

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Diplomová práce

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

Ústav elektrotechnologie

Student: Bc. Tomáš Bajgl

ID: 154672

Ročník: 2

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Tvorba laboratorních úloh pro předmět Obnovitelné zdroje 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. Vytvořte kompletní laboratorní úlohu včetně teoretického rozboru a pracovního postupu měření na malé větrné turbíně a fotovoltaickém panelu.

Seznamte se s metodami pro dosažení maximálního výkonu fotovoltaických panelů. Vytvořte měřicí pracoviště a software využívající těchto metod. Vytvořte kompletní laboratorní úlohu včetně teoretického rozboru a pracovního postupu měření maximálního výkonu fotovoltaických panelů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 25.5.2017

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

Konzultant:

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

UPOZORNĚNÍ:

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

Bibliografická citace práce:

BAJGL, T. Tvorba laboratorních úloh pro předmět Obnovitelné zdroje energie. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 74 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Petr Křivík, Ph.D..

Jako autor uvedené semestrální práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této semestrální práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si 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.

.....



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

**TVORBA LABORATORNÍCH ÚLOH PRO PŘEDMĚT
OBNOVITELNÉ ZDROJE ENERGIE**

CREATION OF LABORATORY EXERCISES FOR RENEWABLE SOURCES OF ENERGY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Bajgl

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Křivík, Ph.D.

BRNO 2017

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá přeměnou sluneční a větrné energie na elektrickou pomocí fotovoltaického panelu a větrné turbíny. Práce dává nahlédnout do problematiky energetiky v České republice v kontextu historického vývoje, současného stavu a také předpokládaného vývoje. Hlavní pozornost je pak věnována obnovitelným zdrojům – sluneční energii a větru. Jsou zde popsány základní principy vzniku a využívání sluneční a větrné energie. V praktické části jsou pak vytvořeny dvě laboratorní úlohy pro předmět *Obnovitelné zdroje energie*.

KLÍČOVÁ SLOVA: Sluneční energie, větrná energie, fotovoltaika, obnovitelné zdroje, alternativní zdroje, FVE, VTE

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the transformation of solar and wind energy into electrical energy by using a photovoltaic panel and a wind turbine. The work gives insight into the Czech Republic's issue of energetics in the context of historical development, the current state, and the expected future development. The primary attention is given to the renewable sources - the solar energy and wind energy. Basic principles of creation and manipulation of solar and wind energy are described in this work. Two laboratory tasks are created for the Renewable Energy Sources' class as a part of the practical part.

KEY WORDS: Solar energy, wind energy, fotovoltaics, renewable sources, alternative sources, FVE, VTE

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	8
SEZNAM TABULEK	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	11
1. ÚVOD.....	14
2. ENERGETIKA V ČR.....	15
2.1 HISTORIE ENERGETIKY	15
2.2 SOUČASNOST ENERGETIKY	15
2.2.1 JADERNÁ ENERGETIKA.....	15
2.2.2 UHLÍ.....	16
2.2.3 ALTERNATIVNÍ ZDROJE.....	17
2.3 BUDOUCNOST ENERGETIKY	17
3. OBNOVITELNÉ ZDROJE.....	22
4. ENERGIE SLUNCE	24
4.1 SLUNEČNÍ ZÁŘENÍ	25
4.2 VLIVY NA SLUNEČNÍ ZÁŘENÍ	29
4.3 VÝHODY A NEVÝHODY VYUŽÍVÁNÍ	30
4.4 FOTOELEKTRICKÝ EFEKT	31
4.5 VOLTAMPÉROVÁ CHARAKTERISTIKA FOTOVOLTAICKÉHO ČLÁNKU	32
4.6 MATERIÁLY PRO FV ČLÁNKY	33
4.7 NÁVRH A REALIZACE FOTOVOLTAICKÝCH SYSTÉMŮ	34
5. ENERGIE VĚTRU	36
5.1 VZNIK VĚTRU	36
5.2 RYCHLOST VĚTRU.....	37
5.3 VÝKON VĚTRU	38
5.4 VÝHODY A NEVÝHODY VYUŽÍVÁNÍ	43
5.5 ROZDĚLENÍ VĚTRNÝCH MOTORŮ	44
5.5.1 ODPOROVÉ MOTORY	44
5.5.2 VRTULE	45
5.6 ČÁSTI VRTULOVÉ ELEKTRÁRNY	45
6. LABORATORNÍ ÚLOHA 1.....	47
6.1 MĚŘÍCÍ PRACOVÍŠTĚ	47
6.2 MĚŘÍCÍ SOFTWARE	51
6.2.1 FUNKCE PROGRAMU	51
6.2.2 MĚŘÍCÍ PANEL	56

6.3 MĚŘENÍ ENERGIE Z FOTOVOLTAICKÉHO PANELU A VĚTRNÉ TURBÍNY	57
6.3.1 TEORETICKÝ ROZBOR	57
6.3.2 SCHÉMA ZAPOJENÍ	62
6.3.3 PRACOVNÍ POSTUP	63
7. LABORATORNÍ ÚLOHA 2.....	64
7.1 MĚŘÍCÍ PRACOVNÍ MÍSTO	64
7.2 MĚŘÍCÍ SOFTWARE	64
7.2.1 FUNKCE PROGRAMU	64
7.2.2 MĚŘÍCÍ PANEL	66
7.3 HLEDÁNÍ BODU MAXIMÁLNÍHO VÝKONU PANELU	67
7.3.1 TEORETICKÝ ROZBOR	67
7.3.2 SCHÉMA ZAPOJENÍ	70
7.3.3 PRACOVNÍ POSTUP	71
8. ZÁVĚR.....	72
POUŽITÁ LITERATURA	73

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Energetický mix v ČR v % pro rok 2015 [5].....	16
Obrázek 2 Pole průměrné rychlosti větru ve výšce 100 m nad povrchem [3]	17
Obrázek 3 Vývoj a struktura primárních energetických zdrojů [4]	18
Obrázek 4 Vývoj a struktura OZE na primárních energetických zdrojích [4].....	19
Obrázek 5 Vývoj a struktura hrubé výroby elektřiny [4]	20
Obrázek 6 Vývoj a struktura hrubé výroby elektřiny z OZE	21
Obrázek 7 Potenciál konečné spotřeby OZE v ČR [4].....	23
Obrázek 8 Struktura Slunce [7].....	24
Obrázek 9 Spektrum slunečního záření [8]	25
Obrázek 10 Poměr složek slunečního záření dopadajícího na zemský povrch [9]	26
Obrázek 11 Intenzita celkového slunečního záření na vodorovné ploše [11].....	28
Obrázek 12 Roční průměrný úhrn doby trvání slunečního svitu v hodinách, úhrn slunečního záření v $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ a v $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ [12]	28
Obrázek 13 Výška slunce nad obzorem a AM [11]	30
Obrázek 14 Vznik fotovoltaického napětí na struktuře s přechodem PN [12]	31
Obrázek 15 V-A charakteristika osvětleného PV článku [12]	32
Obrázek 16 Monokrystalický (vlevo) a polykrystalický (vpravo) článek [14]	33
Obrázek 17 Konstrukční řešení FV instalace [13].....	35
Obrázek 18 Směry větru na zeměkouli [2]	37
Obrázek 19 Závislost výkonu větru, který protéká plochou 1 m^2 , na jeho rychlosti [12]	40
Obrázek 20 Rovina disku [16].....	41
Obrázek 21 Savoniu motor [2].	44
Obrázek 22 Jednotlivé druhy vrtulí: a) jednolistá, b) dvoulistá, c) třílistá [12].....	45
Obrázek 23 Základní části VTE [15]	46
Obrázek 24 Větrná turbína JPT-100.....	47
Obrázek 25 Anemometr TX20ETH.....	48
Obrázek 26 Elektronická jednotka TX20ETH.....	48
Obrázek 27 Pyranometr SG420	49
Obrázek 28 Odečet hodnot pro čas a datum	51
Obrázek 29 Odečet hodnot pro směr a rychlost větru.....	52
Obrázek 30 Odečet napětí na VTE.....	52
Obrázek 31 Ukládání hodnot z VTE do souboru data.txt.....	53

<i>Obrázek 32 Odečet hodnot teploty</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 33 Odečet napětí na FVE.....</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 34 Odečet intenzity dopadajícího záření</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 35 Ukládání hodnot z FVE do souboru data.txt</i>	<i>55</i>
<i>Obrázek 36 Panel měřícího softwaru L1.....</i>	<i>56</i>
<i>Obrázek 37 Schéma zapojení měřícího pracoviště.....</i>	<i>62</i>
<i>Obrázek 38 Odečet napětí a proudu.....</i>	<i>64</i>
<i>Obrázek 39 Funkce programu.....</i>	<i>65</i>
<i>Obrázek 40 Panel měřícího softwaru L2.....</i>	<i>66</i>
<i>Obrázek 41 V-A charakteristika panelu</i>	<i>67</i>
<i>Obrázek 42 Schéma zapojení měřícího pracoviště.....</i>	<i>70</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1</i>	<i>Hodnoty součinitele znečištění Z [11]</i>	<i>29</i>
<i>Tabulka 2</i>	<i>Účinnost jednotlivých typů článků [13]</i>	<i>33</i>
<i>Tabulka 3</i>	<i>Beaufortova stupnice rychlosti větru [14]</i>	<i>38</i>
<i>Tabulka 4</i>	<i>Katalogové hodnoty panelu ATERSA A-130 [15]</i>	<i>58</i>
<i>Tabulka 5</i>	<i>Katalogové hodnoty větrné turbíny JPT-100 [15]</i>	<i>61</i>
<i>Tabulka 6</i>	<i>Chování algoritmu Pertrube & Observe method [22]</i>	<i>69</i>
<i>Tabulka 7</i>	<i>Hodnoty napětí a proudů pro metodu Incremental conductance</i>	<i>71</i>
<i>Tabulka 8</i>	<i>Hodnoty napětí a proudů pro metodu Pertrube & Observe</i>	<i>71</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Veličina	Jednotka
A	součinitel, který je závislý na výšce slunce	-
A_d	plocha disku	m^2
A_k	konstanta	K^{-1}
A_o	ozářená plocha panelu	m^2
A_p	plocha, již vzduch protéká	m^2
A_v	plocha vrtule	m^2
AM	air mass	-
B	konstanta	K^{-2}
C	konstanta	K^{-4}
E	energie	J
E_v	energie vzduchu	J
FF	fill factor	-
h	výška umístění osy rotoru	m
h_0	výška, ve které se provádí měření	m
h_s	výška slunce nad obzorem	m
I	intenzita dopadajícího záření	$W \cdot m^{-2}$
I_{CA}	intenzita slunečního záření při dokonalé čistém ovzduší na kolmou plochu	$W \cdot m^{-2}$
I_D	intenzita difúzního záření	$W \cdot m^{-2}$
I_{Dh}	intenzita difúzního záření na vodorovnou plochu	$W \cdot m^{-2}$
I_{MP}	proud při maximálním výkonu	A
I_N	intenzita slunečního záření při daném znečištění na kolmou plochu	$W \cdot m^{-2}$
I_n	proud v n kroku	A
I_{n+1}	proud v $n+1$ kroku	A
I_o	sluneční konstanta	$W \cdot m^{-2}$
I_{Ph}	intenzita přímého záření na vodorovnou plochu	$W \cdot m^{-2}$
I_{SC}	proud na krátko	A
K	součinitel využití	-

m	hmotnost vzduchu	kg
$\dot{m}$	hmotnostní tok	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
n	exponent vyjadřující drsnost povrchu	-
P	výkon	W
P_t	průměrný výkon turbíny	W
p	tlak vzduchu	Pa
P_A	výkon ideální větrné turbíny	W
P_i	instalovaný výkon	W
P_{n+1}	výkon v $n+1$ kroku	W
P_{n+2}	výkon v $n+2$ kroku	W
P_p	výkon fotovoltaického panelu	W
P_v	výkon větru protékající jednotkovou plochou 1 m^2	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
p_v''	parciální tlak syté páry	Pa
P_W	výkon větru	W
R	odpor	Ω
R_0	elektrický odpor při teplotě 0°C	Ω
r	reflexní schopnost okolních ploch	%
s	dráha, kterou vzduch urazí	m
t_v	časový interval průchodu větru	s
t	čas	s
T	termodynamická teplota	K
U	napětí	V
U_{MP}	napětí při maximálním výkonu	V
U_n	napětí v n kroku	V
U_{n+1}	napětí v $n+1$ kroku	V
U_{n+2}	napětí v $n+2$ kroku	A
U_{OC}	napětí naprázdno	V
ΔU	krok změny napětí	V
V	objem vzduchu	m^3
v	rychlost větru	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
v_1	rychlost větru před diskem	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
v_2	rychlost větru v oblasti disku	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

v_3	rychlost větru za diskem	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
v_h	rychlost větru ve výšce h nad zemí	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
v_0	rychlost větru ve výšce h_0	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
W_R	energie vyprodukovaná za rok	$\text{kWh}\cdot\text{r}^{-1}$
Z	Linkeho součinitel znečištění atmosféry	-
α	úhel sklonu plochy od vodorovné plochy	$^\circ$
η	účinnost turbíny	-
η_c	celková účinnost	-
η_{Betz}	Betzův limit	-
η_t	poměrná účinnost, která je vztažena k ideální turbíně	-
Θ	úhel mezi Sluncem v zenitu a výchozí polohou	$^\circ$
θ	Zenitový úhel	$^\circ$
ϑ	teplota	$^\circ\text{C}$
ρ	hustota vzduchu	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
ρ_v''	hustota nasyceného vzduchu	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
φ	relativní vlhkost vzduchu	-

1. ÚVOD

Lidstvo se už dlouhou dobu snaží o využívání obnovitelných zdrojů energie, jako je Slunce a vítr. Obnovitelnými se tyto zdroje nazývají, protože se dokážou přirozeně obnovovat a jsou tak z principu nevyčerpatelné. V době tenčících se zásob fosilních paliv pak získávají obnovitelné zdroje na důležitosti. Energie z fotovoltaických či větrných elektráren tak již dnes má své pevné místo v energetickém mixu. Velkou výhodou využívání obnovitelných zdrojů energie je to, že nevnašejí žádné znečišťující látky do životního prostředí, kde by docházelo k jejich ukládání.

Diplomová práce se zabývá vytvořením dvou laboratorních úloh pro předmět *Obnovitelné zdroje energie*.

V teoretické části práce je popsán stav energetiky v České republice a pak také energie slunce a větru, které tvoří základ pro první laboratorní úlohu vytvořenou v praktické části. V rámci první laboratorní úlohy je popsáno kompletní měřicí pracoviště a pak také software potřebný pro sběr dat z fotovoltaického panelu a větrné turbíny. Stejně tak je popsáno měřicí pracoviště a software i u druhé laboratorní úlohy, která se zabývá hledáním bodu maximálního výkonu fotovoltaického panelu. U obou laboratorních úloh pak byly také vytvořeny teoretické rozборы a pracovní postupy pro měření.

2. ENERGETIKA V ČR

Poloha České republiky uprostřed Evropy do jisté míry definuje energetické zdroje, které jsou v místních podmínkách využitelné. Na rozdíl od většiny zemí Evropy je Česká republika v současnosti energeticky soběstačná a díky propojenému trhu s energiemi dokonce značnou část energie vyrobené v tuzemsku exportuje. Cílem do budoucna by měla být vyvážená koncepce energetických zdrojů s cílem zvyšování účinnosti přeměny energie a naopak snižování množství emisí a odpadů vnášených do životního prostředí. V geopolitickém kontextu bude také důležité udržet si energetickou soběstačnost.

Celková spotřeba energie bude i v budoucnu stoupat, ať už rychlým či pomalým tempem, z důvodu například odklonění od motorů na fosilní paliva a jejich nahrazením elektrickými motory. Celková účinnost elektrických zařízení se sice neustále zvyšuje, přesto bude nutné i nadále disponovat takovými zdroji, které budou schopny tuto zvýšenou poptávku pokrýt.

2.1 Historie energetiky

Základy energetiky na našem území se datují ke konci 19. století. Nebyla to energetika v té podobě, jak ji známe dnes, přestože elektrické veřejné osvětlení fungovalo v Praze již od roku 1884, výroba elektrické energie byla spíše individuální záležitostí. Při vzniku Československa se na našem území nacházelo 450 elektráren spíše malého instalovaného výkonu. Neexistovala ale téměř žádná elektrizační soustava, která by dokázala vyrobenou energii přivádět pro potřeby průmyslu. První myšlenka na elektrizační soustavu pro Moravu se objevila v roce 1913. Začátek první světové války však výstavbu odložil až na dobu po první světové válce. V té době bylo rozhodnuto o použití napěťové úrovně 110 kV pro přenosové soustavy, 22 kV pro distribuční soustavy a 220/380 V pro města a obce. Soustava byla vytvořena jako trojfázová s frekvencí 50 Hz a zdroji energie pro celou soustavu byly uhelné elektrárny a vodní elektrárny. V roce 1928 bylo již elektrifikováno 50 % obcí v Čechách a 40 % obcí na Moravě, v roce 1955 pak byla přivedena elektrická energie do poslední obce v české republice. V padesátých letech byla dokončena přenosová soustava 220 kV a základ energetiky tvořily uhelné elektrárny. Nutnost přenosu elektrické energie na velké vzdálenosti si v šedesátých letech vyžádala výstavbu přenosové soustavy 400 kV, která se pak zapojila do evropské přenosové soustavy. Do té doby bylo třeba spotřebu energie regulovat podle výroby, ale zapojením do Evropské soustavy se od tohoto trendu mohlo začít ustupovat a výroba se začala přizpůsobovat spotřebě. Regulovat výrobu podle spotřeby je nutné i v dnešní době, protože elektrickou energii v podstatě není možné ve velké míře skladovat. Jedinou alternativou jsou přečerpávací elektrárny, které však mají pouze omezený potenciál.

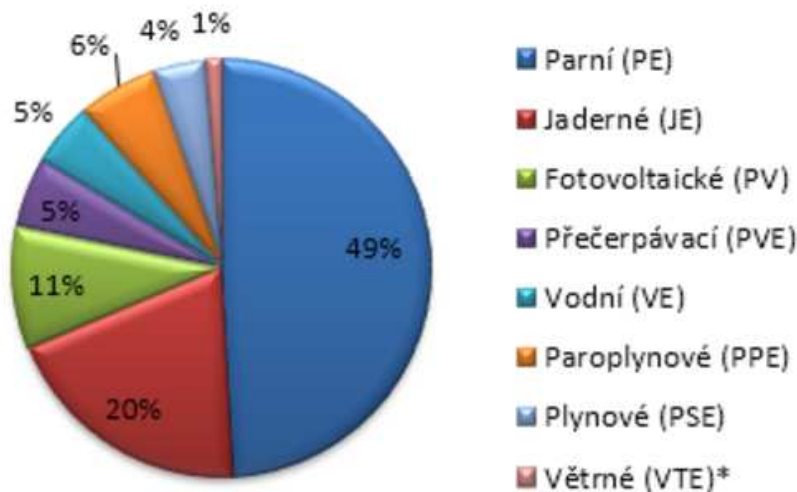
2.2 Současnost energetiky

2.2.1 Jaderná energetika

Jaderné elektrárny jsou v naší republice významným zdrojem elektrické energie, obě tuzemské jaderné elektrárny disponují výkonem přibližně 4000 MW a ročně vyrobí okolo 30 TWh elektrické energie. Výroba v těchto elektrárnách probíhá štěpením izotopu uranu. Výhody těchto elektráren spočívají v nulových emisích oxidů uhlíku a v nízkých nákladech na palivo vzhledem k množství vyrobené energie. Nevýhodou je však jaderný odpad, jehož přepracování k následnému opětovnému použití je nákladnější než vytvoření nového paliva.

2.2.2 Uhlí

Tuzemská energetika je stejně jako ta světová založena na využívání fosilních paliv. Vzhledem k zásobám a rozvinutému těžebnímu průmyslu je především uhlí tím nejvýznamnějším zdrojem v České republice. Uhlí je využíváno nejčastěji v kondenzačních elektrárnách a celkový podíl uhlí na výrobě elektrické energie se v tuzemsku pohybuje okolo 50 %. Vedle elektrické energie se v těchto elektrárnách produkuje i poměrně značná část tepla, kterým mohou být zásobovány domácnosti. Během spalování uhlí v těchto zdrojích však vznikají tuhé nečistoty, oxidy dusíku, oxidy uhličitě a uhelnaté a oxidy síry, které se usazují v životním prostředí. I přestože většina tuzemských elektráren prošla určitou formou odsíření, není tento způsob výroby elektrické energie zrovna ekologický. Tuhé zbytky po hoření se dnes využívají jako příměs do stavebnických materiálů, především do betonu. Parní elektrárny však i v dnešní moderní energetice hrají důležitou roli, neboť jsou to stabilní zdroje, kterými lze pružně reagovat na výkyvy v denní spotřebě. Moderní uhelné elektrárny už produkují malé množství emisí a jsou schopné vysoké úrovně regulace. Je možné je tedy využít jako zálohu instalovaného výkonu u fotovoltaických a větrných elektráren v době nepříznivého počasí [1].

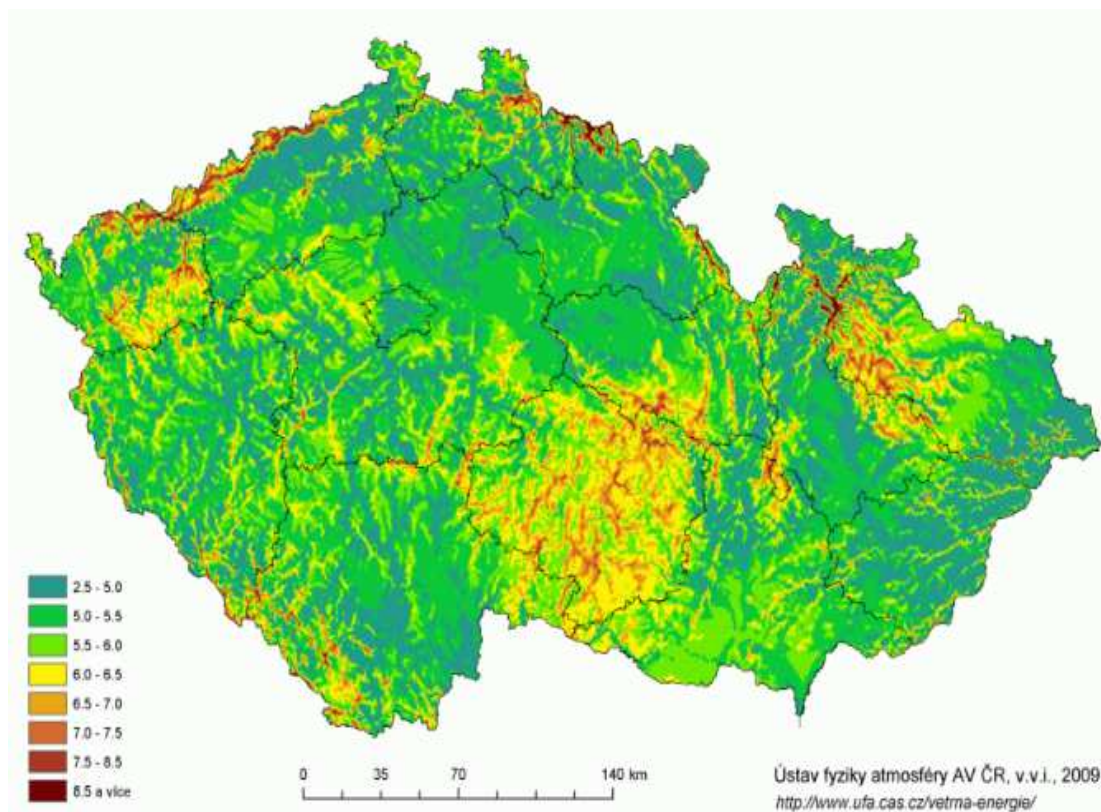


Obrázek 1 Energetický mix v ČR v % pro rok 2015 [5]

2.2.3 Alternativní zdroje

Díky své poloze uprostřed Evropy nedisponuje Česká republika takovými možnostmi jako přímořské státy, navíc zde ani vítr nemá svoji ideální rychlost, řeky mají malé spády a počet slunečných dní v roce není takový jako například u zemí okolo rovníku.

Podíl fotovoltaických elektráren je zhruba 10 % na instalovaném výkonu všech elektráren. Ve větrných elektrárnách je to pak zhruba 1 %, ale podle větrné mapy je vidět, že potenciál pro jejich větší rozšíření není příliš velký.



Obrázek 2 Pole průměrné rychlosti větru ve výšce 100 m nad povrchem [3]

Vodní elektrárny mají celkový podíl asi 5 % a přečerpávací vodní elektrárny také 5 %. Zajímavými zdroji jsou také bioplynové stanice a elektrárny spalující biomasu.

Potenciál pro větší zastoupení obnovitelných zdrojů v současné době spočívá převážně v instalaci malých fotovoltaických systémů na střechy rodinných domů, nebo instalacích malých větrných elektráren.

2.3 Budoucnost energetiky

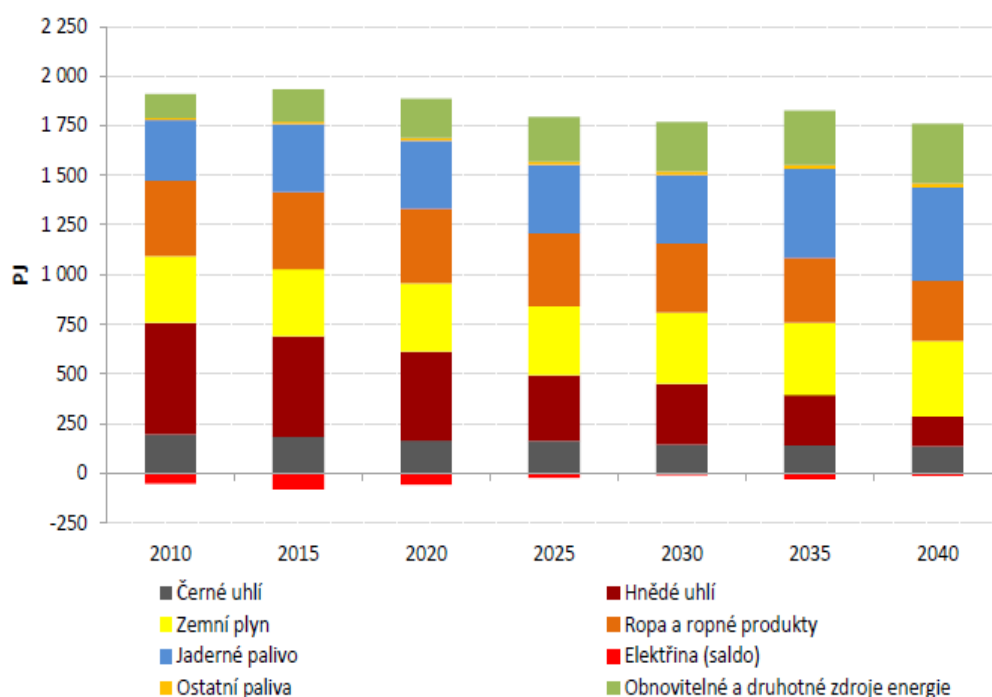
Nejprve je nutné si uvědomit, že budoucnost světové ani tuzemské energetiky není snadná záležitost a je potřeba vědět, že celý tento trh je ovlivněn řadou různých aspektů. Větší či menší roli zde hrají technické a cenové aspekty, ale třeba i politické tlaky a různá lobby.

Státní energetická koncepce je zpracovávána na popud ministerstva průmyslu a obchodu a vytváří ji hned několik odborníků. Z této koncepce by mělo být zřejmé, jakým směrem se bude tuzemská energetika v následujících několika letech ubírat.

18. května 2015 byla vládou České republiky schválena aktualizovaná Státní energetická koncepce na následujících 25 let, která identifikuje několik základních priorit.

Mezi tyto priority patří:

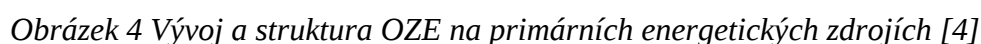
Vyvážený mix primárních energetických zdrojů a efektivní využívání všech dostupných zdrojů. Udržení přebytkové bilance ES s dostatečnými rezervami. Zvyšování účinnosti národního hospodářství a rozvoj infrastruktury v kontextu střední Evropy. Podpora výzkumu a školství s cílem zajistit zlepšení kvality inteligence v sektoru energetiky. A také zlepšení energetické bezpečnosti ČR a posílení schopnosti dodávat energii v případě kumulace poruch či vícenásobných útoků na infrastrukturu [4].



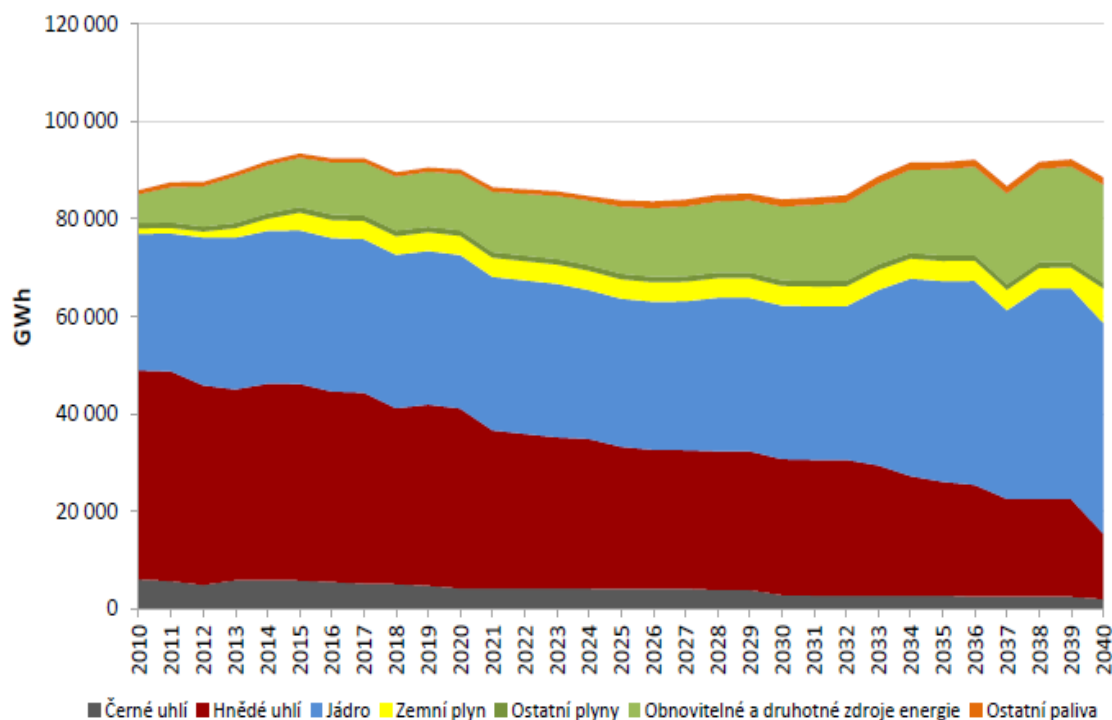
Obrázek 3 Vývoj a struktura primárních energetických zdrojů [4]

Mezi lety 2010 a 2040 je očekáván mírný nárůst spotřeby elektrické energie, neboť řada opatření v oblasti úspor energie bude směřovat ke spotřebě elektrické energie, jako například u elektromobility.

Ve struktuře primárních energetických zdrojů roste podíl obnovitelných zdrojů, především biomasy a odpadů. Naopak tomu se soustavně snižuje podíl, dnes rozhodujícího zdroje, kvalitního hnědého a černého uhlí, z důvodu modernizace energetiky. Tento pokles by měl alespoň částečně nahradit zemní plyn, a proto lze očekávat růst jeho podílu. Ve státní energetické koncepci se také mezi lety 2030 a 2035 počítá se spuštěním nových jaderných bloků, které by měly částečně nahradit i postupně odstavované bloky využívané dnes.



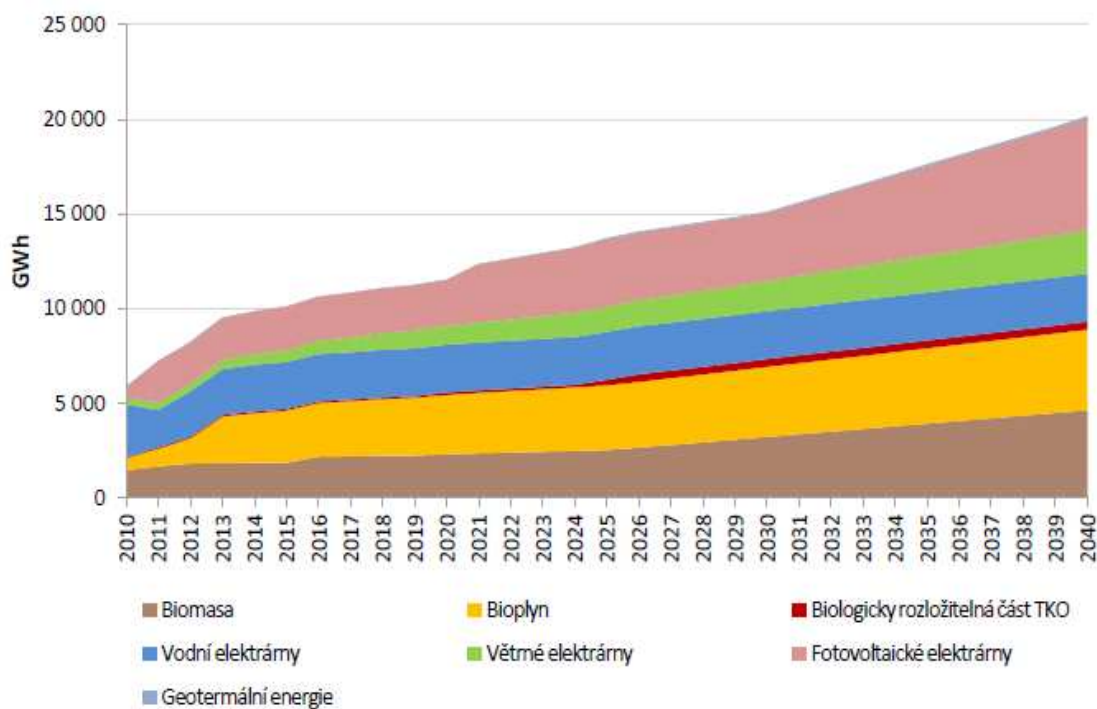
Celková výše energie z obnovitelných zdrojů má v definovaném období trvale vzestupný trend. To je způsobeno postupným zvyšováním konkurenceschopnosti vůči konvenčním zdrojům a také snahou o upřednostňování bezemisních zdrojů energie. Po roce 2025 je vidět opětovný nárůst fotovoltaiky, kdy se předpokládá využití výhradně na střechách a konstrukcích budov a nepočítá se tedy s rozšířením na další zemědělskou půdu, u které, pakliže bylo její vyjmutí ze zemědělského půdního fondu jen dočasné, se počítá s jejím postupným návratem. Dalším zdrojem, u kterého se počítá s jeho postupným nárůstem, je využívání odpadů nevhodných pro recyklaci. U větrné energie se počítá s postupným plným využitím jejího potenciálu s respektováním všech omezujících podmínek [4].



Obrázek 5 Vývoj a struktura hrubé výroby elektřiny [4]

Předpokládá se, že celková výroba elektrické energie v rozhodném období bude mít vzestupnou tendenci, to vychází z předpokladu zvýšených energetických nároků všech odvětví národního hospodářství s výjimkou domácností. Výkyvy jsou způsobeny postupným ukončováním činnosti zastaralých uhelných elektráren a náběhem plánovaných jaderných bloků. Výroba elektrické energie ze zemního plynu se plánuje zejména v kogeneraci a ve špičkových zdrojích. Hlavní část růstu se předpokládá do roku 2020 a poté se stabilizuje.

Výkonová bilance ČR na základě předpokladů zůstává přebytková, avšak v případě zpoždění náběhu nových jaderných zdrojů se bilance zřejmě dostane do mírně deficitního stavu.



Obrázek 6 Vývoj a struktura hrubé výroby elektřiny z OZE

3. OBNOVITELNÉ ZDROJE

Pokud nebude nastoupena cesta většího využívání obnovitelných zdrojů, může dojít ke snížení kvality života a ke značné degradaci životního prostředí. Tento proces však nelze realizovat v krátkém časovém období, nýbrž pouze důsledná dlouhodobá strategie může být úspěšná. Místo tradičních fosilních paliv je možné využít mnoho alternativních druhů energie, konkrétní druh energie, který bude využit, pak vychází z environmentálních a ekonomických hledisek.

Pojem obnovitelný zdroj energie označuje některé formy energie získané převážně z jaderných přeměn uvnitř Slunce či nitra Země. Využívají se pak ve formě slunečního záření, větrné či vodní energie a mnohých dalších. Obnovitelné zdroje mají v celosvětovém měřítku potenciál pokrýt značnou část poptávané energie, jejich využití je však omezené několika faktory, jako je proměnlivá intenzita během dne, měsíce i roku a pak také relativně velké investiční náklady.

Pro posouzení potenciálu obnovitelného zdroje se využívá součinitel využití, který z energie vyprodukované za rok popisuje využívání zdroje v průběhu celého roku [2].

$$K = \frac{W_R}{P_i \cdot 8760} \quad (3.1)$$

K	[-]	součinitel využití
W_R	[kWh·r ⁻¹]	energie vyprodukovaná za rok
P_i	[W]	instalovaný výkon

Potenciál k využívání obnovitelných zdrojů energie v České republice je značně omezen přírodními podmínkami a také různými požadavky na ochranu životního prostředí.

U jednotlivých zdrojů jsou významnými limity:

Větrná energie

Je limitována krajinným reliéfem, který z hlediska proudění vzduchu vytváří významnější lokality v oblastech Vysočiny, Jeseníků a Krušných hor. Dalším důležitým limitujícím faktorem jsou chráněné přírodní oblasti, lidské sídelní celky a podobně. Celkový potenciál určuje studie Ústavu fyziky atmosféry vytvořená pro Českou společnost pro větrnou energii s hodnotou 2 300 MW. Nedá se však předpokládat plné využití tohoto potenciálu z důvodu mnohdy ne příliš vstřícnému postoji místních komunit.

Sluneční energie

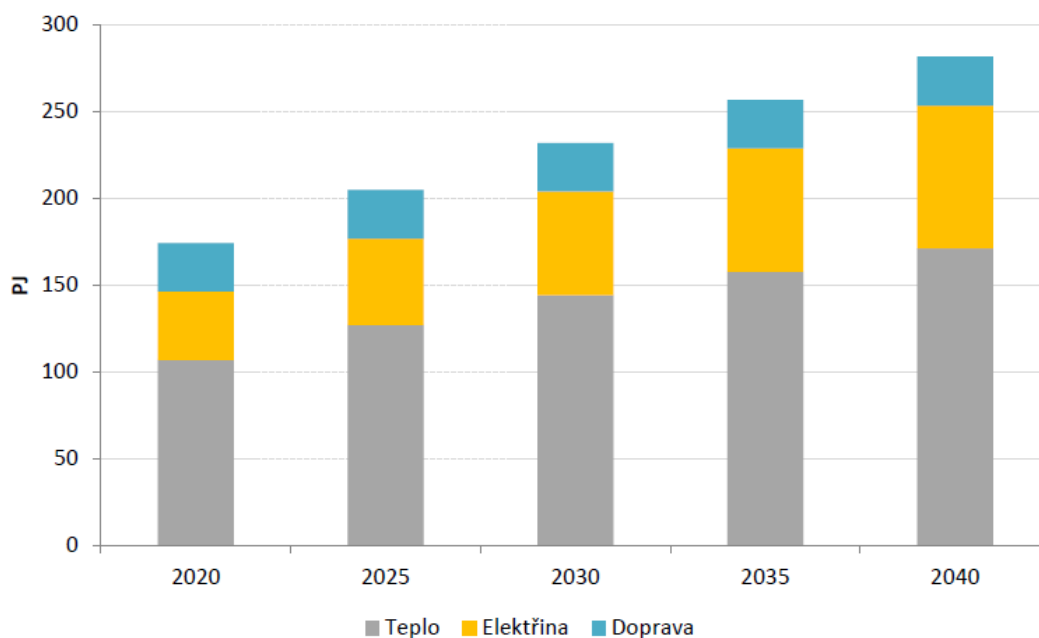
Je limitována především klimatickými podmínkami v ČR, její zeměpisnou šířkou a meteorologickou situací. Dále je tu také problém s ochranou zemědělské půdy, která vylučuje její využívání k fotovoltaickým účelům v daleko větší míře. Potenciál k většímu využití je tedy dán očekávanou větší účinností nových technologií, častějším využíváním ploch střech a efektivním rozmístěním na plochých střechách. Podle scénáře Národního akčního plánu Smart Grids je reálný potenciál cca 5 800 MW.

Energie biomasy

Akční plán pro biomasu uvažuje celkovou hodnotu na území ČR v rozsahu cca 160 až 217 PJ a to aniž by byla ohrožena potravinová bezpečnost. S přihlédnutím k dlouhodobému trendu snižování rozlohy zemědělské plochy v ČR se jedná o konzervativní odhad, nicméně oproti současnému stavu se počítá výrazné navýšení dodávek biomasy určených pro energetiku.

Geotermální energie

Využití nízko-potenciálového tepla pomocí tepelných čerpadel už je komerčně dostupné a v současné době se předpokládá navýšení instalovaných kapacit minimálně na čtyřnásobek současného stavu. Souhrnný potenciál je omezen zejména ekonomikou individuální výstavby, potřebou tepelné energie a podobně [4].



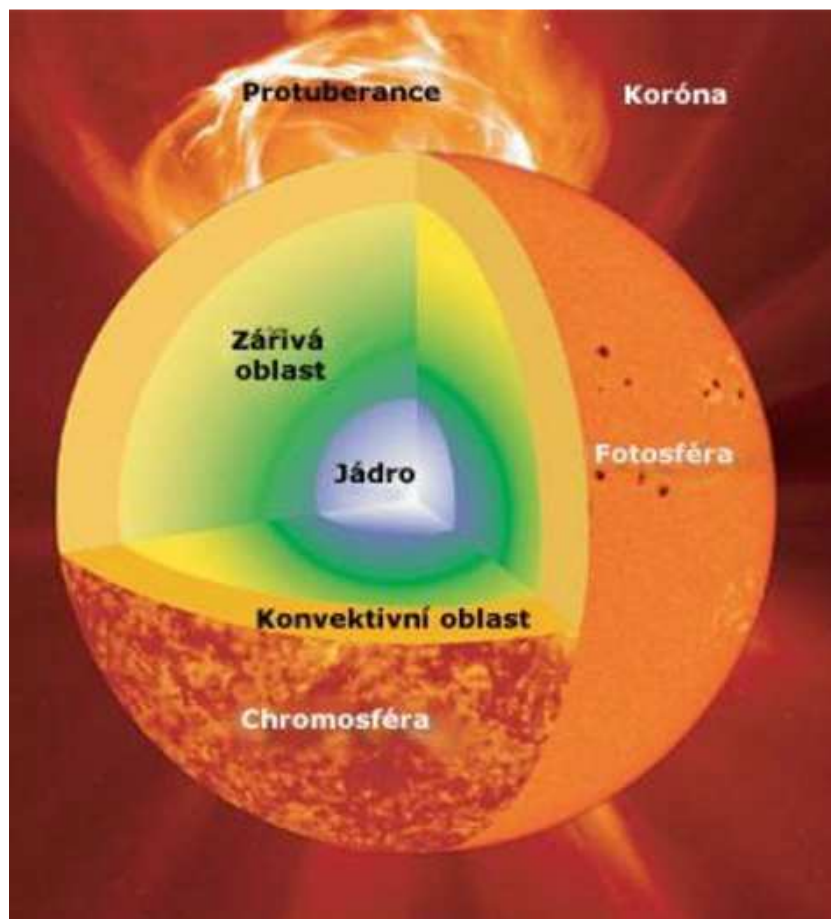
Obrázek 7 Potenciál konečné spotřeby OZE v ČR [4]

4. ENERGIE SLUNCE

Téměř veškerá energie na planetě Zemi pochází ze Slunce a má zásadní vliv na všechny živé organismy, které se na Zemi nacházejí. Mezi důsledky sluneční energie na Zemi patří také energie fosilních paliv, jako je ropa či zemní plyn.

Slunce je koule složená z plynné hmoty s průměrem 1 400 000 km, která se nachází uprostřed naší sluneční soustavy. Vzdálenost mezi Sluncem a Zemí se během roku pohybuje mezi 147 a 152 miliony km. Střední hodnota vzdálenosti definuje tzv. astronomickou jednotku $1 \text{ AU} = 149\,597\,870\,691 \pm 30 \text{ m}$. Světlo k nám ze Slunce dorazí za 8 minut a 19 sekund. Slunce se skládá z plazmy, což jsou žhavé elektricky vodivé plyny. Teplota jeho jádra se pohybuje okolo 13 000 000 K a na povrchu panuje teplota zhruba 6 000 K.

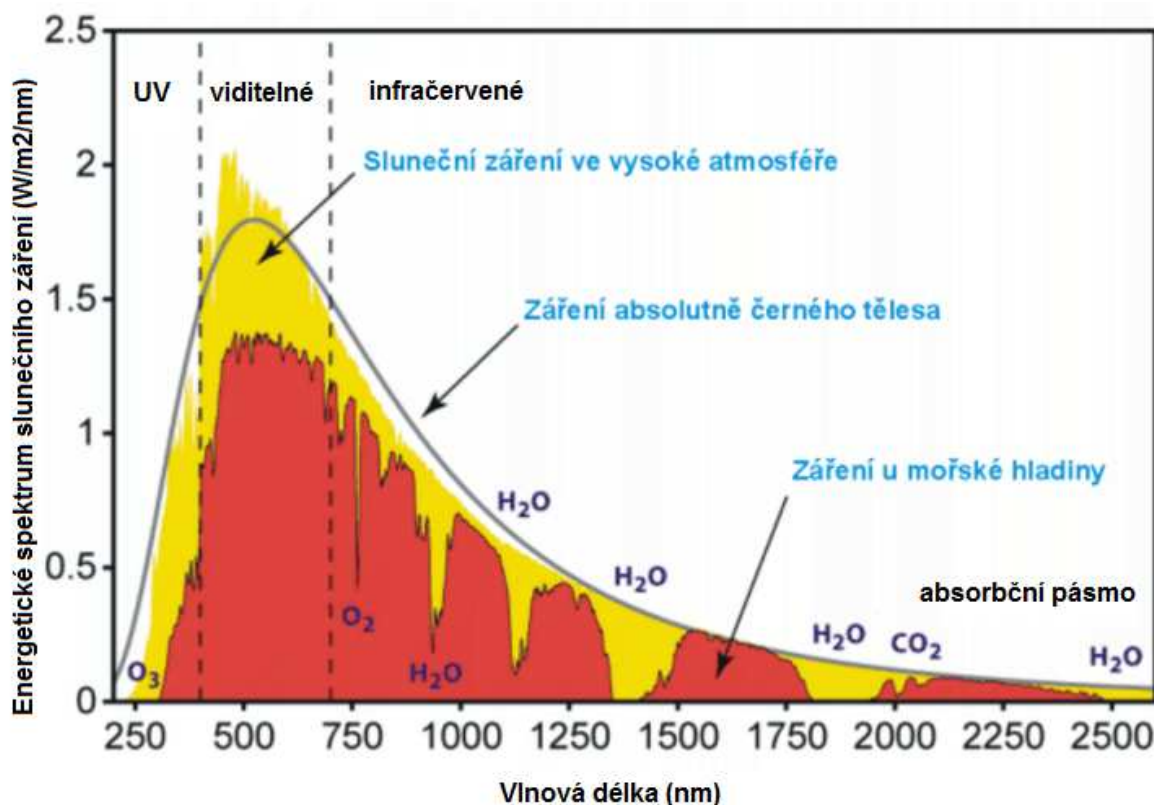
Hlavním zdrojem energie Slunce je probíhající jaderná fúze, což je spojování jader vodíku za současného vzniku helia. Takto se každou sekundu přemění zhruba 600 milionů tun vodíku na helium [6].



Obrázek 8 Struktura Slunce [7]

4.1 Sluneční záření

Sluneční záření je tvořeno rentgenovým, ultrafialovým, viditelným, infračerveným a rádiovým zářením. Spektrální rozsah vlnových délek elektromagnetického záření ze Slunce se pohybuje od 0,1 nm až do 10^3 m, přičemž nejvýznamnější rozsah vlnových délek je podle obrázku 8 mezi 200 až 300 nm.

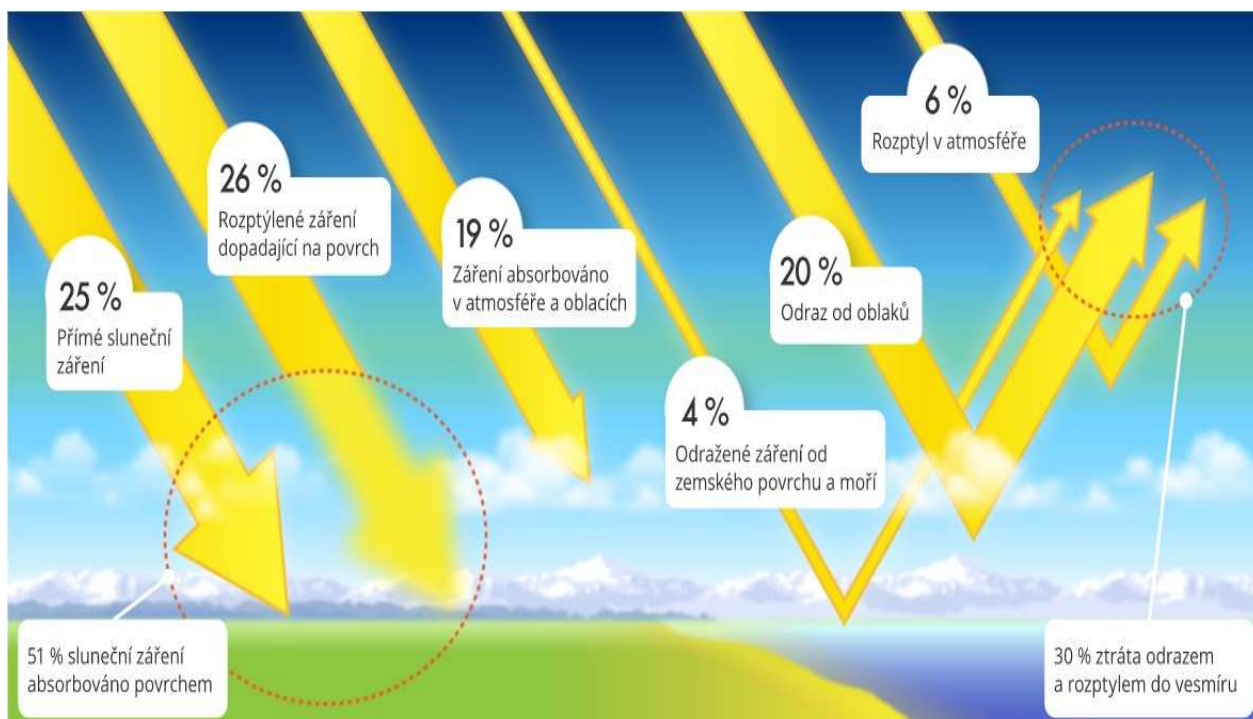


Obrázek 9 Spektrum slunečního záření [8]

Sluneční záření se s rostoucí vzdáleností rozptyluje na větší plochu a ztrácí tak na své intenzitě. Zářivý tok na povrchu atmosféry, který dopadá na jednotkovou plochu, která je kolmá ke slunečnímu záření, je zhruba 1,4 kW. Měrný tok energie $1400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ je označován jako solární konstanta. Průměrná hodnota solární konstanty je rovna: $I_0 = 1360 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Na zemský povrch dopadá jen asi $1,8 \cdot 10^{14}$ kW, což je jen velmi malá část z celkového zářivého toku slunce, který činí $3,8 \cdot 10^{23}$ kW. Drtivá většina záření je tedy rozptýlena do kosmu.

Na obrázku 9 je vidět, jak prochází sluneční záření atmosférou. Jen asi 51 % energie je pohlceno zemským povrchem. Zhruba 19 % energie je absorbováno atmosférou a asi 30 % energie je odraženo zpět do vesmíru. Nakonec je veškerá Zemí pohlcená energie vyzářena zpět do vesmíru. Mezi pohlceným a vyzářeným zářivým tokem je tedy rovnováha, přičemž jakékoliv porušení této rovnováhy by mělo za následek okamžitou změnu klimatu.



Obrázek 10 Poměr složek slunečního záření dopadajícího na zemský povrch [9]

Celkový úhrn slunečního záření, který dopadá na zemský povrch, nazýváme globální záření. Záření, které při své cestě nezmění jakýmkoliv způsobem svůj směr je nazýváno přímé sluneční záření. Rozptýlením přímého záření při průchodu atmosférou například odrazem od molekuly plynu v atmosféře či odrazem od zemského povrchu vzniká difúzní záření. Oproti přímému záření dopadá na povrch ze všech směrů a nevrhá stín. Velikost zastoupení difúzní složky v celkovém záření závisí na znečištění ovzduší, oblačnosti a podobně. Například při velké oblačnosti tedy dopadá na povrch pouze difúzní záření. Podíl difúzního záření na celkovém množství energie je zhruba 50 až 60 %, v zimních měsících je toto číslo ještě větší [10].

- **Přímé záření**

Intenzita přímého slunečního záření na obecnou plochu je popsána vztahem:

$$I_p = I_{pn} \cdot \cos \gamma \quad (4.1)$$

I_p	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$	intenzita přímého záření na obecnou plochu
I_{pn}	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$	intenzita přímého záření na plochu, která je kolmá k záření
γ	$[\circ]$	úhel od normály osluněné plochy ke slunečnímu záření

$$I_{pn} = I_0 \cdot A^{-Z} \quad (4.2)$$

I_0	[W·m ⁻²]	sluneční konstanta
A	[-]	součinitel, který je závislý na výšce slunce nad obzorem
Z	[-]	Linkeho součinitel znečištění atmosféry

- **Difúzní záření**

Intenzita difúzního záření je popsána vztahem:

$$I_D = 0,5(1 - \cos \alpha) I_{Dh} + 0,5r(1 + \cos \alpha)(I_{Ph} - I_{Dh}) \quad (4.3)$$

$$I_{Ph} = I_{pn} \cdot \sinh_s \quad (4.4)$$

$$I_{Dh} = 0,33 \cdot (I_0 - I_{pn}) \sinh_s \quad (4.5)$$

I_D	[W·m ⁻²]	intenzita difúzního záření
I_{Dh}	[W·m ⁻²]	intenzita difúzního záření na vodorovnou plochu
I_{Ph}	[W·m ⁻²]	intenzita přímého záření na vodorovnou plochu
α	[°]	úhel sklonu plochy od vodorovné plochy
r	[%]	reflexní schopnost okolních ploch
h_s	[m]	výška slunce nad obzorem

Zenitový úhel θ vyjadřuje výšku Slunce nad obzorem

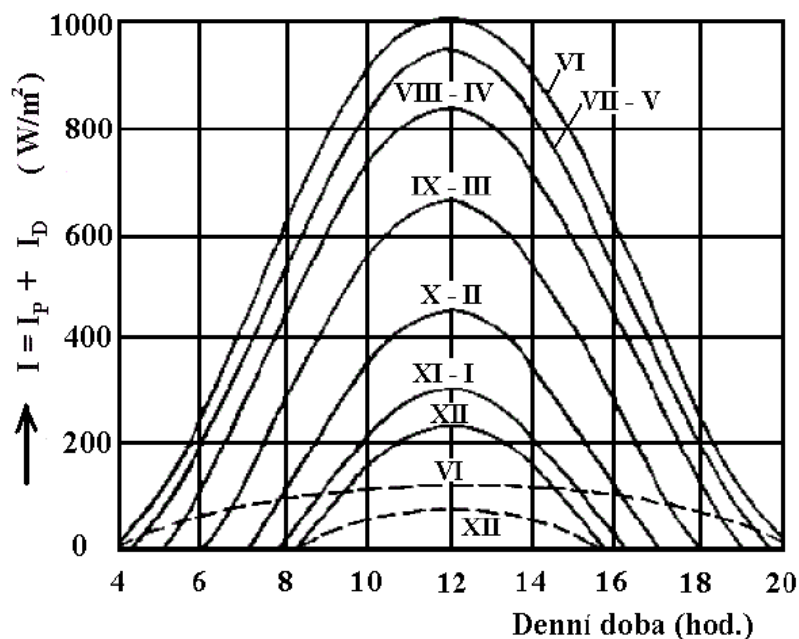
$$h = 90^\circ - \theta \quad (4.6)$$

θ	[°]	Zenitový úhel
----------	-----	---------------

- **Globální záření**

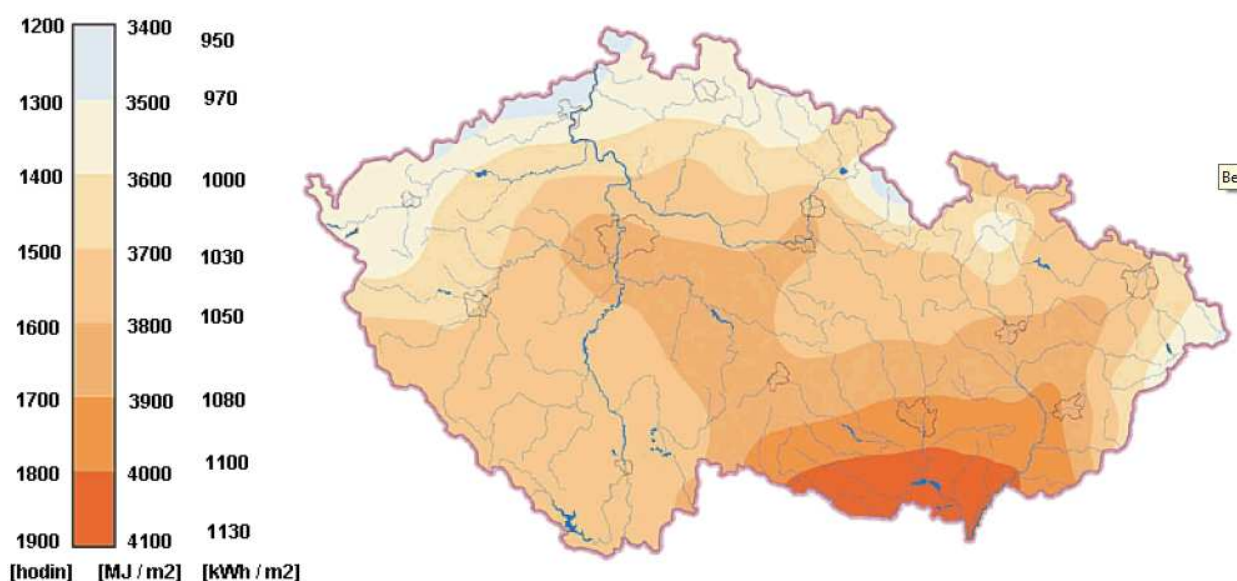
Pro intenzitu globálního záření platí vztah:

$$I = I_p + I_D \quad (4.7)$$



Obrázek 11 Intenzita celkového slunečního záření na vodorovné ploše [11]

Na obrázku 10 je vidět celková intenzita slunečního záření na vodorovné ploše v průběhu celého dne při součiniteli znečištění $Z = 3$ a pro zeměpisnou šířku 50° . Křivky definují charakteristický den v měsíci za slunečního a jasného počasí. Čárkované čáry představují intenzitu difúzního záření v červnu a v prosinci. Difúzní záření za slunečního, jasného počasí obvykle není vyšší než $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, což je zhruba 10 až 15 % z celkového záření.



Obrázek 12 Roční průměrný úhrn doby trvání slunečního svitu v hodinách, úhrn slunečního záření v $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ a v $\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2}$ [12]

- **Linkeho součinitel znečištění atmosféry Z**

Součinitel znečištění Z je závislý na množství exhalací obsažených v ovzduší a nadmořské výšce.

$$Z = \frac{\ln I_0 - \ln I_N}{\ln I_0 - \ln I_{CA}} \quad (4.8)$$

I_0	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$	sluneční konstanta
I_N	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$	intenzita slunečního záření při daném znečištění na kolmou plochu
I_{CA}	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$	intenzita slunečního záření při dokonale čistém ovzduší na kolmou plochu

Tabulka 1 Hodnoty součinitele znečištění Z [11]

součinitel Z	oblast
2	místa nad 2000 m. n. m.
2,5	místa nad 1000 m. n. m.
3	venkov bez průmyslových exhalací
4.5	města a průmyslové oblasti
až 8	silně znečištěné prostředí

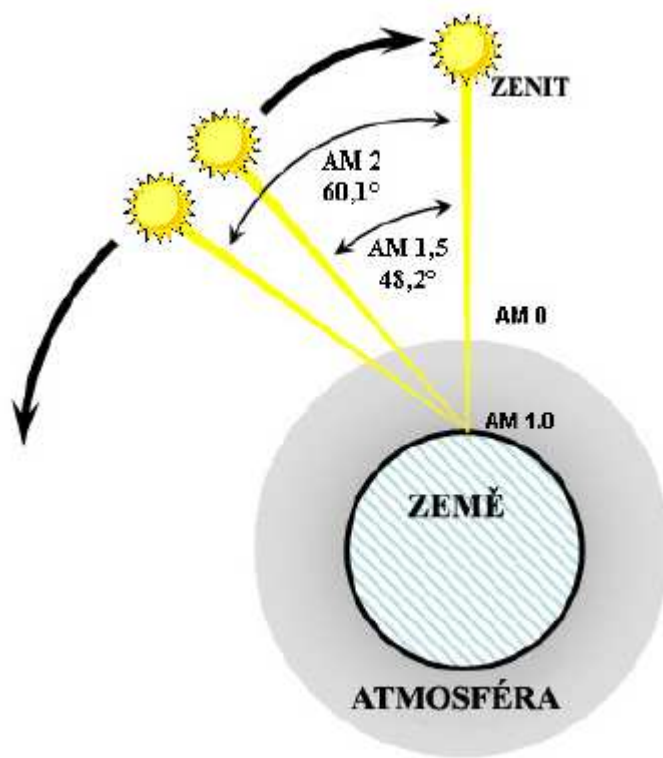
4.2 Vlivy na sluneční záření

Na sluneční záření má vliv hlavně momentální situace v atmosféře, ta je dána především oblačností. Největší překážkou dopadajícímu slunečnímu záření jsou mraky, od kterých se část slunečního záření odrazí a zbytek je rozptýlen do okolí. Další překážkou procházejícímu slunečnímu záření je míra znečištění atmosféry. Rozptylem pak vzniká difúzní záření, které pro účely energetiky není příliš využitelné.

Faktory ovlivňující sluneční záření:

- stav atmosféry (oblačnost, mlha, znečištění..),
- tloušťka atmosféry,
- roční období,
- denní doba,
- zeměpisná šířka,
- sklon osluněné plochy.

Tloušťku atmosféry, tzv. Air Mass určuje výška Slunce nad obzorem a nadmořská výška a je to v podstatě tloušťka vzduchu, kterou musí sluneční záření překonávat.



Obrázek 13 Výška slunce nad obzorem a AM [11]

Je-li Slunce v zenitu, jeho paprsky svírají s rovinou na povrchu Země pravý úhel, zenitový úhel je roven nule a $AM = 1$.

Vztah pro výpočet AM:

$$AM = \frac{1}{\cos \theta} \quad (4.9)$$

AM	$[-]$	air mass
θ	$[^\circ]$	úhel mezi Sluncem v zenitu a výchozí polohou

4.3 Výhody a nevýhody využívání

K hlavním výhodám využívání sluneční energie patří:

- nevyčerpatelný zdroj energie,
- ekologicky šetrná energie,
- vysoká životnost instalovaných zařízení a jejich nenáročná údržba,
- nízké provozní náklady a bezpečný provoz.

K hlavním nevýhodám využívání sluneční energie patří:

- proměnlivá intenzita záření a kolísající doba osvitu během roku,
- malá plošná hustota záření,
- vysoké investiční náklady.

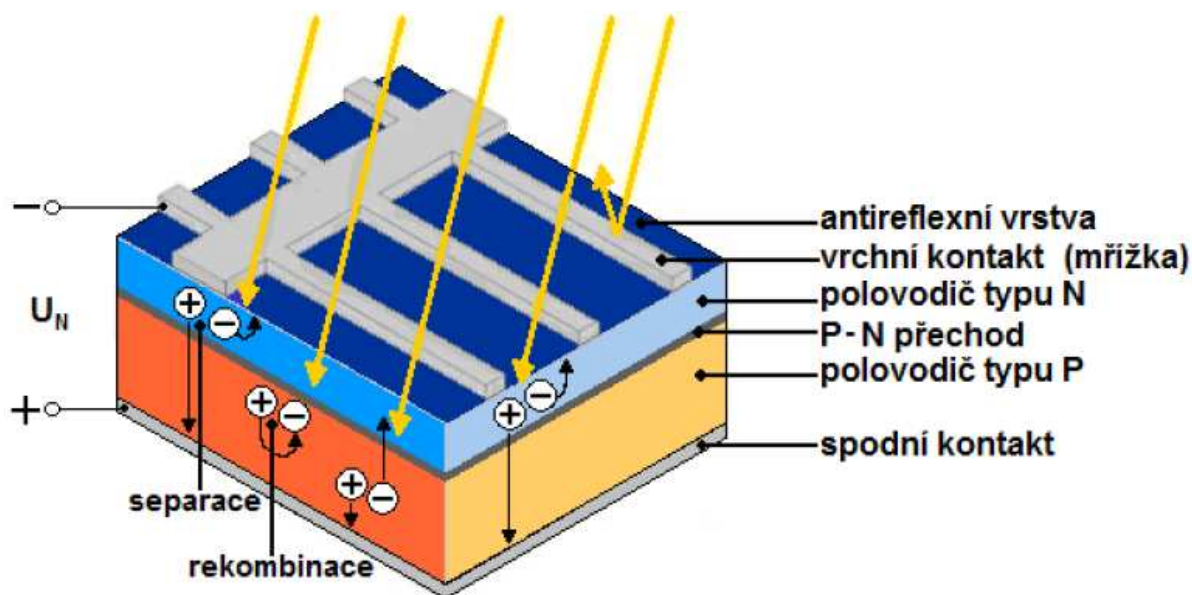
4.4 Fotoelektrický efekt

Fotoelektrický jev vzniká při pohlcování elektromagnetického záření hmotou za současného uvolňování elektronů do vodivostního pásu. K transformaci elektromagnetického záření ve formě fotonů do energie pohybujících se elektronů je zapotřebí:

- dostatečné množství volných elektronů,
- elektrický potenciál.

Fotony ze slunečního záření předávají svoji energii elektronům v kovu či polovodiči. Při dostatečně velké energii dopadajícího fotonu dojde k vyražení elektronu, který za sebou zanechá kladný náboj. Jestliže energie dopadajícího fotonu je menší než šířka zakázaného pásu a nemá tak dostatečnou energii k uvolnění elektronu ke generaci páru elektron – díra tak nedojde a energie se přemění na teplo, které pak zvyšuje teplotu článku.

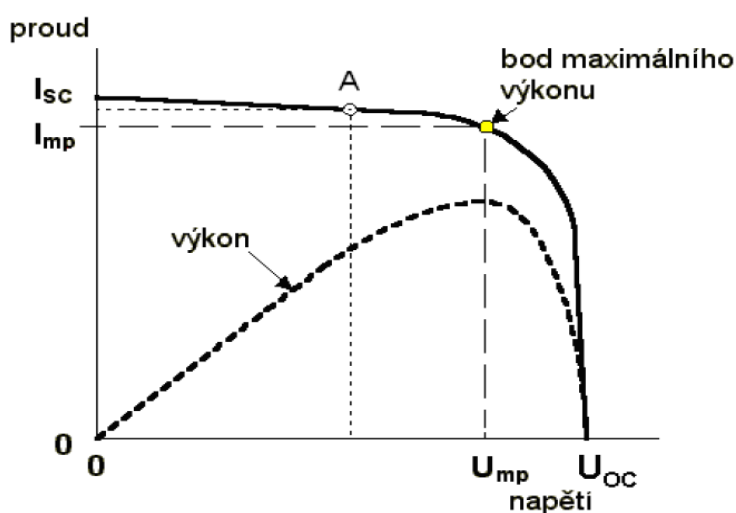
U fotovoltaiických článků jsou polovodičové P-N přechody, které umožňují nábojovou separaci. Prostřednictvím elektrického pole se elektrony přesouvají do oblasti N a díry do oblasti typu P. Oblast typu N se tak nabíjí záporně a oblast P kladně, na tomto osvětleném polovodiči tedy vzniká napětí. Velikost proudu, který může obvodem s připojenou zátěží procházet závisí na intenzitě dopadajícího slunečního záření, ploše článku a jeho účinnosti.



Obrázek 14 Vznik fotovoltaiického napětí na struktuře s přechodem PN [12]

4.5 Voltampérová charakteristika fotovoltaického článku

Činnost fotovoltaického článku můžeme popsat Voltampérovou charakteristikou, ze které je možno vyčíst základní údaje o článku, mezi které patří proud na krátko a napětí na prázdno. Proud na krátko je tzv. zkratový proud a získáme ho při $U = 0$, jeho velikost je rovna proudu generovanému dopadajícím světlem v případě, že sériový odpor je nulový. Dalším parametrem je napětí na prázdno U_{OC} , které získáme při $I = 0$.



Obrázek 15 V-A charakteristika osvětleného PV článku [12]

Výkon článku je pak možné spočítat jako součin proudu a napětí. Bod, ve kterém je dosažitelný výkon nejvyšší, se označuje jako *MPP* s charakteristickou hodnotou proudu I_{MP} a U_{MP} . Výkon je závislý na ozáření daného článku, kdy s rostoucí hodnotou ozáření výkon stoupá, na teplotě článku a na spektru dopadajícího světla [12].

Fill Factor, neboli činitel plnění, definuje elektrickou účinnost panelu a dává povědomí i o kvalitě článku. Je možné ho vypočítat podle vztahu:

$$FF = \frac{U_{MP} \cdot I_{MP}}{U_{OC} \cdot I_{SC}} \quad (4.10)$$

FF	[-]	fill factor
U_{MP}	[V]	napětí při maximálním výkonu
I_{MP}	[A]	proud při maximálním výkonu
U_{OC}	[V]	napětí naprázdno
I_{SC}	[A]	proud na krátko

4.6 Materiály pro FV články

Nejčastějším materiálem pro výrobu fotovoltaických článků je křemík (Si), u kterého je díky jeho šířce zakázaného pásu možno dosáhnout vysoké účinnosti generace elektronů slunečním zářením. U křemíku se podařilo poměrně dobře zvládnout nutné technologické operace k vytvoření struktur a i současný vývoj dává tušit, že křemík bude i nadále patřit k nejdůležitějším materiálům pro výrobu fotovoltaických článků. Snižuje se cena vstupního materiálu, energetická náročnost a zdokonaluje se technologie. V současnosti pokračuje také vývoj tenkovrstvých technologií založených na bázi amorfního křemíku a také na bázi CdTe (Cadmium-Telluride).

V začátku výroby FV článků se využíval monokrystalický křemík. V sedmdesátých letech však potřeba snížení ceny vstupního materiálu vedla k vývoji multikrystalického křemíku. Ten umožnil úsporu materiálu a investičních nákladů. Náhodná orientace jednotlivých zrn ale neumožňuje texturaci povrchu alkalickým leptáním a na hranici zrn dochází ke zvýšeným ztrátám rekombinací. V průběhu vývoje se pak podařilo účinnost multikrystalického křemíku značně přiblížit k účinnosti křemíku monokrystalického [13].



Obrázek 16 Monokrystalický (vlevo) a polykrystalický (vpravo) článek [14]

Tabulka 2 Účinnost jednotlivých typů článků [13]

Typ článku	Typická efektivita článku za běžných podmínek	Maximální naměřená efektivita článku za běžných podmínek	Maximální naměřená hodnota článku v laboratoři
	(%)	(%)	(%)
Monokrystalický křemík	12-16	22	25
Multikrystalický křemík	11-14	16	20
Amorfni křemík	5-7	10	13
Telurid kademnatý	10	12	16

V současné době probíhá vývoj tenkovrstvých technologií, které se od těch klasických liší jednak geometrií článku, způsobem výroby a také použitými materiály.

Klasické c-Si technologie vznikají rozřezáváním monokrystalického či multikrystalického ingotu na tloušťku cca 0,25 - 0,3 mm. Zato tenkovrstvé technologie se vyrábí ukládáním vrstev polovodičů na základní materiál a tím tak vznikne fotovoltaický článek s tloušťkou cca 2 – 5 μm . Velkou výhodou této technologie je až 1000x nižší spotřeba materiálu oproti klasickým metodám [13].

Rozdělení tenkovrstvé technologie podle použitých materiálů:

- amorfní křemík,
 - nízké výrobní náklady,
 - účinnost 4,5 – 9,5 %,
- CIGS (měď-indium-gallium-diselenid),
- CdTe (kadmium-tellurid),
 - účinnost 6 – 11 %,
- organické články,
 - možnost výroby tiskem,
 - účinnost 2 – 3 %.

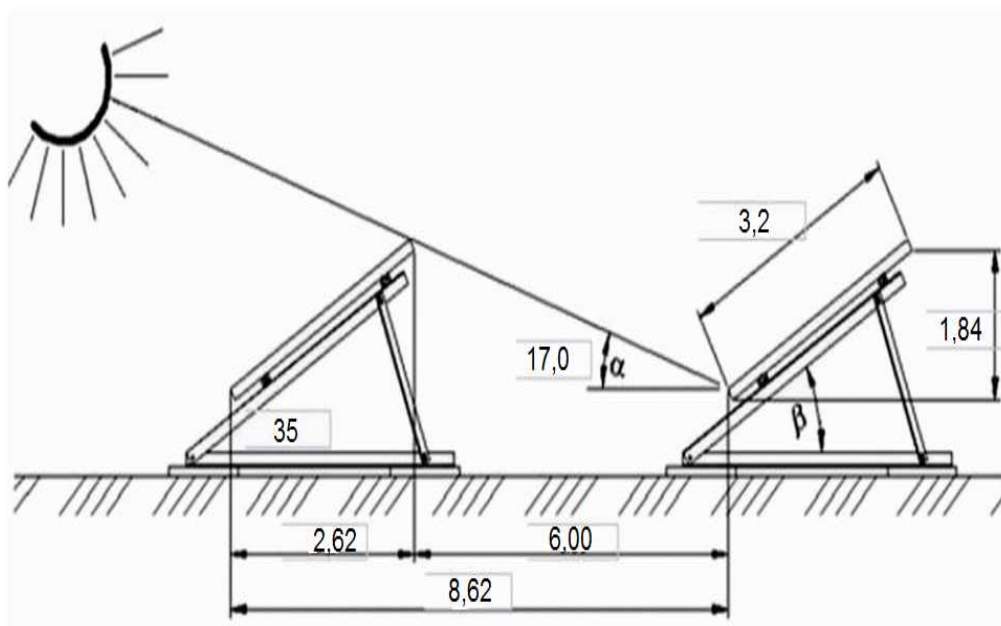
Výhody tenkovrstvých technologií:

- vysoká energetická výtěžnost,
 - Tenkovrstvé články vyrobí v průběhu roku až o 15 % více energie oproti c-Si článkům. Relativní účinnost u tenkovrstvých technologií se snižující se intenzitou záření roste, kdežto u c-Si klesá.
- nízká cena,
- vysoká odolnost vůči zastínění,
- nižší citlivost na úhel dopadu slunečního záření,
 - Tenkovrstvé moduly nejsou tak závislé na orientaci z důvodu své vyšší energetické výtěžnosti. Jsou tak vhodné pro větší spektrum aplikací.

4.7 Návrh a realizace fotovoltaických systémů

Důležitým aspektem při realizaci fotovoltaického systému je jeho správná orientace. Pro maximální využití dopadající sluneční energie je nejideálnější orientace jižním směrem. Mírný odklon, zhruba do 20°, na jihozápad či jihovýchod má za následek snížení výkonu elektrárny jen asi o 5 %. Jestliže je orientace panelů pouze na východ či západ, pak pokles výroby dosahuje až 25 %.

V našich zeměpisných šířkách je ideální sklon panelu zhruba 33°. Je to kompromis mezi výtěžností systému v zimě, kdy je Slunce nízko nad horizontem a výtěžností v létě, kdy je Slunce naopak vysoko nad obzorem. Při stavbě elektrárny na rovné střeše nebo na volném prostranství je také nutné stanovit rozestupy mezi řadami panelů. Ty se určují pro případ zimního období, kdy je slunce nejnižší nad obzorem a sluneční záření v tom nejhorším případě dopadá na povrch pod úhlem $\alpha = 17^\circ$. Důležité je taky eliminovat možnost případného zastínění panelů například stromy, okolními budovami a podobně, což má za následek výrazné snížení energetické výtěžnosti celého systému [13].



Obrázek 17 Konstrukční řešení FV instalace [13]

5. ENERGIE VĚTRU

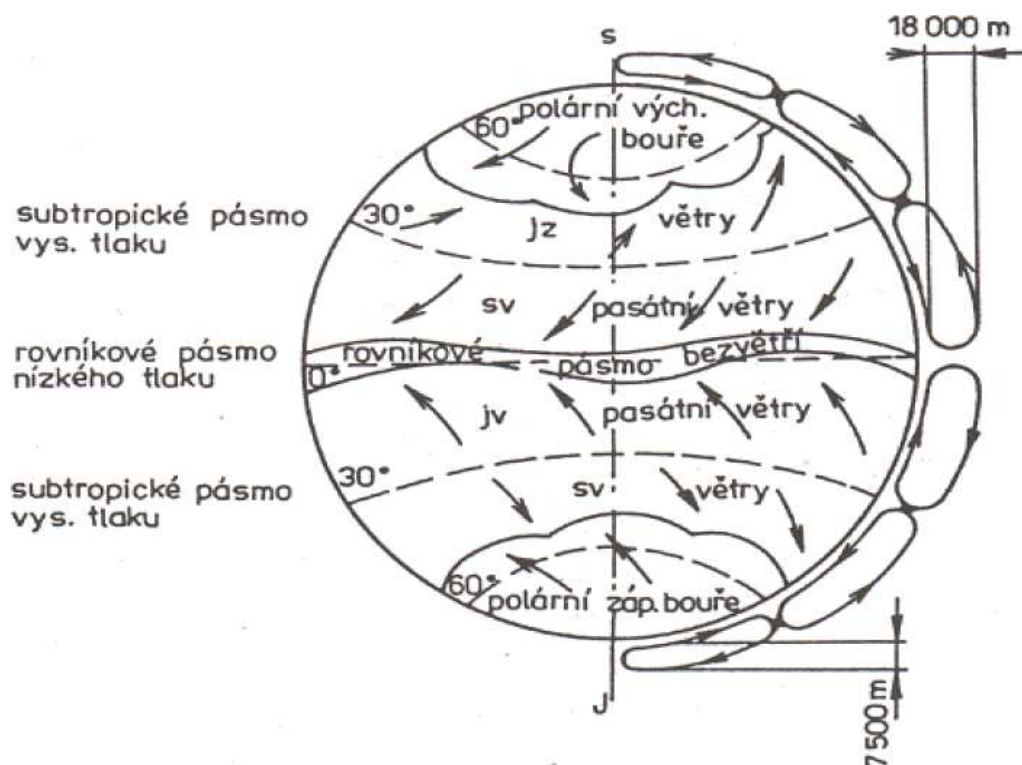
Vedle sluneční energie patří i ta větrná mezi člověkem nejdéle využívané energie. Vedle své vlastní síly a síly hospodářských zvířat to byly v podstatě dva jediné zdroje energie. Velmi důležitou roli hrál vítr zejména v námořní dopravě, kde měl výsadní postavení po dobu více než dva tisíce let. Mezi průkopníky ve využívání větrné energie patří starověký Egypt a Čína, kde větrné motory využívali už dlouhou dobu před narozením Krista. V Evropě se využívání větrné energie rozšířilo ve 13. století v podobě větrných mlýnů k mletí obilí. Na území ČR se první větrný mlýn objevuje na zahradě Strahovského kláštera v Praze v roce 1277. Ve 14. stol. má dominantní postavení ve využívání větrné energie Holandsko, které větrné motory využívalo jak k mletí obilí, tak i k vysušování mokřadů a jezírek. V 19. století dochází k velkému rozvoji ve využívání větrné energie v USA, kde se pomocí malých mnoholopatkových motorů čerpala voda.

První aplikace, která využívala větrnou energii pro výrobu elektrické energie, byla zprovozněna již na začátku 19. století, avšak s nástupem parního stroje došlo k postupnému útlumu ve využívání tohoto obnovitelného zdroje. Rostoucímu zájmu se větrná energie těší opět v současné době, kdy je využívána převážně k výrobě elektrické energie [2][12].

5.1 Vznik větru

Vítr vzniká při nerovnoměrném ohřevu zemského povrchu, od kterého se ohřívá přilehlá vrstva vzduchu a ten má pak tendenci stoupat vzhůru, na jeho místo se pak tlačí studený vzduch. V opačném případě, kdy studený vzduch s vyšším tlakem klesá, vzniká oblast vyššího tlaku vzduchu, a na jeho místo se tlačí teplý vzduch. Celý tento děj je pak ještě ovlivněn střídáním dne a noci a rotací Země. V důsledku rozdílů atmosférických tlaků mezi dvěma místy, se vytváří vzdušné proudění a tvoří se vítr [2].

Na obou polokoulích se utvářejí tři samostatné prstence vzduchu, které příčně rotují. Jeden rotuje nad tropickým pásmem, druhý se nachází nad mírným pásmem a třetí nad polární oblastí.



Obrázek 18 Směry větru na zeměkouli [2]

5.2 Rychlost větru

Rychlost větru je nejdůležitějším faktorem pro jeho možné využití protože má významný vliv na jeho výkon. Znalost rychlosti větru spolu s jeho směrem je důležitá při volbě vhodných lokalit pro stavbu větrné elektrárny a rozmístění jednotlivých elektráren ve skupině tak, aby se zamezilo jejich vzájemnému ovlivňování. Na rychlost větru má vliv členitost zemského povrchu a směrem k němu jeho rychlost klesá. V rovinné krajině pro rychlost platí vztah:

$$v_h = v_0 \cdot \left(\frac{h}{h_0}\right)^n \quad (5.1)$$

v_h	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	rychlost větru ve výšce h nad zemí
v_0	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	rychlost větru ve výšce h_0
h	$[\text{m}]$	výška umístění osy rotoru
h_0	$[\text{m}]$	výška, ve které se provádí měření
n	$[-]$	exponent vyjadřující drsnost povrchu

Exponent n závisí na drsnosti povrchu, výšce nad zemí a vertikálním rozložení teplot a může nabývat hodnot od 0 do 1.

Rychlost větru se často určuje vizuálním pozorováním a následným porovnáním s tzv. Beaufortovou stupnicí pro rychlost větru. Stupnice byla vytvořena roku 1806 anglickým kontraadmirálem Francisem Beaufortem pro námořní účely. Od té doby se počet stupňů rozšířil ze 12ti na 17. Její velkou výhodou je její praktičnost a použitelnost bez jakýchkoliv přístrojů.

Tabulka 3 Beaufortova stupnice rychlosti větru [14]

Bf	Vítr	rychlost [$\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$]	Účinky
0	bezvětří	<1	kouř stoupá kolmo vzhůru
1	vánek	1-5	kouř stoupá mírně ze šikma
2	větřík	6-11	listí na stromech ševlí
3	slabý vítr	12-19	listy a větve stromů se pohybují
4	mírný vítr	20-28	víří se prach
5	čerstvý vítr	29-39	začínají se pohybovat i listnaté keře
6	silný vítr	40-49	pohybují se větší větve stromů
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 poškozuje střechy
10	bouřlivý vichr	89-102	vítr vyvrací stromy
11	vichřice	103-117	vítr působí rozsáhlé škody na velkých plochách
12-17	orkán	>118	vítr má ničivé až devastující účinky

Dalším způsobem, jak určit rychlost větru, je použití zařízení zvaného anemometr, která kromě rychlosti větru dokáže určit i jeho směr. Těchto přístrojů existuje celá řada. Pracují na různých principech, například aerodynamických, značkovacích a podobně. Nejpoužívanější mechanický anemometr se skládá z rotoru, který je upevněn na svisle se otáčející hřídeli a třech až čtyřech ramenech s půlkruhovými miskami [12].

5.3 Výkon větru

Energii proudící masy vzduchu můžeme vyjádřit následujícím vztahem:

$$E_v = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (5.2)$$

E_v	[J]	energie vzduchu
m	[kg]	hmotnost vzduchu
v	[$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]	rychlost větru

Pro hmotnost m platí vztah:

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot A_p \cdot s \quad (5.3)$$

ρ	[kg·m ⁻³]	hustota vzduchu
V	[m ³]	objem vzduchu
A_p	[m ²]	plocha, jíž vzduch protéká
s	[m]	dráha, kterou vzduch urazí

Nyní je již možné odvodit vztah pro výkon větru, který protéká jednotkovou plochou:

$$P_v = \frac{E}{A_p \cdot t_v} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{A_p \cdot s}{A_p \cdot t_v} \cdot v^2 \quad (5.4)$$

P_v	[W·m ⁻²]	výkon větru protékající jednotkovou plochou 1 m ²
t_v	[s]	časový interval průchodu větru

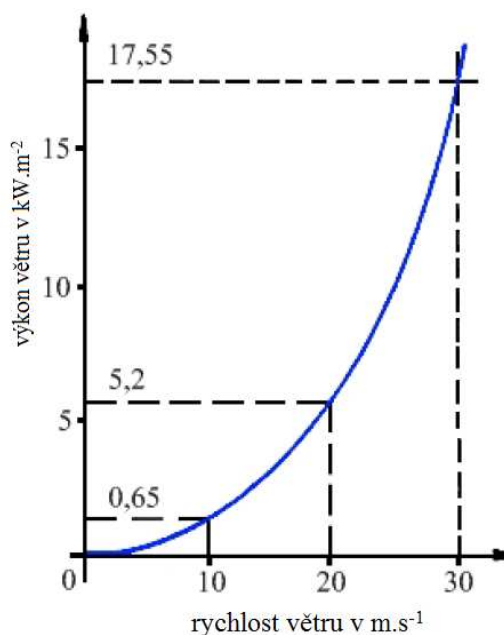
$$v = \frac{s}{t_v} \quad (5.5)$$

Jestliže dosadíme rovnici 5.5 do rovnice 5.4 získáme vztah:

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \quad (5.6)$$

S ohledem na skutečnost, že rychlost a výkon větru jsou časově proměnné veličiny, můžeme energii větru, který protéká jednotkovou plochou, popsat vztahem [2]:

$$E = \int_{t_0}^t P_v \cdot dt \quad (5.7)$$



Obrázek 19 Závislost výkonu větru, který protéká plochou 1 m², na jeho rychlosti [12]

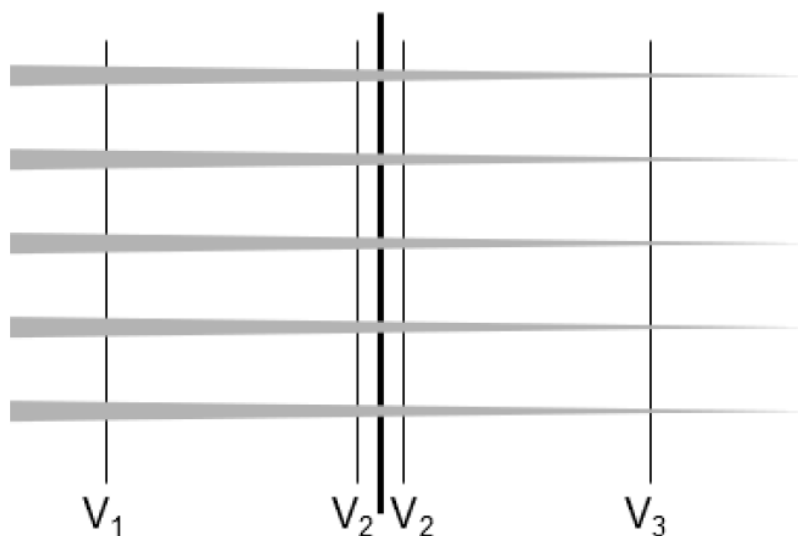
Betzův limit

Větrné elektrárny pracují díky odebrání energie větru pomocí větrné turbíny. Existuje však teoretický limit, který udává množství energie, kterou lze podle aerodynamických zákonů využít. Limit stanovil Albert Betz v roce 1919 na hodnotu přibližně 59,3 %, nemůže proto existovat větrná elektrárna s vyšší účinností.

Budeme-li mít větrnou turbínu, která bude tvořena listy vrtule, bude její užitná plocha symbolizována diskem, který směřuje kolmo k proudění vzduchu. V dostatečných vzdálenostech před a za diskem se měří rychlost proudění v_1 a v_3 . Průměrem těchto rychlostí je pak rychlost v_2 , která je v oblasti disku [16].

$$v_2 = \frac{v_1 + v_3}{2} \quad (5.8)$$

v_1	[m·s ⁻¹]	rychlost větru před diskem
v_2	[m·s ⁻¹]	rychlost větru v oblasti disku
v_3	[m·s ⁻¹]	rychlost větru za diskem



Obrázek 20 Rovina disku [16]

V určité vzdálenosti od disku je rychlost před ním i za ním stejná s velikostí v_2 . Uplatníme-li tento vztah i na pohyb hmoty, pak můžeme získat energie v místech s rychlostí v_1 a v_3 .

Energie před diskem:

$$E_1 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_1^2 \quad (5.9)$$

Energie za diskem:

$$E_3 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_3^2 \quad (5.10)$$

Poměr hmoty, která prochází diskem s plochou A bude:

$$\dot{m} = \rho \cdot A_d \cdot v_2 = \rho \cdot A_d \cdot \frac{v_1 + v_3}{2} \quad (5.11)$$

$\dot{m}$	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$	hmotnostní tok
A_d	$[\text{m}^2]$	plocha disku

Disk odebral vzduchu energii:

$$P_m = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot (v_1^2 - v_3^2) = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A_d \cdot (v_1 + v_3) \cdot (v_1^2 - v_3^2) \quad (5.12)$$

Pokud je tato odebraná energie vydělena energií větru o stejné ploše, pak výsledek definuje maximální možný odebíraný výkon [16]:

$$\frac{P_m}{P_{\max}} = \frac{\frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A_d \cdot (v_1 + v_3) \cdot (v_1^2 - v_3^2)}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^3} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{v_3}{v_1}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{v_3}{v_1}\right)^2\right] \quad (5.13)$$

Poměr $P_m/P_{\max}$ nabývá nejvyšší hodnoty, jestliže je rychlost v_3 třetinová vůči rychlosti v_1 . To vyjadřuje tzv. Betzův limit.

$$\frac{P_m}{P_{\max}} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{1}{3}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{1}{3}\right)^2\right] = \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{3} \cdot \frac{8}{9} = \frac{16}{27} \quad (5.14)$$

Maximální teoretický výkon větrné elektrárny je pak získán vynásobením Betzova limitu a výkonem větru:

$$P_{\text{Betz}} = \frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \quad (5.15)$$

Výsledný dodávaný výkon ideální větrné turbíny s definovanou plochou disku je:

$$P_A = \frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot A_d \quad (5.16)$$

Výpočet účinnosti přeměny z kinetické energie na energii elektrickou je významným ukazatelem k hodnocení turbíny a je definován jako poměr vyrobeného elektrického výkonu a výkonu větru.

$$\eta = \frac{P}{P_W} = \frac{U \cdot I}{P_W} \cdot 100 \quad (5.17)$$

P_W [W] výkon větru

Účinnost větrné turbíny je také možno vypočítat použitím Betzova limitu a účinnosti turbíny:

$$\eta_c = \eta_{Betz} \cdot \eta_t \quad (5.18)$$

η_c [-] celková účinnost

η_{Betz} [-] Betzův limit – 0,593

η_t [-] poměrná účinnost, která je vztažena k ideální turbíně

Většinou se udává účinnost jako poměr výkonu turbíny a ideální turbíny a její velikost dosahuje 40 % až 60 % [16].

$$\eta_t = \frac{P}{P_A} = \frac{U \cdot I}{P_A} \quad (5.19)$$

5.4 Výhody a nevýhody využívání

K hlavním výhodám využívání větrné energie patří:

- nevyčerpatelný zdroj energie,
- ekologicky šetrná energie,
- malá zastavěná plocha.

K hlavním nevýhodám využívání větrné energie patří:

- narušený vzhled okolní krajiny,
- způsobují hluk,
- proměnlivá intenzita větru během roku,
- stroboskopický efekt,
- rušení televizního a radiového signálu.

5.5 Rozdělení větrných motorů

Větrné motory přeměňují kinetickou energii větru na mechanickou energii, která je následně u větrných elektráren transformována na elektrickou energii. Základní rozdělení větrných elektráren je provedeno podle aerodynamického principu.

- odporové motory,
- vztlakové motory.

Další dělení můžeme provést například podle osy rotace, instalovaného výkonu, či rychlostního součinitele λ na rychloběžné a pomaloběžné.

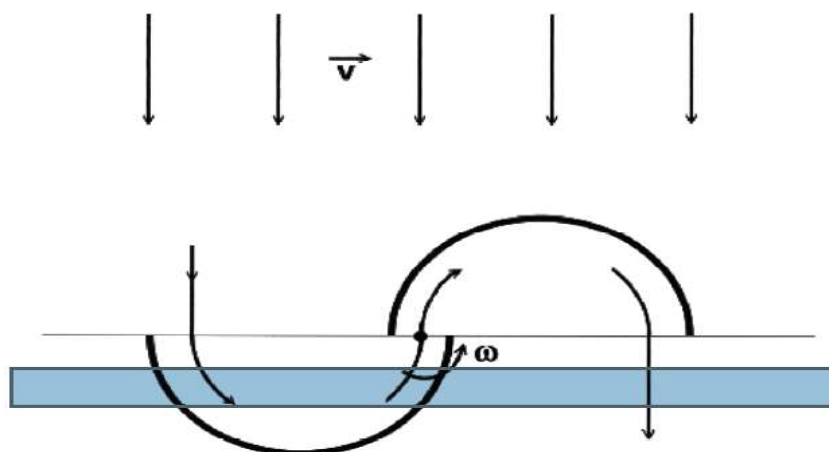
5.5.1 Odporové motory

Patří mezi nejdéle využívané větrné motory. Jejich podstatou je fakt, že na ploše vystavené poryvu větru se vytváří aerodynamický odpor. Tím se vytváří síla, která se pak přeměňuje na otáčivý pohyb. Pro rozběh je důležité, aby obvodová rychlost byla menší než rychlost větru. Jestliže výsledná energie nebude z hřídele odebírána, pak budou otáčky úměrné rychlosti větru.

Účinnost u odporových motorů se pohybuje v rozmezí jen 15 – 20 %, což má za následek jejich poměrně malý výskyt.

Klasickým představitelem odporových motorů je Savoniův motor, který je sestaven ze dvou svislých lopatek. Ty jsou uprostřed zhruba o 20 % průměru rotoru přesazeny do protisměru. Tím je docíleno že část energie ze zadní „pasivní“ lopatky je přesunuta na přední stranu „aktivní“ lopatky.

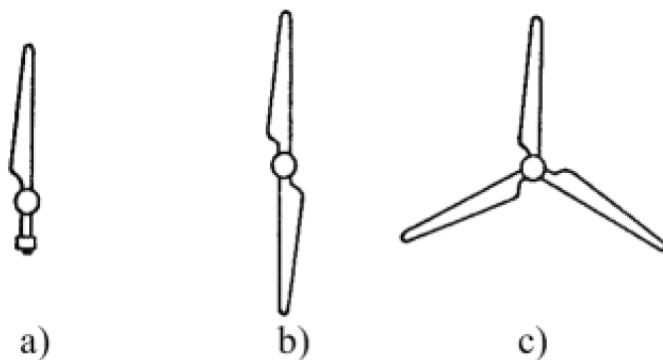
Mezi výhody Savoniova motoru patří jeho jednoduchá konstrukce, nezávislost na směru větru a také rozběh již zhruba od $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.



Obrázek 21 Savoniuv motor [2].

5.5.2 Vrtule

Je to typ větrného motoru, který pracuje na vztlakovém principu. Vrtule je tvořena dvěma či třemi listy, které jsou přichyceny k rotoru. Jednotlivé listy jsou konstruovány ze sklolaminátu a jsou vyrobené tak, aby dokázaly efektivně přenášet sílu větru na rotor s účinností 40 % až 45 %. Průměry jednotlivých listů se mohou pohybovat od 25 m do 150 m.



Obrázek 22 Jednotlivé druhy vrtulí: a) jednolistá, b) dvoulistá, c) třílistá [12]

U větrných motorů, které pracují na vztlakovém principu, vznikají na listech aerodynamické síly a proto musí být listy speciálně tvarované. Působící vztlakové síly rostou s druhou mocninou rychlosti větru a výsledná energie, která je vyprodukována generátorem, dokonce se třetí mocninou. Je proto tedy velice důležitá regulace výkonu, která zajistí, že nedojde k mechanickému a elektrickému poškození [12].

5.6 Části vrtulové elektrárny

- **Rotor**

Rotor má zajistit přeměnu rotačního pohybu na tah. Obvykle je složen ze dvou či třech listů. V rotoru je i regulační systém vrtule, který má udržovat potřebné otáčky a pokud je to nutné, tak vrtuli zabrzdít. Existují v zásadě dva základní regulační systémy. Systém s pevnou vrtulí je vybaven aerodynamickou brzdou, která se v případě vysokých otáček vychýlí a systém s nastavitelnou vrtulí, u kterého se jednotlivé listy natočí tak, že dojde k brzdnému účinku. K brzdění rotoru je pak určena kotoučová brzda.

- **Gondola**

Je umístěna na stožáru a je v ní umístěna strojovna

- **Hřídel**

Je to rotační součást větrné elektrárny která slouží pro přenos kroutícího momentu. K ní jsou pak připojeny jednotlivé další součásti, které se s ní otáčejí.

- **Převodovka**

Má za úkol přizpůsobovat rychlost otáček podle požadavku generátoru.

- **Generátor**

Je využíván k přeměně mechanické energie na energii elektrickou. Lze je rozdělit na:

- o Synchronní generátory – jejich výhodou je schopnost pracovat v širokém rozsahu rychlostí větru a poměrně velká účinnost.
- o Asynchronní generátory – oproti synchronním generátorům jsou levnější a jsou snadno připojitelné k síti.
- o Stejnosměrné generátory – vhodné pro větrné elektrárny malých výkonů s dobíjením akumulátorů.

- **Stožár**

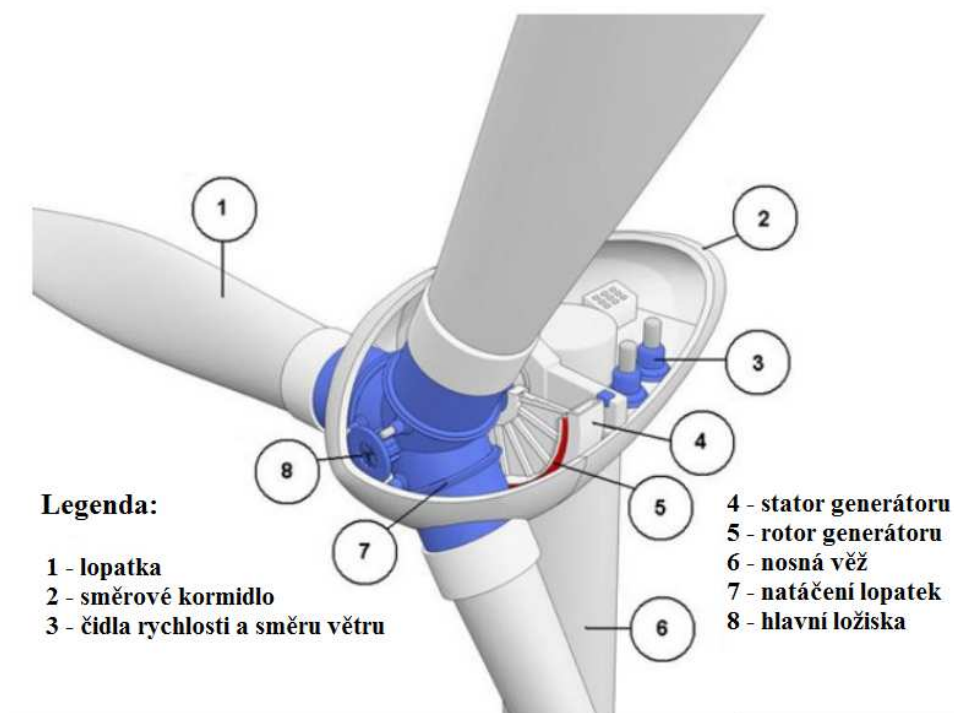
Je to nosný prvek elektrárny, na němž jsou umístěny gondola s rotorem. Nejčastěji jsou stožáry konstruovány jako tubusové, vyrobené z oceli nebo betonu. U malých elektráren se může tubus vytvořit jen s pomocí trubky upevněné lany.

- **Kontrolní systém**

Je tvořen řídicím počítačem a programovou částí, kdy na řídicím panelu je možno sledovat výstupy z jednotlivých čidel, které sledují například rychlost otáček rotoru, vibrace, výkon generátoru apod.

- **Systém k otáčení gondoly**

Je důležitý pro správné natočení gondoly ke směru větru, které je nutné k dosažení maximálního výkonu.



Obrázek 23 Základní části VTE [15]

6. LABORATORNÍ ÚLOHA 1

Laboratorní úloha se zabývá měřením vyrobené energie na fotovoltaickém panelu a větrné turbíně, které jsou umístěny v reálných podmínkách na střeše budovy T10.

6.1 Měřicí pracoviště

Měřicí pracoviště je složeno z fotovoltaického panelu A-130, větrné turbíny JPT-100, anemometru TX20ETH, pyranometru SG420, teplotního čidla PT100, měřící ústředny AGILENT 34980A a počítače.

Větrná turbína

Větrná turbína JPT-100 od společnosti Jetpro Technology, Inc disponuje pětistým rotorem a permanentním magnetickým generátorem, který zajišťuje vysokou účinnost výkonu. Jmenovitý výkon turbíny je 100 W a to při rychlosti větru $12 - 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Spouštěcí rychlost je $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a mezní rychlost, při které dochází k vypínání je $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Při vyšších rychlostech dochází k přepětí a aktivuje se elektromagnetická brzda [19].

Otáčivý pohyb rotoru se pomocí generátoru přeměňuje na elektrickou energii. Pro její výrobu se používá vícepolový synchronní generátor s permanentními magnety. Výsledný elektrický proud je proto potřeba pomocí integrovaného okruhu usměrnit na stejnosměrný. Největší účinnosti přeměny je dosaženo, jestliže je rotor orientován do směru větru, což zajišťuje směrové kormidlo.



Obrázek 24 Větrná turbína JPT-100

Anemometr TX20ETH

Anemometr TX20ETH od společnosti Papouch s.r.o., který dokáže měřit rychlost i směr větru, se skládá ze samotného anemometru a elektronické části. Tento třílístý anemometr je schopen měřit směr větru s rozsahem 360° v 16 horizontálně orientovaných polohách. Rychlost větru dokáže měřit s přesností $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ až do rychlosti $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Propojení anemometru s elektronickou částí je realizováno telefonním kabelem RJ 11 a elektronická část je pak připojena k síti pomocí ethernetového kabelu. Zařízení odesílá naměřené hodnoty na vzdálený server, kde jsou ukládány ve formátu XML [20].



Obrázek 25 Anemometr TX20ETH



Obrázek 26 Elektronická jednotka TX20ETH

Fotovoltaický panel

Fotovoltaický panel A-130 od společnosti ATERSA je monokrystalický panel s výkonem 130 Wp. Panel disponuje 36 články o rozměrech 150 x 150 mm a je umístěn na střeše T10 na hliníkové konstrukci se sklonem 45° a orientován -65° JJV. Celkové rozměry panelu jsou 1475 x 659 x 34 mm [15].

Pyranometr SG420

Pyranometr SG420 od společnosti J. Tlusták Praha pracuje na principu teplotní difrakce vznikající dopadem záření na bílou a černou plochu. Díky absorpci záření dochází k zahřívání jednotlivých segmentů, pod kterými jsou umístěny termočlánky, jež jsou spojeny do série. Pyranometr disponuje na spodní straně šroubovací vysoušecí vložkou, která obsahuje barevný indikátor účinnosti. V případě ideálních podmínek pro měření je barva indikátoru modrá. Jestliže však vysoušecí vložka navlhne, změní svoji barvu a je třeba ji vysušit. Výrobce je pak doporučeno provádět vysoušení vložky alespoň jednou ročně.



Obrázek 27 Pyranometr SG420

Teplotní čidlo PT100

Teplotní čidlo PT100 je zhotoveno z platiny a číselná hodnota 100 odkazuje k tomu, že při teplotě 0 °C je odpor čidla roven hodnotě 100 Ω. Pro výpočet teplotní závislosti odporu je možné použít následující vztahy [15]:

Pro teplotu v rozsahu -200 °C až 0 °C:

$$R = R_0 \cdot [1 + A_k \vartheta + B \vartheta^2 + C \vartheta^3 \cdot (\vartheta - 100)] \quad (6.1)$$

Pro teplotu v rozsahu 0 °C až 850 °C:

$$R = R_0 \cdot [1 + A_k \vartheta + B \vartheta^2] \quad (6.2)$$

R	[Ω]	elektrický odpor při dané teplotě
R_0	[Ω]	elektrický odpor při teplotě 0 °C
A_k	[K^{-1}]	konstanta 3,9083 K^{-1}
B	[K^{-2}]	konstanta -5,775 K^{-2}
C	[K^{-4}]	konstanta $-4,183 \cdot 10^{-12} K^{-4}$
ϑ	[°C]	teplota

Jak větrná turbína, tak fotovoltaický panel jsou umístěny na střeše budovy Technická T10 a vychází z nich vodiče kladných a záporných polů. K vodičům větrné turbíny je připojen odpor o hodnotě 8,12 Ω a k vodičům fotovoltaického panelu pak odpor o hodnotě 4,94 Ω . Oba odpory jsou umístěny v laboratoři z důvodu zamezení jejich teplotního ovlivňování okolním prostředím. K odporům je paralelně připojena měřicí ústředna Agilent 34980A, která zpracovává data a převádí je následně do digitální podoby. Ty jsou následně zpracovány převodníkem GPIB-USB a odeslány do PC.

Anemometr, který je umístěn na střeše budovy Technická T10 je pomocí telefonního kabelu RJ11 propojen s elektronickou jednotkou TX20ETH, která se nachází v laboratoři. Naměřená data jsou zpracovávána elektronickou jednotkou a odesílána na webserver, který je zapisuje do XML a HTML souboru. Zobrazení a zapsání XML souboru z webserveru do PC je zajištěno skriptem vytvořeným v jazyce PHP.

V sérii s pyranometrem je zapojen odpor o hodnotě 101 Ω , na němž je odečítáno napětí. To je úměrné intenzitě dopadajícího slunečního záření. K měřicí ústředně je také připojeno teplotní čidlo PT100, jehož odpor je závislý na aktuální teplotě.

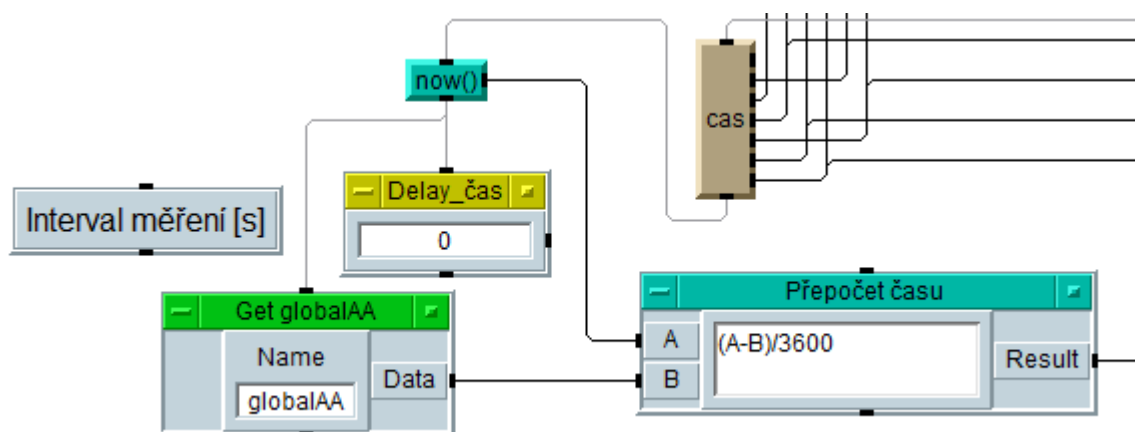
Propojení mezi měřicí ústřednou Agilent 34980A a počítačem je vyřešeno pomocí kabelového rozhraní USB-GPIB. A pro komunikaci mezi měřicí ústřednou, PC a anemometrem TX20ETH, slouží IO knihovna. Naměřené hodnoty, jsou zde zpracovány a následně zobrazeny v uživatelském prostředí.

6.2 Měřicí software

Ke sběru dat byl v modifikované podobě využit měřicí software vytvořený Ing. Davidem Dočkalem. Software následně ukládá naměřené hodnoty z větrné turbíny JPT-100, anemometru TX20ETH, fotovoltaického panelu A-130, teplotního čidla PT100 a pyranometru SG420 do souboru data.txt.

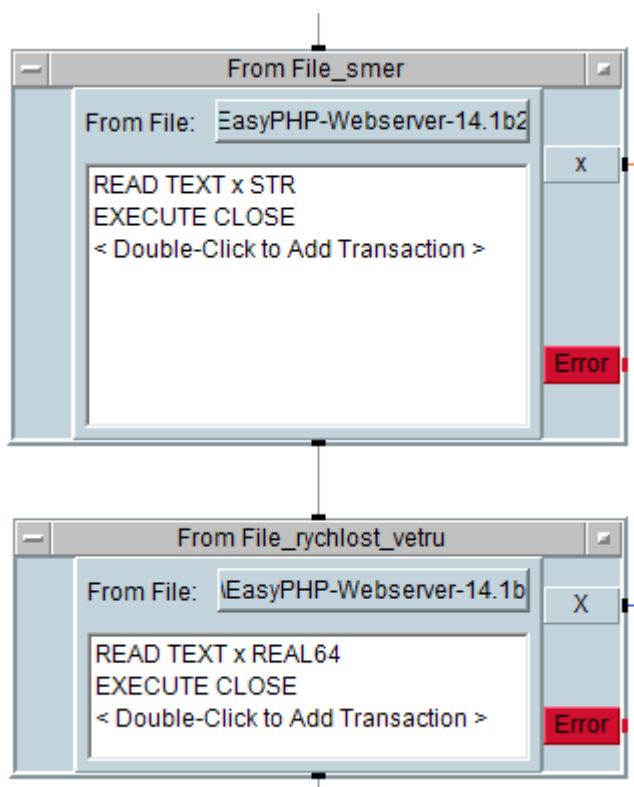
6.2.1 Funkce programu

Pro třídění časových informací (rok, měsíc, den, hodina, minuta, sekunda) je vytvořen blok *cas*. K bloku *Přepočet času* je na vstup A přivedena aktuální hodnota času a na vstup B pak hodnota času v době spuštění měření. Následně dojde k převedení na hodiny.



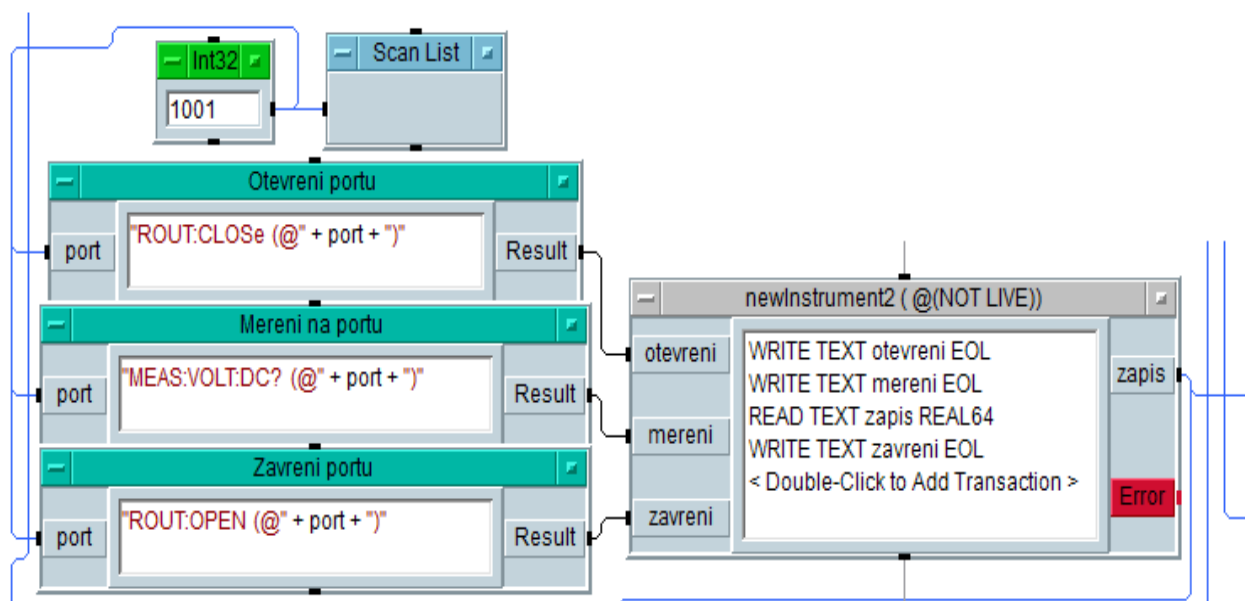
Obrázek 28 Odečet hodnot pro čas a datum

Elektronickou jednotkou anemometru TX20ETH jsou data o směru a rychlosti větru zapisovány v intervalu 10 s do XML souboru. Skript vytvořený v PHP souboru dokáže tento XML soubor otevřít a obsažené informace zapsat do vlastních souborů *směr*, *rychlost_vetru*. Program *mereni.vee* pak tyto soubory čte při každém spuštění měření a hodnoty ukládá v souboru data.txt. Hodnoty rychlosti větru jsou následně pro větší přehlednost převedeny na $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.



Obrázek 29 Odečet hodnot pro směr a rychlost větru

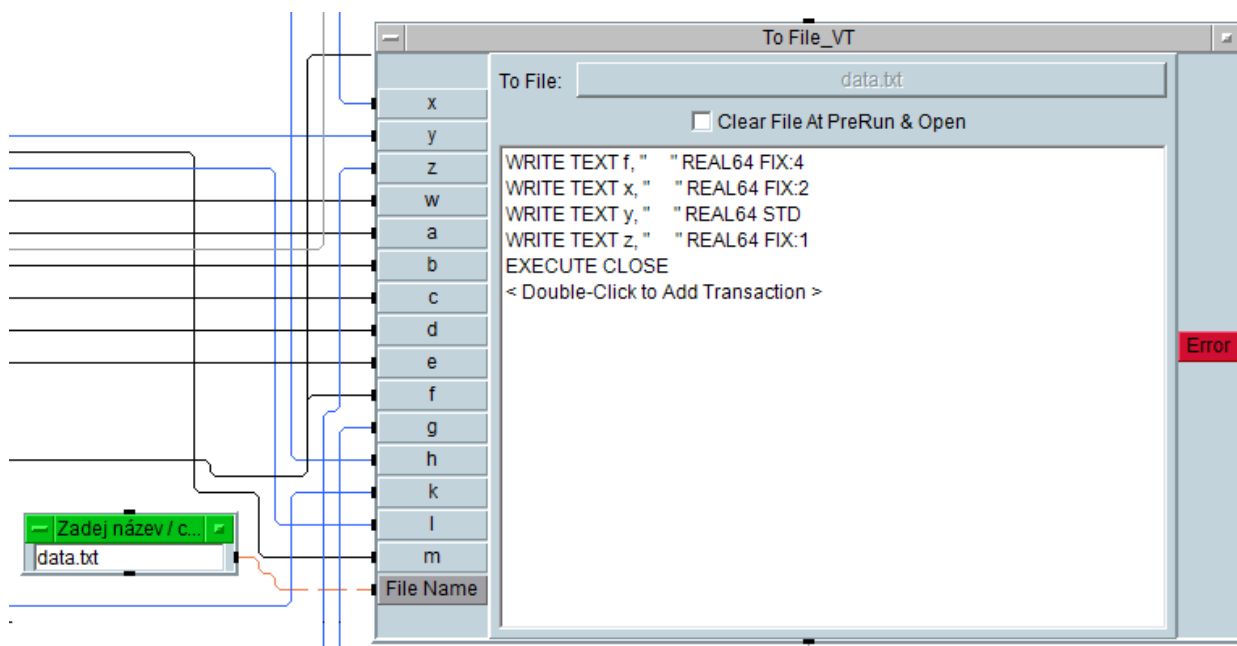
Na kontaktech měřicí ústředny newInstrument2 se provádí odečítání napětí na rezistoru o hodnotě 8,12 Ω , který je připojen k větrné turbíně.



Obrázek 30 Odečet napětí na VTE

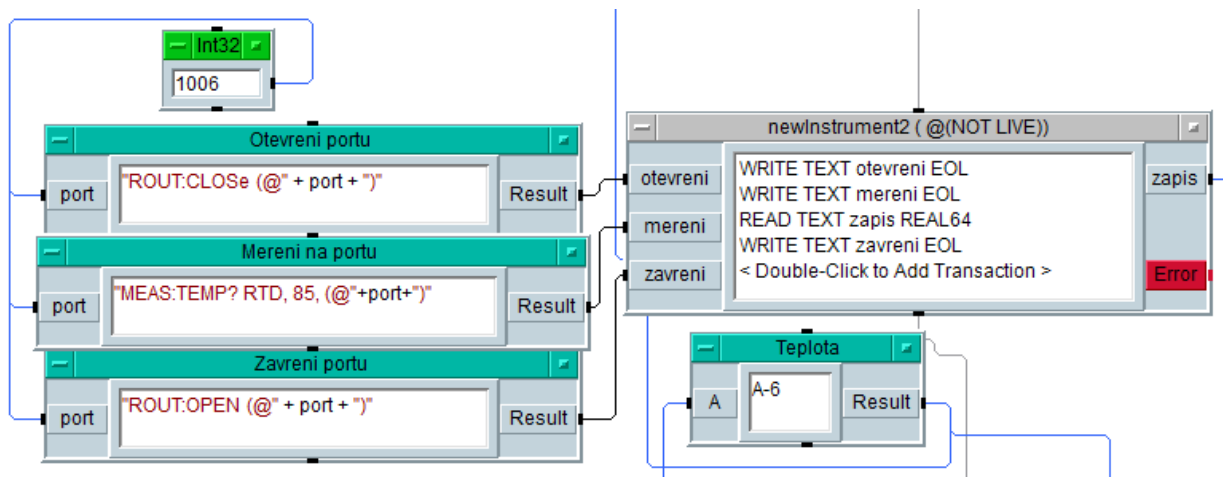
Naměřené a vypočítané údaje času, napětí na turbíně, rychlosti větru a teploty jsou odeslány do bloku *To File_VT* a poté uloženy do souboru *data.txt*.

Na vstup *x* bloku *To File_VT* je přivedena hodnota napětí na turbíně. Ke vstupu *y* je přivedena hodnota rychlosti větru a *kz* je přivedena hodnota teploty. Na vstup *f* je pak přivedena hodnota času. Na ostatní kontakty jsou přivedeny další hodnoty jako proud a účinnost větrné turbíny, které byly využívány v předchozí modifikaci programu. Pro účely laboratorní úlohy však nejsou zapisovány do souborů *data.txt*.



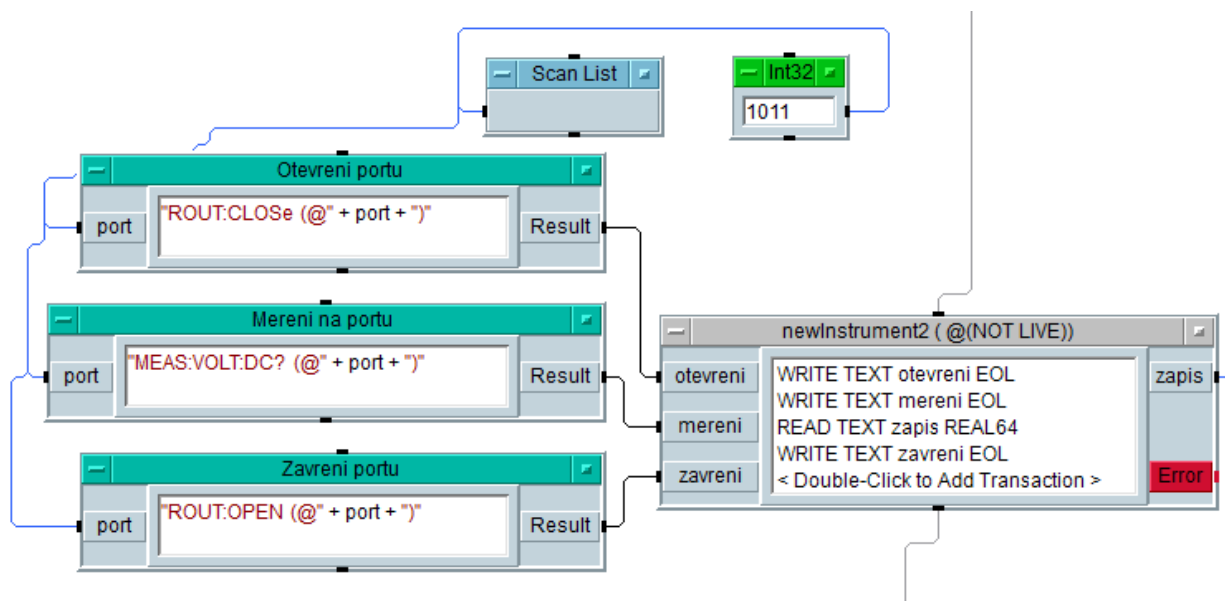
Obrázek 31 Ukládání hodnot z VTE do souboru *data.txt*

Měření hodnoty teploty je prováděno teplotním čidlem PT100 a na skutečnou teplotu je pak hodnota převedena pomocí bloku *Teplota*. Rozdíl 6°C vznikl díky odporu na přívodních vodičích a pájených spojích.



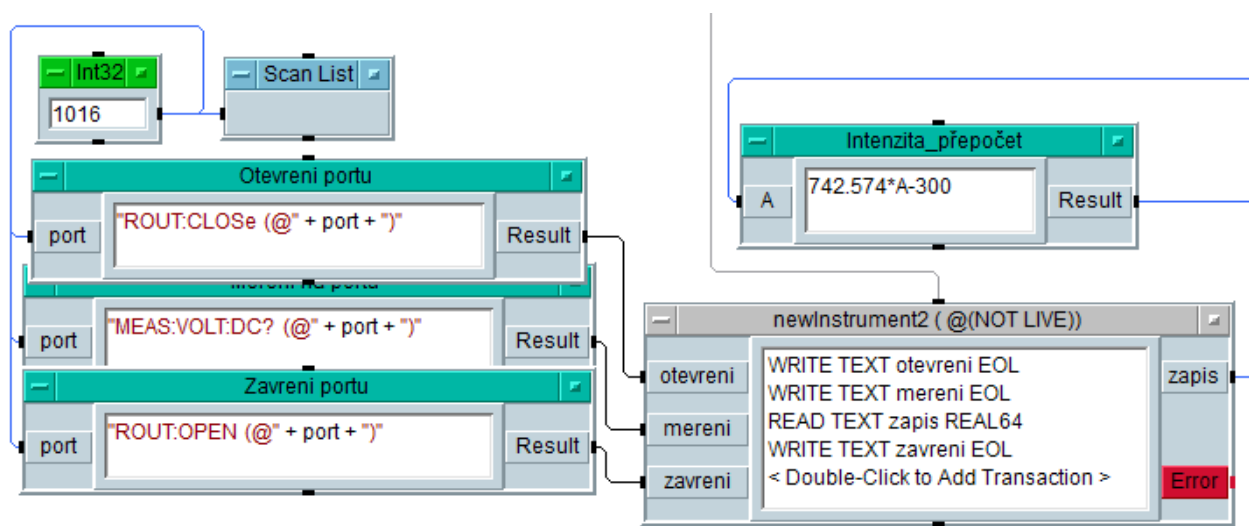
Obrázek 32 Odečet hodnot teploty

Na kontaktech měřicí ústředny newInstrument2 se provádí odečítání napětí na rezistoru o hodnotě 4,94 Ω , který je připojen k fotovoltaickému panelu.



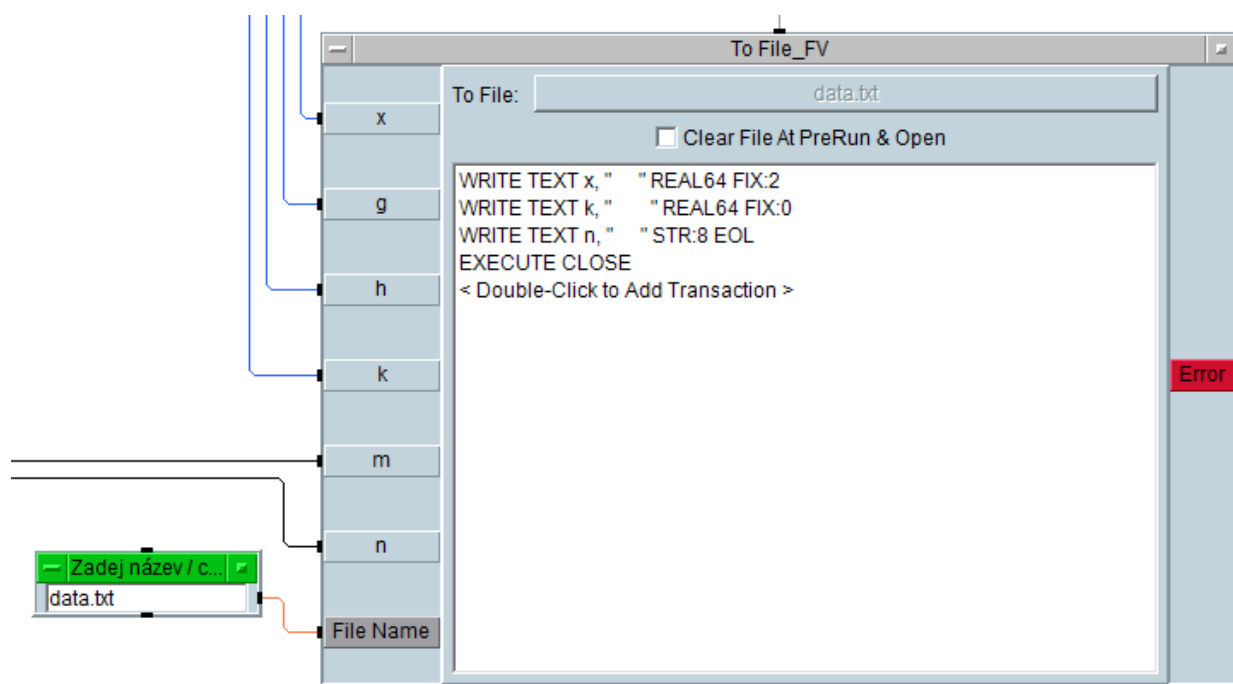
Obrázek 33 Odečet napětí na FVE

Intenzita dopadajícího záření je úměrná proudu generovaného pyranometrem, který je připojen k rezistoru o hodnotě 101 Ω . Na rezistoru je pak pomocí měřicí ústředny měřeno napětí.



Obrázek 34 Odečet intenzity dopadajícího záření

Naměřené údaje napětí na panelu, intenzity záření a směru větru jsou odeslány do bloku *To File_FV* a poté uloženy do souboru *data.txt*. Na vstup *x* bloku *To File_FV* je přivedena hodnota napětí na panelu. Ke vstupu *k* je přivedena hodnota intenzity dopadajícího záření a *kn* je přiveden údaj o směru větru. Na ostatní kontakty jsou přivedeny hodnoty proudu a účinnosti panelu, které pro účely laboratorní úlohy nejsou zapisovány do souborů *data.txt*.



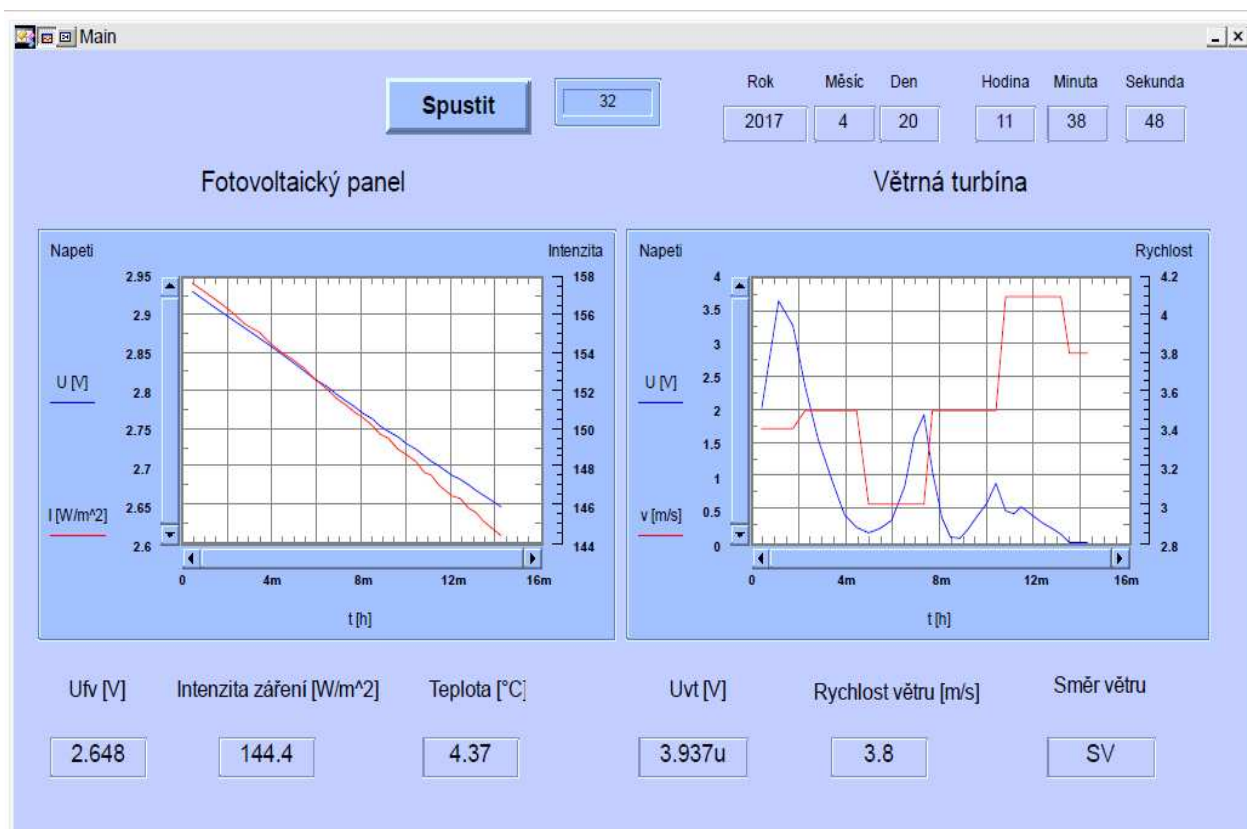
Obrázek 35 Ukládání hodnot z FVE do souboru data.txt

Změření hodnot proběhne při každém zmáčknutí tlačítka *Spustit* a naměřené údaje z obou částí programu jsou ukládány do společného souboru *data.txt*.

6.2.2 Měřicí panel

Za účelem vytvoření laboratorní úlohy bylo nutné upravit stávající měřicí program VEE do podoby vhodné k laboratorní úloze. Program ukládá naměřené a vypočítané hodnoty z panelu, větrné turbíny, pyranometru, anemometru a teplotního čidla do souborů data.txt.

V horní části ovládacího panelu je umístěno tlačítko *Spustit* pro změření hodnot. Vedle tlačítka je umístěn čítač počtu měření a vedle se nachází datum a čas měření. Následuje grafické zobrazení naměřených hodnot a to tak, že grafy pro fotovoltaický panel i větrnou turbínu jsou umístěny vedle sebe. Grafy zobrazující průběh napětí v závislosti na čase a v případě fotovoltaického panelu i průběh intenzity dopadajícího záření v čase a u větrné turbíny průběh rychlosti větru v čase. V dolní části jsou pak zobrazeny naměřené hodnoty z konce měřicího intervalu.



Obrázek 36 Panel měřicího softwaru L1

6.3 Měření energie z fotovoltaického panelu a větrné turbíny

Cíl úlohy

Cílem úlohy je seznámit se s měřením na fotovoltaickém panelu a větrné turbíně, jež jsou umístěny v reálných podmínkách na střeše T10.

Zadání

Zjistěte výkon a energii dodanou fotovoltaickým panelem a větrnou turbínou v časovém intervalu 40 minut.

6.3.1 Teoretický rozbor

Výkon

Měřicí ústředna provádí měření napětí na rezistorech, které jsou připojeny k fotovoltaickému panelu a větrné turbíně. Ze znalosti napětí a hodnoty připojeného odporu lze pak následně dopočítat hodnoty výkonů podle vztahu:

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (6.3)$$

P	[W]	výkon
U	[V]	napětí
R	[Ω]	odpor

Energie

Vytvořenou energii jak v případě fotovoltaického panelu tak i větrné turbíny je možno spočítat jako součin výkonu a času ve kterém byla energie dodávána.

$$E = P \cdot t \quad (6.4)$$

E	[J]	energie
P	[W]	výkon
t	[s]	čas

Fotovoltaický panel

Fotovoltaický panel A-130 od společnosti ATERSA je monokrystalický panel s výkonem 130 Wp. Panel s 36 články a aktivní plochou 0,8487 m² je umístěn na střeše T10 na hliníkové konstrukci se sklonem 45° a orientován -65° JJV [15].

Účinnost fotovoltaického panelu:

$$\eta = \frac{P_p}{I \cdot A_o} \quad (6.5)$$

P_p	[W]	výkon fotovoltaického panelu
I	[W·m ⁻²]	intenzita dopadajícího záření
A_o	[m ²]	ozářená plocha panelu

Tabulka 4 Katalogové hodnoty panelu ATERSA A-130 [15]

ATERSA A-130	
I _{sc} (A)	8,1
U _{oc} (V)	21,3
I _{mp} (A)	7,54
U _{mp} (V)	17,2
P _{mp} (W)	130
η (%)	13,3

Větrná turbína

Větrná turbína pracuje na principu aerodynamických sil, které působí na listy rotoru. Otáčivý pohyb rotoru se pomocí generátoru přeměňuje na elektrickou energii. Pro její výrobu se používá vícepolový synchronní generátor s permanentními magnety. Výsledný elektrický proud je proto potřeba pomocí integrovaného okruhu usměrnit na stejnosměrný. Největší účinnosti přeměny je dosaženo, jestliže je rotor orientován do směru větru, což zajišťuje směrové kormidlo.

Ze znalosti hustoty vzduchu, plochy vrtule $A_v = 0,363 \text{ m}^2$ a průměrné rychlosti větru ve sledovaném období můžeme vypočítat výkon větru:

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_v \cdot v^3 \quad (6.6)$$

P_w	[W]	výkon větru
ρ	[kg·m ⁻³]	hustota vzduchu
A_v	[m ²]	plocha vrtule
v	[m·s ⁻¹]	rychlost větru

Hustotu vzduchu je možno vypočítat z teploty, tlaku a vlhkosti vzduchu.

Vlhkost vzduchu

Vlhký vzduch se rozděluje podle obsahu vlhkosti na:

- přesycený (je to nasycený vzduch s obsahem další vody v kapalném nebo tuhém skupenství),
- nasycený (parciální tlak sytých par při téže teplotě je roven parciálnímu tlaku vodních par); $p_v'' = p_v$,
- nenasyčený (parciální tlak sytých par při téže teplotě je větší než parciální tlak vodních par); $p_v'' > p_v$.

- **Relativní vlhkost φ**

Je to míra nasycení vzduchu a $\varphi = 100 \%$ znamená nasycený vzduch; $p_v = p_v''$.

$$\varphi = \frac{\rho}{\rho_v''} \approx \frac{p}{p_v''} \quad (6.7)$$

φ	[-]	relativní vlhkost vzduchu
ρ	[kg·m ⁻³]	hustota vzduchu
ρ_v''	[kg·m ⁻³]	hustota nasyceného vzduchu
p	[Pa]	tlak vzduchu
p_v''	[Pa]	parciální tlak syté páry

- **Parciální tlak par p_v**

Parciální tlak par je tlak, který odpovídá příslušné absolutní vlhkosti.

Parciální tlak syté páry je závislý na teplotě a s chybou menší než 1‰ ho lze vypočítat pomocí vztahů [17]:

Pro teplotu -20 °C až 0 °C:

$$\ln p_v'' = 28,926 - \frac{6148}{273,15 + \vartheta} \quad (6.8)$$

Pro teplotu 0 °C až 80 °C:

$$\ln p_v'' = 23,58 - \frac{4044,2}{235,6 + \vartheta} \quad (6.9)$$

ϑ [°C] teplota

Hustota vlhkého vzduchu

Hustota vlhkého vzduchu potřebná pro výpočet výkonu větru je dána vztahem [18]:

$$\rho = \frac{1,316 \cdot 10^{-3}}{T} \cdot (2,65 \cdot p + \varphi \cdot p_v'') \quad (6.10)$$

ρ [kg·m⁻³] hustota vzduchu
 T [K] termodynamická teplota
 p [Pa] tlak vzduchu
 φ [-] relativní vlhkost vzduchu
 p_v'' [Pa] parciální tlak syté páry

Betzův limit

Množství energie větru, které lze větrnou turbínou využít na základě aerodynamických sil, je omezeno teoretickým Betzovým limitem $\frac{16}{27}$. Nelze tak sestavit větrnou turbínu s větší účinností.

Vynásobení Betzova limitu a výkonu větru definuje maximální teoretický výkon větrné turbíny:

$$P_A = \frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_v \cdot v^3 \quad (6.11)$$

P_A [W] výkon ideální větrné turbíny
 ρ [kg·m⁻³] hustota vzduchu
 A_v [m²] plocha vrtule
 v [m·s⁻¹] rychlost větru

Důležitým parametrem je účinnost turbíny vyjádřená jako poměr výkonu turbíny a výkonu ideální turbíny:

$$\eta = \frac{P_t}{P_A} \quad (6.12)$$

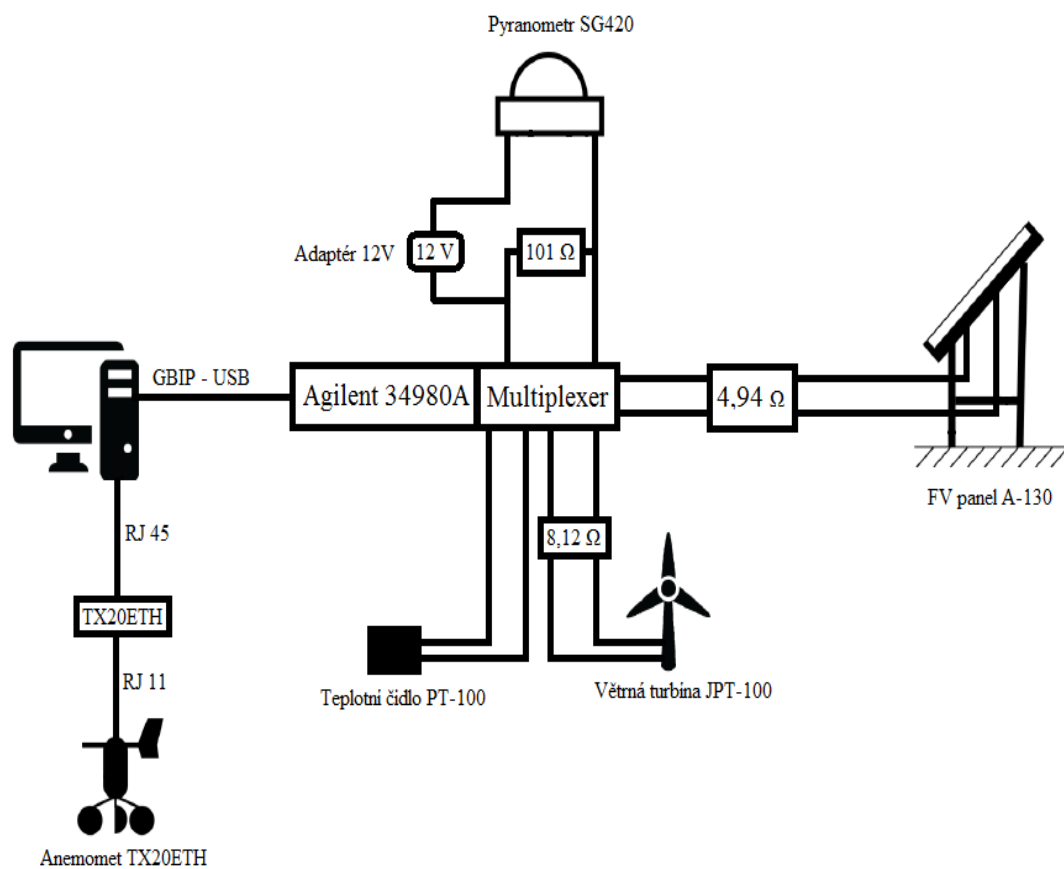
η	[-]	účinnost turbíny
P_t	[W]	průměrný výkon turbíny

Větrná turbína JPT-100 od společnosti Jetpro Technology, Inc disponuje pětistým rotorem a permanentním magnetickým generátorem, který zajišťuje vysokou účinnost výkonu. Jmenovitý výkon turbíny je 100 W a to při rychlosti větru $12 - 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Spouštěcí rychlost je $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a mezní rychlost, při které dochází k vypínání je $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Při vyšších rychlostech dochází k přepětí a aktivuje se elektromagnetická brzda.

Tabulka 5 Katalogové hodnoty větrné turbíny JPT-100 [15]

Větrná turbína JPT-100	
Počet PM generátorů (-)	1
Počet listů (-)	5
Výstupní napětí (Vdc)	12
Jmenovitý výkon (W)	100
Spouštěcí rychlost větru	3
Jmenovitá rychlost větru	12
Mezní rychlost větru	20
Průměr rotoru (m)	0,68
Rozměry (mm)	680x648x725
Váha (kg)	6
Brzda (-)	elektromagnet

6.3.2 Schéma zapojení



Obrázek 37 Schéma zapojení měřicího pracoviště

6.3.3 Pracovní postup

1. Z internetu zjistěte aktuální hodnoty teploty, vlhkosti a tlaku vzduchu.
2. Zkontrolujte správnost zapojení měřicího pracoviště.
3. Spustěte měřící soubor `mereni.vee` pro měření na fotovoltaickém panelu a větrné turbíně umístěné na střeše T10.
4. V intervalu jedné minuty provádějte měření všech dostupných parametrů na panelu a větrné turbíně. V případě nepříznivých klimatických podmínek použijte naměřené hodnoty ze souboru naměřených hodnot.
5. Po skončení měření převed'te data nacházející se v souboru „data“ do souboru excel použitím převodního souboru `prevod.vee`.
6. Z naměřených hodnot napětí vypočítejte hodnoty okamžitých výkonů fotovoltaického panelu a větrné turbíny a spolu s intenzitou záření a rychlostí větru je vynesete do dvou grafů.
7. Zjistěte průměrné výkony obou zdrojů a vypočítejte celkovou vyrobenou energii v průběhu měření.
8. Z průměrného výkonu, intenzity záření a plochy vypočítejte účinnost fotovoltaického panelu.
9. Z průměrné rychlosti větru vypočítejte výkon větru.
10. Z výkonu větru vypočítejte výkon ideální větrné turbíny.
11. Z průměrné hodnoty výkonu větrné turbíny a z výkonu ideální větrné turbíny vypočítejte účinnost větrné turbíny.
12. Zjistěte převažující směr větru v průběhu měření.

7. LABORATORNÍ ÚLOHA 2

Laboratorní úloha se zabývá metodami používanými při vyhledávání bodu maximálního výkonu panelu reálným měřením pomocí metody Pertrube & Observe.

7.1 Měřicí pracoviště

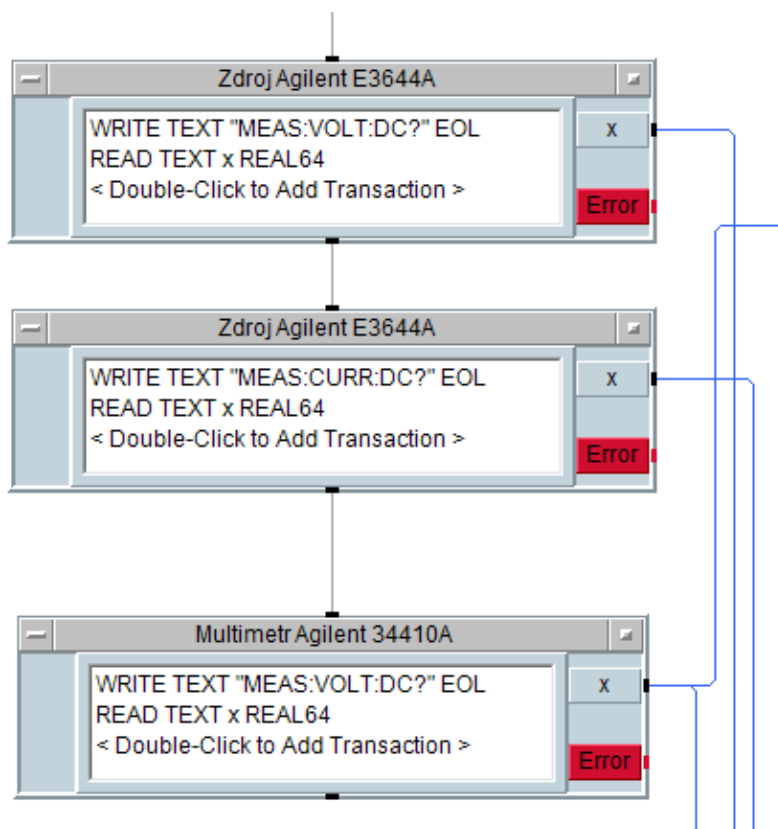
Měřicí pracoviště je složeno z dvou fotovoltaických panelů, které se v zapojení měřícího pracoviště pro účely laboratorní úlohy střídají, zdroje stejnosměrného napětí E3644A, měřiče intenzity záření, multimetru pro měření teploty, multimetru pro měření napětí a proudu, počítače a lampy pro osvit fotovoltaického panelu.

7.2 Měřicí software

Pro účely vyhledání bodu maximálního výkonu byl využit měřicí software vytvořený Bc. Milanem Svrčkem. Software ovládá zdroj stejnosměrného napětí E3644A a kontinuálně měří napětí a proud a vypočítává výkon panelu. Po dosažení oblasti MPP sníží krok napětí z 1 V na 0,1 V a přibližuje se tak k bodu maximálního výkonu, v jehož oblasti se snaží udržet. Program se řídí algoritmem Pertrube & Observe a pracuje v nekonečném cyklu až do zásahu obsluhy. Naměřená data jsou průběžně ukládána do souboru excel.

7.2.1 Funkce programu

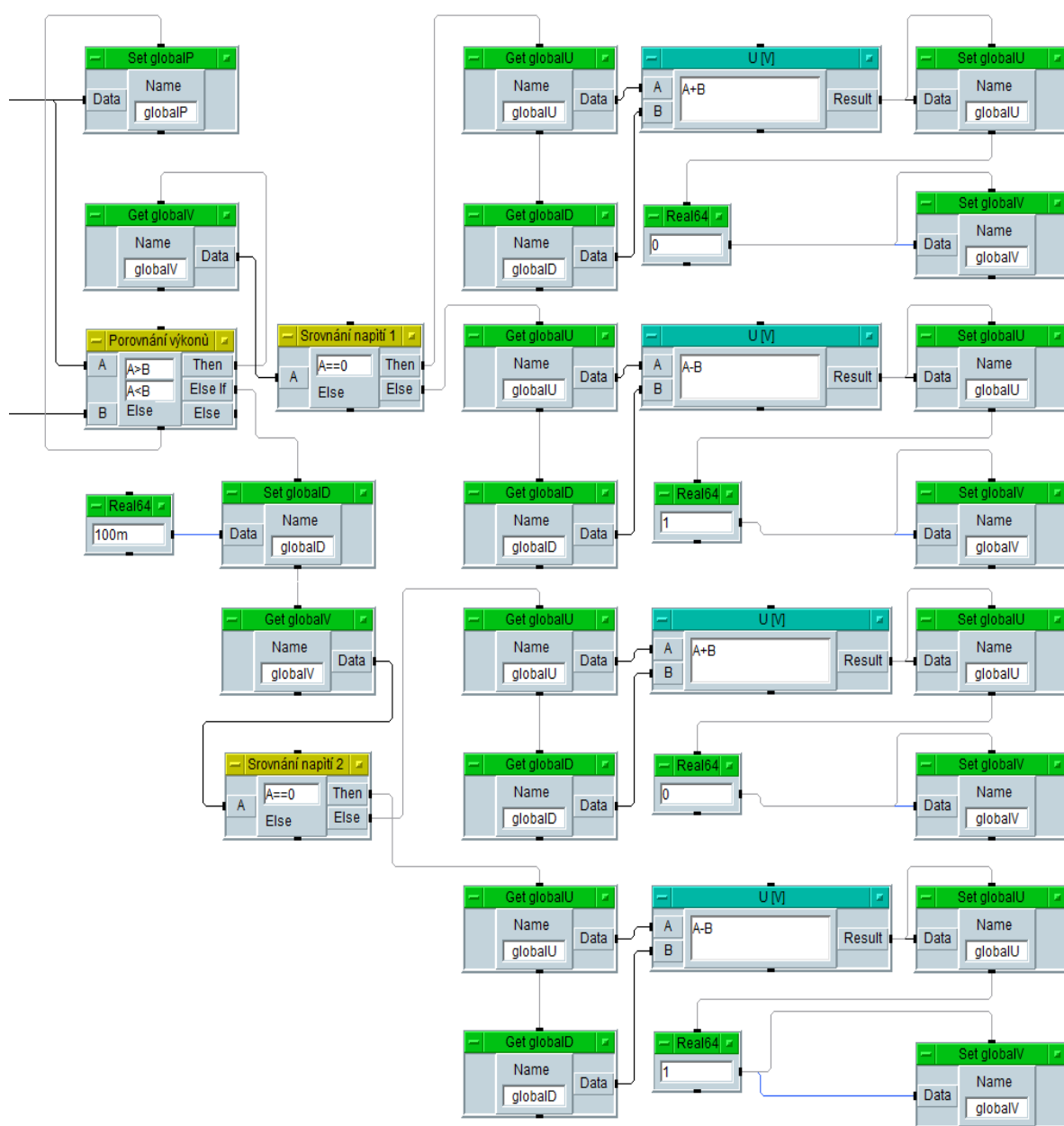
Program pro měření VA charakteristiky panelu měří napájecí napětí zdroje, proud zdroje a pak také napětí na panelu. Následně je vypočítán výkon, který je společně s VA charakteristikou v reálném čase vynášen do grafu na měřicím panelu. Program provádí měření s definovaným krokem v předem nastaveném rozsahu napětí.



Obrázek 38 Odečet napětí a proudu

U programu, který je určen pro vyhledávání bodu maximálního výkonu definuje napětí zdroje logika metody Pertrube & Observe, která je zobrazena na obrázku 39.

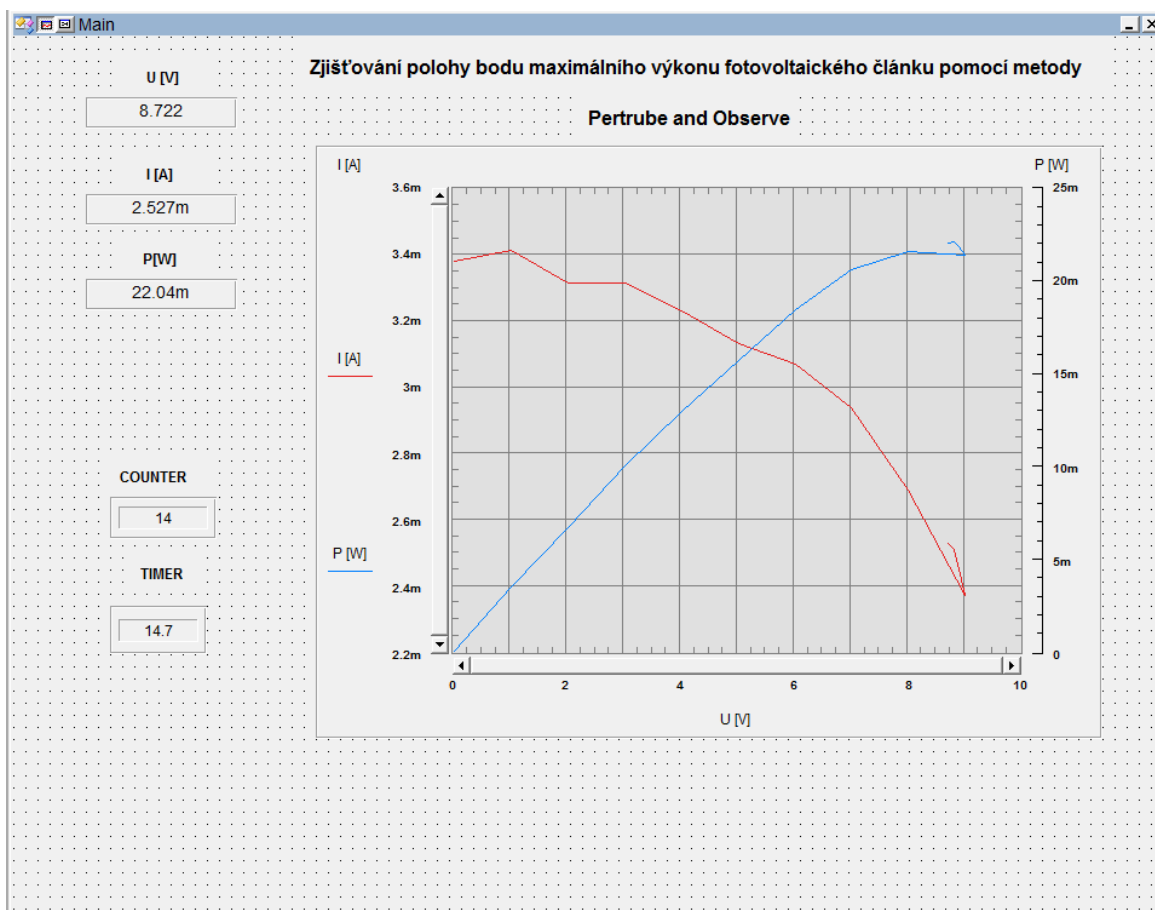
Nejdůležitějším blokem celého programu je blok *Porovnání výkonů*, který porovnává aktuální výkon s výkonem předchozím. Jestliže je aktuální výkon přiváděný na vstup A větší než výkon v předchozím kroku, který je přiveden na vstup B, pak jestliže blok *Srovnání napětí 1* vyhodnotí napětí jako rostoucí, je v bloku *U [V]* připočten krok napětí pro následující hodnotu napětí. Jestliže napětí klesá, je v dalším bloku *U [V]* krok napětí odečten. Jestliže blok *Porovnání výkonů* vyhodnotí aktuální výkon jako menší než výkon v předcházejícím kroku, pak dojde ke zkrácení kroku a v bloku *Srovnání napětí 2* pak dochází opět k posouzení napětí. Jestliže v porovnání s předcházejícím krokem roste pak v bloku *U [V]*, je připočten krok napětí a naopak.



Obrázek 39 Funkce programu

7.2.2 Měřicí panel

Na panelu měřicího programu hraje hlavní roli graf naměřených hodnot, který zobrazuje V-A charakteristiku a výkonovou křivku měřeného panelu. V levé části panelu jsou zobrazeny aktuální hodnoty napětí, proudu a výkonu panelu a pod nimi je čítač počtu cyklů měření a čas od začátku měření.



Obrázek 40 Panel měřicího softwaru L2

7.3 Hledání bodu maximálního výkonu panelu

Cíl úlohy

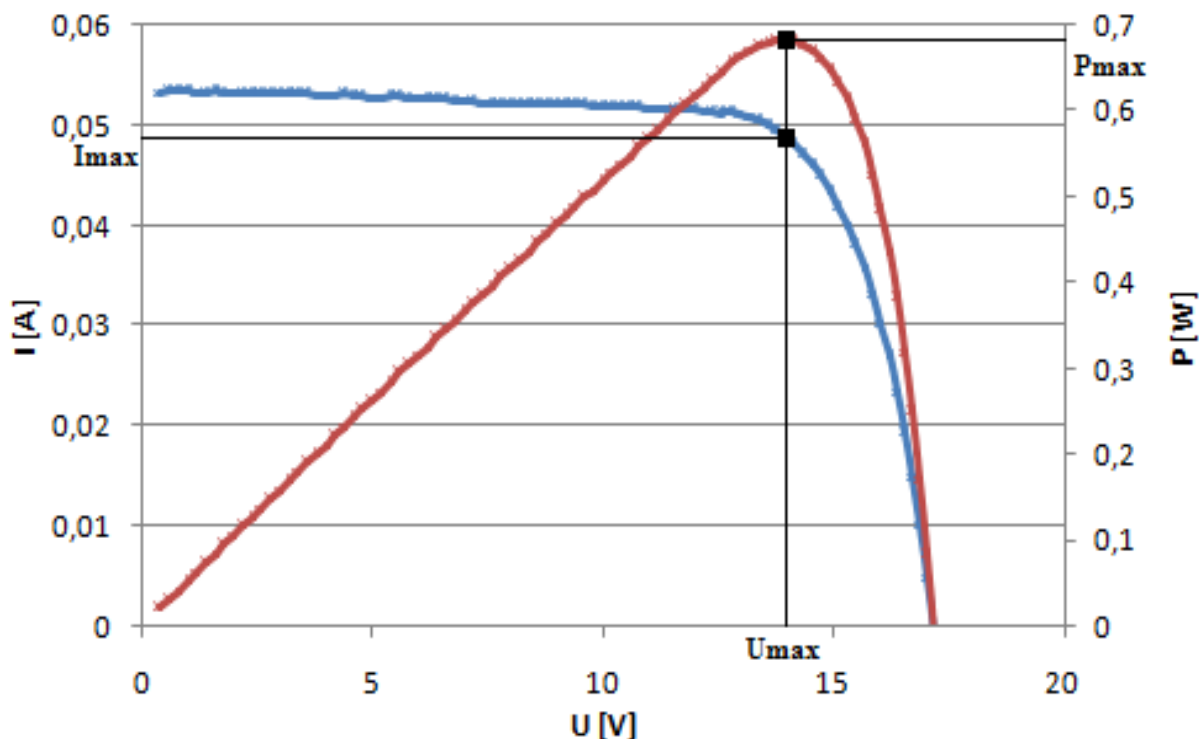
Cílem úlohy je seznámit se s metodami využívanými při hledání bodu maximálního výkonu panelu.

Zadání

Proměřte V-A charakteristiky třech panelů pro dvě zadané intenzity dopadajícího záření a vyhodnoťte vliv teploty na bod maximálního výkonu.

7.3.1 Teoretický rozbor

Maximum power point tracking (MPPT) neboli hledání bodu maximálního výkonu je důležitou součástí všech FV systémů, neboť zvyšuje celkovou efektivitu přeměny dopadajícího záření v elektrickou energii. MPPT regulátory dosahují maximálního výstupního výkonu změnami napětí.



Obrázek 41 V-A charakteristika panelu

- Přímé metody
 - o Incremental conductance

Metoda využívá faktu, že změna výkonu při změně napětí panelu je v MPP bodě nulová, vlevo od MPP kladná a vpravo od MPP záporná [21].

V bodě MPP:

$$\frac{dP}{dU} = 0 \quad (7.1)$$

Vlevo od MPP:

$$\frac{dP}{dU} > 0 \quad (7.2)$$

Vpravo od MPP:

$$\frac{dP}{dU} < 0 \quad (7.3)$$

Rozepíšeme-li výkon jako součin napětí a proudu, můžeme psát:

$$\frac{dP}{dU} = \frac{d(U \cdot I)}{dU} = I + U \cdot \frac{dI}{dU} = 0 \quad (7.4)$$

Po úpravě:

$$\frac{dI}{dU} = -\frac{I}{U} \quad (7.5)$$

Vztah 7.5 lze přepsat jako:

$$\frac{I_{n+1} - I_n}{U_{n+1} - U_n} = -\frac{I_{n+1}}{U_{n+1}} \quad (7.6)$$

JESTLIŽE

PAK

$$\frac{I_{n+1} - I_n}{U_{n+1} - U_n} > -\frac{I_{n+1}}{U_{n+1}}$$

$$U_{n+2} := U_{n+1} +_{\Delta} U$$

$$\frac{I_{n+1} - I_n}{U_{n+1} - U_n} < -\frac{I_{n+1}}{U_{n+1}}$$

$$U_{n+2} := U_{n+1} -_{\Delta} U$$

U_n	[V]	napětí v n kroku
U_{n+1}	[V]	napětí v $n + 1$ kroku
I_n	[A]	proud v n kroku
I_{n+1}	[A]	proud v $n + 1$ kroku
U_{n+2}	[A]	napětí v $n + 2$ kroku
ΔU	[V]	krok změny napětí

o Pertrube & Observe method

Při této metodě se periodicky mění napětí fotovoltaického panelu a vyhodnocuje se změna výkonu podle napětí. V případě kladné změny výkonu zůstává směr napětí stejný i v následujícím cyklu. Naopak v případě záporné změny se směr napětí mění opačným směrem [22].

Tabulka 6 Chování algoritmu Pertrube & Observe method [22]

Změna napětí	Změna výkonu	Následující změna napětí
+	+	+
+	-	-
-	+	-
-	-	+

JESTLIŽE

A ZÁROVĚŇ

PAK

$$U_{n+1} - U_n > 0$$

$$P_{n+1} - P_n > 0$$

$$U_{n+2} := U_{n+1} + \Delta U$$

$$U_{n+1} - U_n > 0$$

$$P_{n+1} - P_n < 0$$

$$U_{n+2} := U_{n+1} - \Delta U$$

$$U_{n+1} - U_n < 0$$

$$P_{n+1} - P_n > 0$$

$$U_{n+2} := U_{n+1} - \Delta U$$

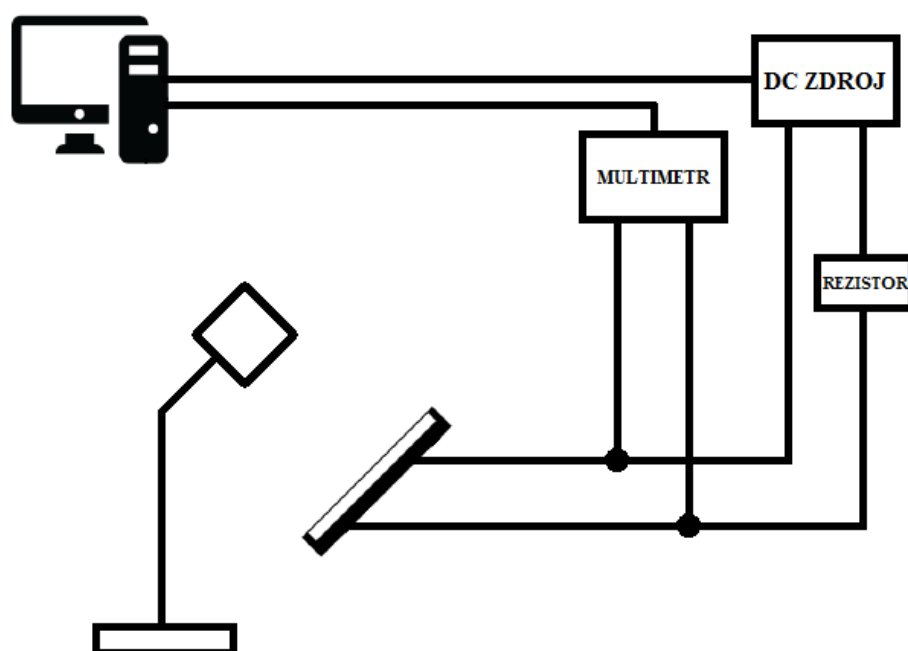
$$U_{n+1} - U_n < 0$$

$$P_{n+1} - P_n < 0$$

$$U_{n+2} := U_{n+1} + \Delta U$$

U_n	[V]	napětí v n kroku
U_{n+1}	[V]	napětí v $n + 1$ kroku
U_{n+2}	[V]	napětí v $n + 2$ kroku
P_n	[W]	výkon v n kroku
P_{n+1}	[W]	výkon v $n + 1$ kroku
P_{n+2}	[W]	výkon v $n + 2$ kroku
ΔU	[V]	krok změny napětí

7.3.2 Schéma zapojení



Obrázek 42 Schéma zapojení měřicího pracoviště

7.3.3 Pracovní postup

1. Zkontrolujte správnost zapojení měřicího pracoviště.
2. Nastavte hodnotu intenzity záření na $150 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, která dopadá na měřený fotovoltaický panel.
3. Proveďte měření V-A charakteristiky a výkonové charakteristiky panelu pomocí měřicího souboru mereni.vee a výsledné hodnoty vynesete do grafů.
4. Spusťte měřicí soubor mereni.vee pro vyhledání bodu maximálního výkonu metodou Pertrube & Observe.
5. V časovém intervalu čtyř minut provádějte vyhledávání bodu maximálního výkonu (MPP) panelu. Po dosažení oblasti bodu MPP a na konci měření proveďte měření teploty panelu.
6. Intenzitu dopadajícího záření nastavte na hodnotu $300 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ a zopakujte měřicí postup od bodu 3 až do bodu 6 pro další panel.
7. Vyhodnoťte vliv intenzity dopadajícího záření na velikost průměrného výkonu v bodě MPP a naměřené hodnoty vynesete do grafů.
8. Vyneste do grafů výkon panelů pro obě intenzity v oblasti MPP v závislosti na čase a závislost vyhodnoťte. Okomentujte vliv teploty.
9. Pro zadané intenzity dopadajícího záření nyní proveďte měření i pro další fotovoltaický panel.
10. Pomocí obou přímých metod rozhodněte o změně napětí v následujícím kroku a vypočítejte U_{n+2} .

Tabulka 7 Hodnoty napětí a proudů pro metodu Incremental conductance

$U_n [\text{V}]$	$U_{n+1} [\text{V}]$	$I_n [\text{mA}]$	$I_{n+1} [\text{mA}]$	$\Delta U [\text{V}]$
8	7,9	1,2	1,2	0,1

Tabulka 8 Hodnoty napětí a proudů pro metodu Pertrube & Observe

$U_n [\text{V}]$	$U_{n+1} [\text{V}]$	$I_n [\text{mA}]$	$I_{n+1} [\text{mA}]$	$\Delta U [\text{V}]$
8,3	8,4	1,1	1,0	0,1

8. ZÁVĚR

Diplomová práce v úvodu popisuje stav energetiky v České republice a to při pohledu do historie, rozbořem současného stavu a také se zabývá jakousi prognostikou dalšího vývoje v letech budoucích. A následně je už pozornost věnována slunečnímu záření jako významnému obnovitelnému zdroji. Je zde popsán princip vzniku slunečního záření, fotovoltaické články a použité materiály pro jejich výrobu a také výhody a nevýhody využívání sluneční energie. Následně se pozornost přesouvá k větrné energii. Je zde popsán vznik větru a jeho výkon či výkon větrné turbíny. Poslední část se věnuje praktické části, kde jsou vytvořeny dvě laboratorní úlohy, které budou využívány v laboratorním cvičení pro praktickou výuku studentů v předmětu *Obnovitelné zdroje energie*.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] PUCHNAR, J. *INSTALACE MALÉ VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY* [online]. Brno, 2015 [cit. 2016-10-26]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_veřejne.php?file_id=101854
- [2] MASTNÝ, Petr, J. DRÁPELA, S. MIŠÁK, J. MACHÁČEK, M. PTÁČEK, L. RADIL, T. BARTOŠÍK a T. PAVELKA. *Obnovitelné zdroje elektrické energie* [online]. Praha, 2011 [cit. 2016-10-17]. Dostupné z: <http://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/cvut-2-oze.pdf>
- [3] Pole průměrné rychlosti větru ve výšce 100 m nad povrchem. *ÚSTAV FYZIKY ATMOSFÉRY: AV ČR, v. v. i.* [online]. [cit. 2016-10-24]. Dostupné z: <http://www.ufa.cas.cz/struktura-ustavu/oddeleni-meteorologie/projekty-egp/vetrnaenergie/vetrna-mapa.html>
- [4] STÁTNÍ ENERGETICKÁ KONCEPCE ČESKÉ REPUBLIKY. *Ministerstvo průmyslu a obchodu* [online]. Praha, 2014, s. 145 [cit. 2016-10-26].
- [5] *Energetický mix ČR: Česká společnost pro větrnou energii* [online]. [cit. 2016-10-26]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/clanky/energeticky-mix-cr/485>
- [6] BERANOVSKÝ, J., K. MURTINGER a M. TOMEŠ. *Fotovoltaika: elektrina ze slunce*. ERA vydavatelství, 2008. ISBN 978-80-7366-133-5.
- [7] *Struktura Slunce* [online]. [cit. 2016-10-31]. Dostupné z: <http://slunce-projekt.blog.cz/galerie/ukazky-slunce/obrazek/86320202>
- [8] *Sluneční spektrum* [online]. 2007 [cit. 2016-10-31]. Dostupné z: <http://www.treking.cz/astronomie/slunce.htm>
- [9] *Svět Energie: Charakteristika* [online]. [cit. 2016-10-31]. Dostupné z: <http://www.svetenergie.cz/cz/elektrarny/slunecni-elektrarny/charakteristika>
- [10] CIHELKA, J. *Sluneční vytápěcí systémy*. Praha, 1984. 206 s.
- [11] HORVÁTH, J. *SOLÁRNÍ ZÁŘENÍ V LOKALITĚ VUT FSI V BRNĚ* [online]. Brno, 2010 [cit. 2016-11-02]. VUT. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_veřejne.php?file_id=26509.
- [12] VANĚK, J. a P. KŘIVÍK. *Obnovitelné zdroje energie*. Brno, 2014, 116 s.
- [13] MASTNÝ, P., J. MORÁVEK a J. PITRON. *Malé zdroje elektrické energie*, 2015, 172s ČADA, R. *Solartecnika: Jakou fotovoltaickou elektrárnu zvolit na dům?* [online]. [cit. 2016-11-14]. Dostupné z: <http://www.solartecnika.sk/solartecnika-12011/jakou-fotovoltaickou-elektrarnu-zvolit-na-dum.html>
- [14] BRANDOS, O. *Treking: Beaufortova stupnice* [online]. [cit. 2016-11-17]. Dostupné z: <http://www.treking.cz/archiv/beaufortova-stupnice-sily-vetru.htm>
- [15] DOČEKAL, D. *Měřicí pracoviště pro systém vzdálené dodávky energie* [online]. Brno, 2016 [cit. 2016-11-21]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_veřejne.php?file_id=128042.

- [16] PUCHNAR, J. *INSTALACE MALÉ VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY* [online]. Brno, 2015 [cit. 2016-11-30]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=101854
- [17] Teorie vlhkého vzduchu (I): Úvod a vyjádření vlhkosti vzduchu. *Tzb-info* [online]. 2006 [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: <http://vetrani.tzb-info.cz/teorie-a-vypocty-vetrani-klimatizace/3323-teorie-vlhkeho-vzduchu-i>
- [18] Teorie vlhkého vzduchu (II): Hustota vlhkého vzduchu a entalpie. *Tzb-info* [online]. 2006 [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: <http://vetrani.tzb-info.cz/teorie-a-vypocty-vetrani-klimatizace/3353-teorie-vlhkeho-vzduchu-ii>
- [19] *Větrná turbína JPT-100: Uživatelský manuál*. 27s.
- [20] *TX20ETH: Měření rychlosti a směru větru. Inteligentní anemometr s Ethernetem*. 2016
- [21] KRŠKA, V. *DIGITÁLNĚ ŘÍZENÝ SPÍNANÝ NAPÁJECÍ ZDROJ* [online]. Brno, 2011 [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=37923
- [22] ESRAM, T. a P. L. CHAPMAN. Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques [online]. 2007 [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4207429>