřena dne 11. 4. 2016 v 11:48 (250,64. hodina od začátku měření). Během prvního dne dosahoval výkon až 29,06 W a poslední den, tedy 14. 4. 2016 výkon 26,95 W. Nižších hodnot výkonu (5 W) se dosahovalo ve zbylých dnech, což mohlo být zapříčiněné nepříznivými klimatickými podmínky. Vlivem těchto podmínek nebylo možné vyrábět elektrickou energii na fotovoltaickém panelu. Celkem bylo vyrobeno v tomto období na FV 158,63Wh.

Graf rozložení výkonu na FV panelu



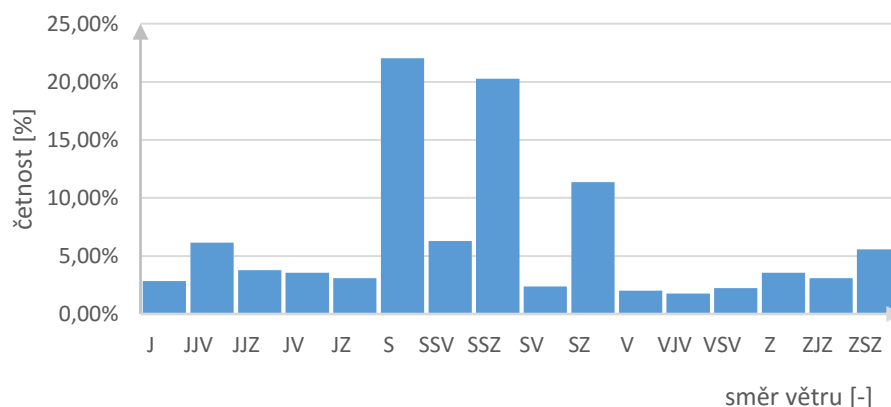
Obr. 6.10: Graf rozložení výkonu na FV panelu ve 2. období

### 6.1.3 Vyhodnocení naměřených hodnot ve 3. období

Třetí období bylo měřeno ve dnech 15.4-18. 4. 2016 a 20. 4. - 21. 4. 2016. Měření bylo spuštěno dne 15. 4. 2016 v 0:01 (286,95. hodina od začátku měření 1. cyklu) a ukončeno dne 21. 4. 2016 v 23:54 (431,31. hodina).

Měření se vyznačuje převážnou převahou 3 směrů větrů a to ze severu 22,4 %, severoseverozápadu 20,26 % a severozápadu v 11,37 %. Zbylé směry větru nepřevýšily hodnotu 7 %, a pokládáme je jako méně výrazné.

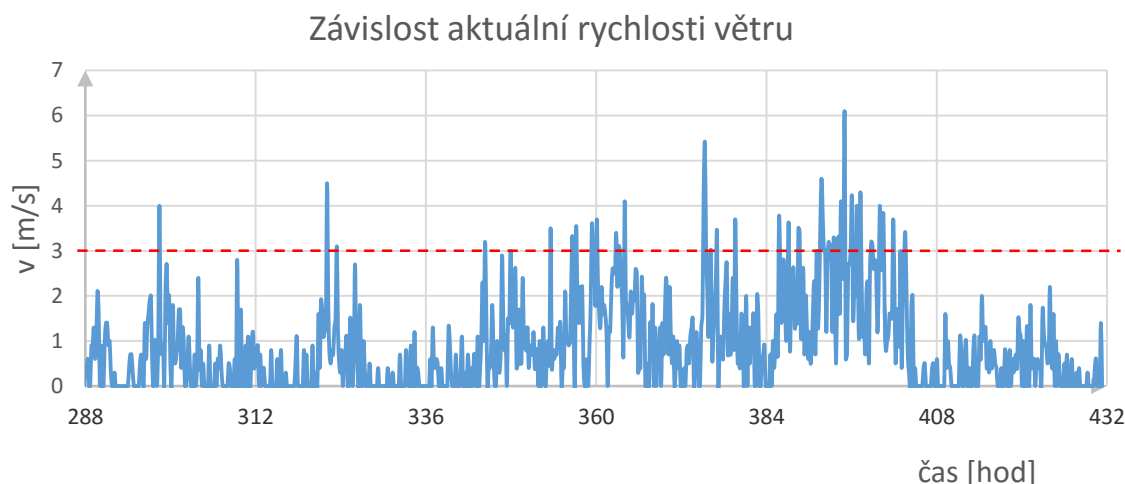
Rozložení směrovosti větru



Obr. 6.11: Rozložení směrovosti větru ve 3. období

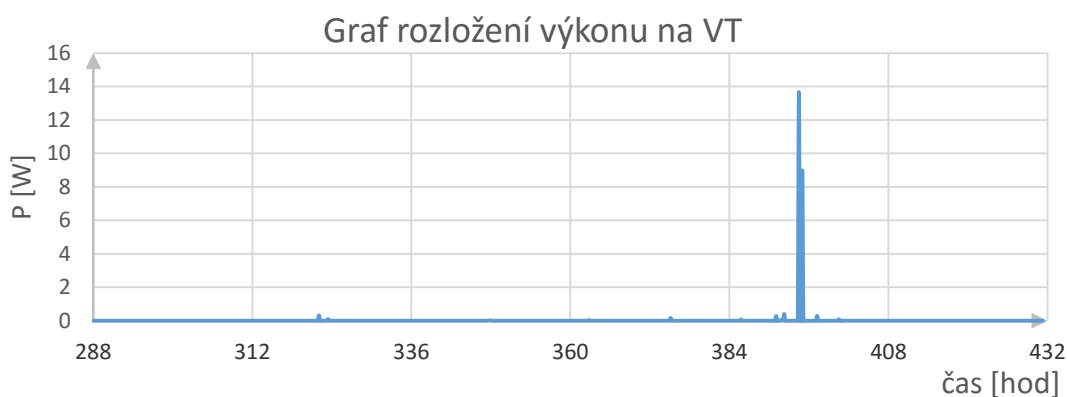
Ve třetím období byla zaznamenána maximální rychlost větru na anemometru 6,1 m/s dne 20. 4. 2016 v 11:48 (395,015. hodina od začátku měření). Další významné body byly naměřeny dne 16. 4. 2016 v 11:05, kde rychlost větru dosáhla 4,5 m/s a 18. 4. 2016 v 16:08, kde byla rychlost větru o něco vyšší, jak v předešlém případě a to 5,4 m/s.

Rychlost větru v tomto intervalu měření nebyla nikterak velká, pouze 5,68 % z naměřených hodnot převýšilo 3 m/s.



Obr. 6.12: Závislost rychlosti větru ve 3. období

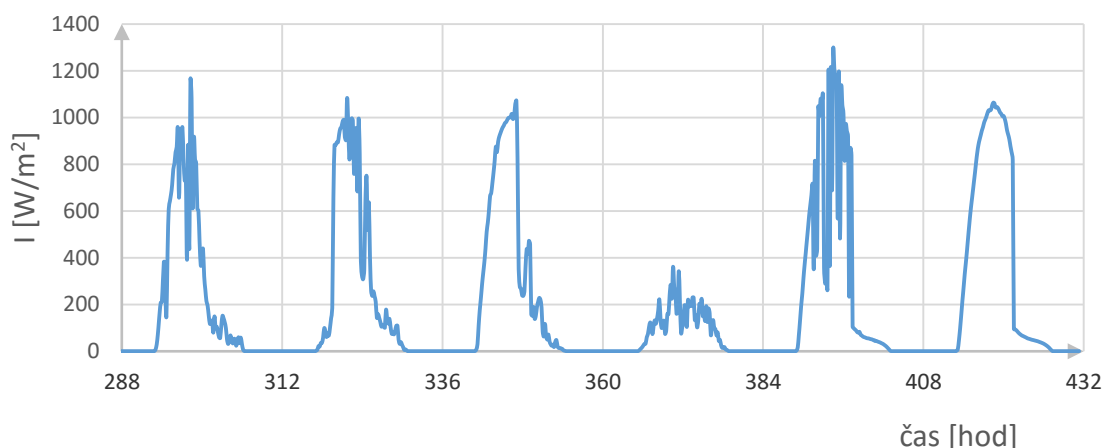
Rozložení výkonu na větrné turbíně JPT-100 je zobrazeno v grafu níže. Díky nepříznivým klimatickým podmínkám VT každý den prakticky stála, jak vyplývalo z grafu výše, jelikož rychlost větru v 95,26 % nepřesáhla 3 m/s. Maximální hodnota výkonu na větrné turbíně byla naměřena 13,66 W 5. dne z tohoto cyklu, tedy 20. 4. 2016 v 11hod 17 min. Celkově bylo vyrobeno v tomto 3. cyklu na větrné turbíně v důsledku nepříznivé rychlosti větru 4,10 Wh.



Obr. 6.13: Graf rozložení výkonu na VT ve 3. období

Klimatické podmínky však dopřávali spíše dopadu intenzity slunečního záření na fotovoltaický panel A-130, jak ne uvedeno v grafu níže. Během tohoto období byla dopadající intenzita slunečního záření každý den vyšší jak  $1000 \text{ W/m}^2$  až na 4. den, kde intenzita slunečního záření nepřesáhla hodnotu  $500 \text{ W/m}^2$  z důvodu oblačna, deště a jiným nepříznivým klimatickým vlivům. Maximální hodnota intenzity slunečního záření byla naměřena  $1290,77 \text{ W/m}^2$  5. dne, tedy 20. 4. 2016 v 11hod 17min. Z grafu je také možné určit střídající se den a noc. Intenzita slunečního záření začala intenzivně narůstat, již od 6:00 každý den až dovršila své maximální hodnoty v rozmezí 10-12 hodiny. Od tohoto časového intervalu začala intenzita dopadajícího slunečního záření klesat, až do 20. hodiny večerní kde klesla až na nulu. Celý tento cyklus se opakoval každý den.

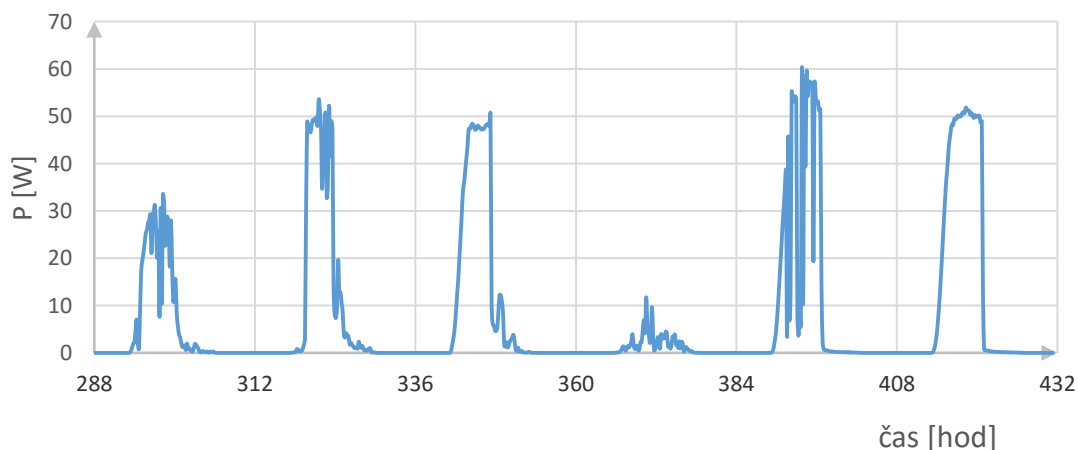
### Závislost aktuální intenzity dopadajícího slunečního záření



Obr. 6.14: Graf závislosti aktuální intenzity dopadajícího záření na pyranometru ve 3. období

Rozložení výkonu na fotovoltaickém panelu A-130 téměř kopíruje křivky průběhu intenzity dopadajícího slunečního záření, který je umístěn výše. Maximální naměřený výkon byl 60,38 W 5. dne (20. 4. 2016) v 10hod 36min (383,81 hodina od začátku měření). Ve dnech 16-17. 4. 2016 a 21. 4. 2016 dosáhl výkon až 51 W. Ve zbylé dva dny byl naměřený výkon na FV panelu nižší. Celkem bylo vyrobeno na fotovoltaickém panelu elektrické energie v tomto období 1,13 kWh.

### Graf rozložení výkonu na FV panelu

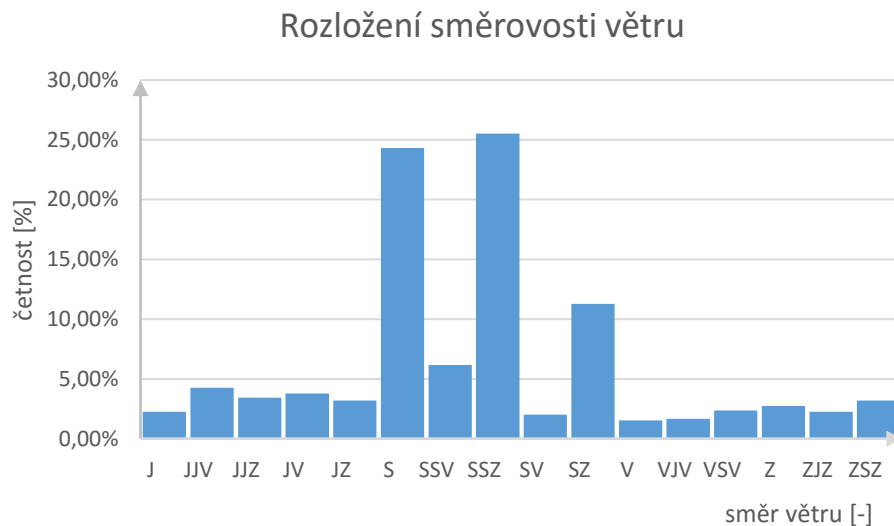


Obr. 6.15: Graf rozložení výkonu na FV panelu ve 3. období

#### 6.1.4 Vyhodnocení naměřených hodnot ve 4. období

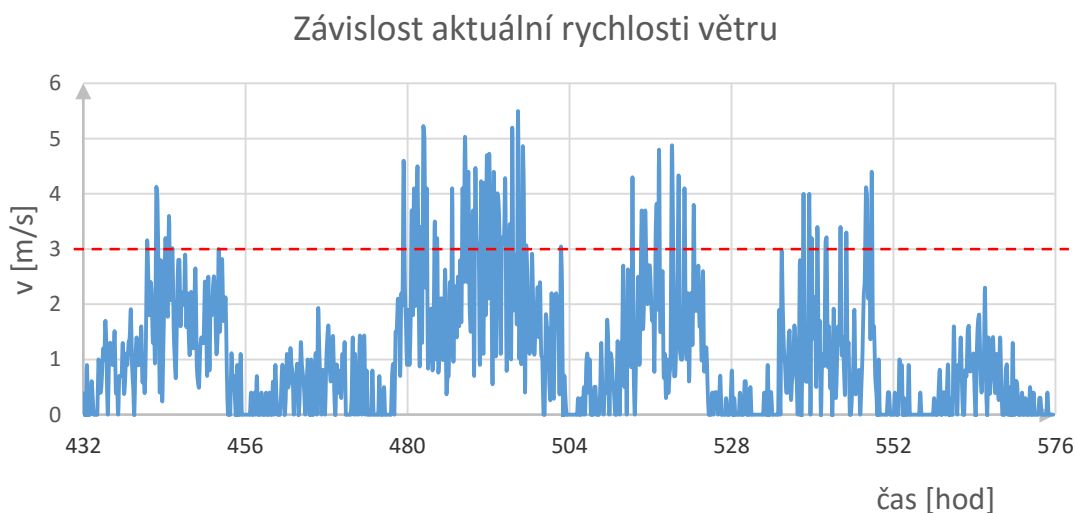
Čtvrté období bylo měřeno ve dnech 22.4-17. 4. 2016. Měření bylo spuštěno dne 22. 4. 2016 v 0:04 (431,48. hodina od začátku měření 1. cyklu) a ukončeno dne 27. 4. 2016 ve 23:53 (575,67. hodina).

Ze směrovosti větru opět vyplývá, že převážná část větru vála od severu a to ve 24,32 %, severoseverozápadu ve 25,50 % a severozápadu v 11,27 %. Ostatní směry větru nebyly nikterak výrazné a dosahovaly maximálně 6,17 %, takže se je možné je posoudit jako méně důležité, co se týče směrovosti větru.



Obr. 6.16: Rozložení směrovosti větru ve 4. období

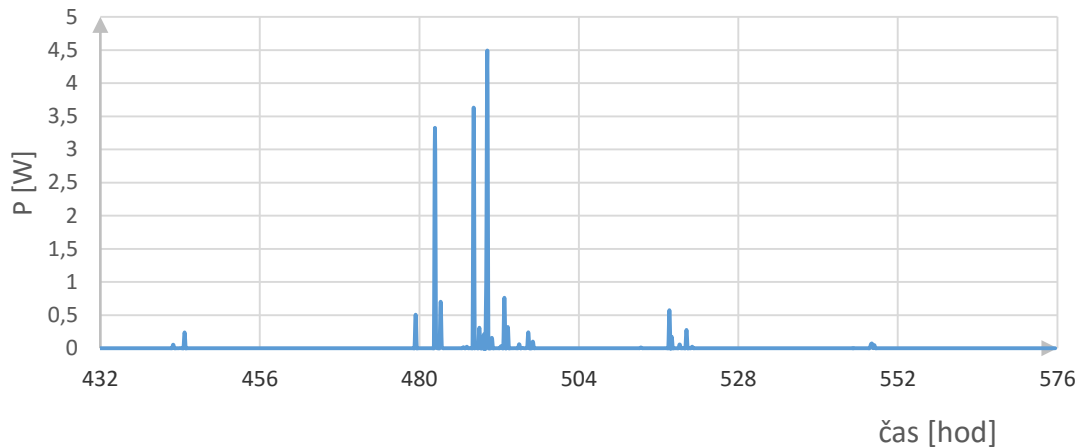
Pro aktuální rychlost větru byl vynesena graf níže. Rychlost větru 3 m/s byla překročena v 8,3 %. Maximální rychlost větru však dosáhla pouze 5,5 m/s dne 24. 4. 2016 v 16hod 50min ze SSZ směru větru.



Obr. 6.17: Závislost rychlosti větru ve 4. období

Graf, který je uvedený níže zobrazuje rozložení výkonu na větrné turbíně JPT-100. Vlivem spouštěcí rychlosti větrné turbíny (3 m/s), se rotační hlavice na VT spustila v 7,6 % v celém intervalu měření, ale s nízkou rychlostí větru, což mělo dopad na celkovou výrobu elektrické energie. Celkem bylo vyrobeno v tomto období na VT 2,93Wh.

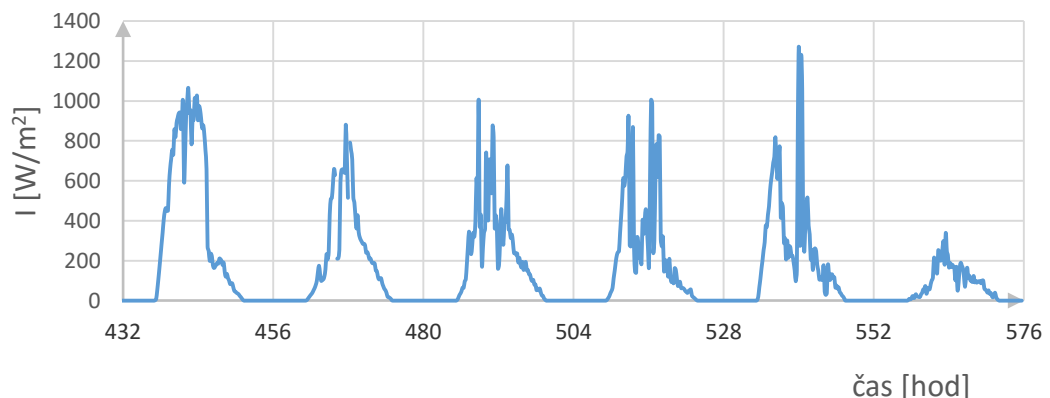
Graf rozložení výkonu na VT



Obr. 6.18: Graf rozložení výkonu na VT ve 4. období

Z intenzity dopadajícího záření vyplývá, že prakticky každý den v tomto období byl slunečný až na 6. den (27. 4. 2016), kde převládalo oblačno s občasnými přeháňkami a proto tento den intenzita dopadajícího slunečního záření nepřesáhla hodnotu  $339,71 \text{ W/m}^2$ . Maximální naměřená intenzita dopadajícího slunečního záření byla naměřena na hodnotě  $1251,48 \text{ W/m}^2$  dne 26. 4. 2016 v 12hod 18min (540,06 hodina od spuštění prvního měření). Jednotlivé výkyvy v jednotlivých průbězích jsou zapříčiněné pohybem oblaka, které zastíňují dopadající sluneční záření. Graf dále popisuje východ slunce okolo 6. hodiny ránní a zapadá okolo 20. hodiny večerní.

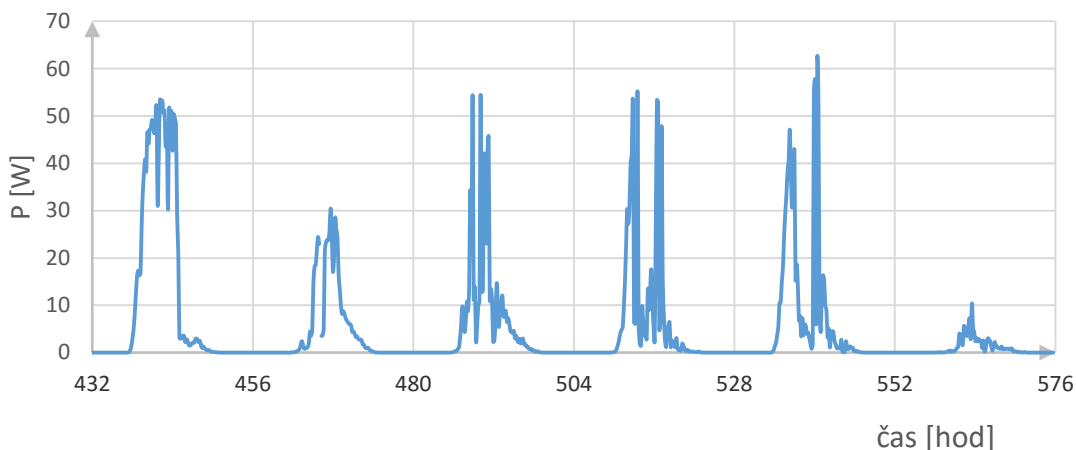
Závislost aktuální intenzity dopadajícího slunečního záření



Obr. 6.19: Graf závislosti aktuální intenzity dopadajícího slunečního záření na pyranometru ve 4. období

Výkon na fotovoltaickém panelu opět kopíruje křivky viz graf výše. Nejnižších hodnot výkonu na FV panelu bylo dosaženo 6. den, jak vyplývalo z intenzity dopadajícího slunečního záření. Nejvyššího výkonu však bylo dosaženo 24. 4. 2016 v čase 12:38.

Graf rozložení výkonu na FV panelu



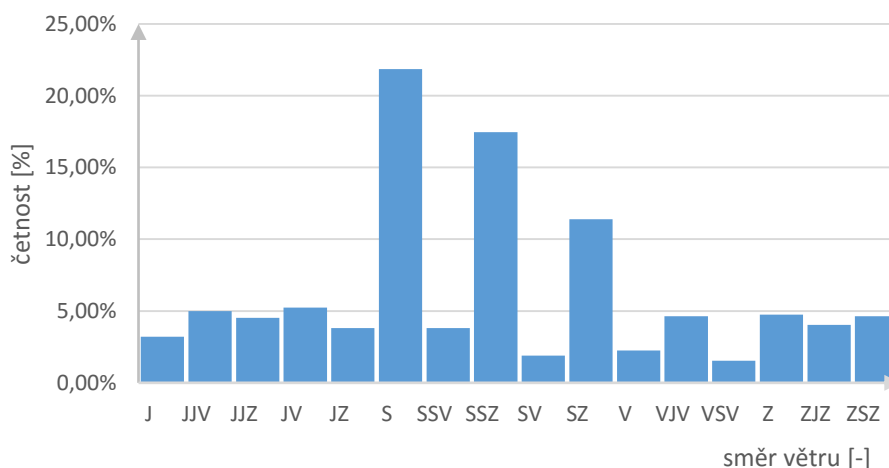
Obr. 6.20: Graf rozložení výkonu na FV panelu ve 4. období

### 6.1.5 Vyhodnocení naměřených hodnot v 5. období

Páté období bylo měřeno ve dnech 28.4- 3. 5. 2016. Měření bylo spuštěno dne 28. 4. 2016 v 0:03 (575,84. hodina od začátku měření 1. cyklu) a ukončeno dne 3. 5. 2016 v 23:51 (719,87. hodina).

Z grafu, uvedeného níže vyplývá, že převážná část větru vála od severu a to ve 21,85 %, což byl nejvíce frekventovaný směr větru. Dalšími směry větru, které je třeba podotknout, byl směr ze severoseverozápadu (17,46 %) a severozápadu (11,4 %). Ostatní směry větru dosahovali maximálně 5 %.

Rozložení směrovosti větru

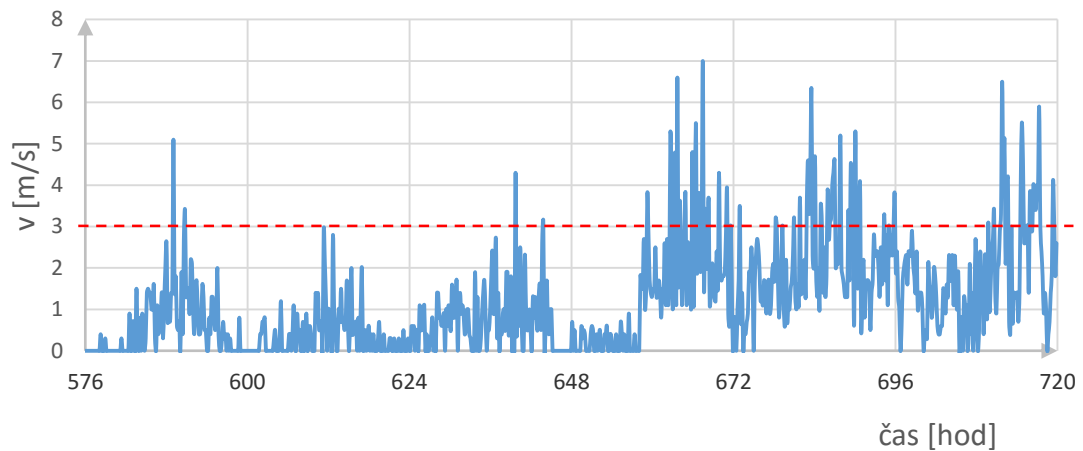


Obr. 6.21: Rozložení směrovosti větru v 5. období

Z rychlosti větru v tomto 5. období vyplývá, že maximální rychlost větru byla naměřena 7 m/s dne 5. 1. 2016 v 19ho 20min (667,46 hodina od 1. spuštění). V 90,85 % z celého měřeného intervalu byla větrná turbína v nečinnosti a v 9,15 % byla rychlost větru větší

jak 3 m/s. Opět tedy vál nárazový vítr, ale s vyšší rychlostí oproti předcházejícím obdobím.

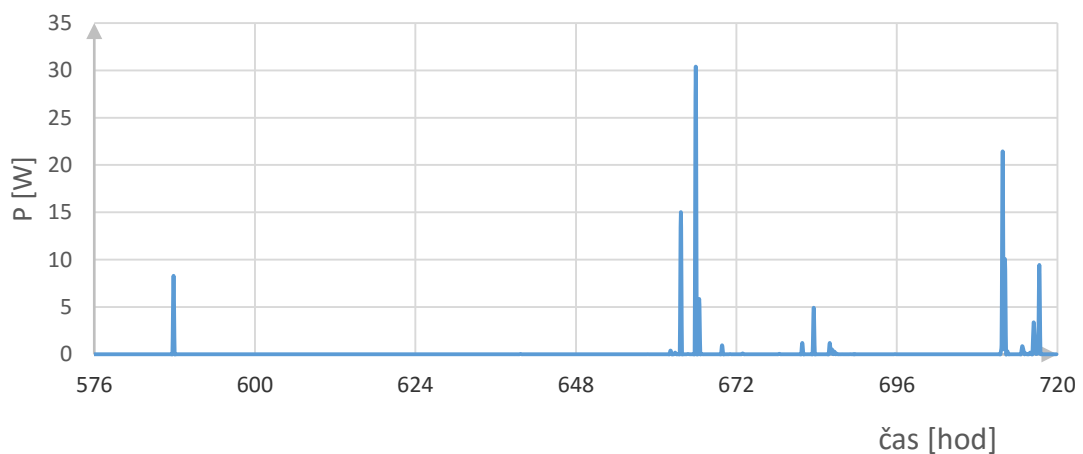
Závislost aktuální rychlosti větru



Obr. 6.22: Závislost rychlosti větru v 5. období

Maximální výkon větrné turbíny byl naměřen 30,39 W dne 5. 1. 2016 v 17:55min (665,92 hodina). Další významný bod byl naměřen do den později a to 21,44 W v 15:48. Celkem bylo vyrobeno v tomto období 19,95 Wh elektrické energie.

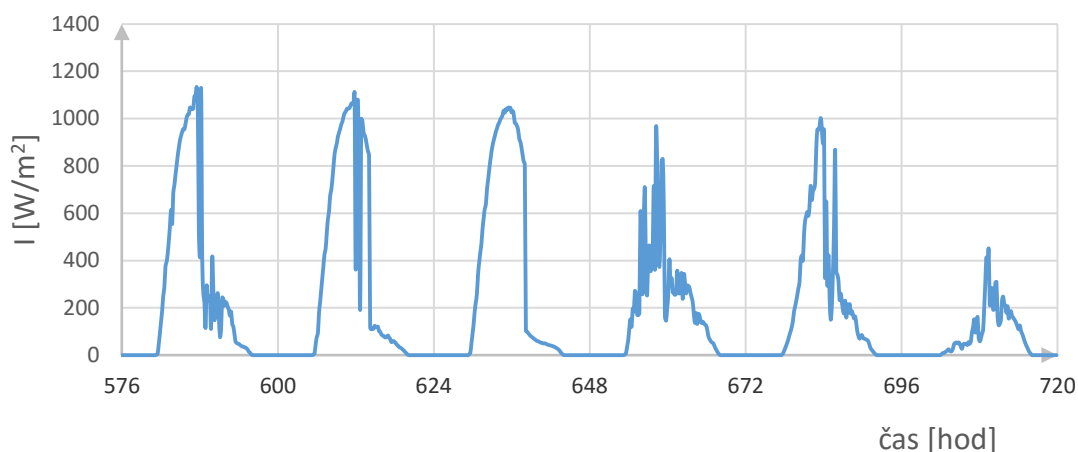
Graf rozložení výkonu na VT



Obr. 6.23: Graf rozložení výkonu na VT v 5. období

Z grafu intenzity slunečního záření vyplývá, že v tomto intervalu měření panovalo slunečné počasí, až na poslední den, kdy intenzita dopadajícího slunečního záření nepřesáhla hranici  $710 \text{ W/m}^2$  z důvodu nepříznivých klimatických podmínek. Maximální naměřená hodnota pro intenzitu dopadajícího slunečního záření byla  $1129,69 \text{ W/m}^2$ . Ostatní dny byla tato hodnota o něco nižší a to maximálně  $1108 \text{ W/m}^2$ . Z grafu také vyplývá, že ve 3. dnu měření panovalo pouze slunečné počasí.

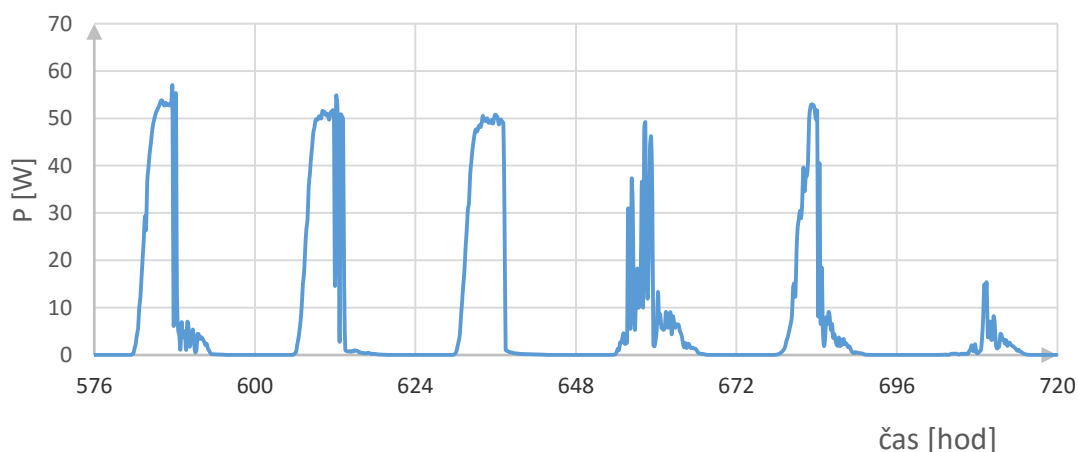
### Závislost aktuální intenzity dopadajícího slunečního záření



Obr. 6.24: Graf závislosti aktuální intenzity dopadajícího záření na pyranometru v 5. období

Z grafu, který je umístěn níže, opět vyplývá, že závislost výkonu na fotovoltaickém panelu opět kopíruje křivky dopadající intenzity slunečního záření, která má vliv na výrobu elektrické energie. Maximální hodnoty výkonu na FV panelu bylo dosaženo první den s hodnotou 56,63 W v čase 11:52 (587,66. hodina) a druhý den 54,67 W v 12:11 (612,15 hodina). V ostatních dnech výkon FV panelu dosahoval okolo 50 W, až na poslední den kde hodnota nepřesáhla 15,20 W.

### Graf rozložení výkonu na FV panelu

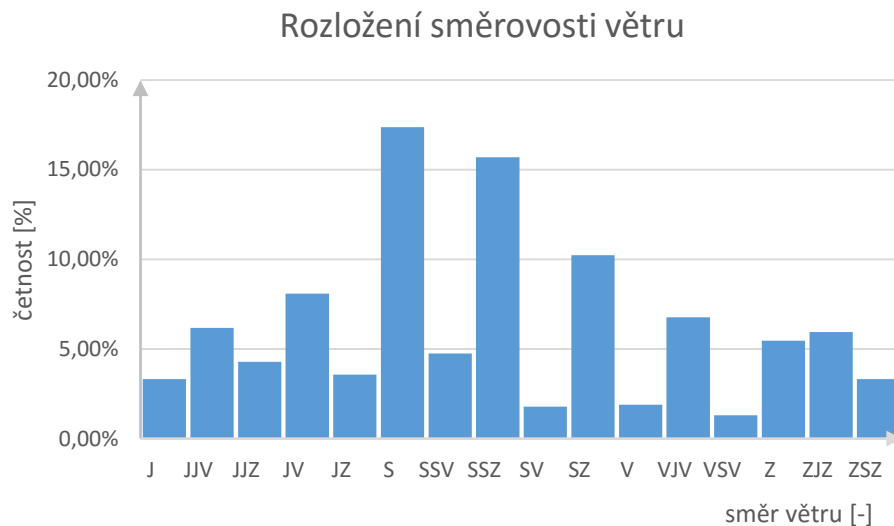


Obr. 6.25: Graf rozložení výkonu na FV panelu v 5. období

#### 6.1.6 Vyhodnocení naměřených hodnot v 6. období

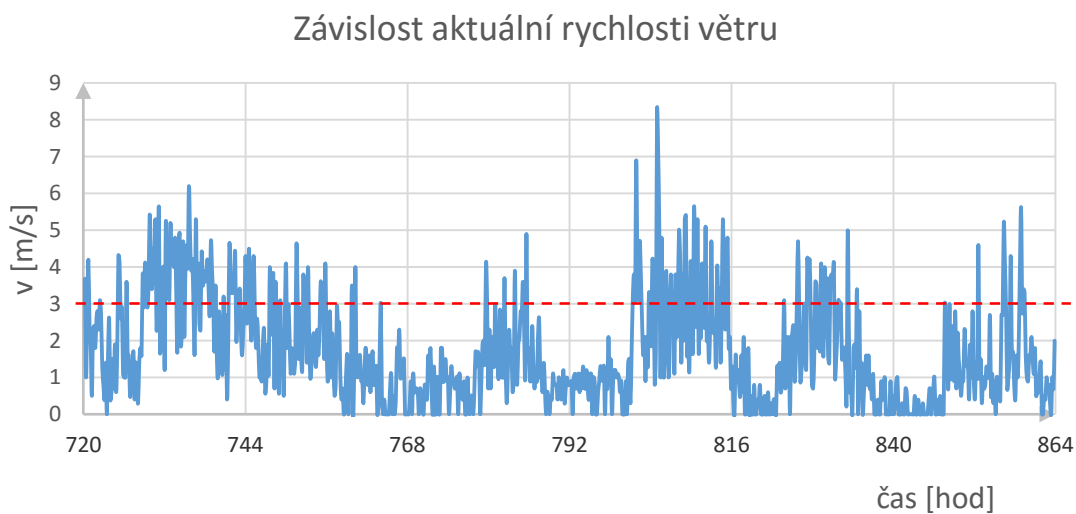
Šesté období bylo měřeno ve dnech 4.5- 9. 5. 2016. Měření bylo spuštěno dne 4. 5. 2016 v 0:01 (720. hodina od začátku měření 1. cyklu) a ukončeno dne 9. 5. 2016 v 23:54 (863,89. hodina).

V 6. období byla distribuce větru velice proměnlivá. Nejvyšších hodnot dosahoval směr větru opět ze severu a to v 17,36 %, dále ze severoseverozápadu (15,7 %), severozápadu (10,23 %), jihovýchodu (8,09 %) a VJV (6,78 %).



Obr. 6.26: Rozložení směrovosti větru v 6. období

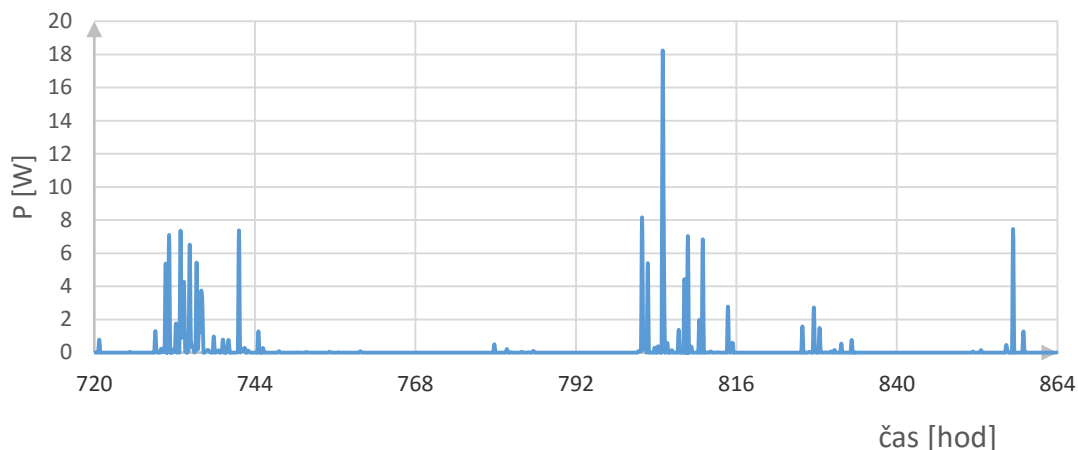
Z grafu vyplývá, že v 6. období byla aktivnost větru nejvyšší. Maximální naměřená rychlost větru byla 8,2 m/s dne 7. 5. 2016 v 12:57 (804,9. hodina od spuštění měření). Celkem bylo zaznamenáno 841 měření. Analýzou bylo zjištěno, že 166 měření zaznamenalo rychlost větru větší jak 3 m/s, což odpovídá 19,73 % z celkového počtu naměřených vzorků.



Obr. 6.27: Závislost rychlosti větru v 6. období

Nejvyšší výkon byl naměřen čtvrtý den, tedy 7. 5. 2016 s maximální naměřenou hodnotou výkonu 18,24 W v 12:57 (804,98. hodina). Během 6. období, tedy ve dnech 4-9. 5. 2016 bylo vyrobeno na větrné turbíně JPT-100 26,14 Wh elektrické energie.

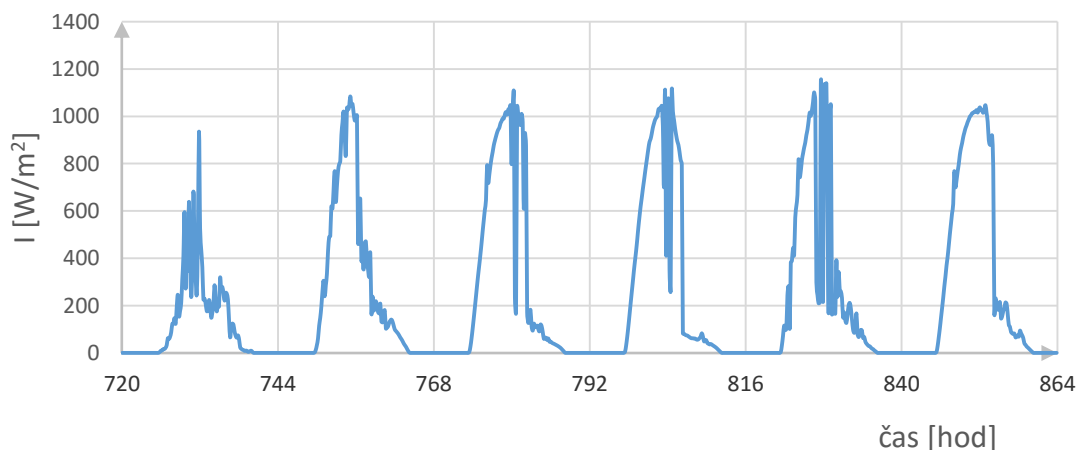
Graf rozložení výkonu na VT



Obr. 6.28: Graf rozložení výkonu na VT v 6. období

V posledním období panovalo slunečno, místy oblačno s občasnými přeháňky. Pouze v první den tohoto cyklu měření nepřekročila hodnota intenzity dopadajícího slunečního záření  $1000 \text{ W/m}^2$ , jako ve zbylých dnech. Maximální hodnoty bylo dosaženo dne 8. 5. 2016 v 12:25 a to  $1138 \text{ W/m}^2$ .

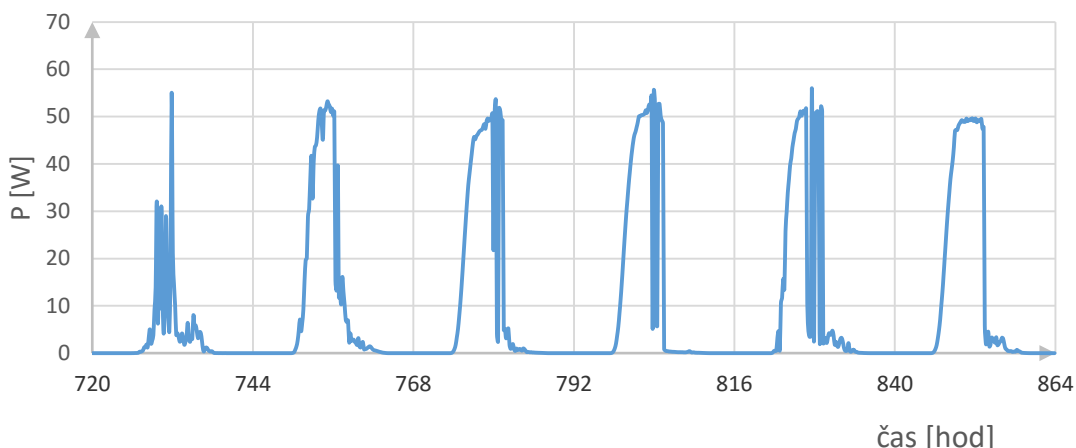
Závislost aktuální intenzity dopadajícího slunečního záření



Obr. 6.29: Graf závislosti aktuální intenzity dopadajícího záření na pyranometru v 6. období

Rozložení výkonu na fotovoltaickém panelu A-130 je zakresleno v grafu uvedeného níže. Z jeho charakteristiky vyplývá, že každý den dosáhla hodnota výkonu na FV panelu okolo 50 W, oproti jinému období. Maximální hodnota výkonu, kterou bylo možné naměřit, byla 56 W 5. den, tedy 8. 5. 2016 v 11:34 (827,58 hodina). V ostatních dnech se nejvyšší naměřené hodnoty pohybovaly v rozmezí 50,268-55,3 W. Celkem bylo vyrobeno na fotovoltaickém panelu v 6. období 5,15 kWh elektrické energie.

Graf rozložení výkonu na FV panelu

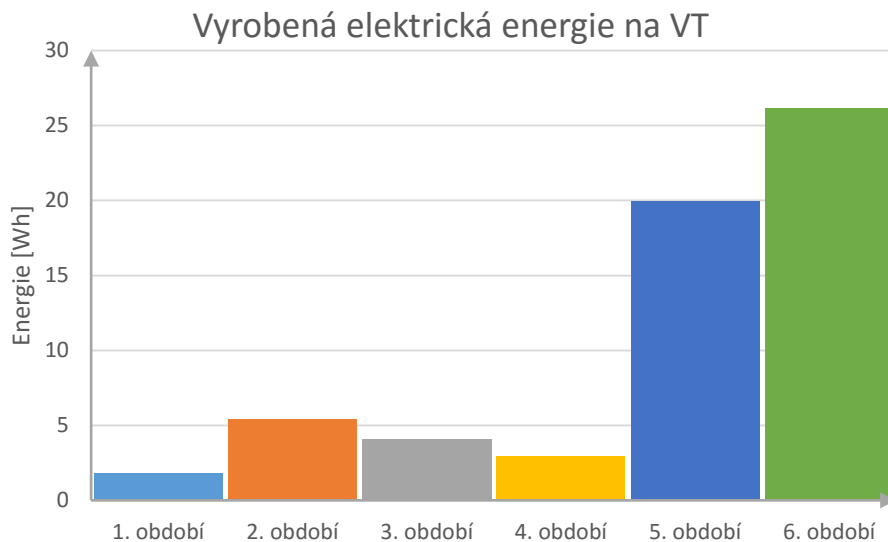


Obr. 6.30: Graf rozložení výkonu na FV panelu v 6. období

### 6.1.7 Vyhodnocení naměřených dat v rámci šesti období

Ve zvoleném časovém období bylo provedeno experimentální měření na malé větrné turbíně JPT-100, fotovoltaickém panelu A-130, pyranometru SG420, anemometru TX20ETH a teplotním čidlu PT100. Celková doba měření trvala 863,98 hodin, tedy 36 dnů a bylo provedeno 5046 měření v 10 minutovém intervalu (vybráno z měření po 30 vteřinách z důvodu dlouhodobého měření)

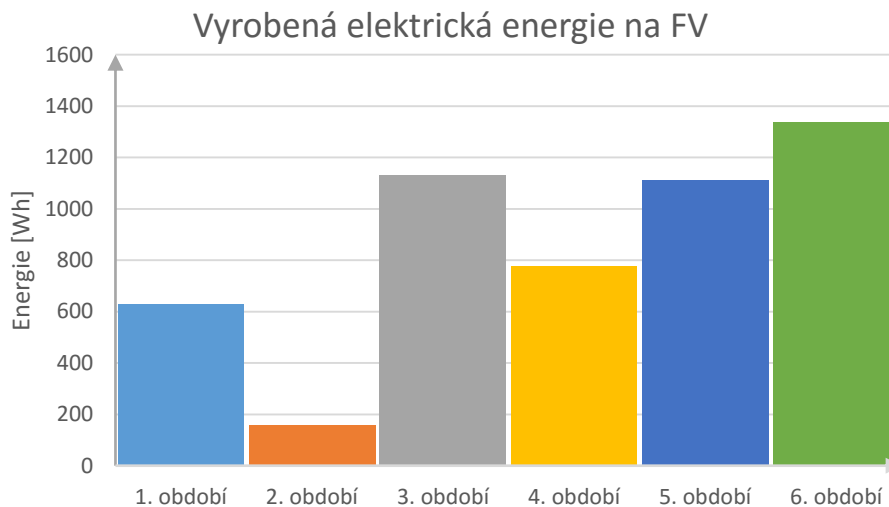
Malá větrná turbína JPT-100 vyrobila za celkové období 60,4 Wh elektrické energie, z toho nejvyšších naměřených hodnot výroby elektrické energie bylo dosaženo v pátém období (19,95 Wh) a šestém období (26,14 Wh). Ve zbytku období panovaly nepříznivé klimatické podmínky pro výrobu elektrické energie, jak uvádí graf níže.



Obr. 6.31: Závislost výroby elektrické energie na VT v jednotlivém období

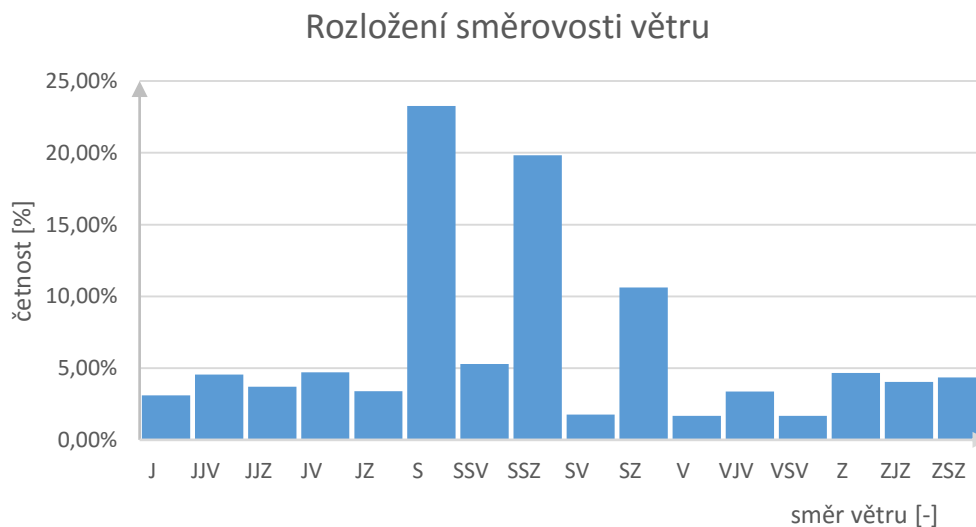
Fotovoltaický panel A-130 vyrobil celkem 5,15 kWh elektrické energie. Již od prvního pohledu na graf viz Obr 6.29 je možné zjistit, že se na fotovoltaickém panelu vyrobilo mnohonásobně více elektrické energie každý den oproti VT. Nejnižší úroveň vyrobené energie (158,36 Wh) bylo dosaženo ve 2. období. V 6. období se vyrobilo 1338,65 Wh elektrické energie. Z grafu je na první pohled zřejmé, že pro výrobu elektrické energie

byly výhodnější klimatické podmínky na FV panelu než na větrné turbíně. Nejvýhodnější klimatické podmínky byly v šestém období, kde FV panel vyrobil 1,338 kWh, což je o 98,05 % více než při výrobě elektrické energie na VT ve stejném období.



Obr. 6.32: Závislost výroby elektrické energie na FV v jednotlivém období

V rámci 36 dnů byla naměřena směrnost větru pomocí ethernetového anemometru. Nejvyšší četnosti směru větru bylo dosaženo ze severu (23,27 %) a severoseverozápadu (19,84 %). S nižší četností vál vítr ze severozápadu v 10,62 %. U zbylých směrů nebylo překročeno ani 5 %.



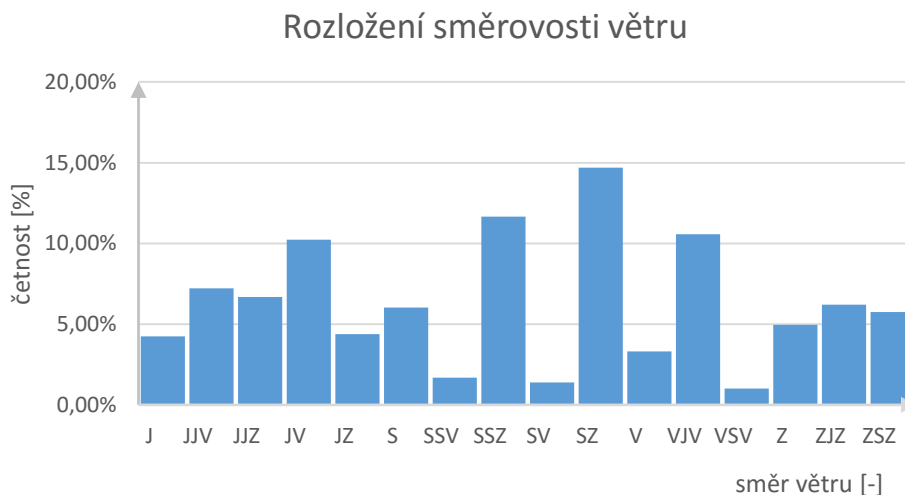
Obr. 6.33: Rozložení směrnosti větru za 36 dnů

## 6.2 Výběr dvou nejefektivnějších dnů pro výrobu elektrické energie na malé větrné turbíně a fotovoltaickém panelu

Z celkové doby měření (36 dní), byly vybrány dva nejefektivnější dny pro výrobu elektrické energie na fotovoltaickém panelu A-130 a větrné turbíně JPT-100. V první podkapitole je uveden nejvyšší den pro výrobu elektrické energie na VT a ve druhé na FV panelu.

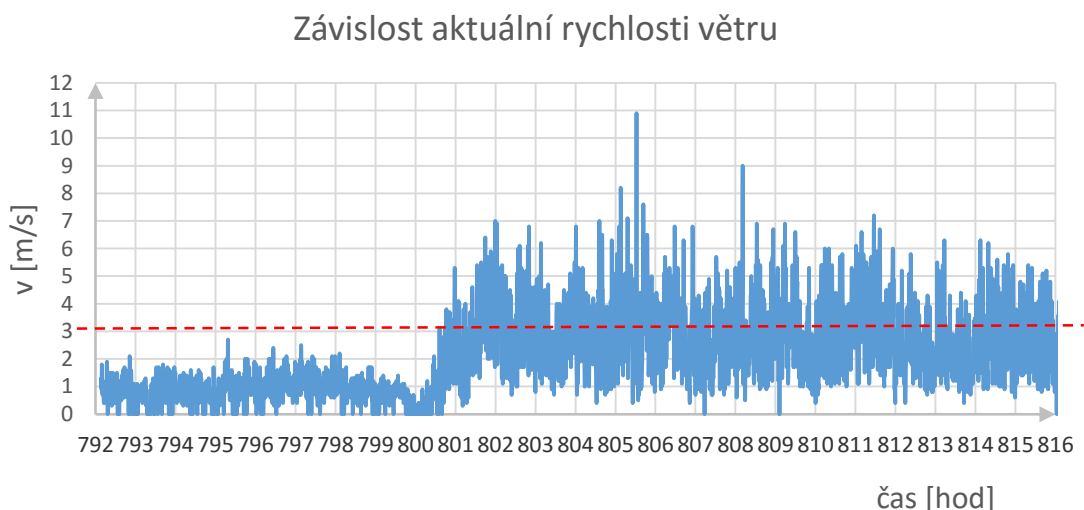
### 6.2.1 Nejefektivnější den pro výrobu elektrické energie na malé větrné turbíně

Dne 7. 5. 2016 se vyrobilo nejvíce elektrické energie na větrné turbíně z celého proměřeného období a to 9.95 Wh. Celkem bylo zaznamenáno 2803 měření pro tento den. Ze směrovosti větru vyplývá, že nejvyšší četnosti bylo ze severozápadu (14,7 % z celého dne). Dále vítr váł z JV, SSZ, VJV z přibližně stejnou četností (10,56-11,67 %).



Obr. 6.34: Rozložení směrovosti větru v 6. období dne 7. 5. 2016

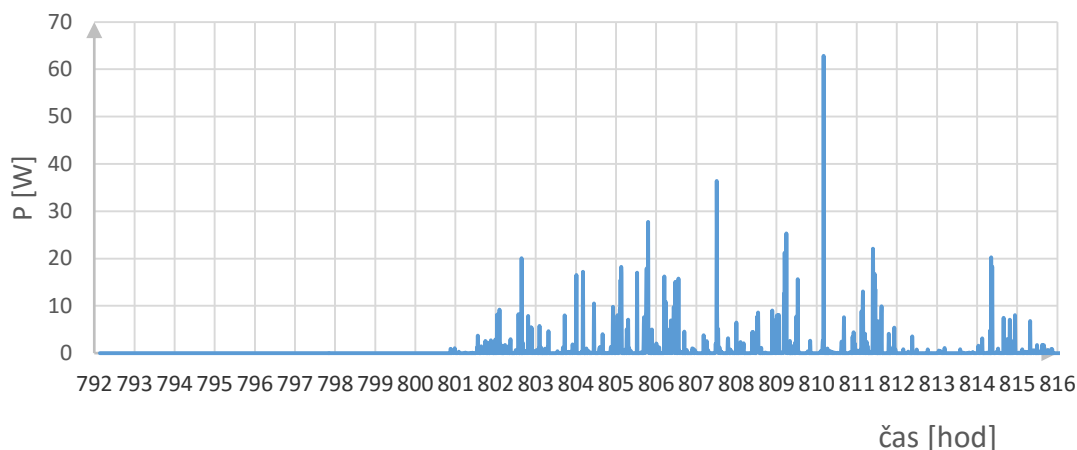
Závislost rychlosti větru na hodinovém rozložení je uvedena níže. V grafu je vyznačena červenou čerchovanou čarou spouštěcí rychlost 3 m/s větrné turbíny. Tato hranice byla překročena ve 27,5 % z celkového dne. V 72,5 % byla VT v neaktivní činnosti a nemohla vyrábět elektrickou energii. Maximální naměřená rychlost 10,9 m/s byla naměřena v 13:20:55 (805,52. hodina).



Obr. 6.35: Závislost rychlosti větru v 6. období dne 7. 5. 2016

Z rozložení výkonu na větrné turbíně vyplývá, že maximálně naměřený výkon byl 62,84 W v 17:57:56 (810,17. hodina). Graf vypovídá o tom, že větrná turbína se spouštěla jen v krátkých intervalech, tudíž vyráběla elektrickou energii jen nárazově.

Graf rozložení výkonu na VT



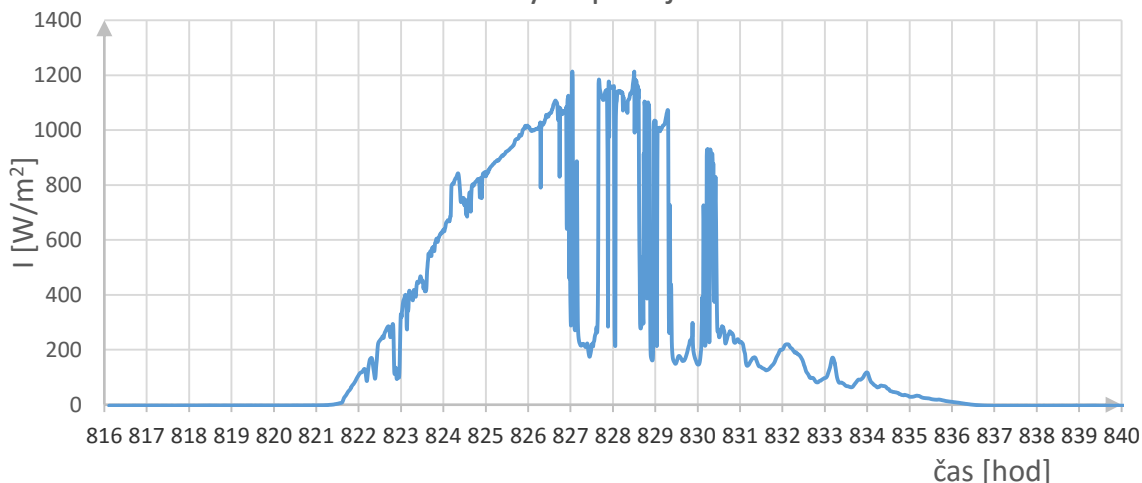
Obr. 6.36: Graf rozložení výkonu na VT v 6. období dne 7. 5. 2016

### 6.2.2 Nejefektivnější den pro výrobu elektrické energie na fotovoltaickém panelu

Dne 8. 5. 2016 se vyrobilo nejvíce elektrické energie na fotovoltaickém panelu A-130, z celého proměřeného období a to 231,73 Wh. Celkem bylo zaznamenáno 2803 měření pro tento den.

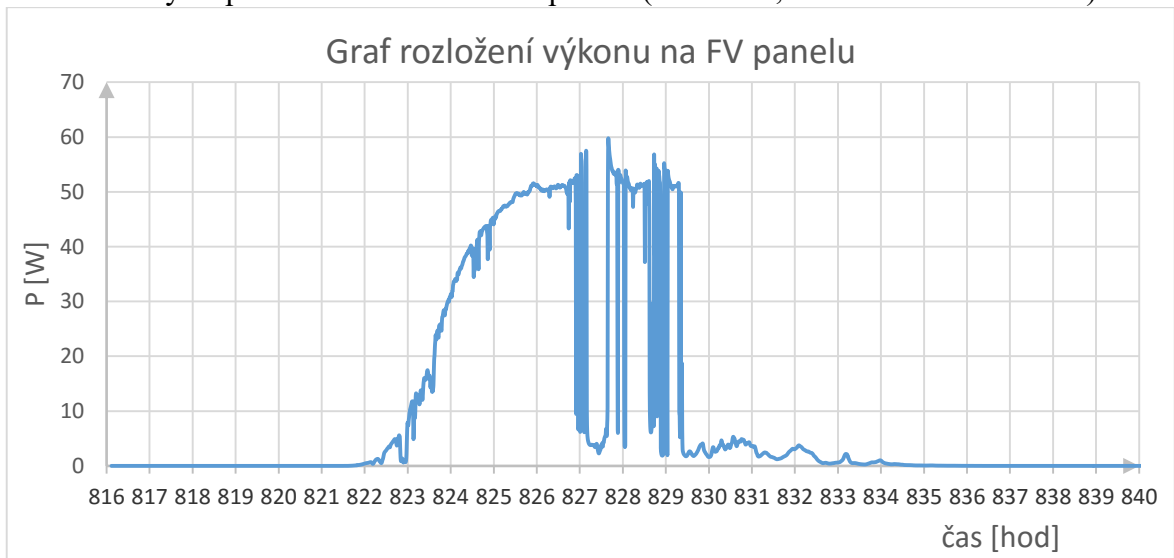
Ze závislosti dopadající intenzity slunečního záření je možné usoudit, že východ slunce mohl nastat přibližně v 5 hodin 16 minut, kdy intenzita záření začala rychle narůstat. Maximální naměřená intenzita dopadu slunečního záření byla  $1213,5 \text{ W/m}^2$  v 10:54:38. (827,04. hodina). Z grafu je také možné vyzorovat, že v určitých intervalech docházelo k poklesu intenzity záření z důvodu pohybu oblaků po obloze, které bránily dopadu slunečních paprsků na fotovoltaický panel a také částečnému až úplnému zastínění FV panelu budovou Technická 10. Západ slunce nastal přibližně okolo 20. hodiny, kdy intenzita slunečního záření klesla na nulovou hodnotu.

Závislost aktuální intenzity dopadajícího slunečního záření



Obr. 6.37: Graf závislosti aktuální intenzity dopadajícího záření na pyranometru v 6. období dne 8. 5. 2016

Graf, který je umístěn níže popisuje rozložení výkonu na fotovoltaickém panelu A-130 dne 8. 5. 2016. z prvního pohledu je možné usoudit, že je obdobnou kopií, která byla popsána výše, protože závislost dopadající intenzity závisí na výkonu fotovoltaického panelu a tím i výrobě elektrické energie. Výkon je také ovlivněn jinými parametry, jako je například teplotou panelu, sklonem, orientací a umístěním FV panelu. Z výkonu panelu vyplývá, že maximální naměřená hodnota výkonu byla 59,78 W v čase 11:31:32 (827,66. hodina). Vyššího výkonu jak 50 W bylo dosaženo v rozmezí 9. - 13. hodiny (825,82-829,34. hodina), pak výkon panelu extrémně klesl téměř na nulovou hodnotu, což mohlo být zapříčiněné zastíněním FV panelu (oblačnost, budova Technická T10).



Obr. 6.38: Graf rozložení výkonu na FV panelu v 6. období dne 8. 5. 2016

# ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo seznámit se s obnovitelnými zdroji energie, v tomto případě se jednalo o větrnou a solární energii. Dalším úkolem bylo vytvořit měřicí stanoviště a software pro sběr dat z malé větrné elektrárny JPT-100, fotovoltaického panelu A-130, pyranometru SG420, anemometru TX20ETH a teplotního čidla PT100. Práce je rozdělena na teoretickou část a praktickou část.

První kapitola se zabývá energií větru, která patří mezi lidstvem nejdéle využívaná. Rychlost a směrnost větru je možné zjistit pomocí Beaufotovy stupnice větru nebo za pomoci anemometru. Kapitola obsahuje také základní rozdělení větrných motorů a důležité teoretické poznatky rozdílu odporových a vztlakových větrných motorů. Důkladně byl popsán princip vzniku vztlaku na lopatkách rotoru, který byl doplněn ilustračními obrázky. Základní princip vzniku vztlaku na lopatkách vychází ze zákona o zachování hmoty a bývá vyjádřen rovnicí kontinuity. Pro dosažení maxima pro vztlakovou sílu je třeba, aby byl profil ofukován pod správným úhlem, který je rozdílný u různých profilů. Základní složení větrné rychloběžné turbíny, doplněné teorií, je na obrázku obr. 1.12. Elektrické zařízení VTE se dělí na dva druhy a slouží převážně k přeměně mechanické energie na elektrickou. Úkolem každé větrné elektrárny je zajistit efektivní a rychle pracující regulaci výkonu rotoru tak, aby nedošlo k mechanickému nebo elektrickému přetížení větrné elektrárny. Podrobný popis a rozdělení regulací výkonu větrných turbín byl popsán v kapitole 1.7.

Solární energie je také řazena mezi OZE. Základní teoretické poznatky jsou uvedeny v úvodu této kapitoly. Na ni navazuje podrobný popis fotoelektrického jevu, doplněný obrázkem. Kapitola dále obsahuje základní dělení generací FV panelů, podrobný popis výroby fotovoltaických panelů a voltampérovou charakteristiku, ze které je možné vyčíst základní informace o FV článku.

Třetí kapitola byla věnována teorii měření. Při návrhu větrné elektrárny bylo důležité počítat s parametry, jako jsou: rychlost větru, tlak vzduchu, hustota vzduchu, síla větru aj. Jedním z důležitých údajů je Betzův limit, který stanovuje omezení maximálního teoretického výkonu VT. Jeho odvození je uvedeno taktéž v této kapitole.

V praktické části bylo potřeba navrhnout, sestavit a zprovoznit měřicí pracoviště, které se nachází ve 4. patře budovy Technická 10. Větrná turbína byla umístěná na kraj střechy, aby nedocházelo k ovlivnění směrnosti a rychlosti větru. Anemometr byl připevněn k podstavci stožáru větrné turbíny JPT-100. Výškový rozdíl v pozici anemometru a VT způsoboval odchylky v naměřené rychlosti a směru větru. Pro získání přesnějších výsledků by bylo vhodnější umístit anemometr do úrovně hlavy rotoru, aby k těmto odchýlkám nedocházelo.

Podobná situace vznikla u fotovoltaického panelu A-130 a pyranometru SG420. Kvůli nevhodné vzdálenosti umístění pyranometru docházelo k situaci, kdy procházející oblačnost zastínila FV panel v jiný časový okamžik, než samotný pyranometr. Umístění pyranometru co nejbližší k fotovoltaickému panelu by tyto odchylky v měření snížilo.

Pro sběr dat z malé větrné turbíny JPT-100, fotovoltaického panelu, ethernetového anemometru TH20ETH, pyranometru SG420 a teplotního čidla PT100 byl vytvořen software v programu Agilent VEE.

Ve zvoleném časovém období 36 dní proběhlo experimentální měření. Celkem bylo zaznamenáno 5046 měření (pro 10 minutový časový interval, který byl užit pro vyhodnocení dat z dlouhodobého měření). Ze získaných údajů měření bylo určeno množství vyrobené energie na fotovoltaickém panelu A-130 a malé větrné turbíně JPT- 100. Na větrné turbíně bylo vyrobeno celkem 60,40 Wh elektrické energie za celé

proměřené období. Tento údaj vypovídá o tom, že v průběhu 36 dní nepanovaly vhodné povětrnostní podmínky (nízká rychlost větru) pro dostatečný rozběh rotoru a stálý provoz VT. Je tedy možné usoudit, že zvolené místo pro větrnou turbínu není zcela ideální. Abychom zajistili vyšší výkonost VT, je potřeba umístit větrnou turbínu výše, kde rychlost a směr větru nebude ovlivněna městskou zástavbou nebo umístěna do volného prostranství. Jednotlivé výkonové zastoupení elektrické energie na VT v určitém období je vyneseno ve sloupcovém grafu viz obr 6.31. Ve stejné kapitole je také vyneseno graf rozložení směrnosti větru, ze kterého vyplývá, že nejvyššího zastoupení měl směr větru ze severu (23,27 %) a severoseverozápadu (19,84 %). Spouštěcí rychlost malé větrné turbíny 3 m/s byla překročena pouze v 10 % z celkové doby měření, na čemž se odrážel celkový výkon VT. Maximální rychlost větru, naměřená na ethernetovém anemometru TX20ETH byla 8,2 m/s. dne 7. 5. 2016 v čase 12:52.

Na fotovoltaickém panelu bylo vyrobeno celkem 5,15 kWh elektrické energie, což bylo mnohonásobně více než u větrné turbíny. V příloze je porovnání sklonu a natočení FV panelu na budově Technická 10 s prakticky ideálním natočením a sklonem, které by přispělo ke zvýšení účinnosti fotovoltaického panelu A- 130. Pomocí pyranometru SG420 bylo možné změřit maximální možnou intenzitu dopadajícího slunečního záření 1213,5 W/m<sup>2</sup> dne 8. 5. 2016 v čase 10:54:38. Srovnání výroby elektrické energie v jednotlivém období je na obr. 6.32. a nejefektivnější den z výroby elektrické energie na FV panelu viz kapitola 6.2.2

Velkou výhodou obnovitelných zdrojů je, že oproti klasickým zdrojům nevznikají žádné škodlivé emise (dusík, síra), které se podílejí na vzniku kyselých dešťů. Dále nevznikají žádné jaderné odpady a oxid uhličitý, který bývá obvykle spojován se vznikem skleníkového efektu a jím ovlivněné globální klimatické podmínky. Jsou považovány za nevyčerpatelný a trvale udržitelný zdroj energie, který má minimální dopad na životní prostředí.

Nevýhody OZE vyplývají z podstaty jejich přijímané energie, která je v některých případech časově proměnlivá a závislá na přírodních podmínkách (energie větru, sluneční energie). Dále sem patří vysoké investiční náklady a jejich dlouhá návratnost.

Měřící pracoviště pro systém vzdálené dodávky energie by bylo možné zařadit do laboratorního cvičení v předmětech, které se zabývají obnovitelnými zdroji elektrické energie. Cílem úlohy by mohlo být měření aktuálních hodnot rychlosti a směrnosti větru, intenzity dopadajícího slunečního záření a výroby elektrické energie na větrné turbíně a vybraném fotovoltaickém panelu. Úloha by mohla být přínosná, protože by se studenti seznámili s měřením v reálných venkovních podmínkách.

Pracoviště by bylo možné rozšířit dalšími komponenty pro přesnější měření, doplněním akumulátoru pro uchování elektrické energie nebo připojením dalších FV panelu (polykrystalického a amorfního) a jejich testováním parametrů mezi sebou. Přidáním MPP trackeru by se zajistilo stálé udržování nastaveného maximálního bodu výkonu FV panelu oproti odporu, který byl zařazen v měřícím pracovišti. Tento odpor byl neměnný a nemohl tedy zajistit vždy nastavení tohoto maximálního bodu.

# LITERATURA

## Tištěné zdroje:

- [ 1 ] RYCHETNÍK, V.; PAVELKA, J.; JANOUŠEK, J. Větrné motory a elektrárny. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1997. 199 s. ISBN 80-01-01563-7
- [ 2 ] KLENOVČANOVÁ, A.; IMRIŠ, I. Zdroje a přeměny energie. 1. vyd. Prešov: ManaCon, 2006. 492 s. ISBN 80-89040-29-2.
- [ 3 ] MASTNÝ, P. Studijní podklady předmětu Malé zdroje elektrické energie prezentace. Vydavatel: UEEN FEKT VUT v Brně, 2011.
- [ 4 ] MALÍK, M., PRIMAS, J. Anemometrické metody. [Učební text] Liberec, 2011.
- [ 5 ] MASTNÝ, P. A KOL., Fotografický a obrazový archiv autorů, UEEN FEKT VUT v Brně
- [ 6 ] JANÍČEK, F. a kolektiv autorů. Obnovitelné zdroj energie 1: technologie pro udržatelnou budoucnost. 1. vyd. Bratislava: STU FEI, 2007. ISBN 978-80-969777-0-3.
- [ 7 ] Strzelecki, R., Benysek, G., Power Electronics in Smart Electrical Energy Networks, Springer – Verlag London Limited, 2008, ISBN: 978-1-84800-317-0
- [ 8 ] JETPRO TECHNOLOGY, INC., JPT-100 Wind Turbine User Manual, duben 2011, 35 s.
- [ 9 ] KRIEG, B., Elektrina ze slunce, Ostrava, 1993
- [ 10 ] VANĚK, Jiří; KŘIVÍK, Petr; NOVÁK, Vítězslav. Alternativní zdroje energie. Brno, 2006, 165s. Skriptum. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie.
- [ 11 ] CIHELKA, Jaromír. Sluneční vytápěcí systémy. Praha : SNTL, 1984. 206 s.
- [ 12 ] LIBRA, M. - POULEK, V.: Fotovoltaická transformace energie. Elektro 2/2010.
- [ 13 ] LIBRA, M. - POULEK, V.: Konstrukce a výroba fotovoltaických článků a panelů. Elektro 3/2010.
- [ 14 ] VANĚK, Jiří; KŘIVÍK, Petr; NOVÁK, Vítězslav. Obnovitelné zdroje energie. Brno, 2014, 116s. Skriptum. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie.
- [ 15 ] MASTNÝ, Petr, Jan MORÁVEK a Jaří PITRON. Malé zdroje elektrické energie. Brno, 2015. 170s. Skriptum: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie.
- [ 16 ] KAMINSKÝ, J., VRTEK, M., Obnovitelné a alternativní zdroje energie, Interní učební texty – skriptum, 2002, VŠB Ostrava
- [ 17 ] KOUTNÍK, Tomáš. Cvičení v předmětu Letadla – prezentace č. 3. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta Strojního inženýrství, Letecký ústav. 2014-03-06
- [ 18 ] ČIČMANEC, P., *Všeobecná fyzika 2, Elektrina a magnetismus*, Bratislava: Alfa a SNTL, 1980

- [ 19 ] DVOŘÁK, Z., KLAZAR, L., PETRÁK, J. Tepelná čerpadla. 1. vyd. Praha: SNTL, 1987. 340 s
- [ 20 ] KREIDL, M. Měření teploty – senzory a měřící obvody. Praha: Vydavatelství BEN, 2005. 240 s. ISBN 80-7300-145-4.

### **Elektronické zdroje:**

- [ 21 ] ČESKÁ SPOLEČNOST PRO VĚTRNOU ENERGII. *Vznik vztlaku* [online]. In: . 2013 [cit. 2015-12-05]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/cz/clanky/vznik-vztlaku/307>
- [ 22 ] BRANDOS, Otakar. Beaufortova stupnice: Stupnice síly (rychlosti) větru. *Beaufortova stupnice: Stupnice síly (rychlosti) větru* [online]. 2010, (6) [cit. 2015-11-12]. Dostupné z: <http://www.treking.cz/archiv/beaufortova-stupnice-sily-vetru.htm>
- [ 23 ] PAPOUCH S.R.O. *TX20ETH: Katalogový list* [online]. 2013, 2013-12-11 [cit. 2015-11-13]. Dostupné z: [www.papouch.com/cz/shop/./tx20eth./tx20eth.pdf/downloadFile.php](http://www.papouch.com/cz/shop/./tx20eth./tx20eth.pdf/downloadFile.php)
- [ 24 ] Webové stránky společnosti W.E.B Větrná energie s.r.o.– [http://www.vetrna-energie.cz/energie-zivlu/vetrna-energie\\_9/systemy-regulace\\_27](http://www.vetrna-energie.cz/energie-zivlu/vetrna-energie_9/systemy-regulace_27), cit. 8.11.2015
- [ 25 ] European Commission. *Photovoltaic Geographical Information System* [online]. 2012 [cit. 2015-12-13]. Dostupné z: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?lang=en&map=europe>

### **Obrázky:**

- [ 26 ] <http://www.inmeteo.cz/clanky/?clanek=vseobecna-cirkulace-atmosfery>
- [ 27 ] <http://energie.iss-sokolnice.cz/wp-content/dokumenty/praccz.pdf>
- [ 28 ] <http://maps.google.com>
- [ 29 ] [http://www.energy.kth.se/compedu/webcompedu/WebHelp/S9\\_Renewable\\_Energy/B2\\_Wind\\_Energy/C1\\_Introduction\\_to\\_Wind\\_Power/ID33\\_files/ID33\\_pops\\_files/image116.gif](http://www.energy.kth.se/compedu/webcompedu/WebHelp/S9_Renewable_Energy/B2_Wind_Energy/C1_Introduction_to_Wind_Power/ID33_files/ID33_pops_files/image116.gif)
- [ 30 ] [http://www.energy.kth.se/compedu/webcompedu/WebHelp/S9\\_Renewable\\_Energy/B2\\_Wind\\_Energy/C1\\_Introduction\\_to\\_Wind\\_Power/ID33\\_files/ID33\\_pops\\_files/image127.jpg](http://www.energy.kth.se/compedu/webcompedu/WebHelp/S9_Renewable_Energy/B2_Wind_Energy/C1_Introduction_to_Wind_Power/ID33_files/ID33_pops_files/image127.jpg)
- [ 31 ] <http://www.wind-systems.eu/images/jpt100-vetrna-turbina.jpg>
- [ 32 ] <http://images.okazje.info.pl/p/dom-i-ogrod/2178/papouch-wiatromierz-internetowy-anemometr-tx20eth-modbus-tcp-lan-ip.jpg>

# SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

DIN	- Deutsches Institut für Normung (německá standardizační organizace)
EGAP	- Šířka zakázaného pásu
FV	- Fotovoltaický panel
HP VEE	- Software pro grafické vývojové prostředí od firmy HP/Agilent
HTML	- HyperText Markup Language (značkovací jazyk pro hypertext používaný pro vytváření internetových stránek)
H <sub>v</sub>	- Výška věže
IC	- Integrovaný obvod
J <sub>ph</sub>	- Maximální proudová hustota
MPP	- Maximum Power Point
PHP	- Hypertext Preprocessor (skriptovací dynamický jazyk)
SNMP	- Simple Network Management Protocol
STC	- Standard Test Conditions
TCP	- Transmission Control Protocol
tzn.	- To znamená
tzv.	- Takzvaný, takzvaná, takzvané
UDP	- User Datagram Protocol
VTE, VT	- Větrná elektrárna
XML	- Extensible Markup Language (obecný značkovací jazyk)

# SEZNAM PŘÍLOH

**Obsah**

**A Příloha**

**70**

# A PŘÍLOHA

Porovnání výroby elektrické energie za rok pro ideální a skutečný nastavení panelu.



Obr. 0.1: Mapa umístění FV panelu na budově Technická 10 [28]

**Nastavení FV panelu umístěného na budově T10**  
**Náklon FV panelu: 45°**  
**Natočení FV panelu: -65° JV**

Tab. 0.1: Teoreticky získatelná intenzita záření za rok

Month	Ed	Em	Hd	Hm
1	0,09	2,88	0,95	29,6
2	0.17	4,72	1,73	48,3
3	0.31	9,69	3,19	98,8
4	0.46	13,7	4,63	139
5	0.48	14,8	4,86	151
6	0.50	14,9	5,06	152
7	0.51	15,6	5,13	159
8	0.46	14,2	4,64	144
9	0.34	10,3	3,51	105
10	0.22	6,77	2,23	69,2
11	0.11	3,28	1,12	33,7
12	0.07	2,21	0,73	22,8
Roční průměr	0.310	9,42	3,16	96

Celkem za rok

113

1150

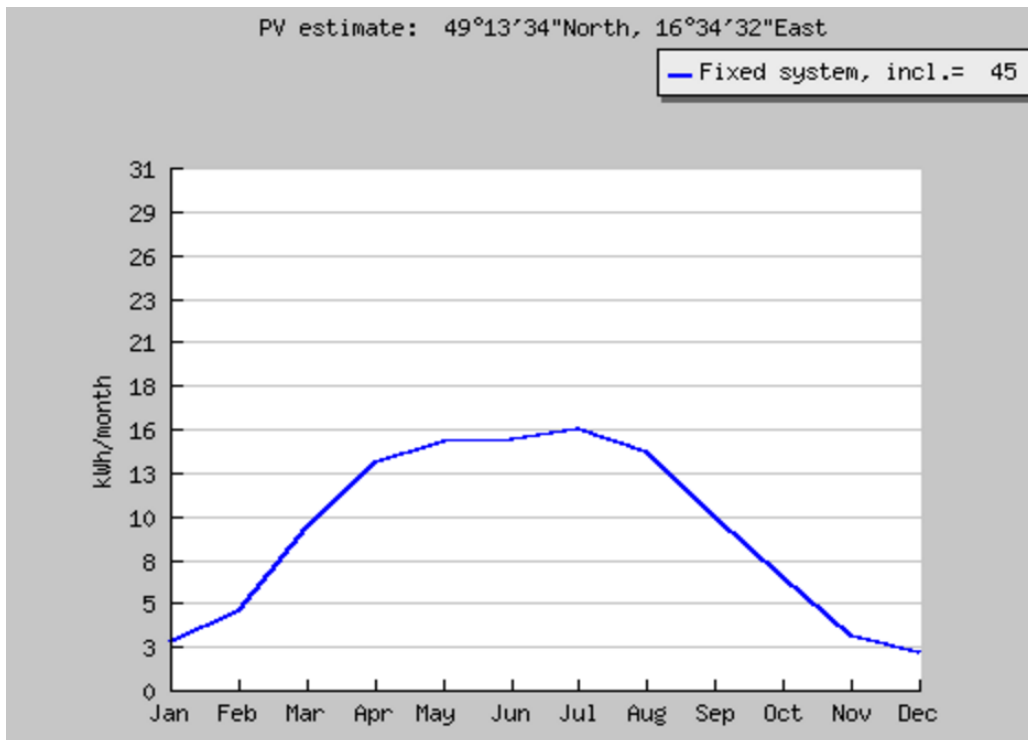
Kde:

Ed: Průměrná denní produkce elektřiny z daného systému (kWh)

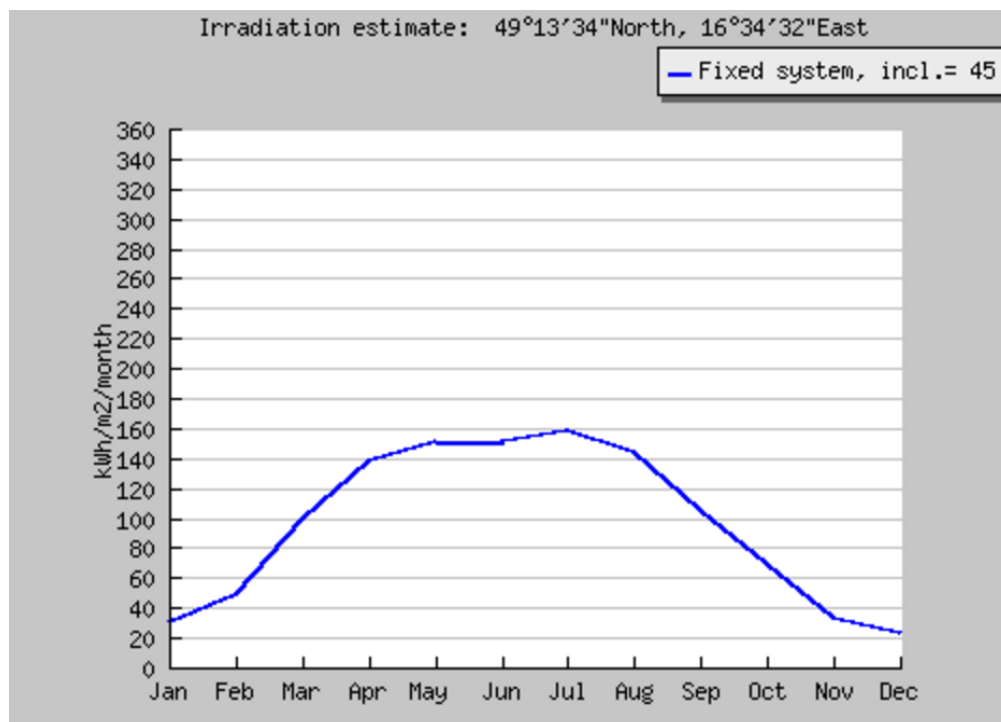
Em: Průměrná měsíční výroba elektřiny z daného systému (kWh)

Hd: Průměrný denní součet globálního záření na čtvereční metr obdržené moduly daného systému (kWh / m<sup>2</sup>)

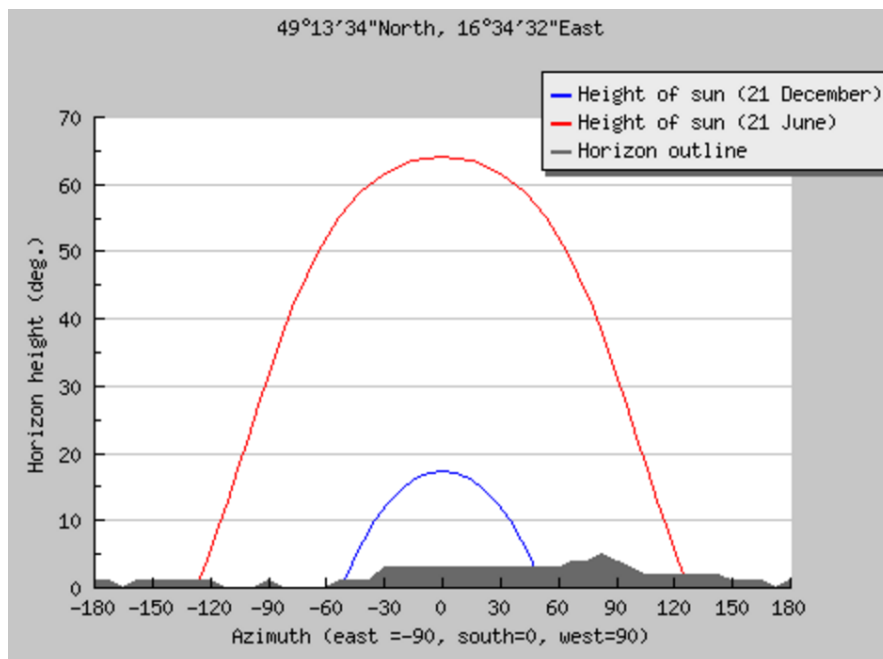
Hm: Průměrný součet globálního záření na čtvereční metr obdržené moduly daného systému (kWh / m<sup>2</sup>)



Obr. 0.2: Průměrné měsíční produkce elektřiny z FV panelu A-130 (skutečné nastavení) [25]



Obr. 0.3: Průměrná intenzita slunečního záření pro FV panel A-130 (skutečné nastavení) [25]



Obr. 0.4: Závislost výšky slunce pro zimní a letní slunovrat [25]

**Ideální nastavení:**

**Náklon FV panelu: 35°**

**Natočení FV panelu: -1°JV**

Tab. 0.2: Ideální teoretická intenzita slunečního záření

Month	Ed	Em	Hd	Hm
1,00	0.12	3,74	1,22	37.9
2,00	0.21	5,97	2,16	60.5
3,00	0.38	11,60	3,81	118,00
4,00	0.52	15,50	5,25	158,00
5,00	0.52	16,10	5,20	164,00
6,00	0.53	16,00	5,42	163,00
7,00	0.54	16,90	5,54	172,00
8,00	0.51	15,90	5,22	162,00
9,00	0.41	12,20	4,14	124,00
10,00	0.27	8,43	2,76	85.5
11,00	0.14	4,26	1,44	43.2
12,00	0.09	2,90	0,95	29,50
<b>Roční průměr</b>	<b>0.35</b>	<b>10,80</b>	<b>3,61</b>	<b>110,00</b>
<b>Celkem za rok</b>				

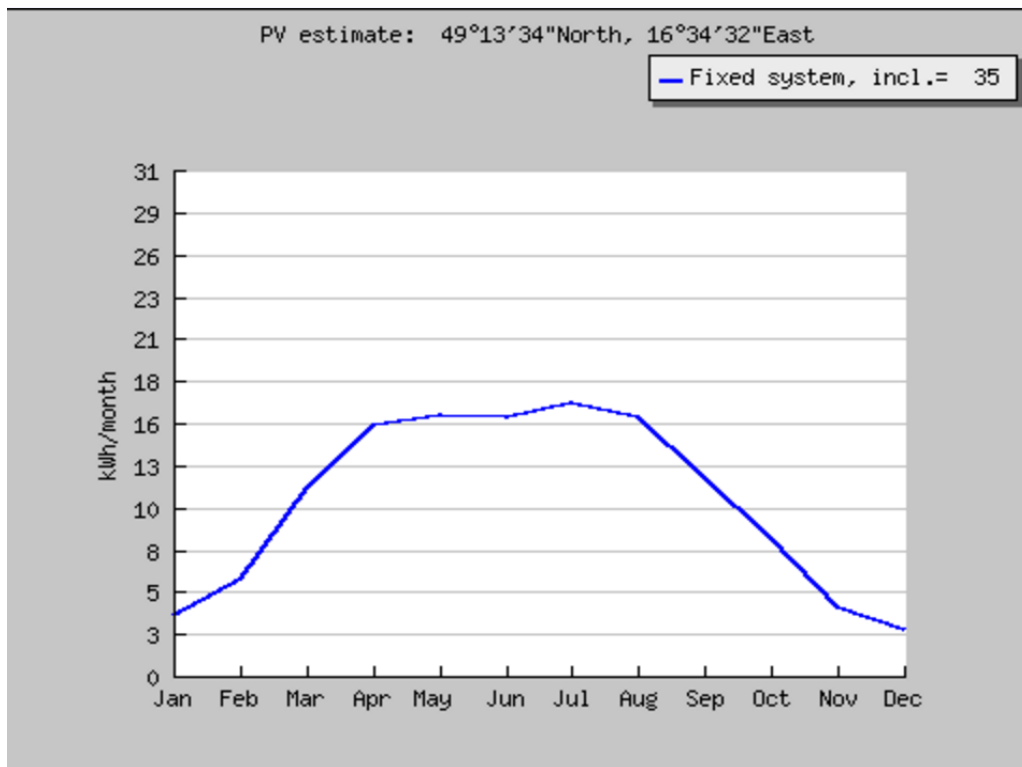
Kde:

Ed: Průměrná denní produkce elektřiny z daného systému (kWh)

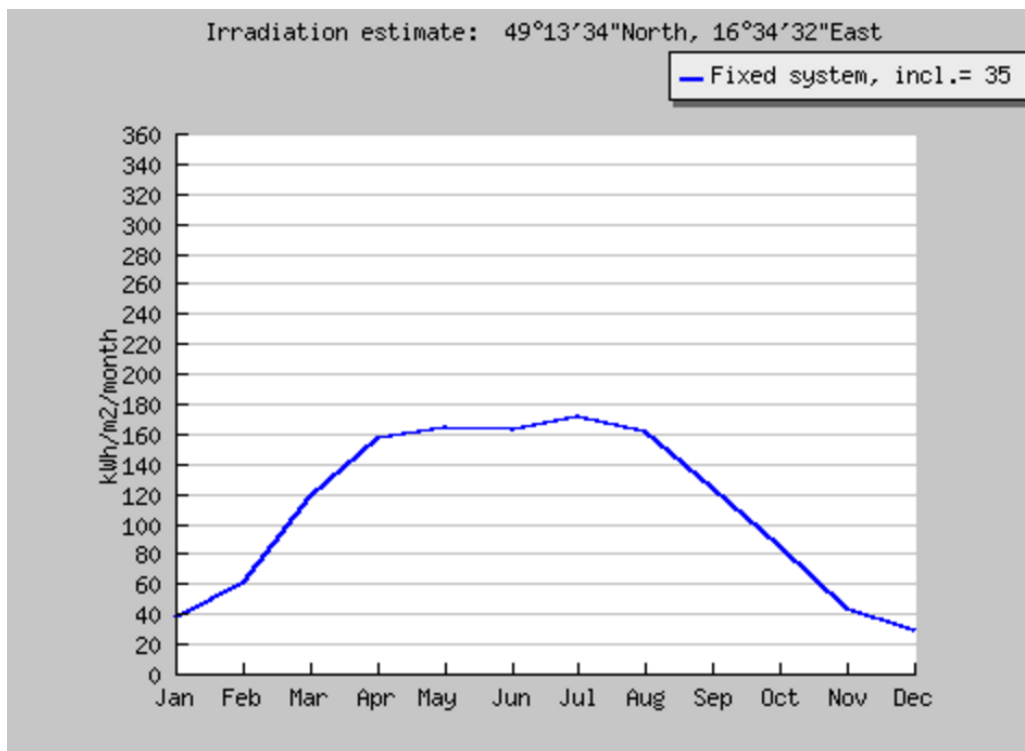
Em: Průměrná měsíční výroba elektřiny z daného systému (kWh)

Hd: Průměrný denní součet globálního záření na čtvereční metr obdržené moduly daného systému (kWh / m<sup>2</sup>)

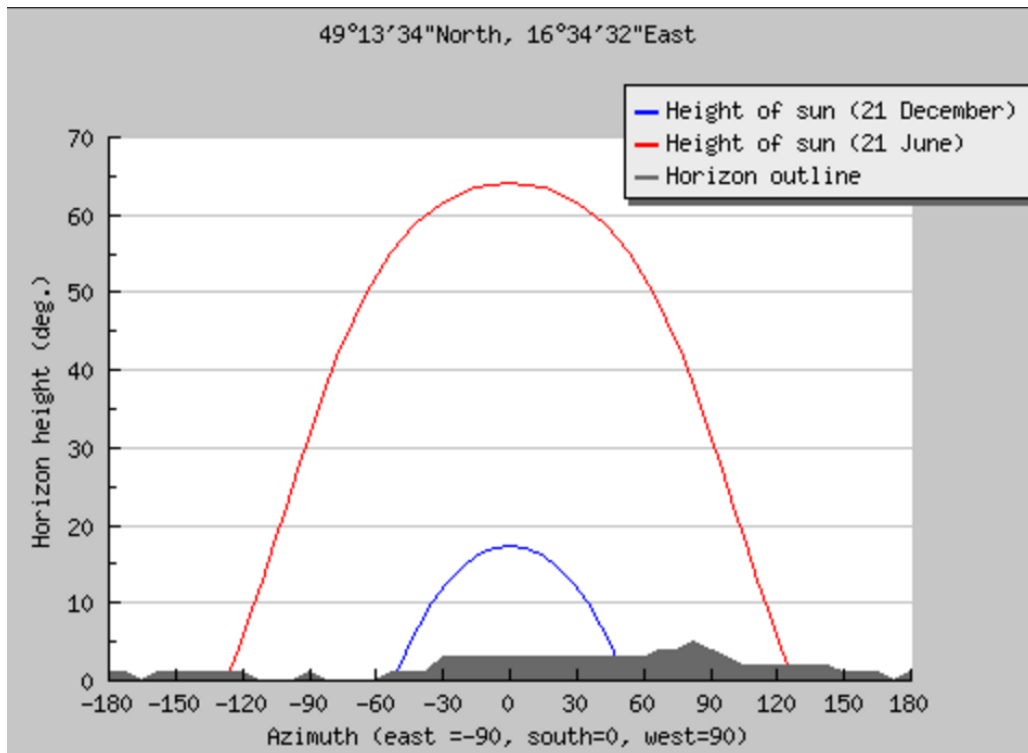
Hm: Průměrný součet globálního záření na čtvereční metr obdržené moduly daného systému (kWh / m<sup>2</sup>)



Obr. 0.5: Průměrné měsíční produkce elektřiny z FV panelu A-130 (ideální nastavení) [25]



Obr. 0.6: Průměrná intenzita slunečního záření pro FV panel A-130 (ideální nastavení) [25]



Obr. 0.7: Závislost výšky slunce pro zimní a letní slunovrat [25]



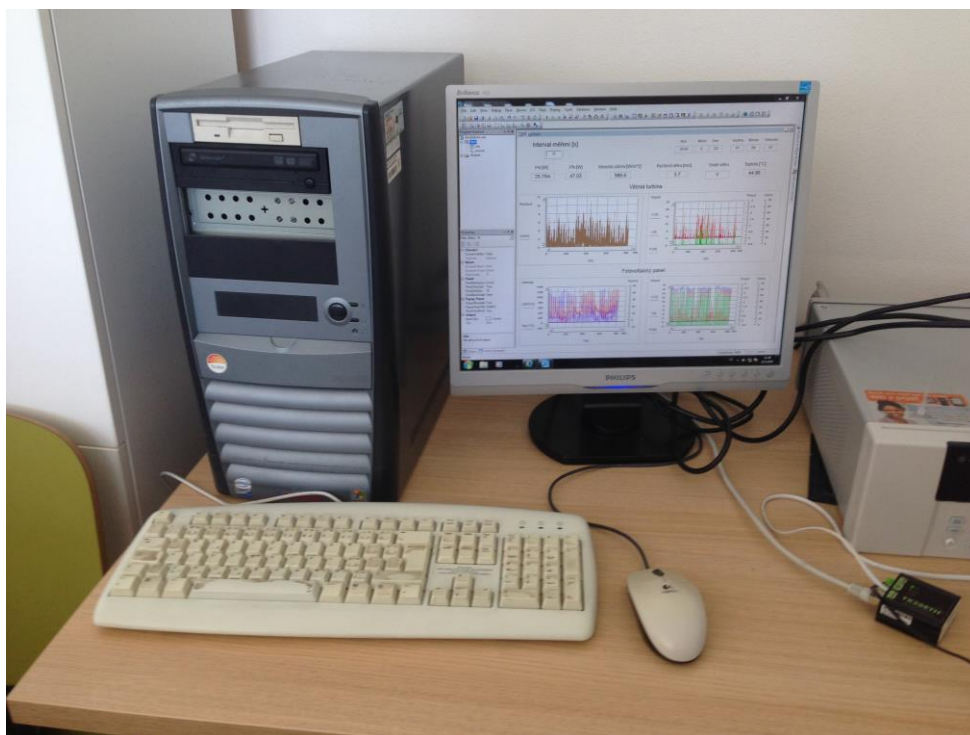
Obr. 0.8: Větrná turbína JPT100 na střeše budovy Technická 10 ve 4. poschodí



Obr. 0.9: Solární panel A-130 na střeše budovy Technická 10 ve 4. poschodí



Obr. 0.10: Pyranometr na střeše budovy Technická 10 ve 4. poschodí



Obr. 0.11: Měřící pracoviště v laboratoři MOZE/MAZE



Obr. 0.12: ethernetový anemometr TX20ETH  
Tab. 0.3: Ukázka tabulky z měření v programu Exce

1	rok	měsíc	den	hodina	minuta	převod na hod	0,167	čas (h)	Větrná turbína						Fotovoltaický panel					
									U (V) <sub>vt</sub>	v (m/s) <sub>vt</sub>	I (A) <sub>vt</sub>	P (W) <sub>vt</sub>	P <sub>max</sub> (W) <sub>vt</sub>	Pa (W) <sub>vt</sub>	n (-) <sub>vt</sub>	směr <sub>vt</sub>	U (V) <sub>fv</sub>	I (A) <sub>fv</sub>	P (W) <sub>fv</sub>	I (W/m <sup>2</sup> ) <sub>fv</sub>
2	2016	5	4	0	1	21	720,0419	0,128363	3	0,015808	0,002029	17,4555	10,344	0,00054	S	1,77E-05	3,58E-06	6,33E-11	0	-5,8E-11
3	2016	5	4	0	11	38	720,2131	0,265575	3,6	0,032706	0,008686	30,1631	17,87443	0,001339	SSV	2,06E-05	4,16E-06	8,56E-11	0	-8,1E-11
4	2016	5	4	0	21	56	720,3844	9,32E-06	1	1,15E-06	1,07E-11	0,6465	0,383111	7,69E-11	SSZ	2,08E-05	4,21E-06	8,77E-11	0	-8,1E-11
5	2016	5	4	0	32	13	720,5556	0,333181	2,9	0,041032	0,013671	15,76749	9,343697	0,004031	SSZ	2,21E-05	4,47E-06	9,88E-11	0	-9,2E-11
6	2016	5	4	0	42	31	720,7269	2,522678	4,2	0,310675	0,783732	47,89789	28,38394	0,076066	S	2,37E-05	4,8E-06	1,14E-10	0	-1,1E-10
7	2016	5	4	0	52	49	720,8981	1,09E-05	2,4	1,35E-06	1,47E-11	8,937216	5,296128	7,65E-12	SSZ	2,35E-05	4,75E-06	1,11E-10	0	-9,7E-11
8	2016	5	4	1	3	7	721,0694	7,87E-06	1,9	9,7E-07	7,64E-12	4,434344	2,627759	8E-12	SZ	2,39E-05	4,83E-06	1,15E-10	0	-1E-10
9	2016	5	4	1	13	26	721,2406	5,79E-06	0,5	7,12E-07	4,12E-12	0,080813	0,047889	2,37E-10	SZ	2,24E-05	4,54E-06	1,02E-10	0	-9E-11
10	2016	5	4	1	23	44	721,4119	5,46E-06	2,3	6,73E-07	3,68E-12	7,865966	4,661313	2,17E-12	SSZ	2,04E-05	4,13E-06	8,43E-11	0	-7,4E-11
11	2016	5	4	1	34	3	721,5831	5,3E-06	2,4	6,53E-07	3,46E-12	8,937216	5,296128	1,8E-12	S	2,22E-05	4,49E-06	9,95E-11	0	-9,4E-11
12	2016	5	4	1	44	21	721,7544	5,54E-06	1,8	6,83E-07	3,79E-12	3,770388	2,234304	4,67E-12	SZ	2,35E-05	4,75E-06	1,11E-10	0	-1E-10
13	2016	5	4	1	54	40	721,9256	6,19E-06	2,6	7,62E-07	4,71E-12	11,36288	6,733561	1,93E-12	SSZ	2,3E-05	4,65E-06	1,07E-10	0	-1E-10
14	2016	5	4	2	4	58	722,0969	0,009961	2,8	0,001227	1,22E-05	14,19197	8,410055	4E-06	S	1,76E-05	3,56E-06	6,27E-11	0	-6,1E-11
15	2016	5	4	2	15	17	722,2681	5,79E-06	2,3	7,12E-07	4,12E-12	7,865966	4,661313	2,44E-12	S	1,7E-05	3,43E-06	5,82E-11	0	-5,7E-11
16	2016	5	4	2	25	36	722,4394	6,43E-06	3,1	7,92E-07	5,09E-12	19,25988	11,41326	1,23E-12	SSZ	2,14E-05	4,33E-06	9,25E-11	0	-9,1E-11
17	2016	5	4	2	35	54	722,6106	5,22E-06	2,7	6,43E-07	3,36E-12	12,72506	7,540776	1,23E-12	SSV	1,98E-05	4E-06	7,91E-11	0	-8,4E-11
18	2016	5	4	2	46	13	722,7819	6,35E-06	1,3	7,82E-07	4,96E-12	1,420361	0,841695	1,62E-11	SSZ	2,01E-05	4,07E-06	8,17E-11	0	-8,1E-11
19	2016	5	4	2	56	31	722,9531	6,27E-06	0,8	7,72E-07	4,84E-12	0,331008	0,196153	6,79E-11	JVV	1,57E-05	3,19E-06	5,02E-11	0	-5,1E-11
20	2016	5	4	3	6	50	723,1244	6,91E-06	0,4	8,51E-07	5,88E-12	0,041376	0,024519	6,61E-10	ZSZ	1,66E-05	3,37E-06	5,6E-11	0	-5,7E-11
21	2016	5	4	3	17	9	723,2956	6,67E-06	1,4	8,21E-07	5,48E-12	1,773996	1,051257	1,44E-11	SZ	2,21E-05	4,47E-06	9,88E-11	0	-1E-10

