

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY a KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

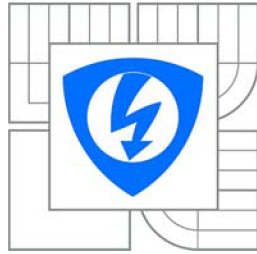
PROVOZNÍ PARAMETRY FV PANELŮ PRACUJÍCÍCH  
V HYBRIDNÍCH ENERGETICKÝCH SYSTÉMECH - POROVNÁNÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. MILAN JÍLEK

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
Elektroenergetika

Student: Bc. Milan Jílek  
Ročník: 2

ID: 125236  
Akademický rok: 2014/2015

## NÁZEV TÉMATU:

**Provozní parametry FV panelů pracujících v hybridních energetických systémech – porovnání**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Definice a popis hybridního energetického systému.
2. Sestavení měřícího aparátu pro komplexní identifikaci provozních veličin.
3. Analýza provozních údajů jednotlivých částí hybridního systému.
4. Stanovení podmínek pro návrhy hybridních energetických systémů na základě dosažených výsledků.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 9.2.2015

Termín odevzdání: 22.5.2015

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

Konzultanti diplomové práce:

**doc. Ing. Petr Toman, 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:

JÍLEK, M. *Provozní parametry FV panelů pracujících v hybridních energetických systémech – porovnání*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 61 s. Vedoucí semestrální práce doc. Ing. Petr Mastný, Ph.D..

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 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**



**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií**

**Ústav elektroenergetiky**



**Diplomová práce**

# **Provozní parametry FV panelů pracujících v hybridních energetických systémech - porovnání**

**Bc Milan Jílek**

**vedoucí: doc. Ing. Petr Mastný, Ph.D.**

**Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2015**

**Brno**





**BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**

**Faculty of Electrical Engineering and Communication**  
**Department of Electrical Power Engineering**

Master's Thesis

# **Operating parameters of the FV panels in hybrid power systems**

by

**Bc. Milan Jílek**

**Supervisor: doc. Ing. Petr Mastný, Ph.D.**

**Brno University of Technology, 2015**

**Brno**

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce pojednává o principu fotoelektrického jevu, složení fotovoltaického článku a různých typech solárních panelů. Je zde popsán princip přeměny větrné energie na elektrickou. Práce popisuje důvody využití hybridního systému. V další části je popsán měřicí systém, který se využívá k reálnému měření provozních stavů. V poslední části je rozbor naměřených hodnot a dále jsou uvedeny faktory ovlivňující návrh hybridního energetického systému.

## **KLÍČOVÁ SLOVA:**

Fotovoltaický článek, fotovoltaický panel, fotovoltaika, fotovoltaický jev, monokrystalické panely, polykrystalické panely, amorfní panely, větrný motor, hybridní systém, měřicí systém.

## **ABSTRACT**

The master's thesis deals with the principle of the photoelectric effect, the composition of the photovoltaic cell and different types of solar panels. Here is described the principle of converting wind energy into electricity. This master's thesis describes reasons for using of the hybrid system. The next section describes the measurement system which is used to measure real operating statuses. The last section is an analysis of measured values and there are listed factors influencing the design of hybrid power system.

## **KEY WORDS:**

Photovoltaic cell, photovoltaic panel, photovoltaics, the fotovoitaic effect, monocrystalline panel, polycrystalline panel, amorphous panel, wind motor, hybrid system, measuring system.

**OBSAH**

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>10</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>12</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>13</b>
<b>1 ÚVOD.....</b>	<b>15</b>
<b>2 SLUNEČNÍ ENERGIE.....</b>	<b>16</b>
<b>2.1 FOTOVOLTAICKÝ ČLÁNEK .....</b>	<b>17</b>
<b>2.2 FOTOVOLTAICKÝ PANEL .....</b>	<b>19</b>
2.2.1 SLOŽENÍ FOTOVOLTAICKÉHO PANELU .....	19
2.2.2 TYPY PANELŮ.....	20
<b>2.3 ZAPOJENÍ FOTOVOLTAICKÝCH SYSTÉMŮ .....</b>	<b>20</b>
<b>3 VĚTRNÁ ENERGIE.....</b>	<b>23</b>
<b>3.1 ENERGIE VĚTRU .....</b>	<b>24</b>
<b>3.2 VĚTRNÉ MOTORY .....</b>	<b>26</b>
3.2.1 ODPOROVÉ MOTORY .....	26
3.2.2 VZTLAKOVÉ MOTORY .....	27
<b>3.3 GENERÁTORY ELEKTRICKÉ ENERGIE .....</b>	<b>30</b>
<b>4 HYBRIDNÍ ENERGETICKÝ SYSTÉM .....</b>	<b>31</b>
<b>4.1 DEFINICE HYBRIDNÍHO ENERGETICKÉHO SYSTÉMU .....</b>	<b>31</b>
<b>4.2 MĚŘENÝ HYBRIDNÍ ENERGETICKÝ SYSTÉM.....</b>	<b>33</b>
4.2.1 VĚTRNÁ ČÁST .....	33
4.2.2 FOTOVOLTAICKÁ ČÁST .....	36
4.2.3 SPOLEČNÁ ČÁST.....	36
<b>5 SLEDOVANÉ PROVOZNÍ ÚDAJE HYBRIDNÍHO ENERGETICKÉHO SYSTÉMU.....</b>	<b>37</b>
<b>5.1 MĚŘENÍ VÝKONU, PROUDU A ELEKTRICKÉ ENERGIE.....</b>	<b>37</b>
<b>5.2 MĚŘENÍ TEPLoty .....</b>	<b>38</b>
<b>5.3 MĚŘENÍ SLUNEČNÍHO ZÁŘENÍ .....</b>	<b>39</b>
<b>6 REALIZACE MĚŘÍČÍHO SYSTÉMU .....</b>	<b>40</b>
<b>6.1 COMPACTRIO .....</b>	<b>40</b>
<b>6.2 LABVIEW.....</b>	<b>42</b>
6.2.1 ČTENÍ Z FPFA KARET .....	43
6.2.2 ZPRACOVÁNÍ A ZOBRAZENÍ ČTENÝCH DAT .....	44
6.2.3 UKLÁDÁNÍ DAT .....	46
<b>7 ANALÝZA PROVOZNÍCH ÚDAJŮ .....</b>	<b>49</b>

---

7.1 ZÁKLADNÍ PROVOZNÍ CHARAKTERISTIKY .....	49
7.2 PROVOZNÍ CHARAKTERISTIKY BĚHEM NOCI .....	51
7.3 VYROBENÁ ELEKTRICKÁ ENERGIE .....	53
<b>8 STANOVENÍ PODMÍNEK PRO NÁVRH HYBRIDNÍHO ENERGETICKÉHO SYSTÉMU .....</b>	<b>55</b>
8.1 ENERGETICKÉ MODELY.....	55
8.1.1 ENERGIE VĚTRU V ČR.....	55
8.1.2 SLUNEČNÍ ENERGIE V ČR .....	56
8.2 NAMĚŘENÁ DATA.....	57
8.3 EKONOMICKÁ NÁVRATNOST .....	57
<b>9 ZÁVĚR.....</b>	<b>58</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>59</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2-1 Princip funkce fotovoltaického článku .....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 2-2 Struktura fotovoltaického článku.....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 2-3 Struktura fotovoltaického článku novějšího typu .....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 2-4 Složení fotovoltaického panelu .....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 2-5 Autonomní fotovoltaický systém .....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 2-6 Fotovoltaický systém, připojený k elektrické síti .....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 3-1 Všeobecný pohyb atmosféry na Zemi [18] .....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 3-2 Závislost výkonu větru na jeho rychlosti .....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 3-3 Savoniův motor .....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 3-4 Grafické znázornění rovnice kontinuity.....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 3-5 Vztlakový motor dvoulistý (vlevo), vztlakový motor třílistý (vpravo).....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 3-6 Darrieův rotor .....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 3-7 Zapojení malé větrné elektrárny.....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 4-1 Průměrná denní výroba elektrické energie ze slunečního záření a větru.....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 4-2 Vzájemná spolupráce fotovoltaiky a větru.....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 4-3 Blokové schéma hybridního energetického systému [32].....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 4-4 Blokové schéma měřeného hybridního energetického systému.....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 4-5 Kombinace Darrieova a Savoniova rotoru [27] .....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 4-6 Výkonová charakteristika větrné elektrárny [34].....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 5-2 Výpočet pomocí dělení na úseky.....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 5-3 Změna provozní charakteristiky FV panelů při různých teplotách panelu .....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 5-4 Změna provozní charakteristiky FV panelů při různých hodnotách osvětlení .....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 6-1 Řídicí systém NI cRIO – 9022 [39] .....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 6-2 Měřicí systém.....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 6-3 Zapojení měřicího systému .....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 6-4 Označení vstupů měřících karet [39] .....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 6-5 Blokový diagram FPGA.vi.....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 6-6 Zobrazení hodnot čtených v části programu FPGA.vi .....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 6-7 Blokový diagram části programu RIO.vi.....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 6-8 Zobrazení proudů a napětí v části programu RIO.vi.....</i>	<i>45</i>

---

<i>Obr. 6-9 Zobrazení výkonů v části programu RIO.vi.....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 6-10 Zobrazení dalších informací v části programu RIO.vi.....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 6-11 Blokový diagram programu ukladani_dat_do_PC.vi.....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 6-12 Ovládací panel programu ukladani_dat_do_PC.vi.....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 6-13 Ovládací panel programu ukladani_dat_na_USB.vi .....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 6-14 Blokový diagram programu ukladani_dat_na_USB.vi .....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 7-1 Časový průběh napětí .....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 7-2 Časový průběh okamžitého proudu .....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 7-3 Časový průběh okamžitého výkonu.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 7-4 Časový průběh napětí s vyznačenými nocemi.....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 7-5 Detail průběhu napětí během noci, bezvětrí.....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 7-6 Detail průběhu napětí během noci, větrno .....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 7-7 Časový průběh vyrobené elektrické energie, fotovoltaická část.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 7-8 Časový průběh vyrobené elektrické energie, větrná část .....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 7-9 Celkové množství vyrobené elektrické energie pomocí jednotlivých zdrojů.....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 8-1 Větrná mapa ČR [41] .....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 8-2 Solární mapa ČR [42] .....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 8-3 Náhled interaktivní mapy [43] .....</i>	<i>56</i>

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 2-1 Typické hodnoty součinitele znečištění.....</i>	<i>16</i>
<i>Tab. 3-1 Beaufortova stupnice rychlosti větru.....</i>	<i>24</i>
<i>Tab. 3-2 Drsnost povrchů v závislosti na typu povrchů.....</i>	<i>25</i>
<i>Tab. 4-1 Popis jednotlivých částí kombinovaného rotoru z Obr. 4-5 [27].....</i>	<i>34</i>
<i>Tab. 4-2 Technické parametry rotoru větrné elektrárny[34].....</i>	<i>34</i>
<i>Tab. 4-3 Parametry regulátoru nabíjení WG0400 [34].....</i>	<i>35</i>
<i>Tab. 4-4 Parametry solárního panelu STP 200-18/Ud.....</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 4-5 Parametry střídače Omniksol-M248.....</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 6-1 Zapojení měřicího systému.....</i>	<i>42</i>



**SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK**

CO <sub>2</sub>	- Oxid uhličitý
FV	- Fotovoltaický
E <sub>G</sub>	- Šířka zakázaného pásma křemíku
$\lambda$	- Vlnová délka záření
h	- Planckova konstanta ( $6,62606896 \cdot 10^{-34}$ J·s)
c	- Rychlost světla ( $299\,792\,458$ m·s <sup>-1</sup> )
Wp	- Watt-peak – jednotka výkonnosti fotovoltaického panelu
AM1.5	- Spektrum slunečního záření o energetické hodnotě 1 kW/m <sup>2</sup>
P	- Výkon
U	- Napětí
I	- Proud
R	- Odpor
$\Delta t$	- Časový interval
R <sub>p</sub>	- Průměrná hodnota osvitu (radiace)
E	- Energie
v	- Rychlost
h	- Výška
P <sub>v</sub>	- Výkon větru
s	- Dráha
t	- Čas
$\rho$	- Hustota
F	- Síla
AIN	- Analogový vstup
TČ	- Teplotní čidlo
MPP	- Maximum power point – Bod maximálního výkonu
MPPT	- Sledování bodu maximálního výkonu
UEEN	- Ústav elektroenergetiky
FEKT	- Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	- Vysoké učení technické
ČR	- Česká republika

---

ERU	- Energetický regulační úřad
MS	- Měřicí systém
PC	- Počítač
OS	- Operační systém
FPGA	- programovatelné hradlové pole
cRIO	- CompactRIO
NI	- National Instruments
VI	- Virtuální instrument
C	- Cena
INV	- Investiční náklady
V	- Výnos
T	- Doba

# 1 ÚVOD

V dnešní době jsou k výrobě elektrické energie využívány z větší části neobnovitelné zdroje (uhlí, ropa, zemní plyn), které se poměrně rychle vyčerpávají a také zatěžují životní prostředí. Hlavním, ne však jediným, problémem je rostoucí množství  $\text{CO}_2$ , jehož obsah v atmosféře se zvyšuje o desetiny procenta ročně. Také spotřeba elektrické energie poměrně rychle roste. Proto se začínají hojně využívat obnovitelné zdroje, do kterých patří využití biomasy (tepelné elektrárny spalující biomasu), vody (vodní elektrárny), větru (větrné elektrárny) a v neposlední řadě energie ze slunce (fotovoltaické elektrárny).

Práce popisuje sluneční energii dopadající na povrch Země a popisuje princip přeměny dopadajícího slunečního záření na elektrickou energii. Dále je zde popsána struktura a složení fotovoltaických panelů a jejich dělení. Také jsou zde uvedeny jednotlivé způsoby připojení fotovoltaických systémů do elektrické sítě. Dále je zde popsán vznik větru a výkon, který je schopen vítr produkovat. Jsou zde uvedeny možnosti přeměny energie větru na točivý moment hřídele a následnou výrobu elektrické energie.

Následující část se zabývá hybridními energetickými systémy. Jsou zde uvedeny důvody využívání spolupráce větrných a solárních zdrojů energie. Je zde také popsáno možné schéma zapojení jednotlivých zdrojů do jednoho celku. Také je popsána konkrétní hybridní elektrárna, na které bylo provedeno praktické měření.

Dále jsou zde uvedeny důvody a způsoby měření jednotlivých parametrů sloužící k sestavení provozních parametrů fotovoltaických panelů, pracujících v hybridních energetických systémech. Načež navazuje hlavní část diplomové práce pojednávající o realizaci měřícího systému, popisu jeho jednotlivých částí.

Následně je proveden stručný rozbor naměřených provozních údajů hybridního energetického systému. V závěru je uvedeno několik faktorů ovlivňující návrh systému.

## 2 SLUNEČNÍ ENERGIE

Elektrárny, využívající sluneční záření patří k nejčistším zdrojům energie a v posledních letech zaznamenaly velký rozmach. To bylo zapříčiněno především dotacemi z Evropské unie, dále také poměrně vysokými výkupními cenami energie.

Zdrojem slunečního záření v celém rozsahu spektra je naše nejbližší hvězda - Slunce. Výkon, který tato hvězda produkuje je přibližně  $4 \cdot 10^{26}$  W. Na Zemi však dopadá pouze malá část z tohoto výkonu (asi  $45/10^9$ ) [16].

Dopadající sluneční záření, které projde atmosférou je složeno ze tří složek. Velká část energie připadá na přímé sluneční záření, které je směřováno přímo ze Slunce. Dále rozeznáváme záření difúzní cirkumsolární, které, vlivem odrazu o molekuly plynů v atmosféře, dopadá na zemský povrch v mnohem větším úhlu, než je tomu u záření přímého. Nejméně energie je zastoupeno difúzním izotropním zářením, které je natolik rozptýlené, že jeho intenzita je ve všech směrech stejná.

Teoretická hodnota dopadajícího množství energie na jednotkovou plochu je rovna  $I_0 = 1367 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  a je nazývána sluneční konstanta. Intenzita přímého slunečního záření  $I_p$  dopadající kolmo na plochu (vyjádřeno rovnicí (2.1)) závisí na takzvaném součiniteli znečištění  $Z$ . Hodnoty součinitele znečištění jsou uvedeny v *Tab. 2-1*.

$$I_p = I_0 \cdot A^{-Z} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (2.1)$$

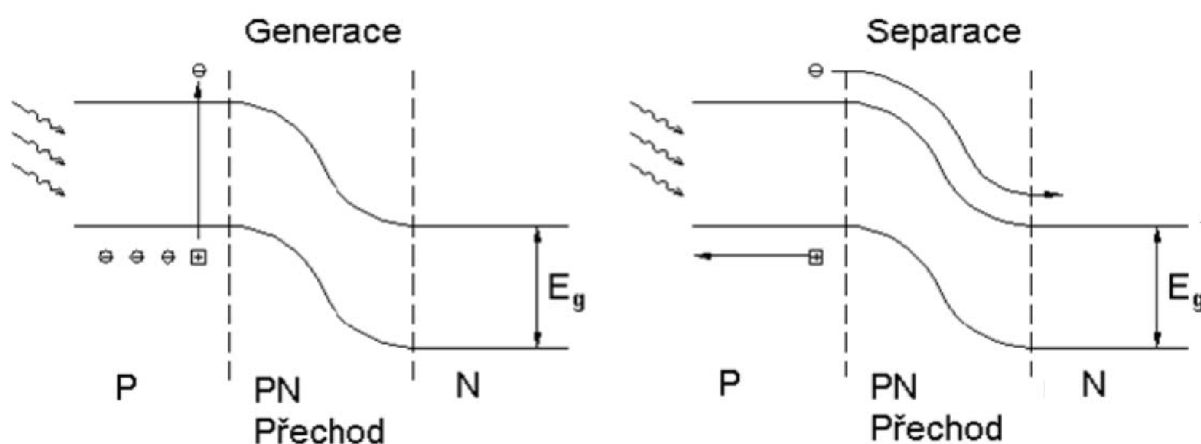
Kde  $I_p$  je intenzita přímého slunečního záření,  $I_0$  je sluneční konstanta,  $A$  je plocha a  $Z$  je součinitel znečištění.

*Tab. 2-1 Typické hodnoty součinitele znečištění*

Typ oblasti	Součinitel znečištění $Z$
místa na 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	5 - 8

## 2.1 Fotovoltaický článek

Fotovoltaický článek přímo přeměňuje dopadající sluneční energii na energii elektrickou. Je to v podstatě velkoplošná fotodioda [8], která pracuje v generátorickém režimu a využívá fotoelektrický jev [1]. To znamená že PN přechod je orientován kolmo ke směru slunečního záření. Pokud má dopadající solární záření vyšší energii než je šířka zakázaného pásma, tak vzniká mezi opačnými póly článku napětí. Vznik napětí je způsobený dopadajícím zářením na polovodič typu N, který pohlcením fotonů uvolní volný elektron. Zároveň se v polovodiči typu P generuje volná díra a tak vzniká pár elektron-díra. Tyto páry se od sebe oddělují elektrickým polem, vznikajícím mezi vázanými prostorovými náboji. Tento princip přeměny přímého slunečního záření na elektrickou energii je zobrazen na *Obr. 2-1* [16].



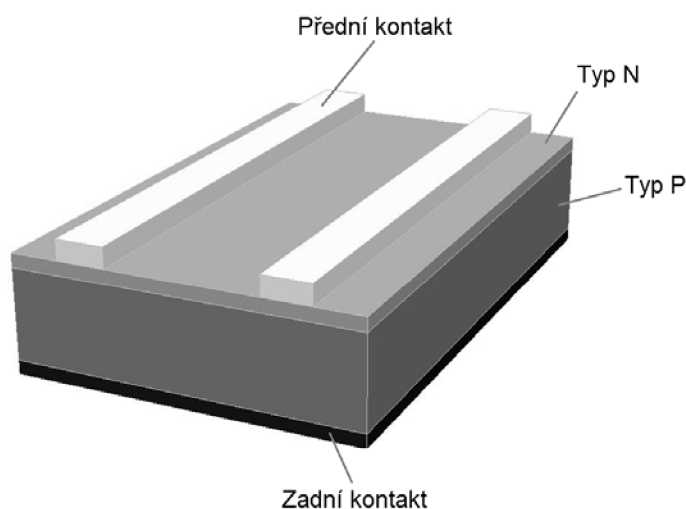
*Obr. 2-1 Princip funkce fotovoltaického článku*

Šířka zakázaného pásma u fotovoltaických článků, pracujících na bázi křemíku odpovídá hodnotě  $E_G \approx 1,1 \text{ eV}$  [2]. Ze vztahu (2.2) vyplývá, že fotovoltaický panel je citlivý na záření s vlnovou délkou nižší než  $\lambda \leq 1100 \text{ nm}$ . Tuto podmínku splňuje ultrafialové záření, viditelné záření a také část záření infračerveného.

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \text{ (J)} \quad (2.2)$$

Kde  $h$  je Planckova konstanta,  $c$  je rychlost světla a  $\lambda$  je vlnová délka záření.

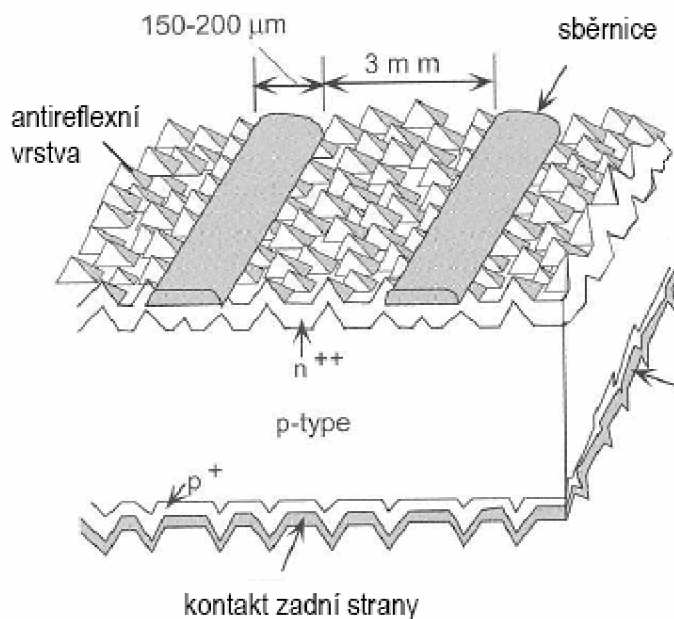
Fotovoltaický článek je složen z několika základních částí [3]. Na obrázku *Obr. 2-2* můžeme vidět základní uspořádání jednotlivých vrstev solárního článku.



Obr. 2-2 Struktura fotovoltaického článku

Takto byly konstruovány články na počátku jejich vzniku – na počátku padesátých let. Zde byly na povrchu umístěny kontakty odvádějící uvolněné elektrony. Ty se na povrch polovodiče nanášely pomocí využití práškové metody, nebo tam byly napařeny. Plocha těchto kontaktů byla co nejnižší z důvodu minimalizování zastínění aktivní vrstvy. Na vrchní vrstvě PN přechodu bývala nanášena antireflexní vrstva, která snižovala odrazivost povrchu a tím zvyšovala účinnost článku. Na zadní straně PN přechodu byl ještě umístěn velkoplošný kontakt.

V druhé polovině osmdesátých let, byla antireflexní vrstva zdokonalena. Do textury jejího povrchu byla vyleptávána struktura miniaturních jehlanů, čímž se zvýšila pohltivost Obr. 2-3. Také při dopadu fotonu, který není v prvním průchodu skrz PN přechod pohlcen, je možnost že se odrazí od zadního velkoplošného kontaktu. Tyto fotony nemůžou vystoupit přes antireflexní vrstvu a tak jsou odrazem vráceny zpět do PN přechodu. Tím se zvyšuje pravděpodobnost pohlcení fotonů a také celá účinnost.

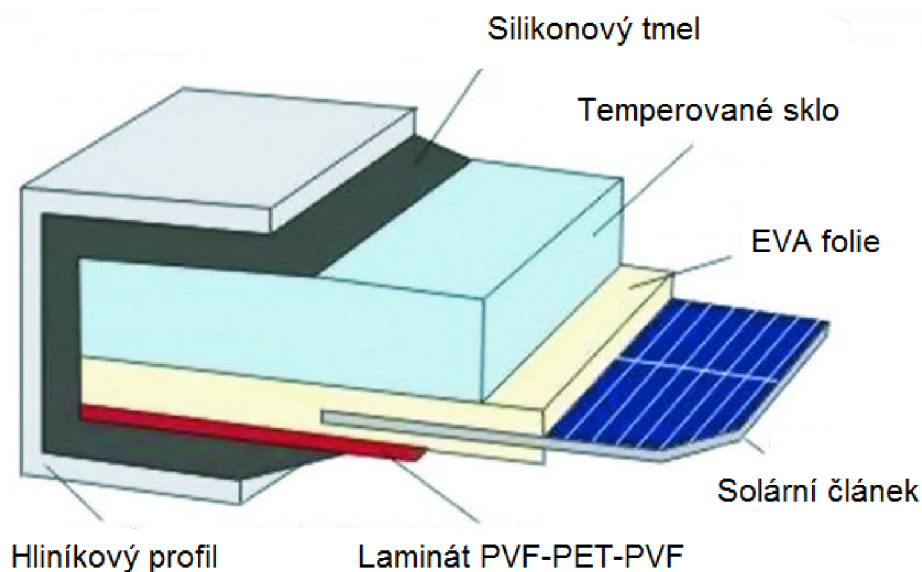


Obr. 2-3 Struktura fotovoltaického článku novějšího typu

Dalším zdokonalením byla změna technologie nanášení kontaktů. Začalo se využívat sítotiskové metody. Ta je značně levnější a také umožňuje vytvářet elektrody o nižší šířce. V dnešní době mají kontakty šířku v rozmezí mezi 150 a 200  $\mu\text{m}$ , které jsou od sebe vzdáleny 3 mm.

## 2.2 Fotovoltaický panel

### 2.2.1 Složení fotovoltaického panelu



Obr. 2-4 Složení fotovoltaického panelu

Vlastnosti fotovoltaických panelů, jako například účinnost a životnost, přímo závisí na kvalitě materiálu a dílenském zpracování při výrobě. Na obrázku *Obr. 2-4* vidíme, že solární článek je pouze jedna z mnoha částí fotovoltaického panelu [4].

Na vrchní části panelu je použito tvrzené sklo. Jeho hlavním účelem je ochrana solárního článku před meteorologickými vlivy. Musí například odolat i silnému krupobití. Ale musí však být dostatečně průzračné, aby neodráželo dopadající sluneční záření a tím nesnižovalo výkonnost celého fotovoltaického systému.

Pod tímto sklem se nachází EVA folie, na kterou se umísťují sérioparalelně spojené solární články. Ty jsou znovu překryty další vrstvou folie. Je odsát přebytečný vzduch mezi foliemi a solárním článkem. Poté je celý panel zahřát nad teplotu tání EVA folie a tím se solární článek zataví mezi tvrzené sklo a zadní ochrannou laminátovou desku.

Celý tento panel je poté vkládán do hliníkového rámu, na který se umísťují krabičky s vyvedenými výstupními kontakty. Do rámu je nanesen silikonový tmel, který chrání článek před pronikáním vlhkosti a jiných nečistot. Zároveň je pružný a tak chrání panel před mechanickým poškozením, které může nastat při instalaci panelu.

Takto sestavený panel je chráněn před všemi běžnými vlivy prostředí. Proto se životnost kvalitních krystalických fotovoltaických panelů pohybuje v rozmezí mezi 20 až 30 roky.

### 2.2.2 Typy panelů

V dnešní době se vyskytují na našem trhu tři základní typy fotovoltaických panelů [5]. Nejrozšířenější jsou panely založené na bázi krystalického křemíku (monokrystalické a polykrystalické). Dále se využívají panely tenkovrstvé amorfni.

Nejstarší objevený solární panel je monokrystalický. Poprvé se začal sériově vyrábět v sedmdesátých letech, ale i v dnešní době je stále nejrozšířenější. Jak již jeho název napovídá, je založen na bázi monokrystalického křemíku. Ten je vyráběn v podobě ingotů, které jsou nařezány na tenké destičky (300  $\mu\text{m}$ , dnes až 100  $\mu\text{m}$ ). Zdokonalením řezací technologie se docílilo významné úspory materiálu, z čehož vyplynulo snížení ceny.

Monokrystalické panely mají poměrně vysokou účinnost – až 20 % u sériové výroby. Další dobrou vlastností tohoto typu panelů je nízká plocha potřebná k vyrobení výkonu 1 kWp, která se pohybuje v rozmezí mezi 7  $\text{m}^2$  až 9  $\text{m}^2$ . Životnost těchto panelů je 30 let. Výrobce garantuje po deseti letech 90% jmenovitého výkonu a 80% po 25 letech používání [9]. Hlavní nevýhodou je složitý výrobní proces, z čehož plyne vysoká pořizovací cena.

Polykrystalický panel je druhý nejrozšířenější typ fotovoltaického panelu používaný na našem území. Jeho základ je polykrystalický křemík, který je stejně jako u předchozího typu, zpracováván v podobě ingotů, které jsou dále řezány na tenké destičky. Výhodou tohoto panelu je jednodušší a levnější výroba polykrystalického křemíku. S tím je spojena nižší cena výsledného panelu. Účinnost je přibližně 15%, plocha potřebná pro výrobu výkonu 1 kWp je o něco vyšší než u monokrystalického – (9  $\text{m}^2$  až 11  $\text{m}^2$ ). Životnost těchto panelů je srovnatelná s monokrystalickým typem [9].

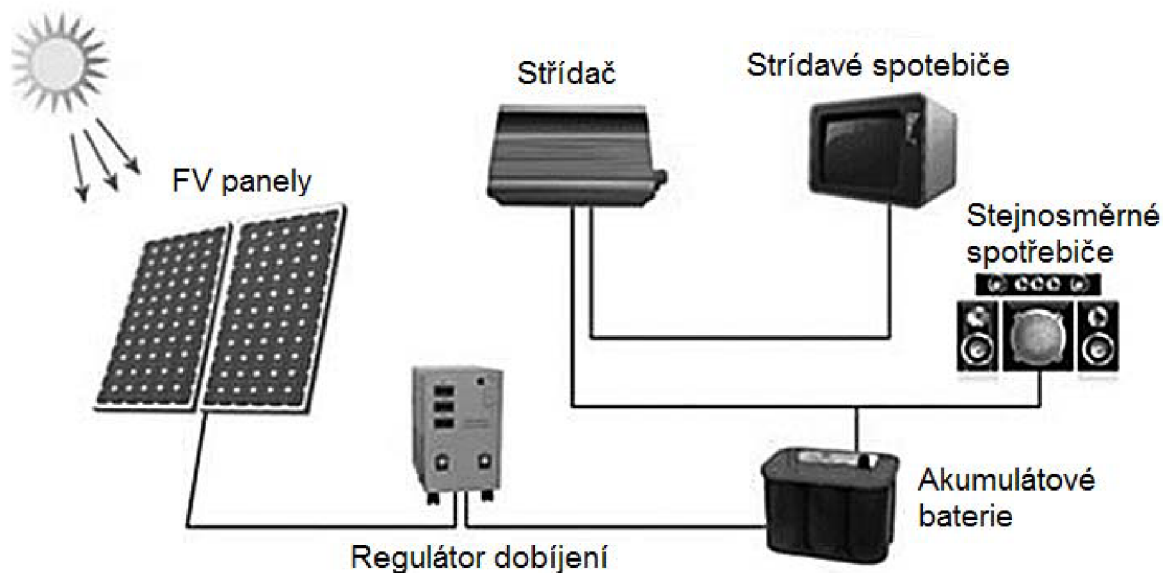
Amorfni panel patří do tzv. druhé generace fotovoltaických panelů. Základem je tenká vrstva amorfniho křemíku nanášená na folii nebo sklo. Nanášená vrstva je 100 krát až 1000 krát slabší, než je tomu u řezaných destiček. Tím je dosaženo velké úspory použitého materiálu a tedy i nižší ceny. Účinnost těchto panelů je nižší než 10%. Plocha potřebná pro výrobu výkonu 1 kWp je cca 2,5 krát vyšší – (16  $\text{m}^2$  až 20  $\text{m}^2$ ). Proto se tento typ panelu využívá minimálně a pouze v instalacích, kde není omezena instalační plocha. Další nevýhodou je nestálost parametrů panelu. Životnost je pouze 20 let. Výrobce po deseti letech používání garantuje 90% jmenovitého výkonu a 80% po 15 letech [9]. I přes tyto nevýhody je výnos amorfniho typu solárních panelů ročně o 10% vyšší než je tomu u ostatních typů. To je zapříčiněno hlavně lepší schopností využívání rozptýleného (difúzního) záření. Nerozhoduje proto umístění, nebo zastínění aktivní plochy fotovoltaického panelu.

## 2.3 Zapojení fotovoltaických systémů

Fotovoltaické systémy pracují z pravidla ve dvou základních zapojeních. Prvním z nich je autonomní, nebo také nazývaný ostrovní systém (Off-grid). Tento systém je používán v místech, kde není zavedena elektrická síť a není tam možné vybudovat elektrickou přípojku. Jedná se především o odlehlá místa například horské chaty, nebo také jachty, nebo karavany. Autonomní systém je složen z fotovoltaických panelů, akumulátorových baterií, regulátoru a střídačem. Akumulátorové baterie jsou konstruovány pro pomalé nabíjení a vybíjení, to zajišťuje regulátor nabíjení. Z baterií můžou být napájeny stejnosměrné spotřebiče. Střídač mění stejnosměrné napětí

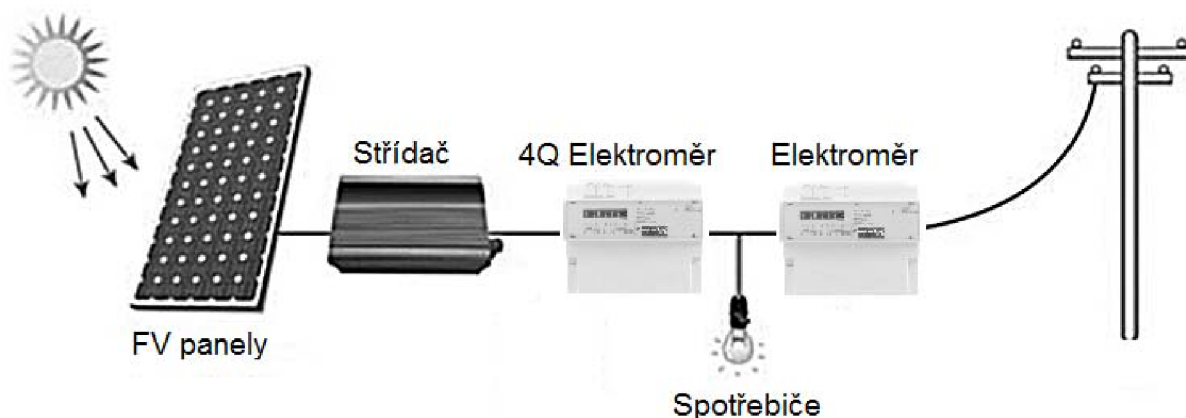


na frekvenci sítě, typicky 50 Hz, aby bylo možno provozovat běžné střídavé elektrické spotřebiče. Blokové schéma zapojení systému Off-grid je na obrázku *Obr. 2-5* [17].



*Obr. 2-5 Autonomní fotovoltaický systém*

Druhým typem fotovoltaického systému je systém On-grid, tedy systém připojený k elektrické síti. Výhodou systému On-grid je, že všechna vyrobená elektrická energie je využita. V případě vysoké intenzity slunečního záření se přebytečná elektrická energie dodává do elektrické sítě, za výkupní cenu. Naopak při nedostatku elektrické energie je možná přivádět elektrickou energii z elektrické sítě.



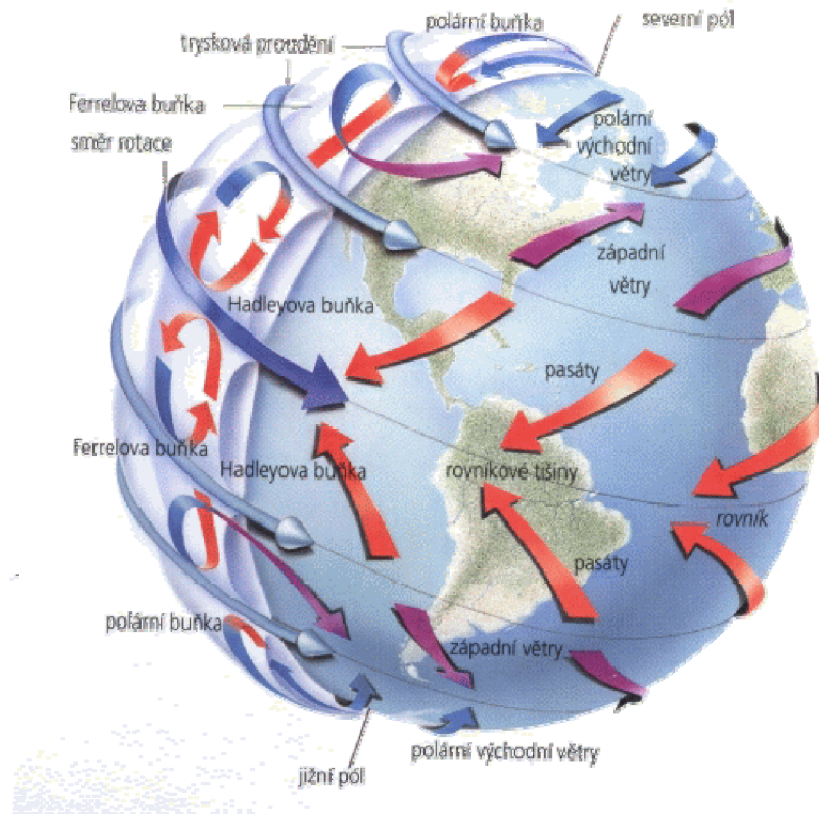
*Obr. 2-6 Fotovoltaický systém, připojený k elektrické síti*

Fotovoltaický systém On-grid (*Obr. 2-6*) [17] se skládá z FV panelů, střídače a dvou elektroměrů. Stejně jako u autonomního systému střídač mění stejnosměrné napětí, které vyrábějí fotovoltaické panely na střídavé o frekvenci 50 Hz. Systém obsahuje elektroměr, který měří všechnu elektrickou energii, dodanou fotovoltaickými panely. Dále je zde umístěn čtyřkvadrantový měnič, který zaznamenává energii, která byla dodána, nebo naopak odebrána z rozvodné sítě.

### 3 VĚTRNÁ ENERGIE

Energie větru je člověkem využívána již několik staletí. Například první doložená zmínka o využití této energie na území Čech, Moravy a Slezska je z roku 1277 [25], kdy byl v zahradách Strahovského kláštera v Praze postaven větrný mlýn. První větrné elektrárny vznikly až koncem osmdesátých let devatenáctého století.

Vítr vzniká vlivem rozdílného tlaku vzduchu, což je dáno rozdílnými tepelnými kapacitami zemského povrchu. Pokud by se země neotáčela, tak by vzduch proudil pouze kolmo na izobary ve směru nižšího tlaku. Jelikož se ale Země otáčí konstantní rychlostí, tak působí na směr proudění vzduchu i další síly. Jednou z nich je takzvaná Coriolisova síla [23], která na severní polokouli stáčí vítr doprava, na jižní polokouli naopak doleva. Vítr ovlivňuje i odstředivá síla, nebo například střídání teplot na rozhraní mezi horami, údolími, poli, lesy apod. Na proudění vzduchu má vliv dokonce i přitažlivá síla Měsíce.



Obr. 3-1 Všeobecný pohyb atmosféry na Zemi [18]

Vítr je definován rychlostí a jeho směrem. Rychlost proudění vzduchu je rozdělena, podle vizuálně pozorovatelných projevů v Beaufortově stupnici síly větru [19].

Tab. 3-1 Beaufortova stupnice rychlosti větru

Beaufortovo číslo	Rychlost větru	Rychlost větru	Popis
[-]	[m/s]	[km/h]	[-]
0	0,0 až 0,4	0 až 1,44	klid
1	0,5 až 1,5	1,80 až 5,4	lehký větřík
2	2 až 3	7,2 až 10,8	lehký vítr
3	3,5 až 5,0	12,6 až 18,0	mírný vítr
4	5,5 až 8,0	19,8 až 28,80	střední vítr
5	8,1 až 10,9	29,16 až 39,24	čerstvý vítr
6	11,4 až 13,9	41,04 až 50,04	silný vítr
7	14,1 až 16,9	50,76 až 60,84	téměř bouře
8	17,4 až 20,4	62,64 až 73,44	bouře
9	20,5 až 23,9	73,80 až 86,04	silná bouře
10	24,4 až 28	87,84 až 100,80	vichřice
11	28,4 až 32,5	102,24 až 117,00	prudká vichřice
12	32,6 až 35,9	117,36 až 129,24	hurikán

### 3.1 Energie větru

Při využívání energie proudění vzduchu je nejdůležitějším parametrem jeho rychlost. Rychlost větru je ovlivňována nejen členitostí povrchu, ale také výškou nad zemí. Pro rychlost větru v rovinném terénu platí vztah (3.1) [16].

$$\frac{v}{v_0} = \left( \frac{h_x}{h_0} \right)^n \quad (3.1)$$

Kde  $v$  je průměrná rychlost větru ve výšce  $h_x$ ,  $v_0$  je rychlost větru v referenční výšce  $h_0 = 10\text{m}$  a  $n$  drsnost povrchu.

V následující tabulce Tab. 3-2 jsou uvedeny hodnoty drsnosti povrchu  $n$  pro jednotlivé typy povrchů.

Tab. 3-2 Drsnost povrchů v závislosti na typu povrchů

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

Energii proudění vzduchu můžeme vyjádřit rovnicí (3.2).

$$E = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (3.2)$$

Kde  $E$  je energie větru,  $v$  je rychlost větru a  $m$  je hmota, kterou vyjadřuje vztah (3.3).

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot A \cdot s \quad (3.3)$$

Zde  $\rho$  představuje hustotu vzduchu,  $V$  objem,  $A$  plochu, kterou daný objem protéká a  $s$  je dráha, kterou pohybující se vzduch urazí.

Výkon větru  $P_v$  protékající jednotkovou plochou lze vyjádřit pomocí následujícího vztahu (3.4).

$$P_v = \frac{E}{A \cdot t} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{A \cdot s}{A \cdot t} \cdot v^2 \quad (3.4)$$

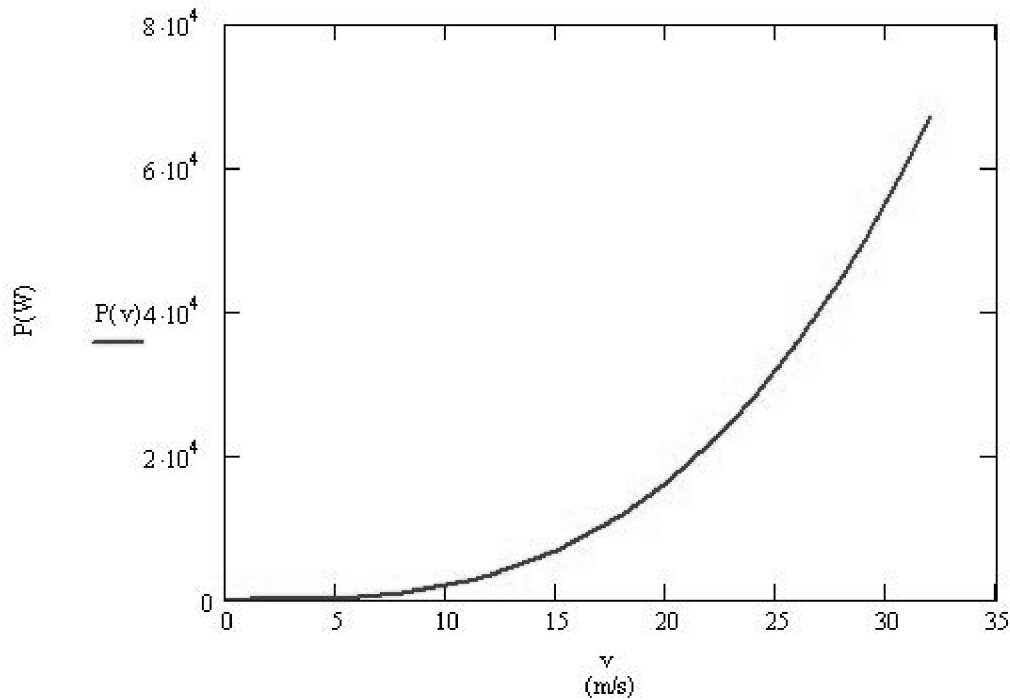
Kde

$$\frac{s}{t} = v \quad (3.5)$$

Úpravou rovnice (3.4) za pomoci rovnice (3.5) získáme konečný vztah pro výkon větru.

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (3.6)$$

Pokud tuto rovnici (3.6) vyneseme do grafické podoby, kde bude výkon větru  $P_v$  závislý na rychlosti proudění vzduchu  $v$ , získáme průběh na Obr. 3-2[20].



Obr. 3-2 Závislost výkonu větru na jeho rychlosti

Kinetickou energii větru, který má časově proměnný výkon  $P_v(t)$ , procházející jednotkovou plochou za čas  $t$ .

$$E_v = \int_{t_0}^t P_v(t) \cdot dt \quad (3.7)$$

Pokud se v daném časovém období teplota a hustota vzduchu nemění, můžeme energii větru vyjádřit jako:

$$E_v = \frac{\rho}{2} \int_{t_0}^t v^3(t) \cdot dt \quad (3.8)$$

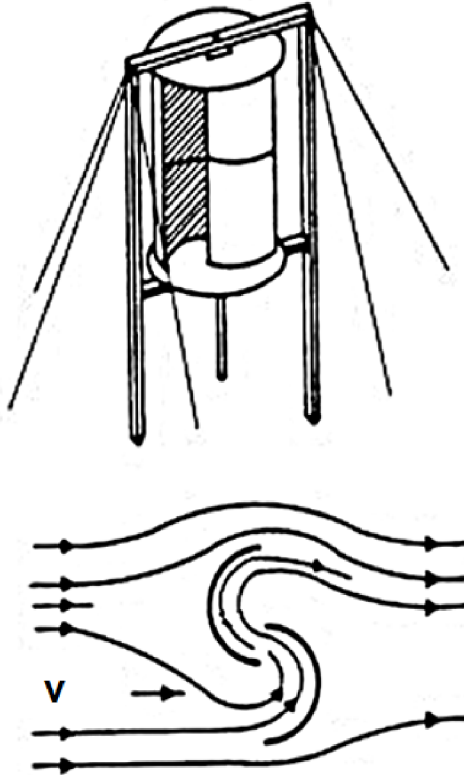
## 3.2 Větrné motory

Větrné motory jsou zařízení, která přeměňují mechanickou energii větru na mechanickou rotační energii na hřídeli. Podle aerodynamického principu dělíme větrné motory na odporové a vztlakové.

### 3.2.1 Odporové motory

Jedná se o nejstarší a nejjednodušší používaný typ větrného motoru. Přeměna energie probíhá tak, že se vítr opírá o lopatky, které mu kladou odpor a tak se vytváří síla. Zástupce tohoto typu motorů je například větrný mlýn, plachetní větrné kolo, nebo Savoniův motor [21]. Tyto motory pracují s účinností v rozmezí 15 – 23 %. Proto se v dnešní době s využitím těchto typů motorů pro energetické účely nepočítá.

Savoniův motor (*Obr. 3-3*) [22] je tvořen dvěma svislými lopatkami ve tvaru půlválců, které jsou vůči sobě předsazeny. Je využito Robinsonova jevu, podle kterého je odpor vyduté části polokoule téměř čtyřnásobný, vůči části polokoule vypouklé.[23]



*Obr. 3-3 Savoniův motor*

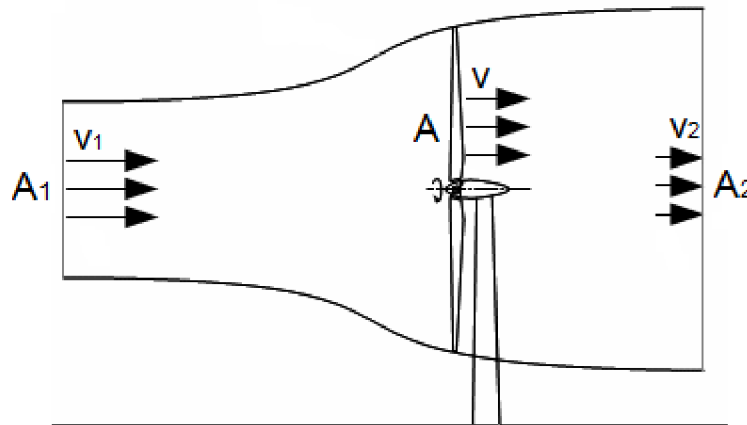
Výhody Savoniova motoru jsou především jednoduchost konstrukce, nezávislost na stávajícím směru větru, přímé předávání rotační síly na svislou hřídel a využití širokého pásma síly větru.[24]

Mezi hlavní nevýhody patří nízká účinnost přeměny energie větru na energii rotační a nízké otáčky.

### 3.2.2 Vztlakové motory

Tento typ motorů přeměňuje energii větru pomocí využití vztlakové síly. Vítr obtéká list, který má průřez podobný vrtuli letadla, zpomaluje proud vzduchu a odebírá větru část jeho energie. Princip přeměny energie větru na výkon můžeme popsat rovnicí kontinuity (3.9), která je také znázorněna pomocí obrázku *Obr. 3-4*. [28]

$$v_1 \cdot A_1 = v \cdot A = v_2 \cdot A_2 \quad (3.9)$$



Obr. 3-4 Grafické znázornění rovnice kontinuity

Pomocí zákona zachování hybnosti lze odvodit axiální sílu (rovnice (3.10)), která působí na listy rotoru.

$$F_a = \rho \cdot A \cdot v \cdot (v_1 - v_2) \quad (3.10)$$

Pro výkon větru  $P$  platí rovnice (3.11):

$$P = F_a \cdot v = \rho \cdot A \cdot v^2 \cdot (v_1 - v_2) \quad (3.11)$$

Výkon větru můžeme určit také ze změny kinetické energie  $\Delta E_k$ , protékající za jednu sekundu kontrolní plochou  $A$ :

$$P = \frac{\Delta E_k}{t} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (3.12)$$

Z rovnic 3.11 a 3.12 vyjádříme vztah pro rychlost větru  $v$ :

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (3.13)$$

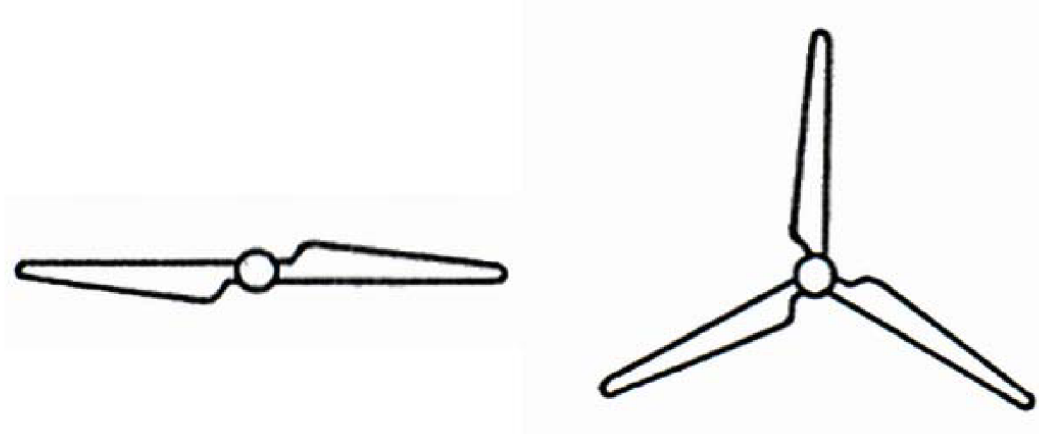
Pro axiální sílu  $F_a$  působící na rotor a výkon rotoru můžeme psát rovnice:

$$F_a = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (3.14)$$

$$P = \frac{1}{4} \rho \cdot A \cdot (v_1^2 - v_2^2) \cdot (v_1 + v_2) \quad (3.15)$$

Vztlakové motory jsou konstruovány především s horizontální osou otáčení, nejčastěji v dvoulistém, či třílistém provedení Obr. 3-5.[16]





*Obr. 3-5 Vztlakový motor dvoulistý (vlevo), vztlakový motor třílistý (vpravo)*

Existují vztlakové motory, které mají vertikální osu otáčení. Hlavním představitelem tohoto typu motoru je Darrieův rotor *Obr. 3-6* [26]. Ten zkonstruoval v roce 1931 francouzský inženýr George Jean Marie Darrieus. Motor se skládá ze dvou, nebo více listů, rotujících kolem vertikální osy. Listy jsou navrženy tak, aby jejich namáhání odstředivými silami bylo co nejnižší. Výhodami tohoto rotoru je vysoká účinnost, dosahující hodnoty přibližně 38 %. Dále není potřeba natáčení podle směru větru, stejně tak jako u Savoniova motoru. Mezi nevýhody patří horší regulovatelnost a problémový rozběh při nižších hodnotách rychlosti větru.

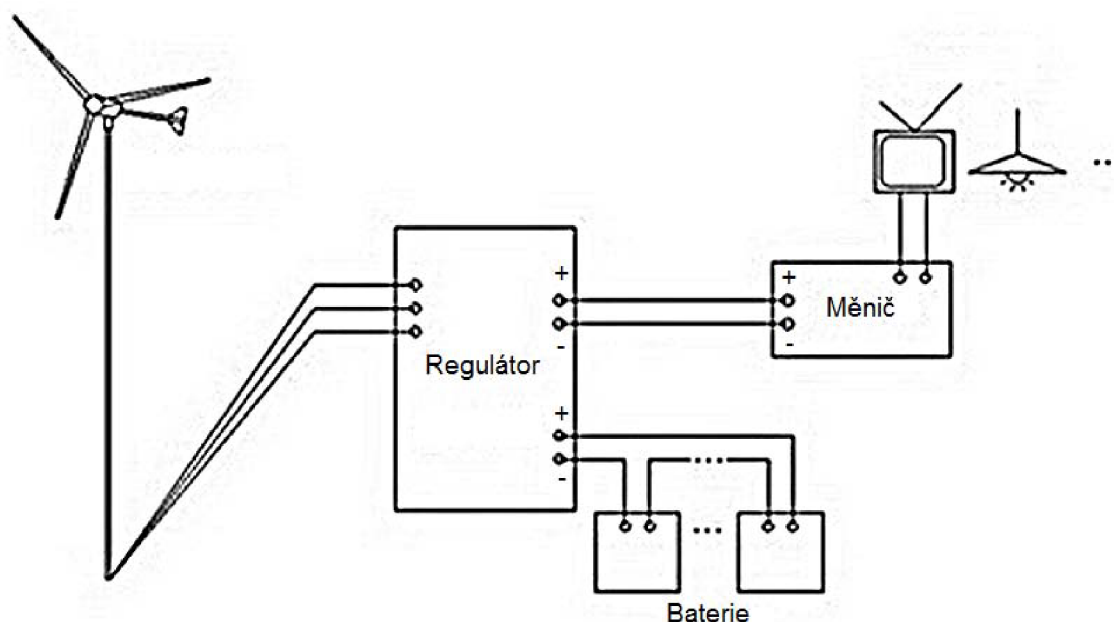


*Obr. 3-6 Darrieův rotor*

### 3.3 Generátory elektrické energie

Ve větrných elektrárnách se rotační energie hřídele převádí na elektrickou pomocí asynchronních a synchronních generátorů. Asynchronní generátory mají jednodušší konstrukci, což znamená, že jsou finančně méně náročné a mají méně náročný provoz. Tyto generátory mají jednoduchý rozběh, snadno se připojují do sítě a dobře se regulují. Jsou využívány ve větrných elektrárnách středních a velkých výkonů.

Větrné elektrárny malých výkonů (do cca 10 kW) používají pro výrobu elektrické energie vícepólové synchronní generátory s permanentními magnety. Tento typ generátoru může být používán pouze v synchronních otáčkách větrné turbíny. Abychom mohli provozovat synchronní generátor ve větším rozsahu otáček rotoru, je potřeba vyrobenou elektrickou energii usměrnit a poté následně, za pomoci střídače převést na frekvenci sítě. Typické zapojení malé větrné elektrárny je vidět na obrázku *Obr. 3-7*. [29]



*Obr. 3-7 Zapojení malé větrné elektrárny*

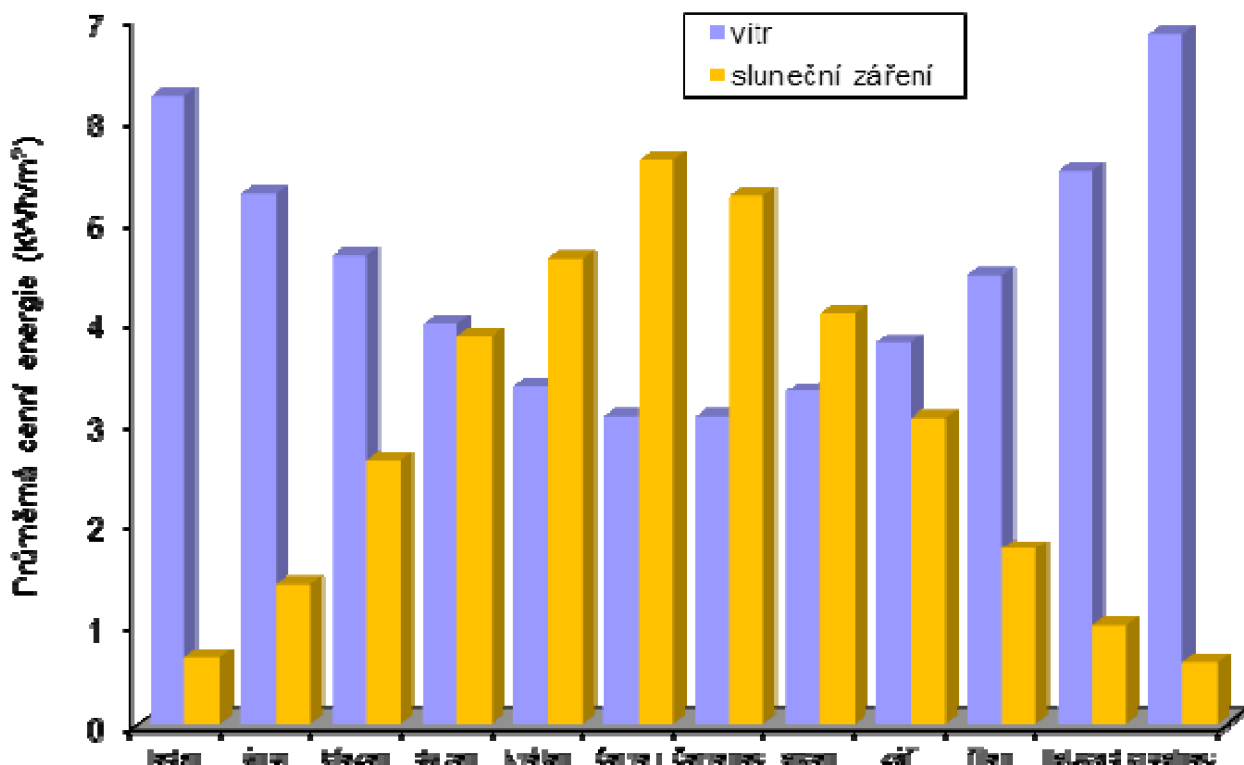
## 4 HYBRIDNÍ ENERGETICKÝ SYSTÉM

### 4.1 Definice hybridního energetického systému

V předchozích kapitolách jsme si řekli něco o výrobě elektrické energie z obnovitelných zdrojů, konkrétně ze sluneční a větrné energie. Tyto zdroje jsou již poměrně dlouho používány, tudíž je považujeme za prověřené technologie. Jsou to ekologické zdroje, které ke svému provozu nepotřebují dodávku žádného paliva. Hlavní nevýhodou fotovoltaických a větrných elektráren je však velká nestabilita dodávky elektrické energie. To přináší nadměrné zatížení distribučních sítí a komplikuje operátorské řízení těchto sítí.

Nestabilita dodávky elektrické energie je zapříčiněna časově proměnou intenzitou slunečního záření. Solární energie a energie větru jsou vzájemně komplementární. To znamená, že během dne, kdy je intenzita slunečního záření vysoká, vítr nedosahuje takové intenzity. Naopak při západu slunce, kdy solární energie slábně, vlivem rozdílných teplot na povrchu země vítr zesiluje. [30]

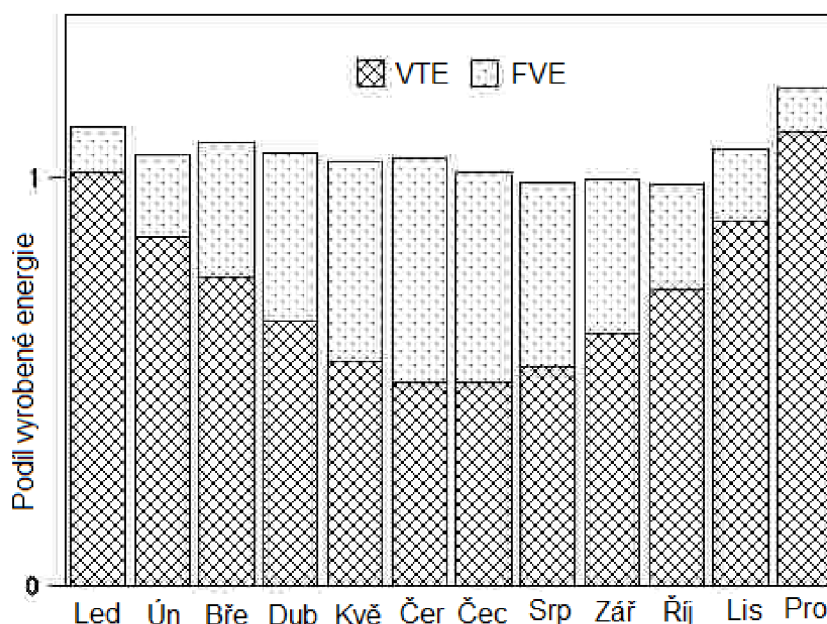
Stejná situace je i během roku, kdy v letních měsících převládá výroba energie z fotovoltaických panelů, naopak v zimě výroba z větrných zdrojů. Tuto skutečnost můžeme vidět na obrázku (Obr. 4-1) [31], kde je zobrazena průměrná denní výroba elektrické energie, během jednoho roku.



Obr. 4-1 Průměrná denní výroba elektrické energie ze slunečního záření a větru

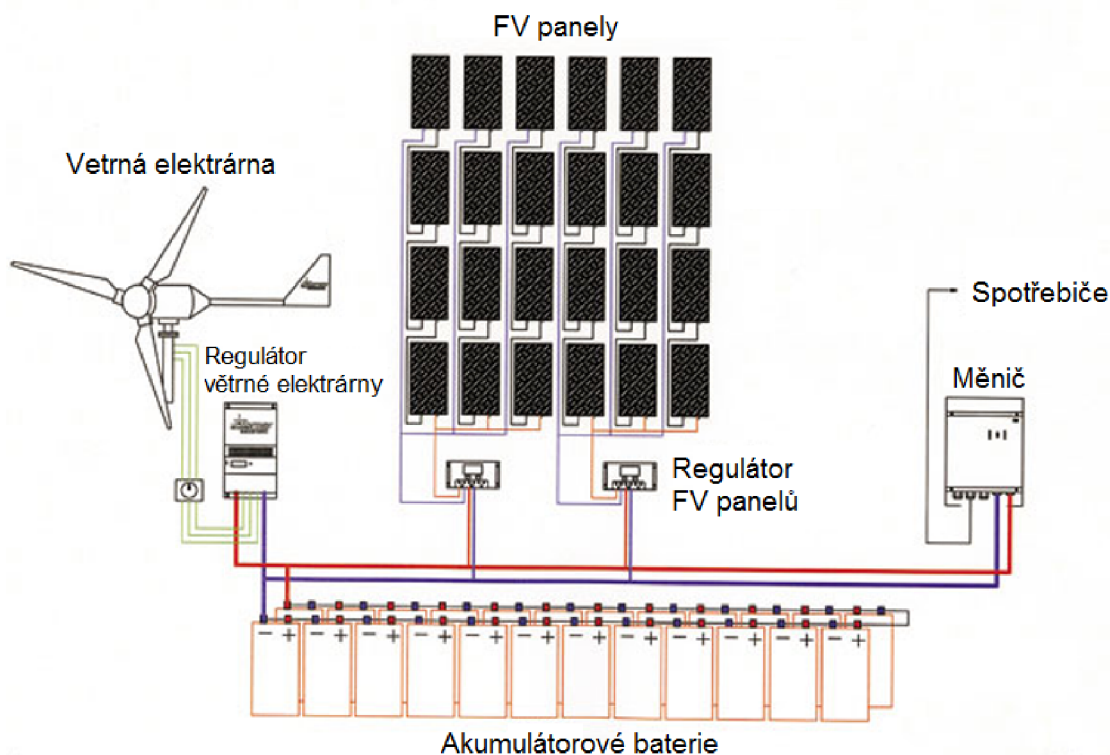
Jisté řešení nabízejí hybridní energetické systémy kombinující výrobu elektrické energie z fotovoltaických a větrných elektráren. Pokud tyto zdroje pracují společně, mohou se vzájemně

doplňovat. V případě sníženého výkonu větru je dodávka elektrické energie hrazena z fotovoltaických panelů a naopak. Tato skutečnost je zobrazena na obrázku *Obr. 4-2*. [31]



*Obr. 4-2* Vzájemná spolupráce fotovoltaiky a větru

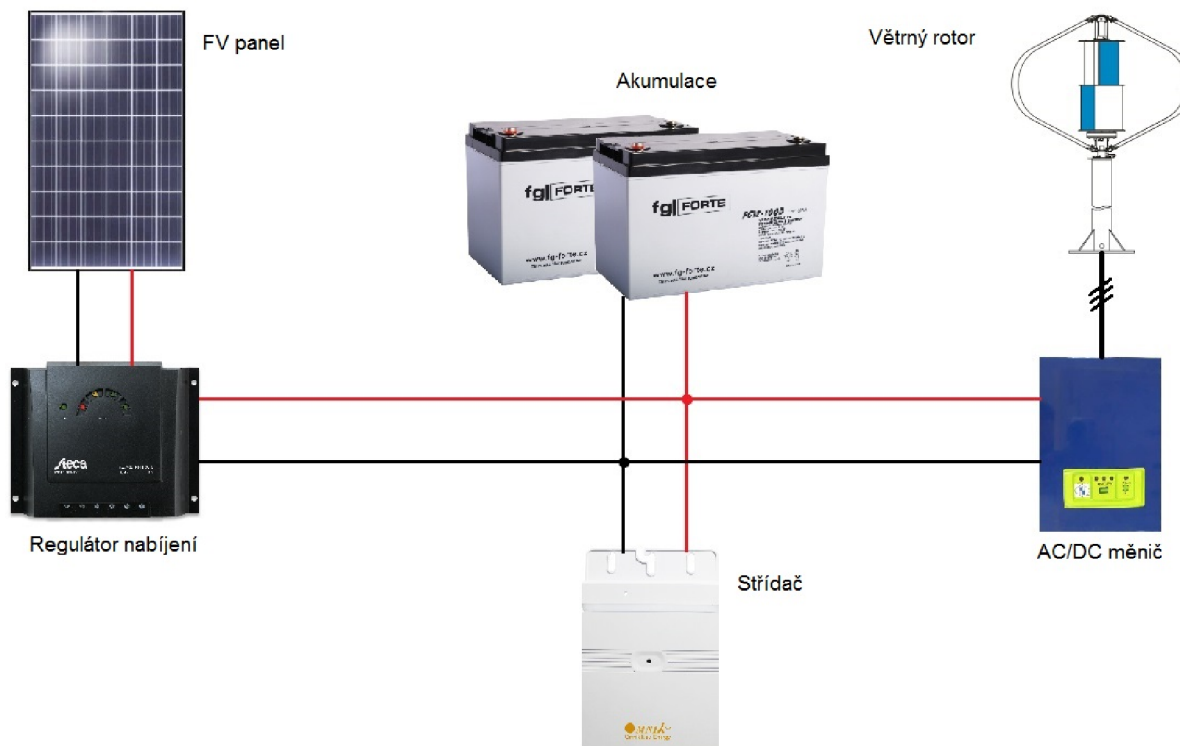
Hybridní energetický systém má několik vzájemně propojených částí, jak můžeme vidět na *Obr. 4-3*. Základem jsou fotovoltaické panely a větrný rotor. Každý z těchto zdrojů má vlastní regulátor, který reguluje nabíjení baterií. Společným prvkem jsou akumulátorové baterie a měnič, který mění stejnosměrné napětí z baterií na střídavé o frekvenci 50 Hz.



*Obr. 4-3* Blokové schéma hybridního energetického systému [32]

## 4.2 Měřený hybridní energetický systém

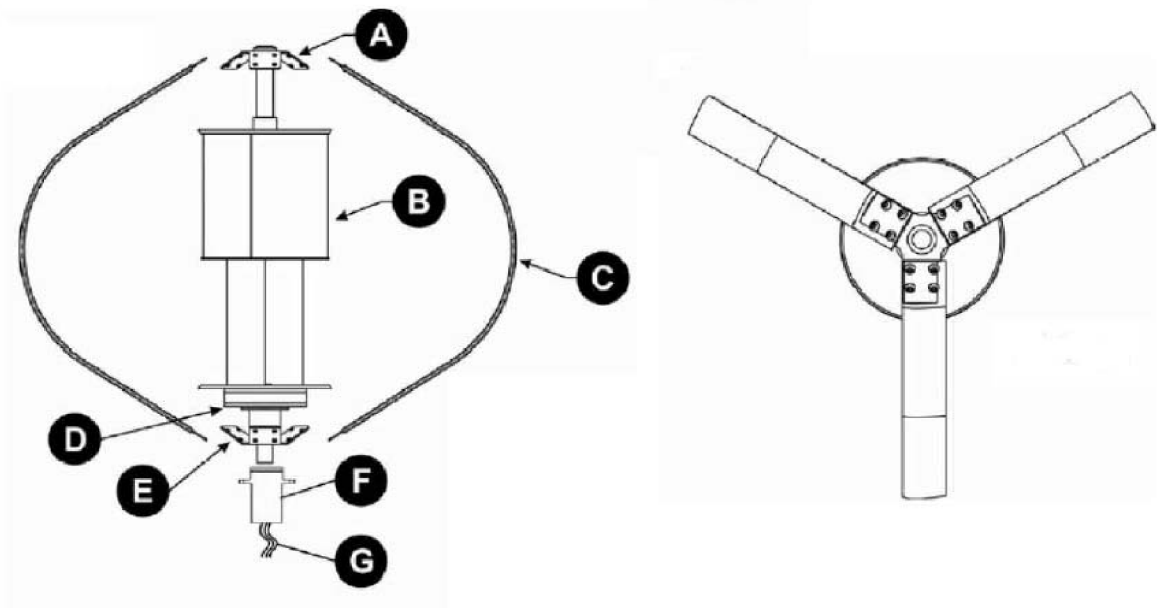
Nyní si popíšeme vlastní hybridní energetický systém, na kterém bylo provedeno základní měření provozních veličin. Jedná se o systém, který vyrábí elektrickou energii pomocí kombinace fotovoltaických panelů a větrného rotoru. Tento systém je umístěn v Brně, Králově poli, na střeše budovy SA T12, UEEN FEKT VUT. Blokové schéma tohoto konkrétního energetického systému je na *Obr. 4-4*.



*Obr. 4-4* Blokové schéma měřeného hybridního energetického systému

### 4.2.1 Větrná část

Základem větrné části hybridního energetického systému je větrný rotor s vertikální osou rotace. Jedná se o kombinaci Darrieova a Savoniova rotoru, kde Savoniův motor zajišťuje rozběh při malých rychlostech větru, poté se o hlavní přeměnu stará Darrieův rotor. Tyto dva typy rotorů jsou umístěny na společné hřídeli. Díky této kombinaci lze provozovat rotor ve velmi širokém rozsahu rychlosti větru s velkou účinností. Tato kombinace je zobrazena na *Obr. 4-5*, v tabulce *Tab. 4-1* jsou popsány jednotlivé části tohoto kombinovaného rotoru. Technické parametry turbíny větrné elektrárny jsou uvedeny v tabulce *Tab. 4-2*.



Obr. 4-5 Kombinace Darrieova a Savoniova rotoru [27]

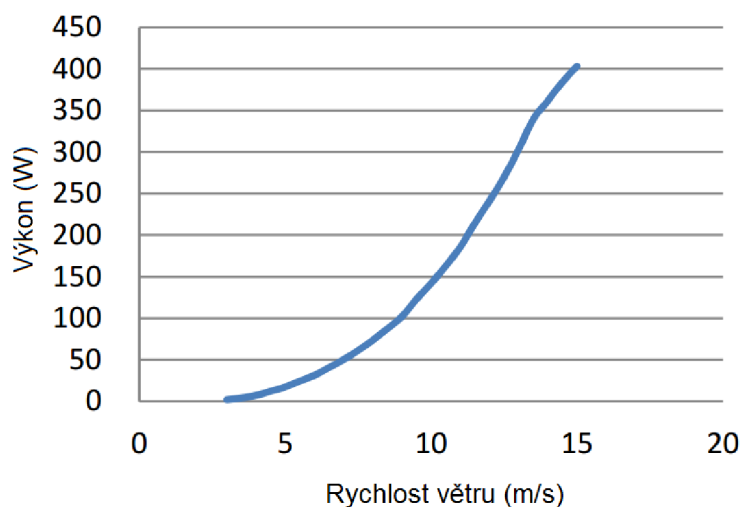
Tab. 4-1 Popis jednotlivých částí kombinovaného rotoru z Obr. 4-5 [27]

Část	Popis
A	Horní spojka Darrieových listů
B	Savonius typu S
C	Darrieovy listy s vestavěným profilem
D	Generátor s mechanicky integrovaným magnetem
E	Spodní spojka Darrieových listů
F	Tlumič
G	Vodiče třífázového generátoru

Tab. 4-2 Technické parametry rotoru větrné elektrárny[34]

Průměr rotoru	1,24 m
Výška rotoru	1,06 m
Hmotnost rotoru	25,5 kg
Počet listů rotoru	3 listy
Spouštěcí rychlost větru	3 m/s
Vypínací rychlost větru	15,5 m/s

Rotační energie rotoru větrné energie je převáděna na elektrickou energii pomocí třífázového AC generátoru s permanentními magnety. Ten má jmenovitý výkon 300 W, při rychlosti větru 13,5 m/s. Výkonovou charakteristiku větrné elektrárny můžeme vidět na obrázku *Obr. 4-6*



*Obr. 4-6 Výkonová charakteristika větrné elektrárny [34]*

Třífázový výkon z generátoru je vyveden na řídicí jednotku nabíjení WG0400. Ta usměrňuje vstupní napětí z generátoru, řízeně dobíjí akumulární baterie a chrání je před hlubokým vybitím. Regulátor také při překročení maximálních otáček rotoru samočinně odstaví větrnou elektrárnu. V tabulce *Tab. 4-3* jsou uvedeny parametry tohoto regulátoru nabíjení. Regulátor obsahuje fotocitlivý prvek – schopný rozeznat, zda-li je den či noc. To umožňuje řízení fotovoltaické části hybridního systému.

*Tab. 4-3 Parametry regulátoru nabíjení WG0400 [34]*

Jmenovitý výstupní výkon	400 W
Rozsah vstupního napětí	0 ~ 50 V
Jmenovité vstupní napětí	28 V
Jmenovitý vstupní proud	15 A
Účinnosti MPPT	>92 % / >95 %
Režim spánku (Napětí po probuzení)	5 Vdc při 1 min
Aktivační napětí	5 V
Doporučená akumulární baterie	12 Vdc / 100 Ah / 150 Ah / 200 Ah
Maximální nabíjecí proud	10 A / 15 A / 30 A
Ochranné napětí baterie	13,8 A ± 0,5 V
Plovoucí nabíjecí napětí	14,4 V ± 0,5 V, 1 min nabíjení za 10 min
Výstupní nabíjecí proud	DC 16 Amax
Mez vybití	11,5 Vdc ± 0,5 V (z baterie)



### 4.2.2 Fotovoltaická část

Byl zde zvolen fotovoltaický panel z polykrystalického křemíku – konkrétně STP 200-18/Ud firmy SUNTECH. Parametry tohoto solárního panelu jsou uvedeny v tabulce *Tab č.4-4*.

*Tab. 4-4 Parametry solárního panelu STP 200-18/Ud*

Jmenovitý výkon	200 Wp
Napětí v bodě max. výkonu	26,2 V
Proud v bodě max. výkonu	7,63 A
Napětí naprázdno	33,4 V
Zkratový proud	8,12 A
Účinnost modulu	13,6 %

*Pozn. Uváděné údaje jsou při standardních testovacích podmínkách (STC): Intenzita záření 1000 W/m<sup>2</sup>, teplota 25 °C, spektrum dopadajícího záření AM 1,5.*

Z panelu je vyvedeno stejnosměrné napětí do regulátoru dobíjení Steca Solarix MPPT 2010.

### 4.2.3 Společná část

Pro akumulaci vyrobené elektrické energie jsou použity dva bezúdržbové gelové akumulátory. Každý z nich má napětí 12 V a kapacitu 100 Ah [36]. Akumulátory jsou zapojeny do série, výsledná akumulární baterie má tedy kapacitu 100 Ah, při napětí 24 V.

Aby bylo možné vyvést výkon ke střídavým spotřebičům, je akumulární baterii připojen střídač Omnisol-M248. Tento střídač pracuje vysokofrekvenčního izolovaného transformátoru. Elektrické parametry střídače jsou uvedeny v následující tabulce *Tab č.4-5*

*Tab. 4-5 Parametry střídače Omnisol-M248*

Doporučený vstupní výkon	160 W – 300 W
Maximální vstupní napětí	50 V
Startovací napětí (min / max)	28 V / 50 V
MPPT rozsah napětí	28 V ~ 40 V
Pracovní napětí	22 V ~ 40 V
Maximální vstupní proud	15 A
Maximální výstupní výkon	248 W
Nominální výstupní napětí	230 V
Nominální výstupní proud	1,07 A
Maximální výstupní proud	1,11 A
Noční spotřeba	120 mW



## 5 SLEDOVANÉ PROVOZNÍ ÚDAJE HYBRIDNÍHO ENERGETICKÉHO SYSTÉMU

Při měření provozních stavů hybridního energetického systému musíme sledovat několik základních parametrů. V první řadě je to dodávaná elektrická energie, kterou produkují jednotlivé zdroje- větrná elektrárna a fotovoltaické panely. Dále je pak nutné měřit klimatické podmínky, protože dodávka elektrické energie produkovaná obnovitelnými zdroji je přímo závislá na aktuálním počasí.

### 5.1 Měření výkonu, proudu a elektrické energie

Napětí a proud dodávaný jednotlivými zdroji jsou základní parametry, které nás zajímá při měření provozních stavů. Z rovnice (5.1) vyplývá, že hodnotu okamžitého výkonu získáme součinem okamžitých hodnot napětí a proudu.

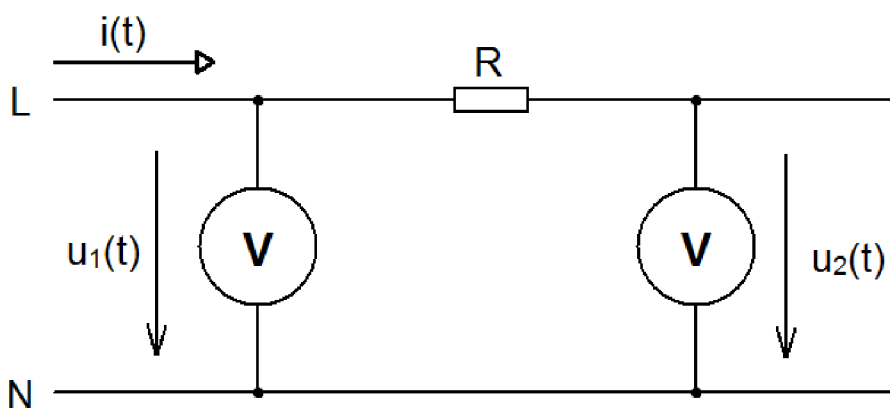
$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \quad (\text{W;V,A}) \quad (5.1)$$

Kde  $p(t)$  je okamžitý výkon,  $u(t)$  je okamžité napětí a  $i(t)$  je okamžitý proud.

Proud měříme pomocí rezistoru vřazeného do obvodu a následného měření napětí před a za ním. Výsledný proud  $i(t)$  se získá ze vzorce (5.2), který vychází z Ohmova zákona.

$$i(t) = \frac{u_1(t) - u_2(t)}{R} \quad (\text{A;V,V},\Omega) \quad (5.2)$$

Kde  $u_1(t)$  je napětí před rezistorem  $R$ ,  $u_2(t)$  je napětí za rezistorem.



Obr. 5-1 Zapojení pro měření proudu

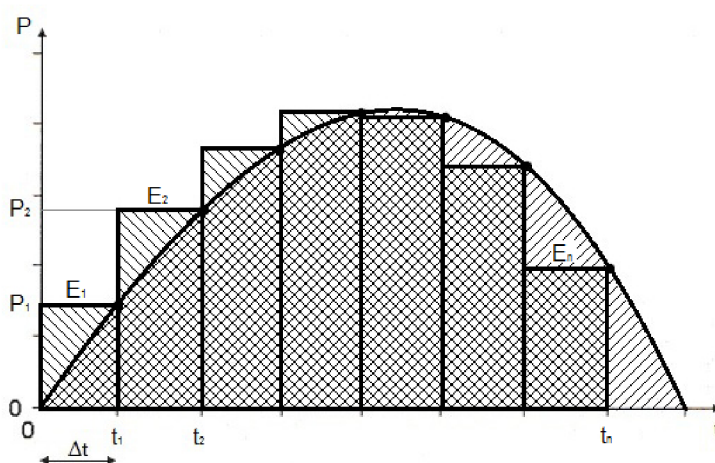
Z okamžitého výkonu lze několika způsoby spočítat vyrobenou elektrickou energii. Při tomto způsobu výpočtu se předpokládá, že naměřený okamžitý výkon působí po dobu  $\Delta t$ , která je konstantní. Po uplynutí této doby se skokově mění výkon na další naměřenou hodnotu. Součinem doby  $\Delta t$  a okamžitého výkonu získáme hodnotu elektrické energie vyrobenou za časový úsek  $\Delta t$  – rovnice (5.3). Celková elektrická energie odpovídá součtu dílčích energií – rovnice (5.4).

$$E_n = P_n \cdot \Delta t \quad (\text{W} \cdot \text{s}; \text{W} \cdot \text{s}) \quad (5.3)$$

$$E = \sum_{i=1}^n E_i \quad (\text{W} \cdot \text{s}; \text{W} \cdot \text{s}) \quad (5.4)$$

Tento princip výpočtu je zobrazen na *Obr. 5-2*. V tomto způsobu výpočtu nahrazujeme křivku větším počtem obdelníků, které odpovídají vyrobené elektrické energii za časový úsek  $\Delta t$ . Z obrázku je patrné, že se vzrůstajícím počtem vzorků (obdelníků) je výpočet přesnější. Ideální případ nastane když počet vzorků se bude limitně blížit nekonečnu – rovnice (5.5).

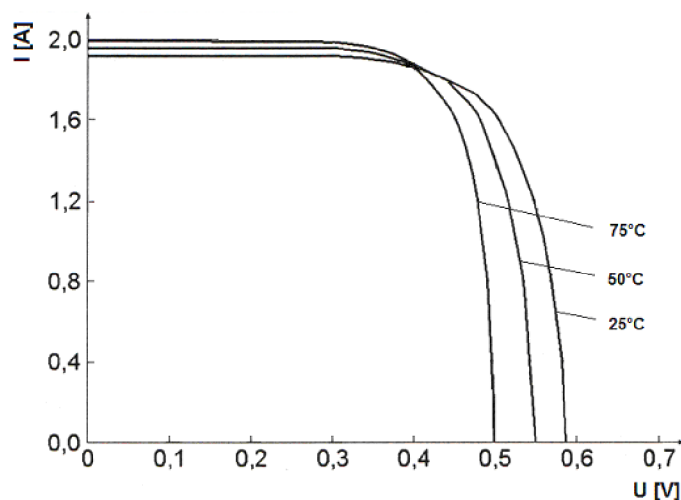
$$E = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n E_i \quad (\text{W} \cdot \text{s}; \text{W} \cdot \text{s}) \quad (5.5)$$



*Obr. 5-2 Výpočet pomocí dělení na úseky*

## 5.2 Měření teploty

Změna teploty povrchu fotovoltaického panelu přímo ovlivňuje jeho elektrické vlastnosti *Obr. 5-3*. Se vzrůstající teplotou klesá generované napětí. Jeho důsledkem je posun pracovního bodu. Solární panel tak nedodává maximální výkon a to se projevuje snížením výroby elektrické energie.



*Obr. 5-3 Změna provozní charakteristiky FV panelů při různých teplotách panelu*

Využívají se teplotní čidla měnící odpor v závislosti na teplotě (termistory) [12]. Podle toho, zda se vzrůstající teplotou roste či klesá odpor součástky, dělí se termistory na dva základní typy – negastory a pozistory.

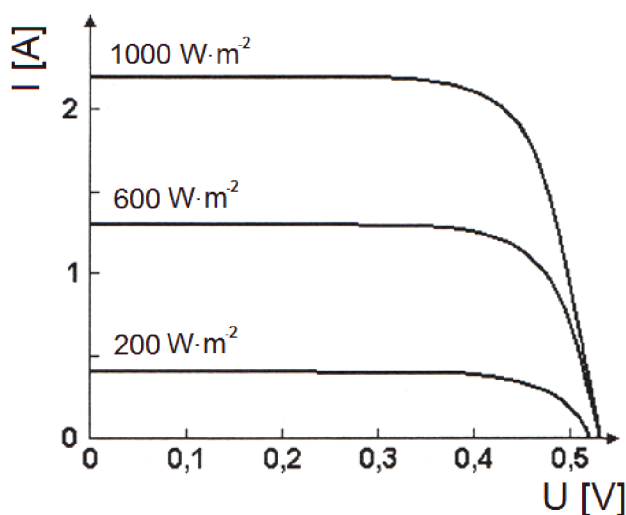
Konkrétně se je možno využít např. teplotní čidlo PT100, který se řadí mezi pozistory, tzn. že jeho elektrický odpor se se vzrůstající teplotou zvyšuje [11]. Toto čidlo má při nulové teplotě odpor  $100 \Omega$  [13].

Teplotu dále můžeme snímat termočlánky. Termočlánek je založen na principu termoelektrického jevu, kde jsou vodivě spojeny dva různorodé kovy. Toto spojení je nazýváno aktivní část termočlánku. Při zahřívání této části snímače, vůči referenční teplotě, vzniká elektrický potenciál [38]. Ten je měřitelný na opačných koncích kovů. Vzniklé napětí se pohybuje řádově v desítkách mikrovoltů – je závislé na použitých materiálech a teplotě spojení.

### 5.3 Měření slunečního záření

Pro měření přímého dopadajícího slunečního záření se využívá měřicí systém, složený ze snímače (pyranometru). Měření rozptýleného (difúzního) záření je možno realizovat přidáním druhého snímače na spodní stranu fotovoltaického panelu.

Pyranometry jsou snímače, které přímo měří dopadající sluneční záření. Jejich funkce je založena na zahřívání pasivního, teplotně citlivého prvku – termočlánku. Dopadající záření je pohlcováno v černém tělese, které se působením tohoto vlivu zahřívá a vniklé teplo je odváděno přes tepelný odpor do těla pyranometru. Rozdíl teplot na tepelném odporu je pak konvertován na napětí. Toto napětí je lineární závislostí dopadajícího slunečního záření.



Obr. 5-4 Změna provozní charakteristiky FV panelů při různých hodnotách osvětlení

## 6 REALIZACE MĚŘICÍHO SYSTÉMU

Při tvorbě této kapitoly bylo čerpáno z [40].

Měřicí systém musí být funkční bez poruchy po velmi dlouhou dobu, bez zásahu obsluhy. Z tohoto důvodu není možné použít běžné osobní počítače, protože OS se kterými pracují nejsou navrženy pro nepřetržitý provoz.

### 6.1 CompactRIO

Využijeme tedy průmyslový řídicí systém, konkrétně systém od společnosti National Instruments – CompactRIO. Jedná se o řídicí systém pracující v reálném čase a využívá systému programovatelného hradlového pole (FPGA – „field-programmable gate array“). K dispozici je široký výběr FPGA modulů, sloužící například pro: měření napětí a proudu, měření teploty, měření a řízení pohonů, digitální vstupy a výstupy, zdroje napětí a proudu, čítač a generátor pulsů, sériovou komunikaci a mnoho dalších.



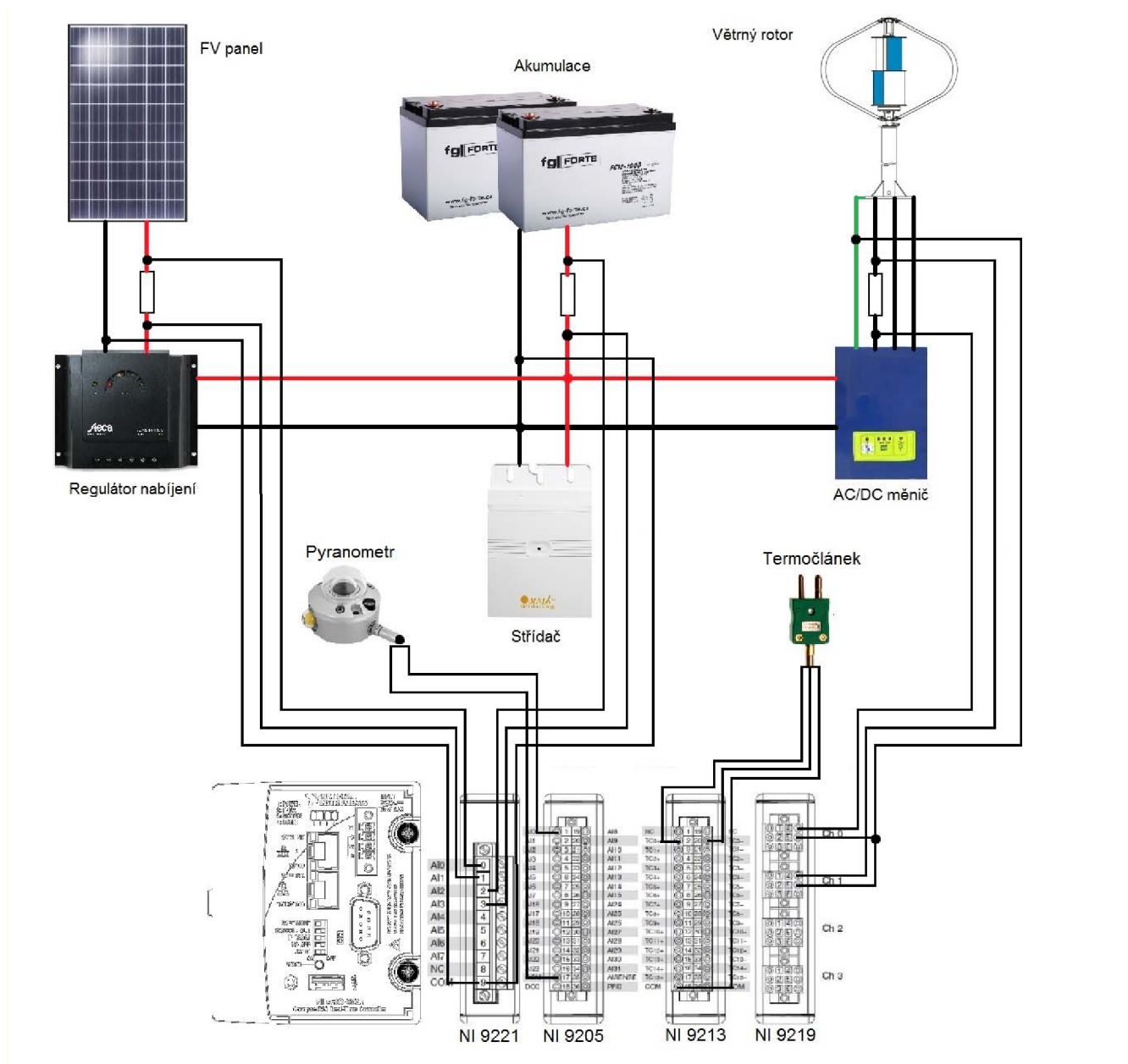
Obr. 6-1 Řídicí systém NI cRIO – 9022 [39]

V našem měřicím systému byl použit řídicí systém NI cRIO – 9022. Základem je jednotka s taktem procesoru 533 MHz, pracující v reálném čase. Systém je odolný a schopný pracovat v širokém rozsahu teplot od  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  [39]. K připojení FPGA karet slouží šasi NI cRIO 9114 se sloty pro osm karet.



Obr. 6-2 Měřicí systém

Využíváme čtyři měřicí karty – dvě napěťové, jednu napěťovo-proudovou a jednu teplotní kartu. V prvním slotu je zapojena napěťová karta NI 9221 s rozsahem  $\pm 60$  V, která slouží k měření stejnosměrného napětí solární části hybridního systému a na akumulční baterii. Ve druhém slotu je další napěťová karta NI 9205, která má rozsah  $\pm 10$  V. Ta slouží k měření napětí z pyranometru. Ve třetím slotu je karta sloužící k měření teploty pomocí termočlánku. Poslední karta NI 9219 – umístěná ve čtvrtém slotu je používána k měření veličin větrné části hybridního systému. Na obrázku je *Obr. 6.3* kompletní řídicí systém s připojenými měřicími kartami.



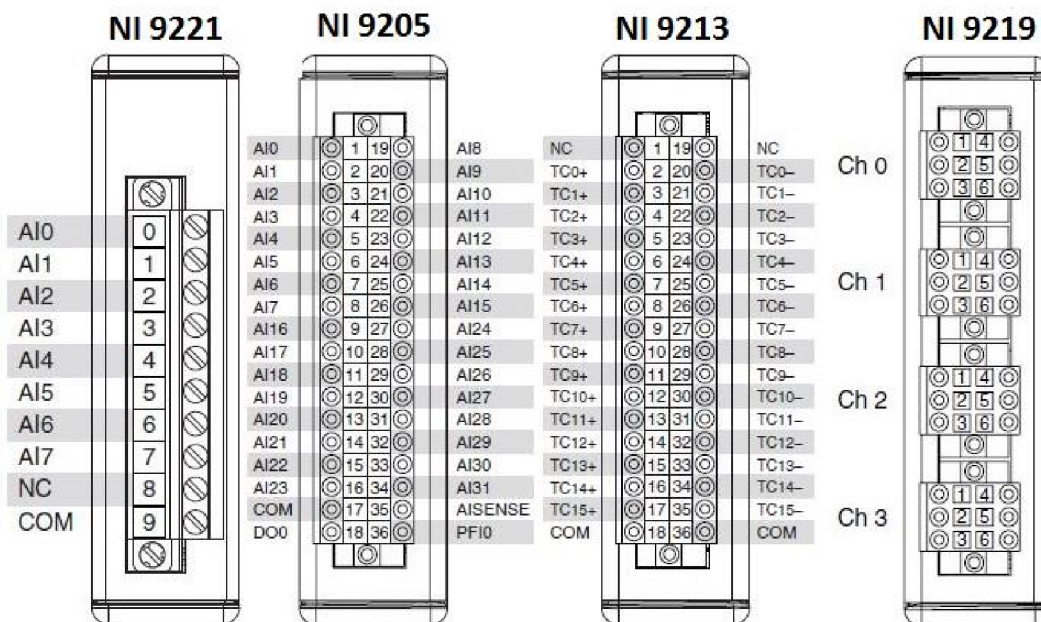
*Obr. 6-3* Zapojení měřicího systému

Vstupy jednotlivých karet jsou zobrazeny na obrázku níže. Aby byl měřicí systém funkční, musí být systém pospojován podle předem definovaného zapojení, které je znázorněné v tabulce *Tab. 6.1*



Tab. 6-1 Zapojení měřicího systému

NI 9221		NI 9205	
Slot	Připojeno	Slot	Připojeno
0	Napětí před odporem na FVE části	0	Napětí pyranometru
1	Napětí za odporem na FVE části		
2	Napětí před odporem na baterii		
3	Napětí za odporem na baterii		
NI 9213		NI 9219	
Slot	Připojeno	Slot	Připojeno
0	Připojení termočlánku typu K	0	Napětí před odporem na VTE části
		1	Napětí za odporem na VTE části



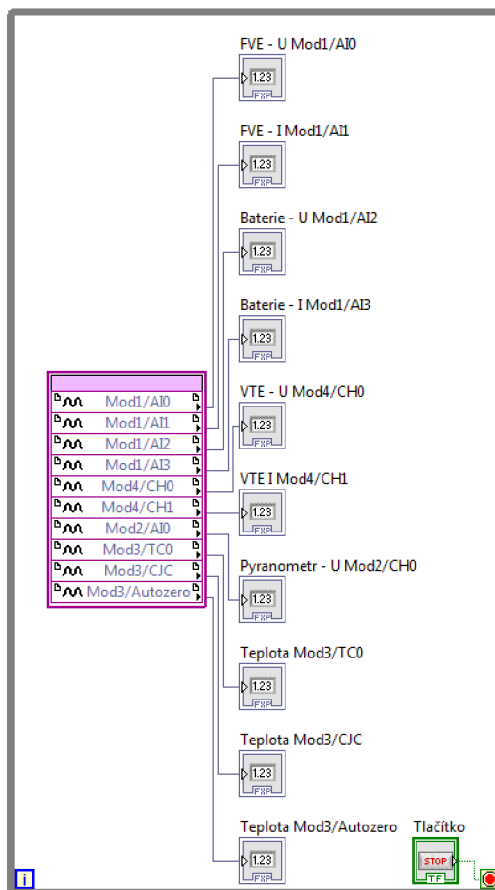
Obr. 6-4 Označení vstupů měřicích karet [39]

## 6.2 LabVIEW

LabVIEW je grafické programovací a vývojové prostředí, vhodné pro programování systémů sloužící pro měření a analýzu signálů, řízení a vizualizaci technologických procesů. Hlavním cílem virtuální instrumentace je nahrazení technických prostředků, které jsou prostorově a finančně mnohokrát náročnější. Hlavní výhodou grafického programování je vysoká názornost kódu programu a jednoduché, rychlé sestavení výstupního uživatelského rozhraní. Navržený program DP.lvproj je rozdělen na několik částí – čtení, zpracování a ukládání dat.

### 6.2.1 Čtení z FPFA karet

První programu je virtuální instrument (VI) pojmenovaný FPGA.vi. Do blokového diagramu (Obr. 6-5) byl vložen blok „FPGA I/O node“, který má za úkol čtení z FPGA karet.



Obr. 6-5 Blokový diagram FPGA.vi

V této části programu byly také definovány vstupy jednotlivých karet, proto je nutné dodržet zapojení měřicího systému, které jsme si uvedli výše. Vstup pojmenovaný Mod1/AI0 bude měřit příslušný parametr za pomoci karty umístěné v prvním slotu (NI 9221), na vstupu měřicí karty číslo 0. Na předním panelu (Obr. 6-6) jsou zobrazeny parametry čtené z jednotlivých karet.

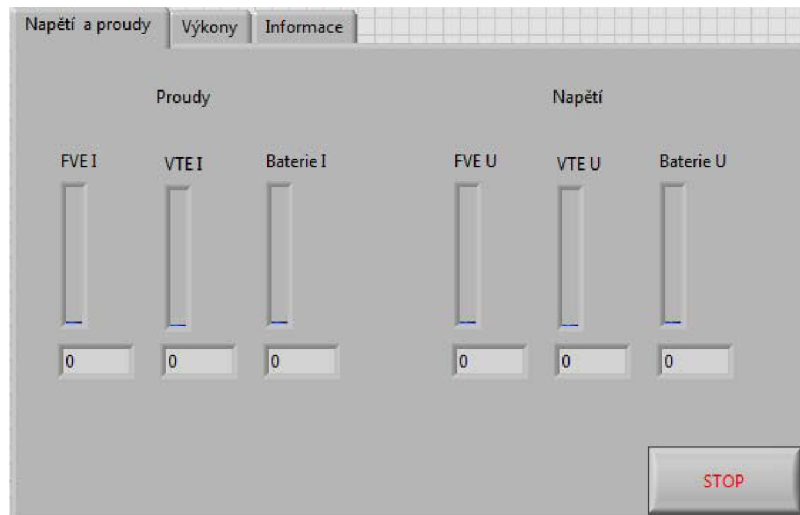
NI-9221 měření napětí před a za odporem v ss části systému	NI-9205 měření napětí pyranometru	NI-9213 měření teploty okolí	NI-9219 měření napětí před a za odporem v části VTE
FVE - U Mod1/AI0 0	Pyranometr - U Mod2/CH0 0	Teplota Mod3/TC0 0	VTE - U Mod4/CH0 0
FVE - I Mod1/AI1 0		Teplota Mod3/CJC 0	VTE I Mod4/CH1 0
Baterie - U Mod1/AI2 0		Teplota Mod3/Autozero 0	
Baterie - I Mod1/AI3 0			

**STOP**

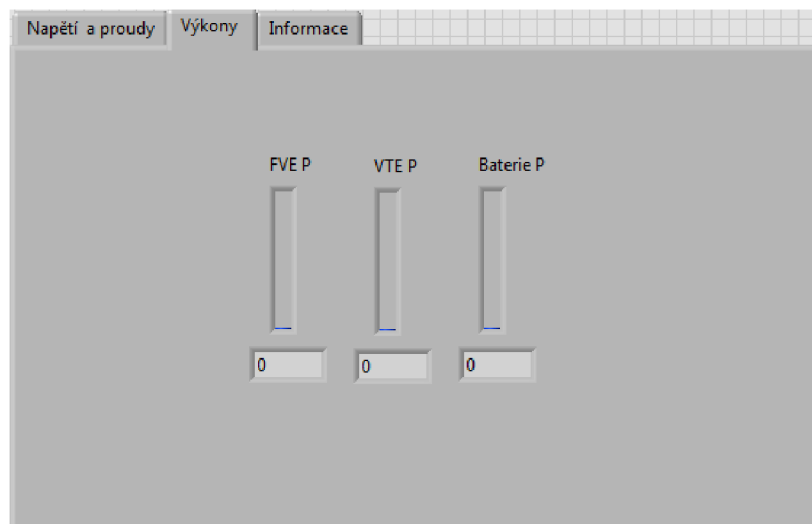
Obr. 6-6 Zobrazení hodnot čtených v části programu FPGA.vi



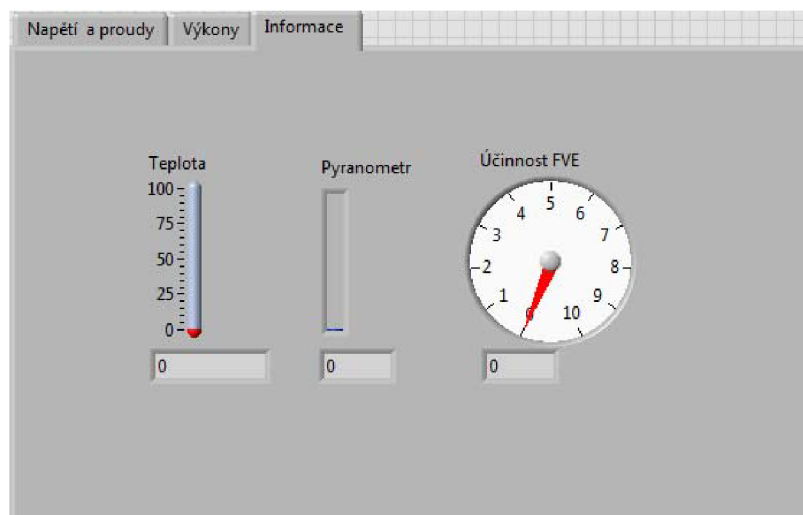




Obr. 6-8 Zobrazení proudů a napětí v části programu RIO.vi



Obr. 6-9 Zobrazení výkonů v části programu RIO.vi



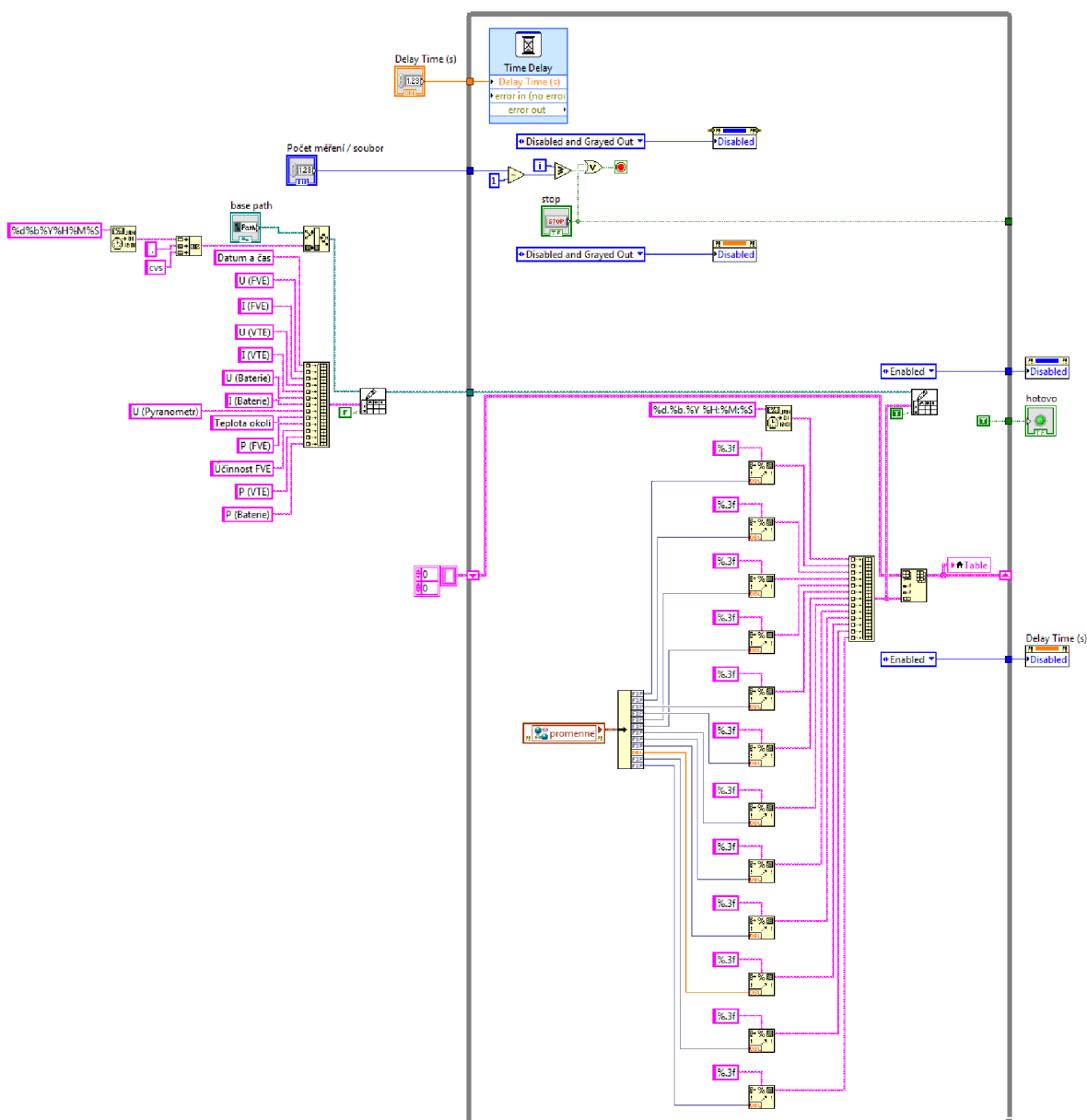
Obr. 6-10 Zobrazení dalších informací v části programu RIO.vi

## 6.2.3 Ukládání dat

Poslední část programu je zaměřena na ukládání zpracovaných dat. Data můžeme ukládat dvěma různými způsoby.

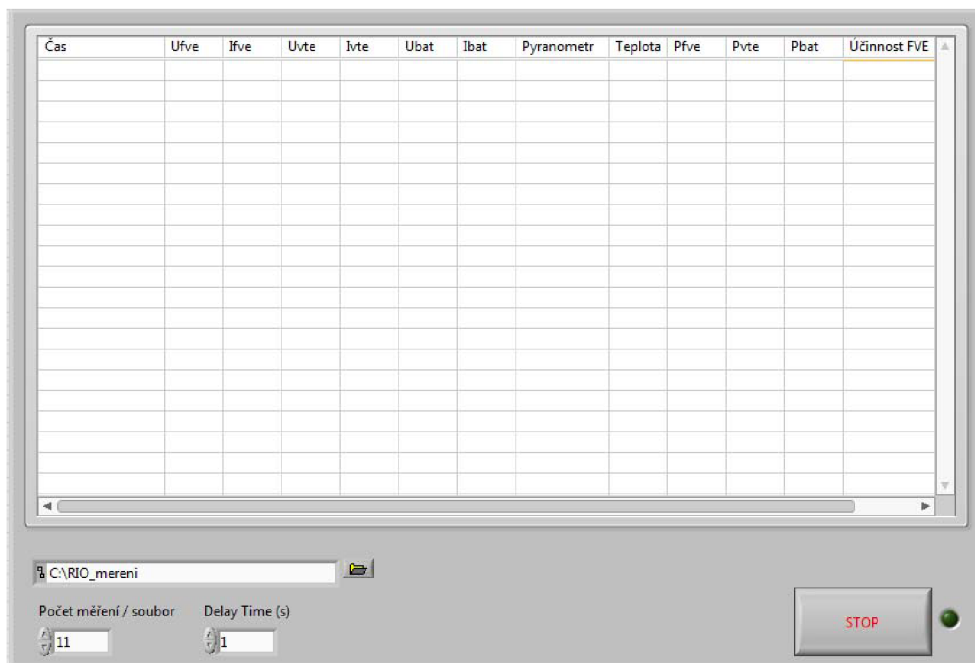
### 6.2.3.1 Ukládání dat na PC

Prvním z nich se pomocí souboru „ukladani\_dat\_do\_PC.vi“ archivují data ve standartním PC, které je připojeno k měřicímu systému cRIO-9022 pomocí kříženého Ethernetového kabelu. Na obrázku *Obr. 6-11* můžeme vidět princip zápisu dat do tabulky a následné ukládání. Pomocí clusteru (skupiny proměnných) je vytvořena hlavička tabulky. Dále je zde definován formát názvu souboru, který je ve tvaru „den\_měsíc\_rok\_hodiny\_minuty\_sekundy“ – aktuálního času vytvoření. Souboru je typu „\*.csv“, ten je možné otevřít v programu MS Excel a uložená data dále zpracovávat podle potřeby.



Obr. 6-11 Blokový diagram programu ukladani\_dat\_do\_PC.vi

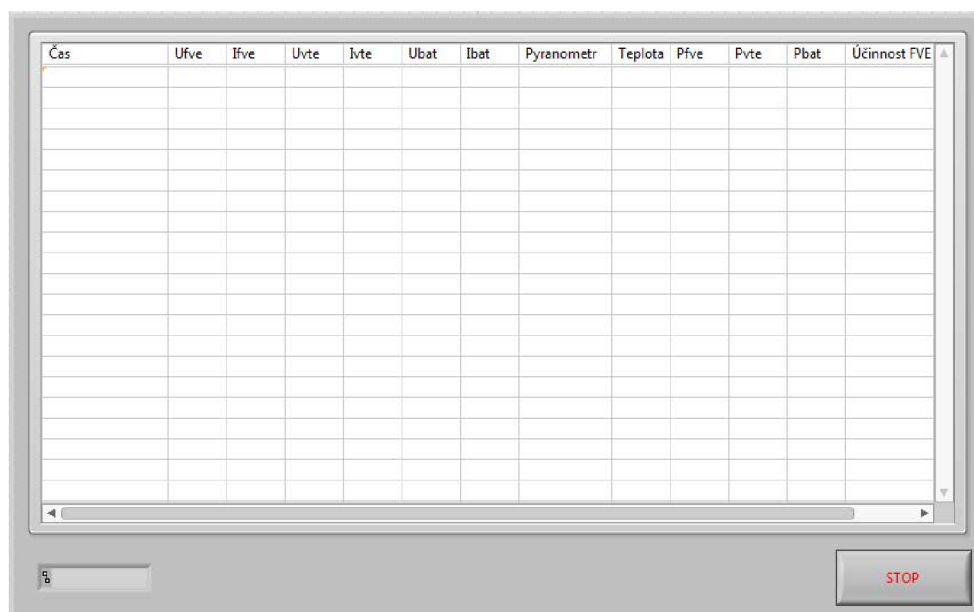
V čelním panelu (Obr. 6-12) je možno pro zvýšení přehlednosti nastavit počet zapsaných hodnot, které budou uloženy v jednom souboru. Po dosažení zvoleného počtu hodnot bude vytvořen další soubor. Dále je možnost nastavení intervalu zápisu ve vteřinách. Data jsou defaultně ukládána do složky „RIO\_mereni“ na disku C:\. Umístění pro ukládání je nastavitelné.



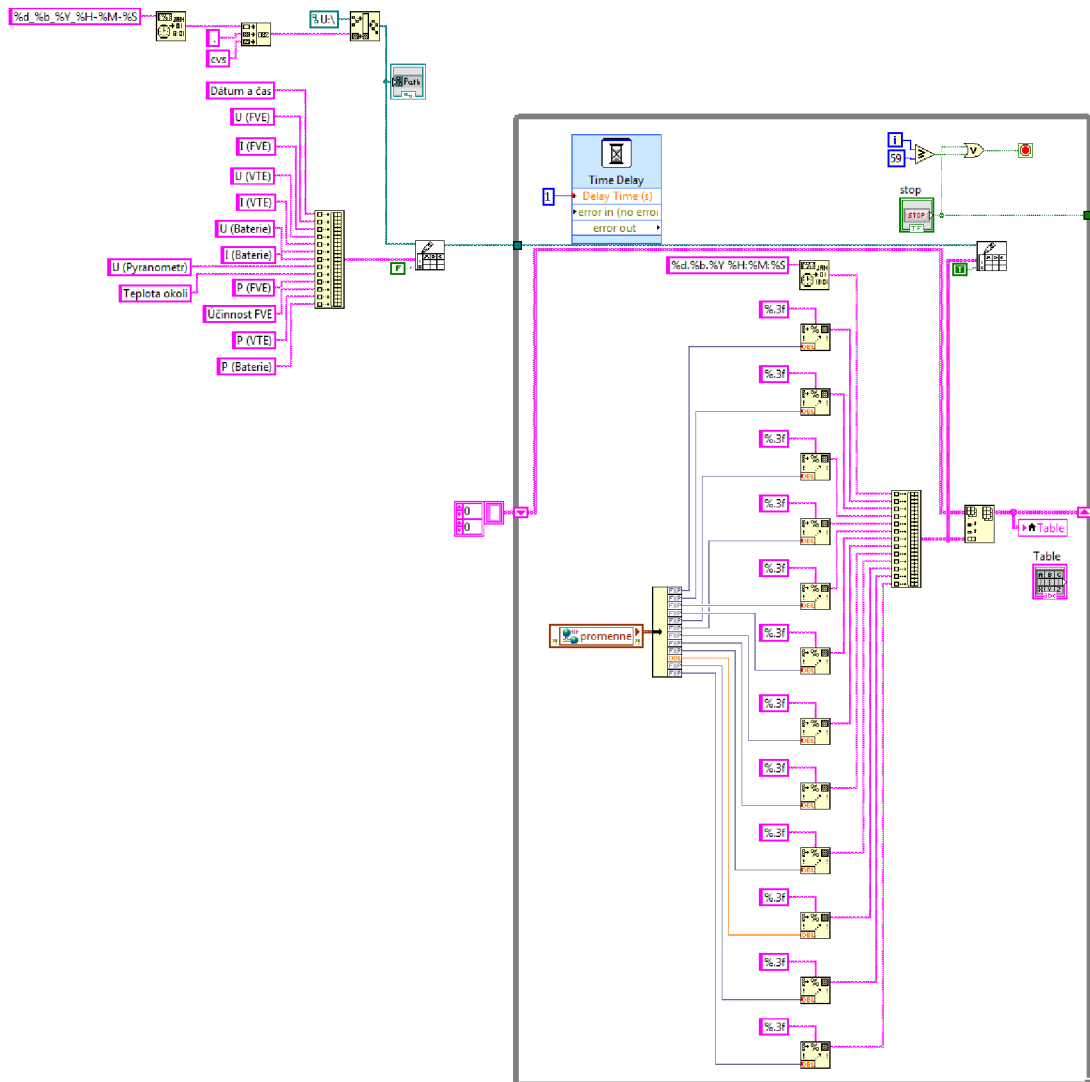
Obr. 6-12 Ovládací panel programu *ukladani\_dat\_do\_PC.vi*

### 6.2.3.2 Ukládání dat na USB

Abychom se zbavili závislosti na stolním PC a zároveň nezatěžovali vnitřní paměť řídicího systému cRIO-9022, byl vytvořen program „ukladani\_dat\_na\_USB.vi“ (Obr. 6-13). Ten ukládá měřené hodnoty na externí USB disk, připojený k řídicímu systému cRIO-9022. Tento program pracuje na stejném principu (Obr. 6-14), jako při ukládání do PC.



Obr. 6-13 Ovládací panel programu *ukladani\_dat\_na\_USB.vi*



Obr. 6-14 Blokový diagram programu ukladani\_dat\_na\_USB.vi

## 7 ANALÝZA PROVOZNÍCH ÚDAJŮ

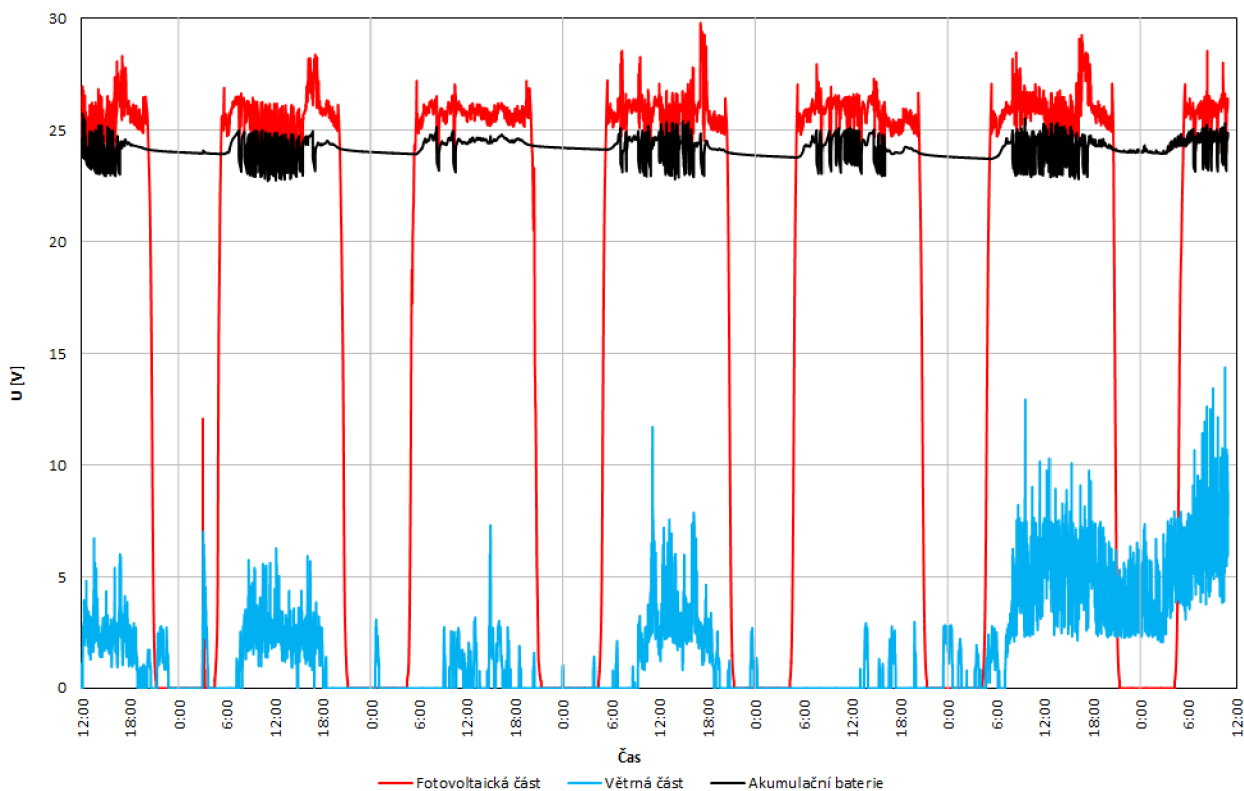
Měření probíhalo na vzorovém hybridním energetickém systému popsaném v kapitole 4.2. Cílem měření bylo získat reálné provozní údaje jednotlivých částí elektrárny využívající sluneční a větrné energie. Ty budou sloužit, jako ověření teoretických podkladů pro stanovení podmínek návrhu hybridních energetických systémů. Měření probíhalo šest dní, mezi 9. květnem a 15. květnem.

Dle teoretických předpokladů popsaných v kapitole 4.1 bylo měření provedeno v období, kdy je nejvyšší podíl vyrobené elektrické energie z fotovoltaické části a naopak nejnižší podíl vyrobené elektrické energie z větrné části.

### 7.1 Základní provozní charakteristiky

Po zpracování dat pomocí programu MS Excel bylo vytvořeno několik provozních charakteristik. Na první z nich (*Obr. 7-1*) je časová závislost:

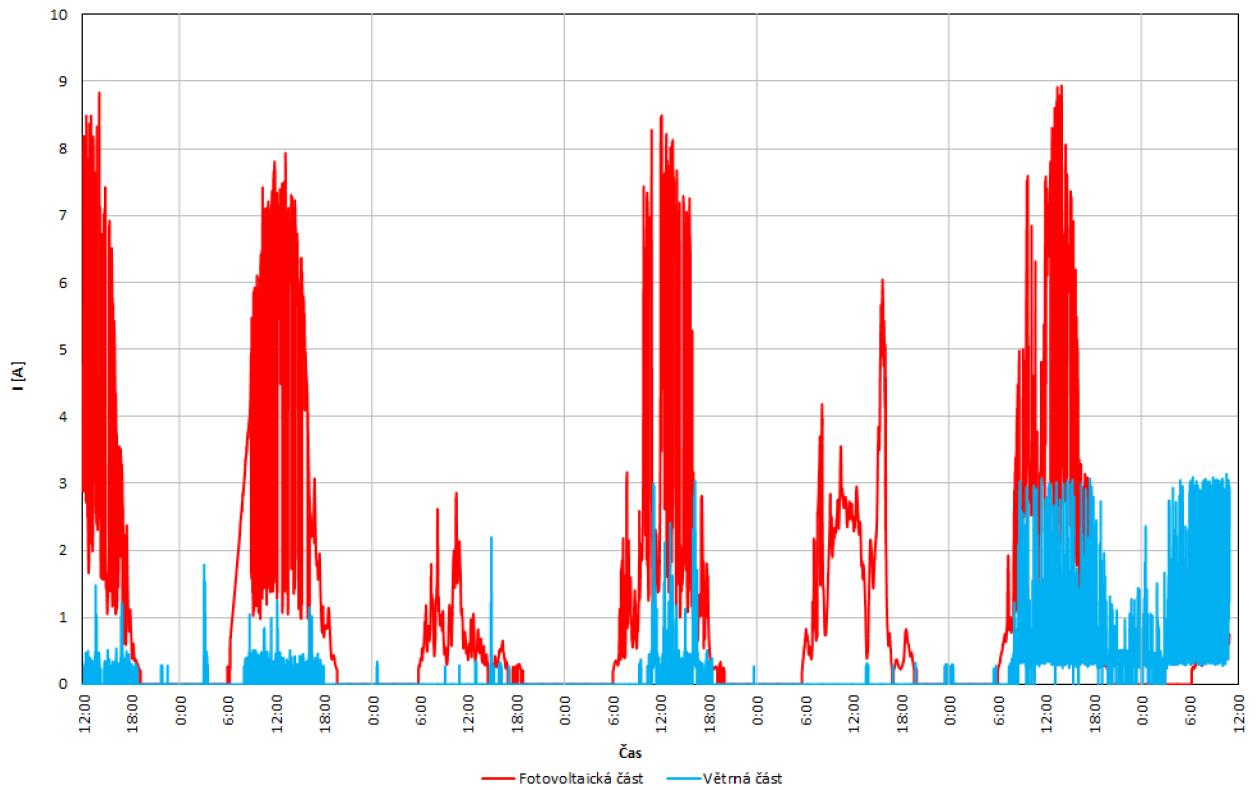
- okamžité hodnoty stejnosměrného napětí fotovoltaického panelu
- okamžité hodnoty stejnosměrného napětí akumulární baterie
- okamžité efektivní hodnoty střídavého napětí generátoru větrné části



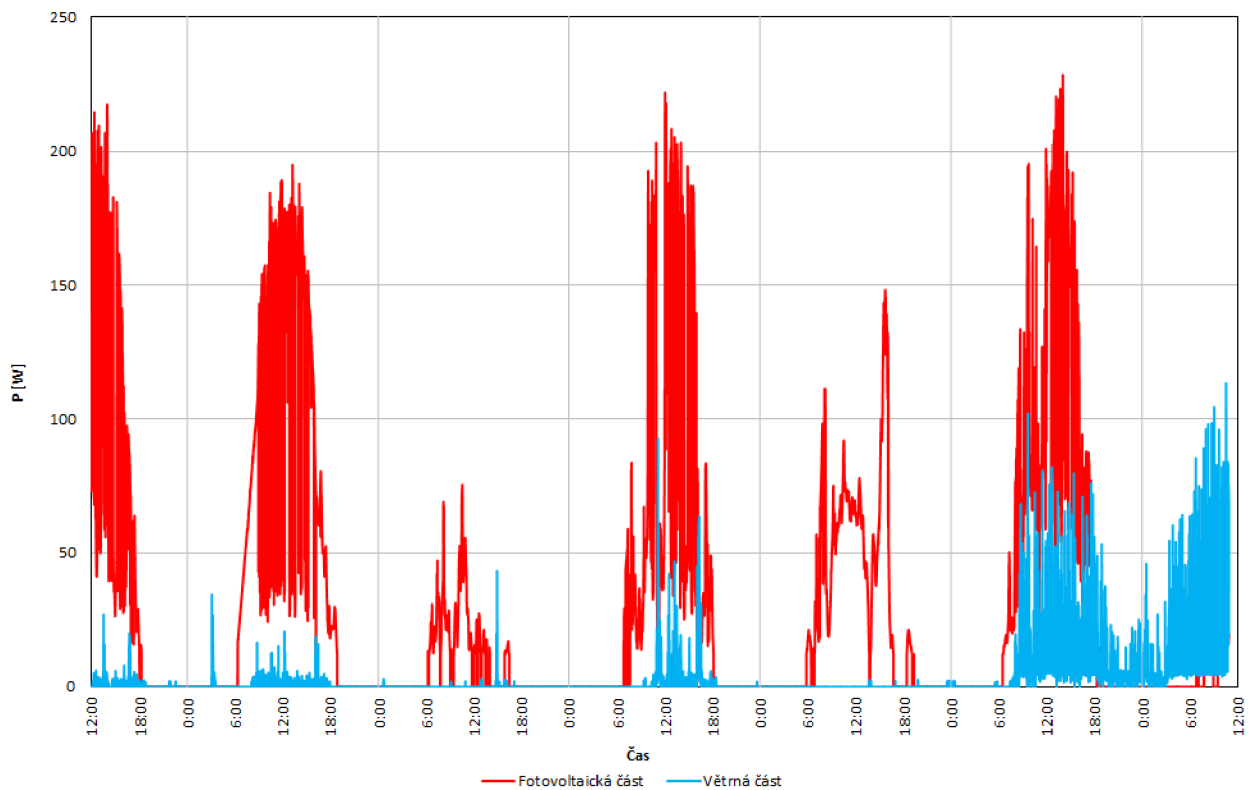
*Obr. 7-1 Časový průběh napětí*

Jelikož jsou pro následující část práce (stanovení podmínek pro návrh hybridního energetického systému) důležité hlavně příspěvky (vyrobená elektrická energie) jednotlivých zdrojů, zaměříme se primárně na ně. V níže zobrazených provozních charakteristikách (*Obr. 7-2*

a Obr. 7-3) jsou vykresleny časové závislosti okamžité hodnoty proudu a výkonu fotovoltaické a větrné části elektrárny.



Obr. 7-2 Časový průběh okamžitého proudu

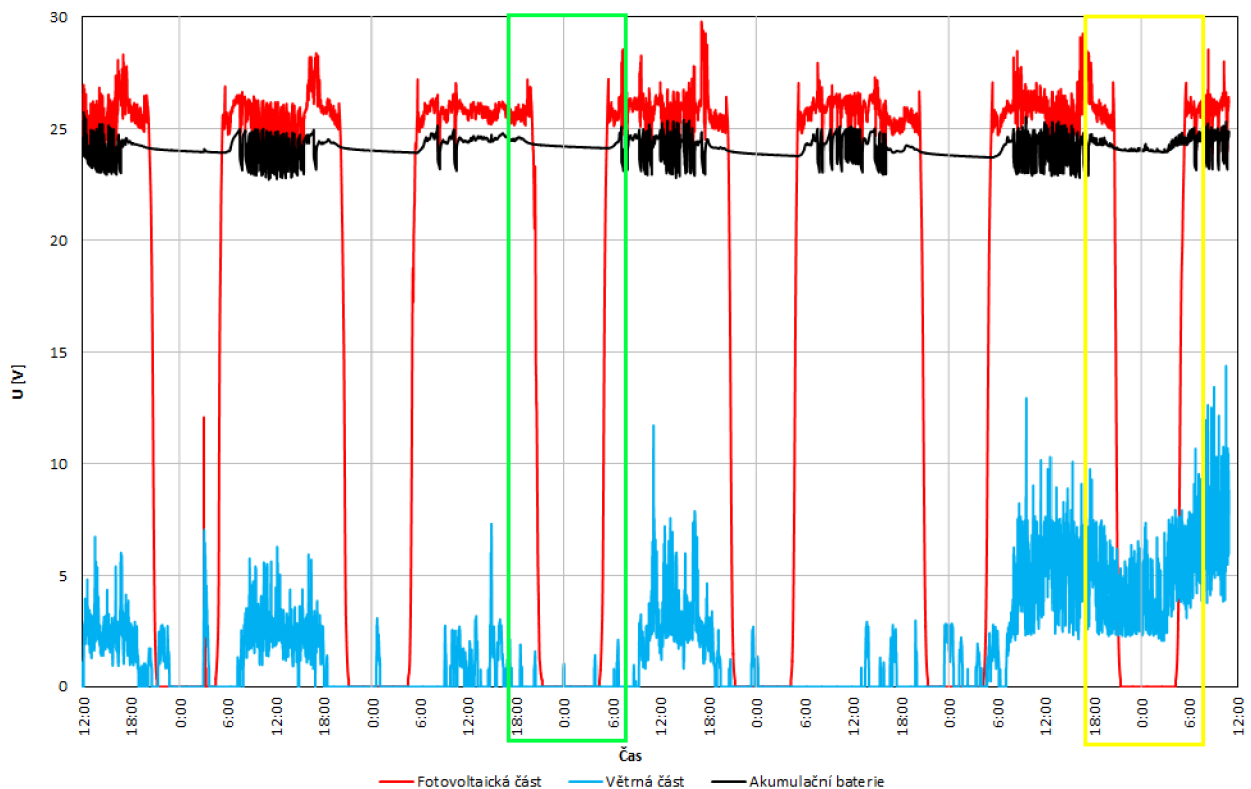


Obr. 7-3 Časový průběh okamžitého výkonu

Z časového průběhu okamžitého výkonu na *Obr. 7-3* je patrné že solární část elektrárny dosahuje zdatně vyšších výkonů ( $P_{\max FV} = 221,80 \text{ W}$ ) oproti části větrné ( $P_{\max FV} = 112,51 \text{ W}$ ).

## 7.2 Provozní charakteristiky během noci

V části 4.1 jsme uvedli, že sluneční a větrná energie jsou teoreticky komplementární, takže by během večera měla větrná část přebírat výrobu. Jelikož se v průběhu měření, během noci vyskytly meteorologické podmínky při kterých bylo bezvětří i větrno, tak je možné pozorovat vliv výroby z větrné části.

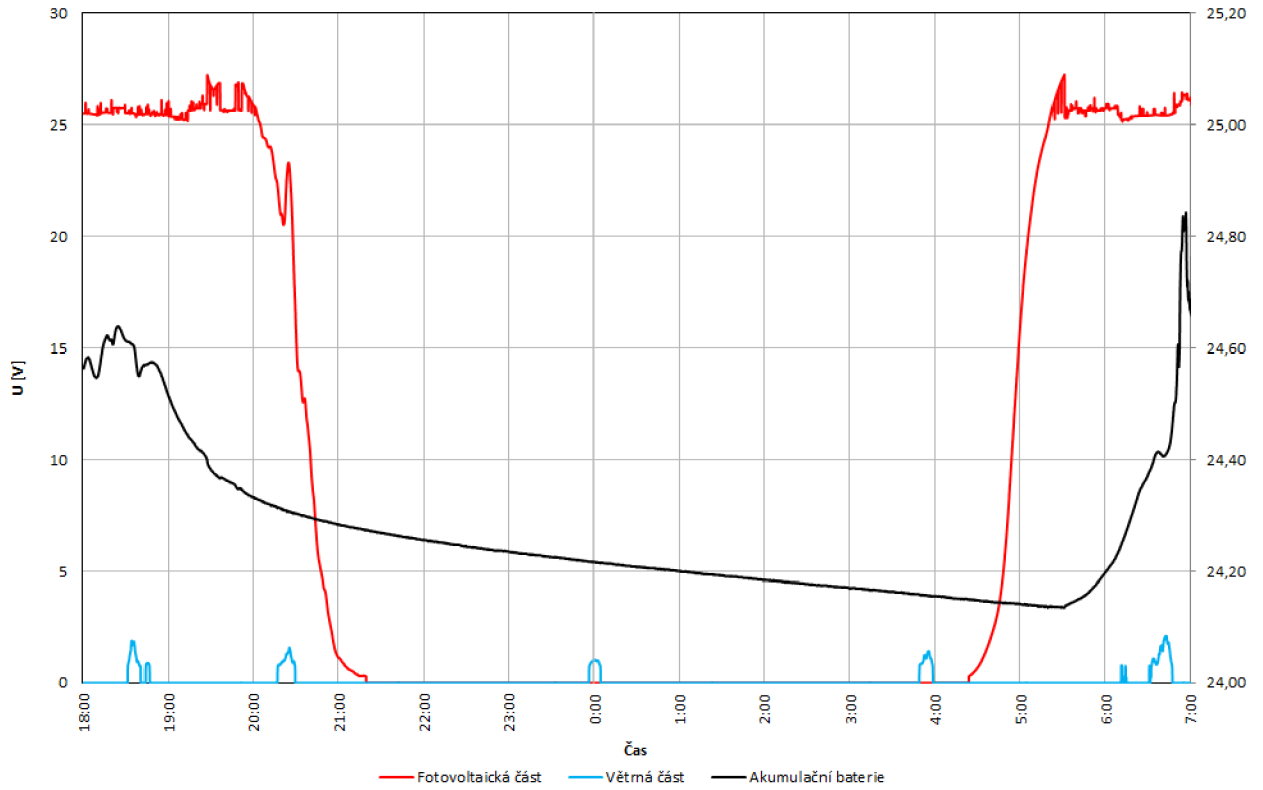


*Obr. 7-4 Časový průběh napětí s vyznačenými nocemi*

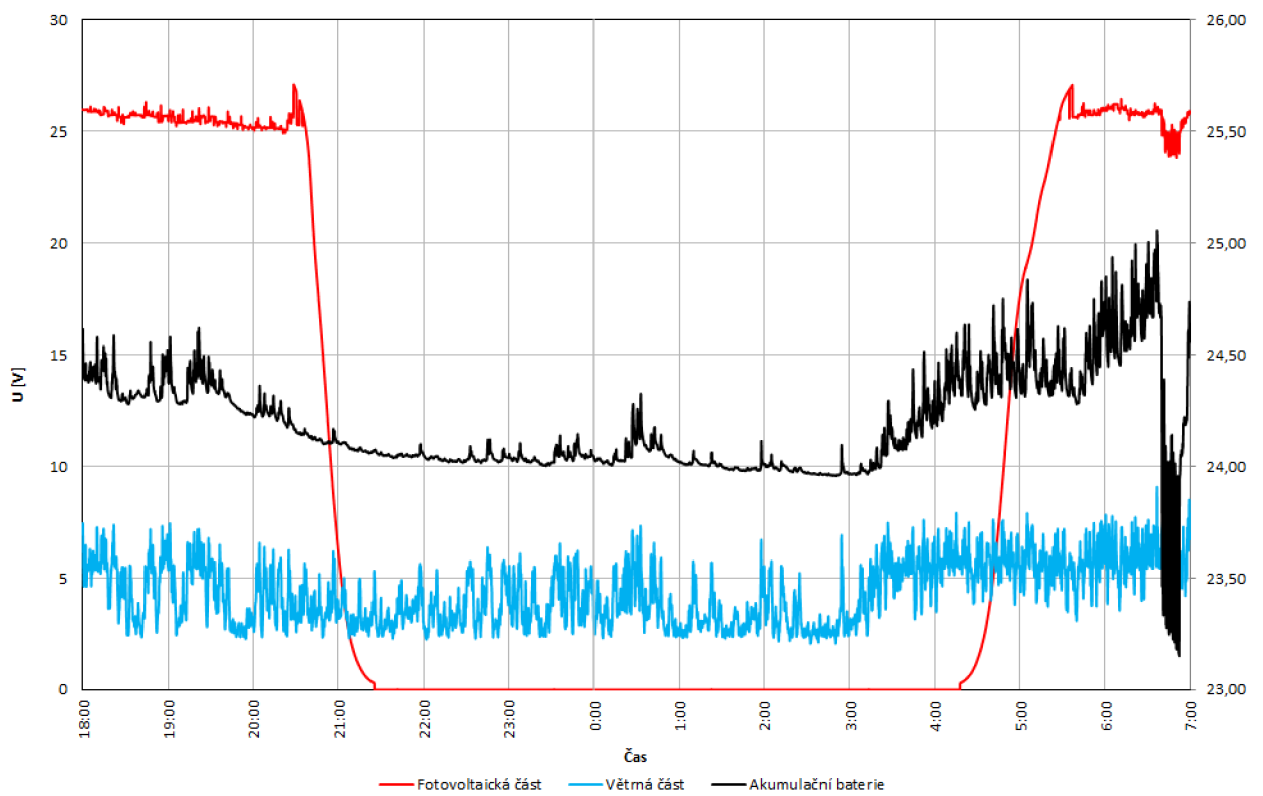
Na časovém průběhu napětí *Obr. 7-4* jsou vyznačeny vybrané oblasti – noci. V zelené části se jedná o časový úsek mezi 11.5 a 12.5, kdy bylo bezvětří. Ve žlutě vyznačené části je noc mezi 14.5 a 15.5, během které bylo větrno. Tyto dva časové intervaly ukazují vliv větrné části elektrárny na stav akumulace.

V průběhu na *Obr. 7-5* můžeme sledovat detail zeleně vyznačené části, tedy noci, při které bylo bezvětří. Je zde parné vybíjení akumulátorů z důvodu vlastní spotřeby aktivních částí hybridního systému.

Oproti tomu na *Obr. 7-6* je detail noci při které bylo větrné počasí. Můžeme zde vidět, že energie větru, je schopna úbytek způsobený vlastní spotřebou kompenzovat.



Obr. 7-5 Detail průběhu napětí během noci, bezvětrí



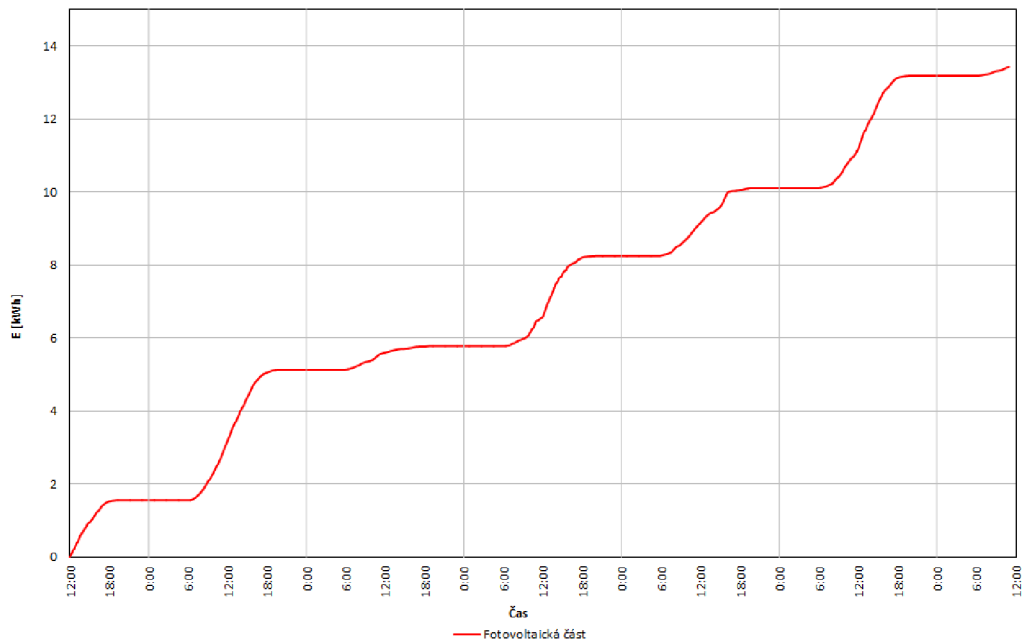
Obr. 7-6 Detail průběhu napětí během noci, větrno



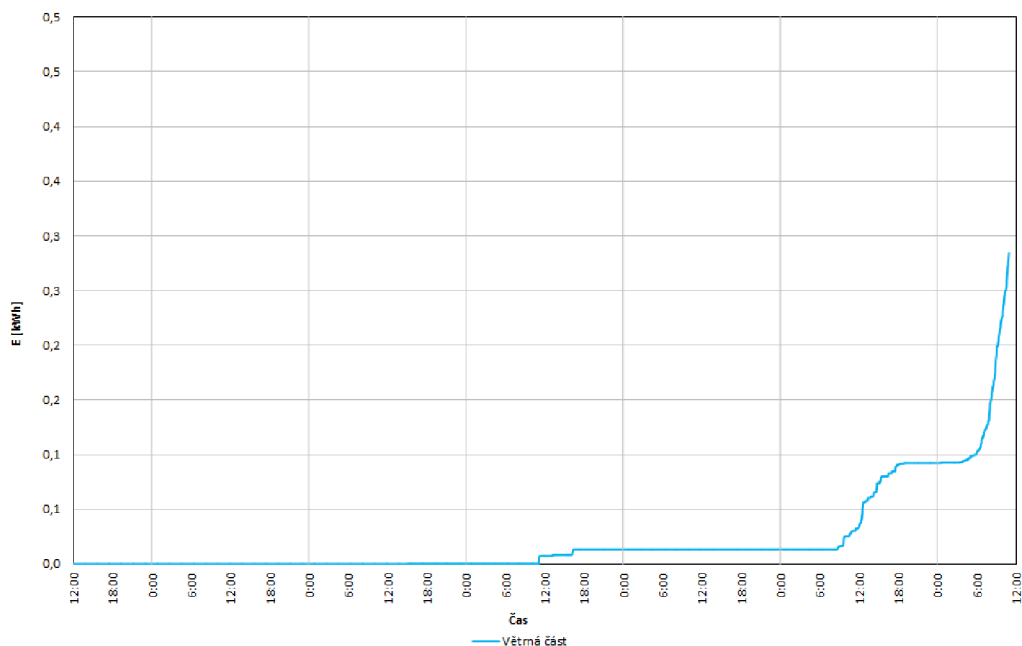
### 7.3 Vyrobená elektrická energie

Nejdůležitějším parametrem je bezesporu vyrobená elektrická energie. Nesledujeme však pouze její velikost, ale také stálost dodávky. V grafické závislosti (Obr. 7-7) je vykreslen časový průběh vyrobené elektrické energie fotovoltaické části elektrárny. Je patrné, že množství energie narůstá pravidelně každý den, cca od 6:00 do 18:00 hodin.

Naproti tomu elektrická energie z větrné části hybridního systému (Obr. 7-8) roste náhodně. Během prvních tří dnů nebyla pomocí větru vyrobena téměř žádná elektrická energie.

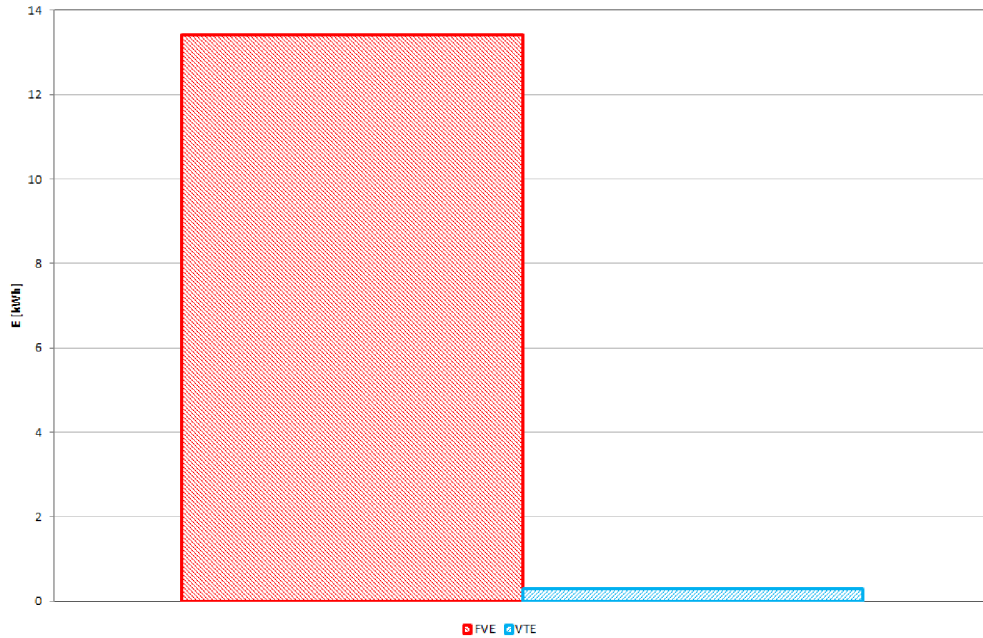


Obr. 7-7 Časový průběh vyrobené elektrické energie, fotovoltaická část



Obr. 7-8 Časový průběh vyrobené elektrické energie, větrná část

Z naměřených hodnot jsme vypočetli množství elektrické energie (viz. kapitola 5.1), které vyprodukují jednotlivé části hybridního energetického systému za dobu měření. Tyto vypočtené hodnoty jsou zobrazeny v grafu– Obr. 7-9. Z tohoto grafu je patrné, že za dobu měření trvajících šest dní, byl příspěvek solární části elektrárny několikanásobně vyšší oproti části větrné.



Obr. 7-9 Celkové množství vyrobené elektrické energie pomocí jednotlivých zdrojů

## 8 STANOVENÍ PODMÍNEK PRO NÁVRH HYBRIDNÍHO ENERGETICKÉHO SYSTÉMU

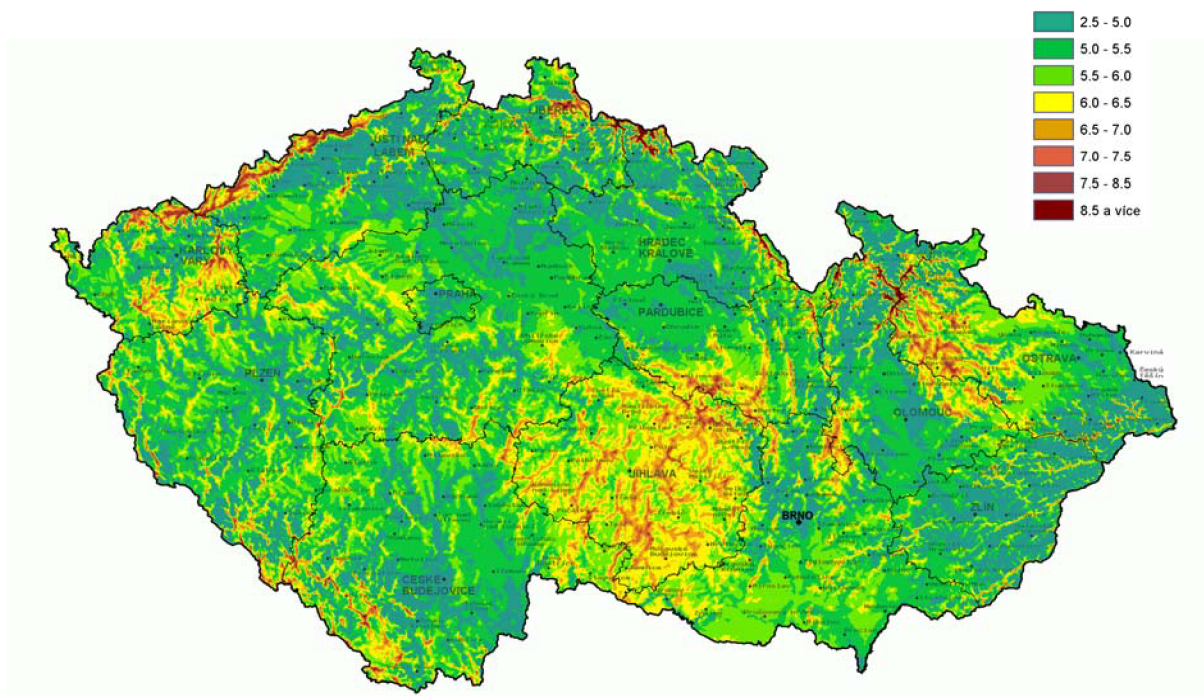
Při návrhu hybridního energetického systému využívající sluneční a větrnou energii, bereme v potaz několik faktorů. Mimo instalovaného výkonu jednotlivých částí hybridní elektrárny, vycházející ze spotřeby elektrické energie například rodinného domu, je nutné zohledňovat i zeměpisnou polohu. Umístění energetického systému výrazně ovlivňuje množství vyrobené elektrické energie sluneční a větrné části, což má také vliv na ekonomickou návratnost celého systému. Umístění zohledňují matematicko – fyzikální modely.

### 8.1 Energetické modely

#### 8.1.1 Energie větru v ČR

Průměrné rychlosti větru se určují pomocí matematicko – fyzikálních modelů. Mezi základní vstupní parametry patří meteorologická a účelová měření rychlosti a směru větru. Přesnost matematických modelů závisí na přesnosti jednotlivých měření a jejich četnosti.

Výstupem těchto modelů je takzvaná větrná mapa ČR (Obr. 8-1), která udává průměrnou rychlost větru v m/s, v rámci jednotlivých částí České republiky.

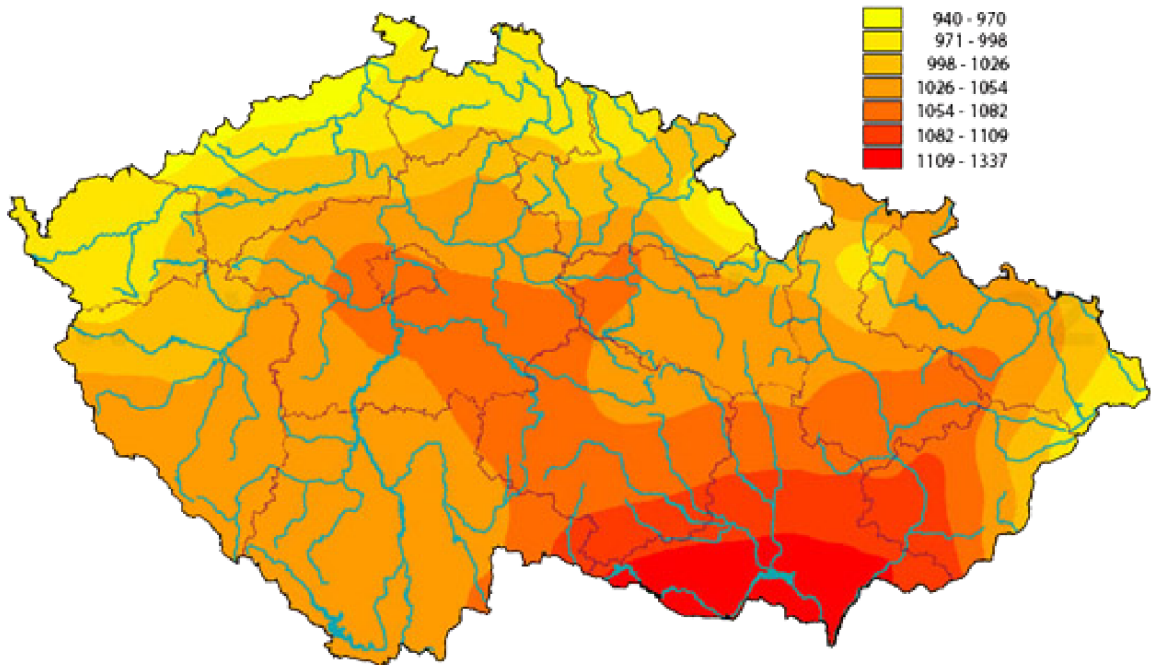


Obr. 8-1 Větrná mapa ČR [41]

Pomocí větrného modelu a hodnoty instalovaného výkonu je možné určit teoretickou roční výrobu elektrické energie.

### 8.1.2 Sluneční energie v ČR

Obdobně jako u větrné energie existuje matematicko – fyzikální model ročního úhrnu dopadajícího slunečního záření, který se nazývá solární mapa ČR (Obr. 8-2). Ta popisuje roční úhrn globálního slunečního záření v kWh/m<sup>2</sup>.



Obr. 8-2 Solární mapa ČR [42]

Vyrobená elektrická energie solárními panely nezávisí pouze na zeměpisné poloze, ale také na orientaci panelů a jejich sklonu. Proto byl vytvořen výpočetní nástroj – interaktivní mapa [43], pomocí které, při zadání vstupních údajů, určíme teoretickou hodnotu vyrobené elektrické energie.

Obr. 8-3 Náhled interaktivní mapy [43]

## 8.2 Naměřená data

V kapitole 7 byly stručně popsány provozní údaje měřeného hybridního energetického systému. Toto měření mělo za úkol ověření teoretických faktorů ovlivňující výrobu elektrické energie.

Měření bylo provedeno v měsíci květnu, kdy podle teoretických podkladů je nejnižší podíl vyrobené energie z větru, naopak nejvyšší ze slunce.

Elektrárna je umístěna na střeše budovy budovy SA T12, UEEN FEKT VUT, tedy v Brně Králově poli. Podle matematicko – fyzikálních modelů je toto umístění velmi vhodné pro využívání dopadající sluneční energie, která má hodnotu přibližně 1190 kWh/m<sup>2</sup>/rok [42]. Avšak podle větrné mapy ČR je umístění elektrárny pro využití větrné elektrárny nevhodné. Průměrná rychlost větru v této oblasti je nižší než 5 m/s [42]. Analýza, publikována ve výzkumné zprávě (Štekl et. al., 2002), dokazuje že výstavba malých větrných zdrojů (s nominálním výkonem 2,5 kW až 10 kW) v místech s roční průměrnou rychlosti nižší než 4,5 m·s<sup>-1</sup> (ve výšce 10 m) je nerentabilní.

## 8.3 Ekonomická návratnost

Každoročně je Energetickým regulačním úřadem (ERU) pro daný rok stanovena cena elektřiny vyrobená jednotlivými typy zdrojů (větrným  $C_{vte}$  a solárním  $C_{fve}$ ). Dalšími parametry jsou investiční náklady (INV), cena za údržbu zařízení ( $C_{údr}$ ) a doba životnosti ( $T_{živ}$ ).

Pomocí nástrojů uvedených v kapitole 8.1 je možné odhadnout množství vyrobené elektrické energie větrnou částí  $E_{vte}$  a fotovoltaickou částí  $E_{fve}$ . Jelikož výkon fotovoltaické části během doby své životnosti klesá, musíme tuto degradaci zohlednit. Pomocí rovnice (8.1) můžeme určit roční výdělek:

$$V_{rok} = C_{vte} \cdot E_{vte} + C_{fve} \cdot E_{fve} \cdot \left(1 - \frac{deg}{100}\right)^n \quad (\text{Kč/kWh, kWh/rok; Kč/rok}) \quad (8.1)$$

*Kde deg je hodnota degradace fotovoltaických panelů v % za jeden rok, n je rok provozu (při životnosti 20 let bude n 0~19)*

Následně z investičních nákladů, nákladů na údržbu a ročního výdělku spočteme dobu návratnosti:

$$T_{nav} = \frac{INV}{V_{rok} - C_{údr}} \quad (\text{Kč, Kč/rok, Kč/rok; rok}) \quad (8.2)$$

Nakonec můžeme vypočítat hodnotu výdělku hybridního energetického systému za dobu jeho životnosti:

$$V_{celk} = (T_{živ} - T_{nav}) \cdot (V_{rok} - C_{údr}) \quad (\text{Kč, Kč/rok, Kč/rok; rok}) \quad (8.3)$$

Pomocí tohoto zjednodušeného postupu je možné vyčíslit orientační ekonomickou návratnost investice.



## 9 ZÁVĚR

Diplomová práce v úvodní části obsahuje souhrn základních teoretických poznatků autora práce v oblasti způsobu výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů a jejich vzájemné spolupráce.

Tato práce pojednává o způsobu přeměny dopadajícího slunečního záření na elektrickou energii za využití fotovoltaického článku. Dále se zabývá základní strukturou a složením fotovoltaických článků. Je zde také popsána struktura složení fotovoltaických panelů. Ty jsou rozděleny na jednotlivé typy. U každého z nich jsou uvedeny jejich základní vlastnosti a také hlavní výhody a nevýhody. Pak jdou zde uvedeny dva základní způsoby vyvedení vyrobené elektrické energie k její spotřebě.

Další část práce se zabývá využitím větru v energetických systémech. Je zde popsán vznik větru, odvozen jeho výkon a energie v závislosti na jeho rychlosti. Jsou zde popsány jednotlivé principy přeměny větru na mechanickou energii a uvedeny konkrétní zařízení, používané při této přeměně. Dále je zde popsán způsob převedení točivého momentu na hřídeli větrného rotoru na energii elektrickou a její následné vyvedení ke spotřebě.

V diplomové části je definován hybridní energetický systém a jsou uvedeny důvody spolupráce energie větru a slunce. Jsou zde taky popsány jednotlivé části a parametry hybridní elektrárny, na které bylo provedeno praktické měření.

Následující část pojednává o způsobu měření, který se používá při měření provozních stavů FV panelů, které pracují v hybridních systémech. Jsou zde popsány důvody měření jednotlivých parametrů.

Hlavní část diplomové práce se zabývá návrhem funkčního měřicího systému pro komplexní identifikaci provozních veličin. Je zde popsána hardwarová (fyzická) část měřicího systému, pracující na platformě CompactRIO a způsob jeho připojení ke sledovanému hybridnímu systému. Součástí měřicího systému je program, vytvořený v prostředí LabVIEW. Práce seznámila čtenáře s jednotlivými částmi programu (čtení, zpracování, ukládání dat) a vysvětlila jejich funkci.

Bylo provedeno šestidenní zkušební měření provozních veličin a jejich následný stručný popis a vykreslení časových závislostí jednotlivých parametrů. Poté se vyčíslila vyrobená elektrická energie dodaná během intervalu měření. Byly porovnány příspěvky fotovoltaické a větrné části.

Na závěr diplomové práce byly stanoveny faktory, které jsou potřebné sledovat při návrhu hybridní elektrárny a způsob jejich vlivů na návrh. Je zde uvedena zjednodušená možnost výpočtu ekonomické návratnosti investice do energetického systému.

Diplomovou práci je možno dále rozšiřovat. Největší potenciál pro rozšíření má zejména vlastní měřicí systém. Ten je možné doplnit o další sledované veličiny, jako například hodnota rychlosti větru a další atmosférické veličiny. Nabízí se také možnost vytvoření komunikačního protokolu, databáze pro archivaci dat a jejich zobrazení v reálném čase, například pomocí webové stránky.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] LIBRA, Martin; POULEK, Vladislav. *Fotovoltaika : Teorie i praxe využití solární energie*. Vyd. 1. Příbram : ILSA, 2009. 190 s. ISBN 978-80-904311-0-2.
- [2] LIBRA, Martin; POULEK, Vladislav. *Elektro: Odborný časopis pro elektrotechniku* [online]. 2010 [cit. 2014-09-20]. Konstrukce a výroba fotovoltaických článků a panelů. Dostupné z WWW: <[http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=40646](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=40646)>.
- [3] BENDA, Vítězslav. *Tzbinfo* [online]. Praha : 25.9.2006 [cit. 2014-09-20]. Solární články z krystalického křemíku - základní technologie současné fotovoltaiky. Dostupné z WWW: <<http://www.tzb-info.cz/3553-solarni-clanky-z-krystalickeho-kremiku-zakladni-technologie-soucasne-fotovoltaiky>>.
- [4] *ROAD Energy : Fotovoltaické panely* [online]. 2010 [cit. 2014-09-20]. Technologie výroby panelů. Dostupné z WWW: <<http://www.roadenergy.eu/d32-technologie-vyroby-panelu-html.html>>.
- [5] *Czech RE Agency* [online]. 2007 [cit. 2014-10-15]. Fotovoltaika pro každého. Dostupné z WWW: <<http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fotovoltaika#fv>>.
- [6] *EKO - EKO TOP* [online]. 2010 [cit. 2014-10-15]. Fotovoltaika na střeše, solární panely. Dostupné z WWW: <<http://www.infratopeni-ekoekotop.cz/Fotovoltaika.html>>.
- [7] *SOLAREN s.r.o.* [online]. 2009 [cit. 2014-10-15]. Rozdělení modulů - monokrystalické / polykrystalické / amorfnní moduly. Dostupné z WWW: <<http://www.solarni-systemy.eu/solaren/fr.asp?tab=solaren&id=14&burl=&pt=SO>>.
- [8] ČERVINKA, P. *Porovnání výkonnosti fotovoltaických panelů v podmínkách ČR*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 66 s. Vedoucí diplomové práce Ing. David Pleha.
- [9] *ENERG SERVIS, a.s.* [online]. 2009 [cit. 2014-11-13]. Fotovoltaika-princip. Dostupné z WWW: <<http://www.energyservis.cz/cs/fotovoltaika/fotovoltaika-princip/>>.
- [10] *Ústav elektroenergetiky* [online]. 2007 [cit. 2014-11-13]. Online měření. Dostupné z WWW: <<http://www.ueen.feec.vutbr.cz/cz/index.php/online-mereni>>.
- [11] ŠPRINGL, Vít. *HW.cz : Vše o elektronice a programování* [online]. 2004 [cit. 2014-04-20]. Měření teploty - polovodičové odporové senzory teploty. Dostupné z WWW: <<http://www.hw.cz/Teorie-a-praxe/Dokumentace/ART1141-Mereni-teploty---polovodicove-odporove-senzory-teploty.html>>.
- [12] *ATERM* [online]. 2009 [cit. 2014-11-13]. Měření a regulace teploty. Dostupné z WWW: <<http://www.aterm.cz/Teperm.htm>>.
- [13] *Pico Technology : For all your oscilloscope and data acquisition needs* [online]. 2007 [cit. 2014-11-13]. PT100 sensors. Dostupné z WWW: <<http://www.picotech.com/applications/pt100.html>>.
- [14] WILLIAMS, Jim. Linear technology : Thermocouple measurement. In *Linear Technology Application Note*. [s.l.] : [s.n.], 1988. s. 20. Dostupné z WWW: <<http://cds.linear.com/docs/Application%20Note/an28f.pdf>>.

- [15] LIEW, Soo Chin. CRISP : *Centre for Remote Imaging, Sensing and Processing* [online]. 2006 [cit. 2014-11-13]. Principles of Remote Sensing. Dostupné z WWW: <<http://www.crisp.nus.edu.sg/~research/tutorial/em.htm>>.
- [16] *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. 1. vyd. Praha: Vydalo České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [17] Solar Power Solution. *Monocrystalline Solar Panel, Multicrystalline Solar Cell, Multicrystalline Silicon Wafer* [online]. 2011 [cit. 2014-12-24]. Dostupné z: <http://etwsample.com/profile/solar-product-application/163081/0>
- [18] Všeobecná cirkulace atmosféry a místní větry. *Ceska společnost pro větrnou energii* [online]. 2008 [cit. 2014-12-24]. Dostupné z: <http://csve.sweb.cz/odkazy/Info/Met/druhy.htm>
- [19] Beaufortova stupnice síly větru. *Czech Hydrometeorological Institute* [online]. 2008 [cit. 2014-12-24]. Dostupné z: [http://old.chmi.cz/meteo/olm/Let\\_met/beaufort/Beaufortova\\_stupnice.htm#](http://old.chmi.cz/meteo/olm/Let_met/beaufort/Beaufortova_stupnice.htm#)
- [20] Malá větrná elektrárna pro malý rodinný domek bez přípojky el. energie. *Plawiki* [online]. 2007 [cit. 2014-12-24]. Dostupné z: <http://vrecion.plarmy.org:8081/cad/galerie/2003/mcad/PosekanyTomas/vetrna.htm>
- [21] *Savoniuův rotor: Návod na stavbu*. 1. české. Ostrava-Plesná: HEL, 2005. ISBN 3-922964-48-6.
- [22] Der Savonius-Rotor. *Achmed Khammas - Das Buch der Synergie* [online]. 2007 [cit. 2014-12-24]. Dostupné z: [http://www.buch-der-synergie.de/c\\_neu\\_html/c\\_08\\_08\\_windenergie\\_senkrechtachser.htm](http://www.buch-der-synergie.de/c_neu_html/c_08_08_windenergie_senkrechtachser.htm)
- [23] VĚTRNÁ ENERGIE, EOLICKÁ ENERGIE. *VŠCHT – Vysoká škola chemicko-technologická v Praze: Vítejte ve světě moderní chemie* [online]. [cit. 2014-12-24]. Dostupné z: [http://www.vscht.cz/ktt/studium/zdrene/3.0\\_V%ectrn%e1\\_energie.pdf](http://www.vscht.cz/ktt/studium/zdrene/3.0_V%ectrn%e1_energie.pdf)
- [24] Rotory s vertikální osou. *Ekodům* [online]. 2003 [cit. 2014-12-24]. Dostupné z: <http://www.ekodum.cz/energy/wind/vertikal.php>
- [25] Větrné elektrárny. *Alternativní zdroje energie* [online]. 2009 [cit. 2014-12-24]. Dostupné z: <http://www.alternativni-zdroje.cz/vetrne-elektrarny.htm>
- [26] Tidal Turbines. *Society of Oxford University Engineers* [online]. 2008 [cit. 2014-12-24]. Dostupné z: <http://www.soue.org.uk/souenews/issue7/tidalturbines.html>
- [27] TOPOLÁNEK, David a Jan ŠLEZINGER. VUT FEKT. *Systém malé větrné elektrárny s axiální osou rotace: Popis měřicího systému a parametrů větrné elektrárny*. Brno, 2009.
- [28] Transformace energie v lopatkových strojích. *Transformační technologie* [online]. 2012 [cit. 2014-12-24]. Dostupné z: <http://www.transformacni-technologie.cz/transformace-energie-v-lopatkovych-strojich.html>
- [29] Jak na to - Větrné elektrárny. *Wodasign global* [online]. 2011 [cit. 2014-12-24]. Dostupné z: <http://www.wodasound.com/jaknato/wind/wdsvitr.htm>



- [30] Hybridní soustava větrné elektrárny a solárních fotovoltaických článků. LUŤCHA, Josef. *Časopis stavebnictví | Expodata Brno* [online]. 2009 [cit. 2014-12-24]. Dostupné z: [http://www.casopisstavebnictvi.cz/hybridni-soustava-vetrne-elektrarny-a-solarnich-fotovoltaickych-clanku\\_A1906\\_I26](http://www.casopisstavebnictvi.cz/hybridni-soustava-vetrne-elektrarny-a-solarnich-fotovoltaickych-clanku_A1906_I26)
- [31] Dimenzování hybridních systémů fotovoltaika-vítr: Zjednodušený model pro předběžné rozhodování. MARKVART. *Obnovitelná energie a úspory energie - TZB-info* [online]. 2012 [cit. 2014-12-24]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/8747-dimenzovani-hybridnich-systemu-fotovoltaika-vitr>
- [32] *Bornay* [online]. 2013 [cit. 2014-12-24]. Dostupné z: <http://www.bornay.com/>
- [33] Technické prostředky automatizace. OTTE, Lukáš. *INNET - HomeL - homel.vsb.cz* [online]. 2007 [cit. 2014-12-24]. Dostupné z: <http://homel.vsb.cz/~ott007/TPA-Otte.htm>
- [34] Hi-Energy. *Hi-VAWT* [online]. [cit. 2015-01-22]. Dostupné z: [http://www.hi-vawt.com.tw/downloads/DS300\\_Specification%20-100610.pdf](http://www.hi-vawt.com.tw/downloads/DS300_Specification%20-100610.pdf)
- [35] MPPT 2010. *ENERGY FOREVER s.r.o.* [online]. [cit. 2015-01-22]. Dostupné z: [http://www.energyforever.cz/data/eshop\\_sym/doc/737-34/manual-steca-solarix-mppt.pdf](http://www.energyforever.cz/data/eshop_sym/doc/737-34/manual-steca-solarix-mppt.pdf)
- [36] Solární akumulátory. *FG forte*. [online]. [cit. 2015-01-29]. Dostupné z: <http://www.fg-forte.cz/cz/produkt/264-sol02fg12100dg-solarni-akumulator-gelovy-12v100ah-fg12100dg.aspx>
- [37] Omniksol M248. *Obchodsolar* [online]. [cit. 2015-01-29]. Dostupné z: [http://www.obchodsolar.cz/fotky13919/fotov/\\_ps\\_582Datovy-list-Micro-Omniksol-248.pdf](http://www.obchodsolar.cz/fotky13919/fotov/_ps_582Datovy-list-Micro-Omniksol-248.pdf)
- [38] WILLIAMS, Jim . Linear technology : Thermocouple measurement. In *Linear Technology Application Note*. [s.l.] : [s.n.], 1988. s. 20. Dostupné z WWW: <<http://cds.linear.com/docs/Application%20Note/an28f.pdf>>.
- [39] *National Instruments Česká Republika a Slovensko* [online]. 2015 [cit. 2015-02-15]. Dostupné z: <http://czech.ni.com/>
- [40] HRDÝ, B. Řídící a měřicí systém pro hybridní energetický zdroj. Diplomová práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2014, 59 stran.
- [41] Větrná mapa. *Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v.v.i* [online]. [cit. 2015-03-30]. Dostupné z: <http://www.ufa.cas.cz/struktura-ustavu/oddeleni-meteorologie/projekty-egp/vetrna-energie/vetrna-mapa.html>
- [42] Fotovoltaika - sluneční záření v České republice. *Isofen Energy* [online]. [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: <http://www.isofenenergy.cz/Slunecni-zareni-v-CR.aspx>
- [43] PV potential estimation utility. *Photovoltaic Geographical Information System* [online]. [cit. 2015-04-21]. Dostupné z: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>
- [44] Návratnost fotovoltaické elektrárny. *Isofen Energy* [online]. [cit. 2015-5-3]. Dostupné z: <http://www.isofenenergy.cz/navratnost-fotovoltaicke-elektrarny.aspx>