

**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

**NÁVRH METODIKY ZPRACOVÁNÍ A  
VYHODNOCENÍ DLOUHODOBÉHO MĚŘENÍ  
NA FV PANELU**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

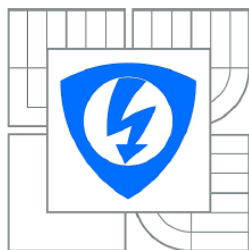
BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**TOMÁŠ ŽÁK**

**BRNO 2009**



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

**Student:** Tomáš Žák

**ID:** 106897

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2009/2010

## NÁZEV TÉMATU:

**Návrh metodiky zpracování a vyhodnocení dlouhodobého měření  
na FV panelu**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Princip fotovoltaické přeměny v FV článcích
2. Současný stav řešené problematiky
3. Systém dlouhodobého měření a záznamu dat na fotovoltaických panelech na UEEN
4. Návrh rozšíření metodiky zpracování a vyhodnocení naměřených dat z dlouhodobého měření
5. Závěr

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 8.2.2010

**Termín odevzdání:** 31.5.2010

**Vedoucí práce:** Ing. Jan Macháček, Ph.D.

**doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

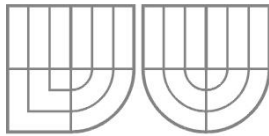
Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných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

Bibliografická citace práce:

ŽÁK, T. *NÁVRH METODIKY ZPRACOVÁNÍ A VYHODNOCENÍ DLOUHODOBÉHO MĚŘENÍ NA FV PANELU*. BRNO: VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ, 2010. 63 s. VEDOUcí BAKALÁŘSKÉ PRÁCE ING. JAN MACHÁČEK, PH.D.

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

.....



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**



**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií**

**Ústav elektroenergetiky**



**Bakalářská práce**

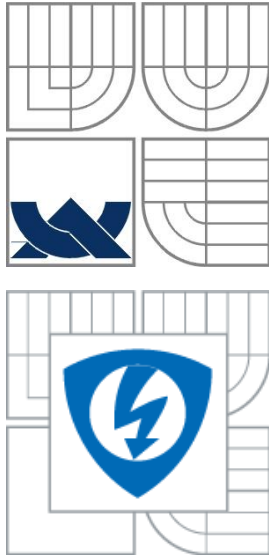
# **Návrh metodiky zpracování a vyhodnocení dlouhodobého měření na FV panelu**

**Tomáš Žák**

**vedoucí: Ing. Jan Macháček, Ph.D.**

**Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2000**

**Brno**



**BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**

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

**BACHELOR'S THESIS**

# **Draft methodology for processing and evaluation of long-term measurements on PV Panel**

by

**Tomáš Žák**

**Supervisor: Ing. Jan Macháček, Ph.D.**

**Brno University of Technology, 2009**

**Brno**

## ABSTRAKT

Tato bakalářská práce si dává za cíl rozebrat teoretický, respektive fyzikální základ FV článků a navrhnout rozšiřující měření pro modernizovanou on-line laboratoř. V úvodních kapitolách se tak tato práce zabývá samotnou teorií fungování fotovoltaické přeměny slunečné energie na elektrickou energii. Podrobně je zde rozebrána teorie p-n přechodu, která je pro hlubší pochopení hodně důležitá, a následně i teplotní závislost FV panelu. Tedy negativní vliv rostoucí teploty na výstupní výkon. Samotným přínosem této práce je pak kromě sumarizace současného stavu a státních podpor pro aktuální rok i návrh rozšíření měření on-line laboratoře, která by se v rámci Ústavu elektroenergetiky měla modernizovat. Práce tak obsahuje kromě konkrétních návrhů na grafické závislosti s významnou vypovídací schopností i případné další rozšíření laboratoře o měřicí či měřené prvky, které by pomohly k ještě hlubšímu pochopení dané problematiky. Zejména pak k pochopení na jakých faktorech výrazně nebo méně výrazně závisí výstupní výkon FV panelu, který je asi nejdůležitějším prvkem.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** Fotovoltaika; fotovoltaický jev; fotovoltaický článek; fotovoltaické panely; obnovitelné zdroje energie; teplotní závislost fotovoltaických panelů; sluneční energie; solární energie; on-line laboratoř; měření fotovoltaických panelů;

**ABSTRACT**

This bachelor thesis aims to analyse the physical theory behind the photovoltaic cells and propose extension measurements for a modernised on-line laboratory. The first part of this thesis describes the theory of the photovoltaic conversion of solar energy into electricity. The p-n junction is described in detail because of its importance for a thorough understanding of the subject. The temperature dependence of a photovoltaic panel, i.e. the negative impact of rising temperature on the output power, is also described here. The contributions of this thesis include a summary of the current situation and the system of state subsidies for the current year as well as a proposal for an extension of measurements in an on-line laboratory, which is to be modernised, at the Department of Power Engineering. Therefore, the thesis includes some specific proposals of graphic dependence, which have a significant information value, and a possible further extension of the laboratory with new measuring and measured elements, which would be helpful for deeper understanding of the subject. In particular, it would be useful for understanding which factors influence the output power of a photovoltaic panel, both significantly and less significantly, which is undoubtedly the most important point.

**KEY WORDS:**

Photovoltaics; photovoltaic effect; photovoltaic cell; photovoltaic panels; renewable energy sources; temperature dependence of photovoltaic panels; solar energy; on-line laboratory; measuring of photovoltaic panels;

## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych poděkoval svému vedoucímu Ing. Janu Macháčkovi, Ph.D. za veškerou podporu při tvorbě této bakalářské práce.

## OBSAH

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>11</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>12</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>13</b>
<b>1 ÚVOD.....</b>	<b>16</b>
<b>1.1 ENERGETICKÁ SITUACE VE SVĚTĚ.....</b>	<b>16</b>
<b>1.2 SLUNCE, ŽIVOTADÁRNÁ HVĚZDA.....</b>	<b>17</b>
1.2.1 SPEKTRUM DOPADAJÍCÍHO ZÁŘENÍ .....	17
1.2.2 VLIV ATMOSFÉRY NA SLUNEČNÍ ZÁŘENÍ.....	18
<b>1.3 NOVÝ ZDROJ ENERGIE .....</b>	<b>20</b>
<b>1.4 SOLÁRNÍ KOLEKTORY.....</b>	<b>21</b>
1.4.1 ROZDĚLENÍ SOLÁRNÍCH SYSTÉMŮ .....	22
<b>2 PRINCIP FOTOVOLTAICKÉ PŘEMĚNY VE FV ČLÁNCÍCH.....</b>	<b>23</b>
<b>2.1 FOTOELEKTRICKÝ JEV .....</b>	<b>23</b>
<b>2.2 POLOVODIČOVÁ TECHNOLOGIE .....</b>	<b>25</b>
2.2.1 STRUKTURA ATOMU .....	25
2.2.2 VLASTNÍ POLOVODIČ.....	27
2.2.3 NEVLASTNÍ POLOVODIČ TYPU N.....	29
2.2.4 NEVLASTNÍ POLOVODIČ TYPU P .....	30
<b>2.3 POLOVODIČOVÁ DIODA JAKO FV ČLÁNEK .....</b>	<b>31</b>
<b>3 CHARAKTERISTIKA SOUČASNÉHO STAVU ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY .....</b>	<b>35</b>
<b>3.1 PRAKTICKÉ VYUŽITÍ FV ČLÁNKŮ.....</b>	<b>35</b>
<b>3.2 DRUHY FV ČLÁNKŮ .....</b>	<b>35</b>
3.2.1 FV ČLÁNKY NA BÁZI KŘEMÍKU.....	35
3.2.2 NEKŘEMÍKOVÉ FV ČLÁNKY .....	36
<b>3.3 EKONOMIKA FV SYSTÉMŮ.....</b>	<b>38</b>
3.3.1 STÁTNÍ PODPORA FV ELEKTRÁREN .....	39
3.3.2 STÁTNÍ PODPORA FV ELEKTRÁREN ČR VERSUS EVROPA .....	40
<b>3.4 STRUKTURA ENERGETICKÝCH NÁKLADŮ NA VÝROBU FV PANELŮ.....</b>	<b>41</b>
<b>3.5 VÝHODY A NEVÝHODY FV SYSTÉMŮ .....</b>	<b>43</b>
3.5.1 VÝHODY FV SYSTÉMŮ .....	43
3.5.2 NEVÝHODY FV SYSTÉMŮ .....	43
<b>4 VLIV TEPLoty NA KVALITATIVNÍ PARAMETRY FV ČLÁNKŮ.....</b>	<b>44</b>
<b>4.1 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ VÝKON FV ČLÁNKŮ .....</b>	<b>44</b>
<b>4.2 FYZIKÁLNÍ PODSTATA ZMĚNY ELEKTRICKÝCH PARAMETRŮ FV ČLÁNKŮ V ZÁVISLOSTI NA TEPLOTĚ .....</b>	<b>45</b>
4.2.1 VLIV TEPLoty NA PARAMETRY ČLÁNKŮ .....	46
<b>5 MĚŘÍCÍ SYSTÉM V RÁMCI ÚSTAVU ELEKTROENERGETIKY .....</b>	<b>49</b>
<b>5.1 POPIS MĚŘÍCÍHO SYSTÉMU .....</b>	<b>49</b>

---

5.2 ON-LINE MĚŘENÍ.....	49
<b>6 NÁVRH ROZŠIŘUJÍCÍHO ZPRACOVÁNÍ HODNOT .....</b>	<b>51</b>
6.1 VÝKONOVÁ ZÁVISLOST NA TEPLOTĚ PANELU V ČASE .....	51
6.2 VÝKONOVÁ ZÁVISLOST NA TEPLOTĚ VZDUCHU V ČASE .....	52
6.3 VÝKONOVÁ ZÁVISLOST NA TEPLOTNÍM KOEFICIENTU V ČASE .....	53
6.4 VÝKONOVÁ ZÁVISLOST NA INTENZITĚ DOPADAJÍCÍHO ZÁŘENÍ V ČASE.....	54
6.5 NÁVRHY DALŠÍCH GRAFICKÝCH ZÁVISLOSTÍ.....	54
<b>7 ZÁVĚR.....</b>	<b>57</b>
7.1 SOUČASNÝ STAV.....	57
7.2 SHRUTÍ VĚDECKÝCH POZNATKŮ PRÁCE.....	57
7.3 ZÁVĚRY PRÁCE, JEJÍ PŘÍNOS A DALŠÍ POSTUP .....	57
<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>58</b>
<b>PŘÍLOHA A TISKOVÁ ZPRÁVA ERÚ, 16. BŘEZNA 2010.....</b>	<b>60</b>
<b>PŘÍLOHA B EVROPA Z POHLEDU VÝNOSU FV ELEKTRÁREN .....</b>	<b>61</b>
<b>PŘÍLOHA C SPEKTRÁLNÍ ANALÝZA SLUNEČNÍHO ZÁŘENÍ.....</b>	<b>62</b>
<b>PŘÍLOHA D FV SYSTÉM V RÁMCI UEEEN FEKT VUT BRNO.....</b>	<b>63</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1-1 Spektrum slunečního záření při vstupu do atmosféry a na zemském povrchu [2].</i>	18
<i>Obr. 1-2 Souvislost AM faktoru a výšky slunce nad obzorem [2].</i>	19
<i>Obr. 1-4 Graf počtu obyvatel a spotřeby energie na jednotlivých kontinentech.</i>	21
<i>Obr. 1-5 Řez kolektorem Heliostar H300 [4].</i>	22
<i>Obr. 2-1 Závislost energie fotonu na vlnové délce [6].</i>	24
<i>Obr. 2-2 Zařízení pro studium fotoelektrického jevu [5].</i>	25
<i>Obr. 2-3 Jednoduchý pásový model pevné látky [7].</i>	26
<i>Obr. 2-4 Vznik páru elektron díra ve vlastním polovodiči [7].</i>	27
<i>Obr. 2-5 Model elektronů a děr v případě vlastního polovodiče [6].</i>	28
<i>Obr. 2-6 Krystalová mřížka Si s jedním atomem P a pásový model polovodiče typu N [7].</i>	29
<i>Obr. 2-7 Model elektronů a děr v případě polovodiče typu N [6].</i>	30
<i>Obr. 2-8 Krystalová mřížka Si s jedním atomem B a pásový model polovodiče typu P [7].</i>	31
<i>Obr. 2-9 Model polovodičového přechodu P-N [6].</i>	32
<i>Obr. 2-10 Model energetických hladin FV článku a fotovoltaické přeměny energie [6].</i>	33
<i>Obr. 2-11 Závislost napětí naprázdno na osvětlení u FV panelu [6].</i>	34
<i>Obr. 3-1 Výše výkupních cen v rámci Evropské unie [16].</i>	40
<i>Obr. 3-2 Potřebná energie k přípravě materiálů pro výrobu FV panelu o výkonu 1 kW<sub>p</sub> [6].</i>	41
<i>Obr. 3-3 Poměry spotřeba energie při výrobě FV panelu o výkonu 1 kW<sub>p</sub> [6].</i>	42
<i>Obr. 4-1 Spektrum slunečního záření po průchodu atmosférou [6].</i>	44
<i>Obr. 4-2 VA charakteristika FV článku při různých intenzitách osvětlení a t=50 °C [6].</i>	45
<i>Obr. 4-3 Model obvodu solárního článku obsahujícího parazitní sériový a paralelní odpor [12].</i>	46
<i>Obr. 4-4 Vliv teploty na VA charakteristiku FV článku při 1000 W/m<sup>2</sup> [13].</i>	46
<i>Obr. 4-5 Závislost poměrů účinnost pro FV článek před a po ozáření [9].</i>	48
<i>Obr. 5-1 Roční výtěžek z FV panelů za jednotlivé roky provozu [19].</i>	50
<i>Obr. 6-1 Výkonová závislost na teplotě panelu v čase.</i>	51
<i>Obr. 6-2 Výkonová závislost na teplotě okolního vzduchu v čase.</i>	52
<i>Obr. 6-3 Výkonová závislost na teplotním koeficientu v čase.</i>	53
<i>Obr. 6-4 Výkonová závislost na intenzitě dopadajícího záření v čase.</i>	54
<i>Obr. 6-5 Návrhy rozšiřujících grafických závislostí pro on-line měření FV panelu.</i>	55

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 3-1 Výnosy nízkorizikových investic [11].....</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 3-2 Státní podpora FV systémů [15]. ....</i>	<i>40</i>

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Veličina	Značka jednotky
AM faktor	<b>A</b> ir <b>M</b> ass faktor	[-]
CdTe	telurid kadmia	
CFC	freony	
CO <sub>2</sub>	oxid uhličitý	
Cu(InGa)Se <sub>2</sub>	diselenid mědi india a galia (CIGS)	
CuInSe <sub>2</sub>	diselenid mědi a india (CIS)	
E	energie	[J]
E <sub>A</sub>	akceptorová hladina	[eV]
E <sub>C</sub>	energie vodivostního pásu	[eV]
E <sub>D</sub>	donorová hladina	[eV]
E <sub>G</sub>	šířka zakázaného pásu	[eV]
E <sub>g0</sub>	šířka zakázaného pásu polovodiče získanou extrapolováním do nulové teploty	[eV]
E <sub>kmax</sub>	maximální kinetická energie	[J]
E <sub>V</sub>	energie valenčního pásu	[eV]
ERÚ	<b>E</b> nergetický <b>R</b> egulační <b>Ú</b> řad	
FF	<b>F</b> ill <b>F</b> actor, faktor plnění	[-]
FV	fotovoltaický	
GaAs	galium arsenid	
GaSb	galium antimon	
Ge	germanium	
CH <sub>4</sub>	metan	
I	intenzita záření	[W/m <sup>2</sup> ]
I <sub>L</sub>	proud generovaný světlem	[A]
I <sub>mp</sub>	maximální proud	[A]
InP	indium fosfor	
I <sub>P</sub>	průměrná intenzita záření	[W/m <sup>2</sup> ]
I <sub>S</sub>	saturační proud	[A]
I <sub>SC</sub>	proud nakrátko	[A]

$I_{SP}$	intenzita změřená spektroskopem	[W/m <sup>2</sup> /nm]
$L_n$	střední difúzní délka minoritních nosičů elektronů	[m]
$N$	polovodič s pětímocnou příměsí	
$N_2O$	oxid dusný	
$N_A$	koncentrace akceptorů	[m <sup>-3</sup> ]
$N_D$	koncentrace donorů	[m <sup>-3</sup> ]
$NF_3$	fluorid dusitý	
<b>OZE</b>	<b>Obnovitelné Zdroje Energie</b>	
$P$	polovodič s třímocnou příměsí	
$P_C$	celkový výkon	[W]
$P_O$	výkon	[W]
<b>PPI</b>	<b>cenový index průmyslové výroby=„průmyslová inflace“</b>	
$R_{PA}$	paralelní odpor	[Ω]
$R_S$	sériový odpor	[Ω]
$T$	termodynamická teplota	[K]
$TiO_2$	oxid titaničitý	
$U_{0C}$	napětí naprázdno	[V]
$U_b$	brzdné napětí	[V]
$U_{g0}$	napětí při energii $E_{g0}$	[V]
$U_{mp}$	maximální napětí	[V]
$U_p$	fotovoltaické napětí	[V]
$U_T$	teplotní napětí	[V]
<b>UV záření</b>	<b>ultrafialové záření</b>	
<b>VA</b>	<b>Volt-Ampérova charakteristika</b>	
$e$	náboj elektronu	[C]
	$e = 1,602 \cdot 10^{-19} C$	
$f$	frekvence	[Hz]
$h$	Planckova konstanta	[J.s]
	$h = 6,63 \cdot 10^{-34} J \cdot s$	
$k$	Boltzmanova konstanta	[J.K <sup>-1</sup> ]
	$k = 1,38 \cdot 10^{-23} J \cdot K^{-1}$	
$k_{tep}$	teplotní koeficient	[-]
$n$	počet volných elektronů	[m <sup>-3</sup> ]
$n_i$	intrinzická koncentrace nosičů	[m <sup>-3</sup> ]

---

p	počet kladných děr	[m <sup>-3</sup> ]
q	elementární náboj	[C]
t	$q = 1,602 \cdot 10^{-19} C$ čas	[s]
v	rychlost vzduchu	[m/s]
$\gamma$	koeficient zahrnující teplotní závislosti ostatních parametrů	[-]
$\theta_{\text{panelu}}$	změřená teplota FV panelu	[°C]
$\theta_{pp}$	průměrná denní teplota panelu	[°C]
$\theta_{\text{vzduchu}}$	změřená teplota okolního vzduchu	[°C]
$\lambda$	vlnová délka	[m]
$\Phi$	výstupní práce	[J]

# 1 ÚVOD

## 1.1 Energetická situace ve světě

Moderní svět, ve kterém žijeme, je prostředí bez výhrady závislé na spotřebě energie a to v jakékoliv formě. Denně používáme automobily, které spalují benzín, městské autobusy, které ve většině dnešních případů jezdí na zemní plyn a samozřejmě domácí spotřebiče, které potřebují ke své činnosti elektrickou energii. Elektřinu, kterou má každý ve svém domě vyrábíme v elektrárnách poháněných neobnovitelnými zdroji energie jako je uhlí, zemní plyn a v neposlední řadě jaderné palivo. Všechny tyto zmíněné zdroje energie v dnešní době tvoří drtivou většinu veškeré výrobní kapacity lidstva a jsou tak prakticky nenahraditelné. Bohužel pro nás jsou zásoby těchto surovin konečné a jejich tvorba trvala několikanásobně delší dobu, než za jakou je lidstvo schopno tyto zásoby „energie“ spotřebovat. Se spotřebou těchto prostředků, které každodenně pumpují do našich domovů elektřinu, je ale spojen ještě další negativní faktor. Kromě omezených zásob, které se s rozrůstající spotřebou rozvojových zemí ztenčují, vypouští naše elektrárny při chemickém procesu, popřípadě jaderném, kterým je elektřina vyráběna, do ovzduší velké množství škodlivých látek. Když pomineme škodlivé látky, jako jsou sírany a další, které jsou v dnešní době na drtivě většině uhelných elektráren filtrovány, vypouštíme stále do naší atmosféry velké množství takzvaných skleníkových plynů. Tyto skleníkové plyny, pod kterými si můžeme představit oxid uhličitý ( $\text{CO}_2$ ), metan ( $\text{CH}_4$ ), freony (CFC), oxid dusný ( $\text{N}_2\text{O}$ ), vodní páry a další, vytváří „nepropustnou“ vrstvu kolem naší planety, která podle řady vědců způsobuje globální oteplování, tedy růst průměrných teplot na naší planetě. Následkem tohoto růstu pak tají na obou zemských pólech ledovce, roste výška sněžné čáry a celkově se mění klimatický ráz ve všech částech naší planety.

Cílem vyspělých zemí světa je tak získat a zaměřit se na nový zdroj elektrické energie, který by dokázal neomezeně dlouho dodávat lidstvu životadárnou energii. Když pomineme termojadernou reakci, na které intenzivně pracují vědci v jihofrancouzském městečku Cadarache, jsou naší možnou spásou alternativní zdroje energie, tedy obnovitelné zdroje. Lidstvo má tak technologie na využívání energie vody, větru, geotermální energie, biomasy a v neposlední řadě sluneční energie naší jediné hvězdy. Ta nás zásobuje prakticky veškerou energií a právě díky této energii z termojaderných reakcí, které v jádru Slunce probíhají, se na naší planetě vyvinuly všechny živočišné i rostlinné druhy. Kromě využití této masy dopadající energie k fotosyntéze rostlin, ke koloběhu vody a k dalším důležitým funkcím, jsme díky moderním technologiím schopni využít sluneční paprsky k ohřevu vody v solárních panelech a k výrobě elektřiny ve fotovoltaických článcích.

V současné době je především velký boom ve vývoji, výrobě, užití fotovoltaických nebo-li solárních článků, které vyrábějí na základě fotoelektrického jevu stejnosměrné napětí. Především díky zeleným bonusům a dotacím ve vyspělých zemích světa tak vzniká vhodné „klima“ pro budování nových slunečních elektráren a s tím je samozřejmě spojeno i zdokonalení výroby fotovoltaických článků, dále jen FV článků, a samozřejmě vývoj této technologie. Samotný FV článek totiž nedisponuje nijak zázračnou účinností konverze energie slunečního záření na elektrickou energii. Navíc se jeho výkon mění a to jednak v závislosti na teplotě FV článku a současně na „stáří“ FV článku.

## 1.2 Slunce, životadárná hvězda

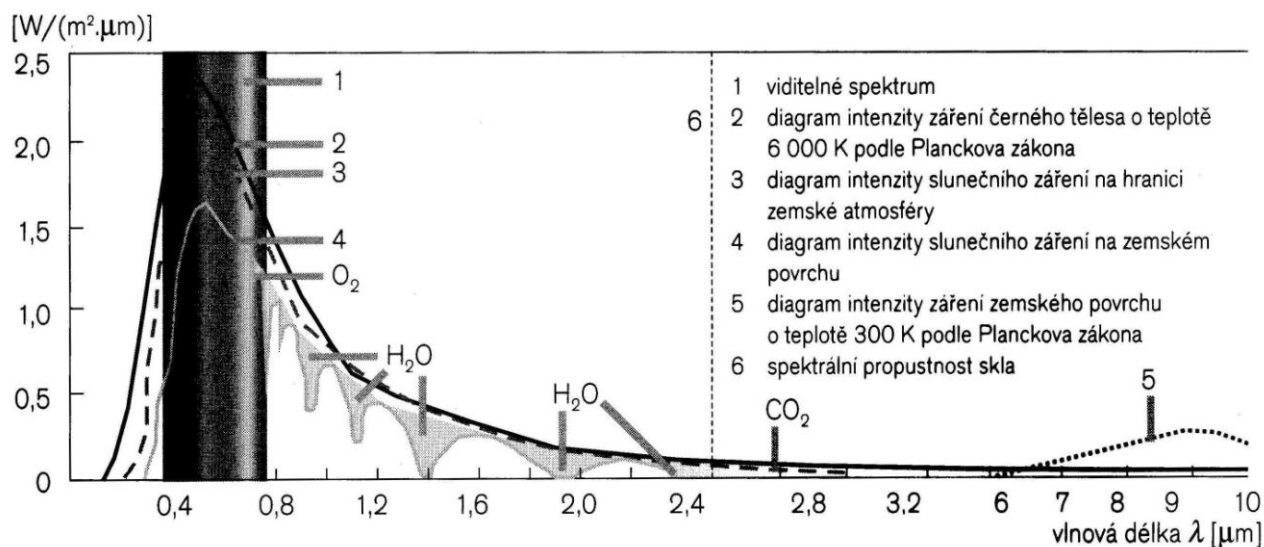
Počátky naší Sluneční soustavy spadají do doby před 4,6 miliardy let. Tehdy se vytvořilo naše Slunce a začaly vznikat planety. Ty se postupnými srážkami dostaly do vzdáleností, v nichž je známe dnes. Avšak naše Země nevypadala už od počátku tak, jak vypadá dnes. Byla zjizvena řadou kráterů, vzniklých srážkami s tělesy, které na ni dopadaly. Protože neměla takovou ochranu jakou má dnes, tedy atmosféru, každý dopad vnějšího tělesa znamenal další kráter. Na vytvoření atmosféry bylo potřeba dalších 2,5 miliard let. Poté začala Země pracovat na své vnitřní struktuře. Začala zde vulkanická činnost, posouvání litosférických desek, které pokračuje až dodnes.

Už od počátku vzniku naší Země se ale o nás „starala“ naše hvězda. Díky ní se zde vyvinuly fauna a flóra. Naše hvězda, která zahajuje každý den na Zemi, je tvořena nejrozšířenějšími prvky ve vesmíru, tedy vodíkem a héliem. Tyto dva prvky dohromady tvoří asi 98% veškeré známé hmoty. I když na Zemi je prakticky všechen vodík sloučen s kyslíkem, Slunce, jehož gravitace je mnohem silnější, je tvořeno vodíkem téměř celé a užívá tohoto prvku jako paliva do termojaderné reakce. Tu si můžeme představit jako přeměnu čtyř protonů na jádro helia. Postupnými reakcemi tak vzniká nejprve deuterium a následně alfa záření, tedy jádro helia. Za vše se ale musí platit, a tak i Slunce odvádí svou krutou daň. Každou vteřinu ve Slunci „shoří“ termojadernou reakcí 600 milionů tun vodíku, což je více než 100x hmotnost největších egyptských pyramid. Není se však čeho bát, Slunce má zásobu na dalších 5 miliard let ( $2 \cdot 10^{30}$  kg). Z těchto termojaderných reakcí podle Einsteinova známého vzorce  $E = m \cdot c^2$  se uvolňuje nepředstavitelné množství energie, konkrétně  $3,8 \cdot 10^{26}$  J. Pro srovnání je celkové množství energie uvolněné při přeměně čtyř vodíkových jader na jádro helia asi 10 miliónkrát větší, než může poskytnout chemická reakce, při níž se vodík sloučí s kyslíkem v procesu hoření. Vzniklá energie z termojaderné reakce tak putuje ze středu Slunce, kde k těmto reakcím dochází, na jeho povrch. Tento transport trvá zhruba milióny let. Energie z povrchu naší hvězdy je vyzařována formou elektromagnetického záření do kosmu a my ji na Zemi vnímáme jako teplo a světlo. Při standardních podmínkách je hustota výkonu dopadajícího na Zemi asi 1,4 kilowattu na metr čtverečný ( $\text{kWm}^{-2}$ ) [1]. Toto množství energie ale nedopadá na zemský povrch. Část dopadající energie je totiž při průchodu atmosférou pohlcena nebo doražena zpátky do vesmíru. Na každý metr čtverečný zemského povrchu tak dopadá v průměru 1000 W při slunečním svitu a několik desítek wattů při zatažené obloze [2]. Tato energie tak umožnila vznik veškerým fosilním palivům, které dnes využíváme k výrobě energie. Avšak jejich zásoby se ztenčují a jejich spotřeba roste.

### 1.2.1 Spektrum dopadajícího záření

Průchodem slunečního záření zemskou atmosférou dochází k tomu, že spektrum slunečního záření se pozmění a je ochuzeno o některá pásma, protože dochází k absorpci a rozptylu na molekulách plynů tvořících atmosféru a na částí prachu nebo aerosolů v atmosféře přítomných [2].

Veškeré sluneční záření přicházející na Zem se nazývá globální záření. To znamená, že obsahuje záření všech vlnových délek. Při praktickém měření intenzity slunečního záření se dělí záření na přímé (při přímém slunečním svitu) a difuzní (rozptýlené, při zatažené obloze). Při zatažené obloze je přítomna pouze difuzní složka záření a zisky z FV článků jsou při takovémto počasí minimální [2].



Obr. 1-1 Spektrum slunečního záření při vstupu do atmosféry a na zemském povrchu [2].

Obrázek 1-1 ukazuje, změny spektra slunečního záření po průchodu atmosférou (pro srovnání je zakresleno emisní spektrum černého tělesa při teplotě 6000 K). Na obrázku je taky vymezena ta část spektra, která prochází sklem-je patrné, že sklem neprochází záření UV ani tepelné záření (dlouhovlnné infračervené záření) [2].

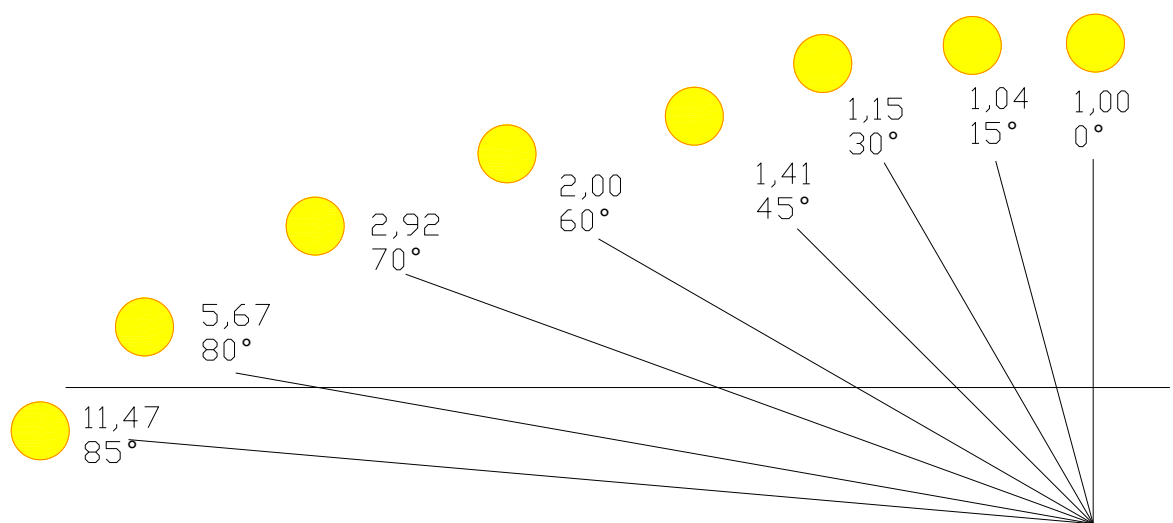
Drtivá většina sluneční energie, která se dostane skrz atmosféru až k zemskému povrchu je zpětně vyzářena do vesmíru ve formě krátkovlnného záření (cca 30 %) a dlouhovlnného záření, tedy tepla (cca 47 %). Další část sluneční energie využije naše příroda ke koloběhu vody (vypařování), samozřejmě k fotosyntéze a dalším koloběhům na ní navazujících. Samotný spektrální rozsah slunečního záření je v rozmezí od 30 nm do 3000 nm. Z toho většina sluneční energie přichází ve formě viditelného světla, tedy v rozsahu 380 nm až 760 nm. Energetické maximum samotného záření je pak okolo 500 nm. Vlnové délky větší jak 800 nm patří do sekce infračervené záření (tepelné). Vlnové délky nižší jak 300 nm spadají do sekce UV záření. Toto záření je silně pohlcováno v horních vrstvách atmosféry díky reakci s ozónem. Pokud ozónová vrstva chybí, proniká toto UV záření na povrch naší planety a má negativní dopad na lidské zdraví. Z energetického hlediska je ale využití této části spektra zanedbatelné [2].

### 1.2.2 Vliv atmosféry na sluneční záření

Už jsme se několikrát zmínili, že když dorazí světelné záření na hranici naší zemské atmosféry, stojí před ním „náročná“ cesta k zemskému povrchu. V zemské atmosféře na plynech, aerosolech a pevných částicích dochází k odrazu, rozptylu a pohlcení části záření. Dochází tak ke změně spektrálního složení světla a navíc dojde i k poklesu intenzity dopadajícího záření. Za jasného a slunečního letního dne tak dopadne na metr čtverečný v našich zeměpisných šířkách o něco méně než 1 kW na povrch orientovaný kolmo na sluneční paprsky.

Výsledný vliv atmosféry tak závisí na mnoha faktorech. Patří mezi ně:

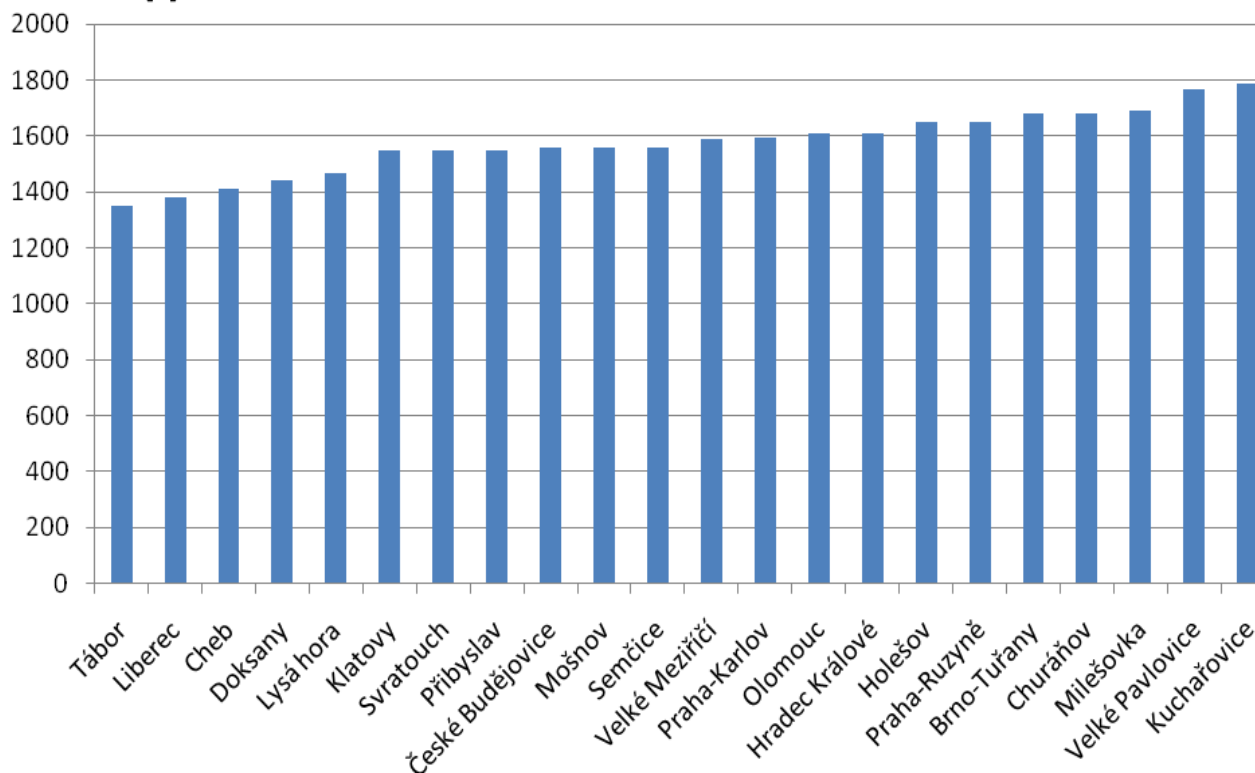
- Výška slunce nad obzorem a s ní související tloušťka vrstvy vzduchu, kterou musejí sluneční paprsky projít. Používá se takzvaný „Air Mass“ faktor, zkratkou AM, který zohledňuje efektivní množství vzduchu vyskytujícího se mezi vesmírem a zemským povrchem. Takže je-li slunce v nadhlavníku, je  $AM=1$ . Pokud natáčíme fotovoltaické moduly za sluncem, tak je třeba počítat s tím, že jejich výkon bude večer nebo ráno (při malé výšce slunce) značně menší [2].
- Nadmořská výška místa – opět souvisí s vrstvou vzduchu jako v předchozím bodě [2].
- Míra znečištění atmosféry – je všeobecně známo, že nad městy a ve velkých aglomeracích je zřetelně větší obsah aerosolů a tuhých částic, a díky tomu i menší intenzita slunečního záření [2].
- Oblačná pokrývka – největší překážkou v atmosféře jsou pochopitelně mraky, které značnou část dopadajícího záření odrazí a zbytek rozptýlí tak, že nedopadá ze směru slunce, ale přichází víceméně rovnoměrně, ze všech směrů (difuzní záření). Relativní četnost slunečných a oblačných dnů závisí na lokálním klimatu a zpravidla je k dispozici dostatek meteorologických údajů za dlouhou dobu, po kterou probíhá sledování [2].



Obr. 1-2 Souvislost AM faktoru a výšky slunce nad obzorem [2].

Z uvedených faktorů tak sice vyplývá, že při výběru lokality umístění FV elektrárny bychom měli brát na tyto věci ohled, nicméně nemáme moc možností, jak je ovlivnit. V dané lokalitě tak můžeme co nejpřesněji změřit dané poměry. V rámci ČR nejsou naštěstí rozdíly moc velké a z grafu na Obr. 1-3 je vidět, že průměrná délka slunečního svitu se pohybuje někde mezi 1350 a 1800 hodinami za rok, rozdíl tedy nepřesahuje 25 % [2].

délka slunečního  
svitu za rok [h]

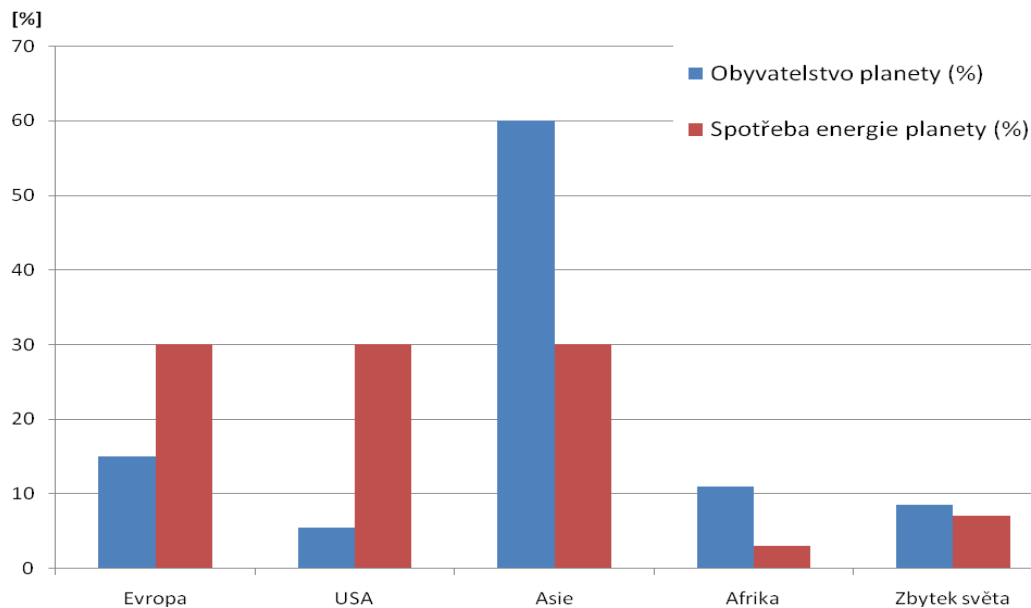


Obr. 1-3 Dlouhodobý průměr roční doby slunečního svitu za období 1961-1990 [2].

### 1.3 Nový zdroj energie

Jak již bylo zmíněno v předchozí části, zásobuje nás naše hvězda velkým množstvím energie, na kterém stojí naše civilizace. Bohužel pro nás se zásoby vzniklých nerostných surovin ztenčují. Pro ilustraci je možné zmínit, že zásoby uhlí se odhadují na 200-250 let, ale ropy jen na 40-45 let a u zemního plynu to je 60-70 let. Zásoby  $^{235}\text{U}$  se díky nadměrné těžbě odhadují jen na 90 let. A to nezapočítáváme růst životní úrovně v Asii, kde Čína nastartovala obrovský hospodářský růst. Zanedlouho tak bude lidstvo stát před problémem nedostatku energie.

„Do očí bijící je spotřeba energie ve vztahu k rozložení obyvatelstva planety. Evropa se svými 15 % celkové populace světa spotřebuje 30 % celkové energie. Ještě hůř jsou na tom Spojené státy americké, které spotřebují zhruba stejné množství energie jako Evropa, ale žije zde pouze 5,5 % celkové lidské populace. Kvůli takovým polykačům energie pak na celou Asii, kde je asi 60 % lidské populace, zbývá 30 % a to už se vůbec nezmiňujeme o Africe, kde 11 % populace musí vystačit s pouhými 3 % celkové energetické produkce. Právě na základě tohoto nerovnoměrného rozložení se tak neustále hledá nový zdroj energie, který by uklidnil obavy a čím dál tím víc slyšíme o alternativních zdrojích energie“ [3].



Obr. 1-4 Graf počtu obyvatel a spotřeby energie na jednotlivých kontinentech.

Solární energie by tak teoreticky mohla naši energetickou „nenasytnost“ uspokojit. Podle statistik OSN totiž lidstvo využívá na své energetické potřeby výkon 10 TW. 1 TW je bilión wattů, což odpovídá výkonu 500 temelínských jaderných elektráren. Sluneční záření však na Zemi přináší astronomických 180 000 TW, což je výkon 90 milionů Temelínů. Při porovnání těchto čísel je tak každému jasné, že pokrytí jen části pouští na Zemi, které prakticky nikdo nevyužívá, solárními elektrárnami, by vyřešilo naše energetické problémy.

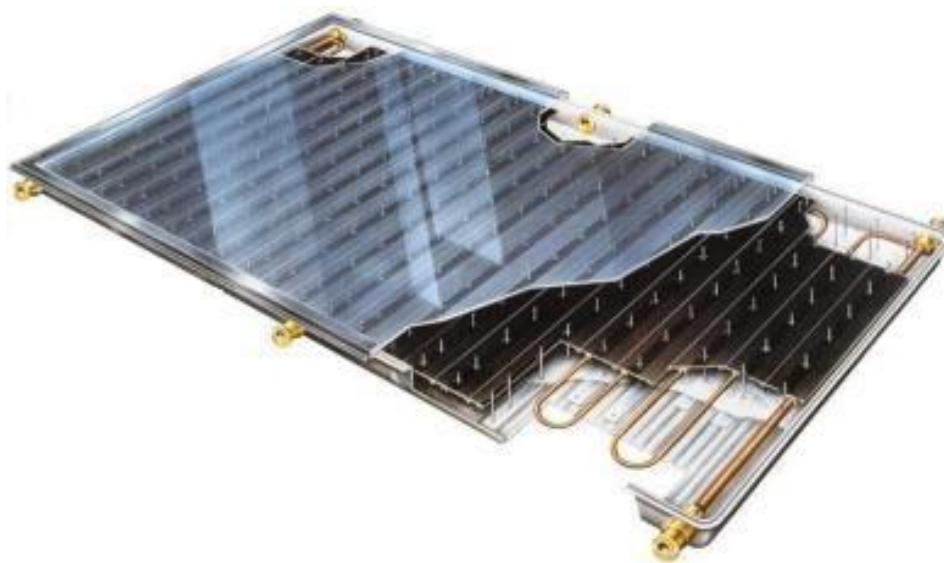
## 1.4 Solární kolektory

Již jsme se zmínili o tom, jak je pro nás naše hvězda důležitá a jak se v její energii skrývá velký potenciál. Nyní se dostáváme k možnostem využití tohoto kvanta energie, které každou vteřinu dopadá na naši planetu. Nejprve se zmíníme o solárních termálních systémech, tedy soustavách, v nichž získáváme ze slunečního záření tepelnou energii. To není nějak velký problém, protože je dobře známo, že matný, černý povrch postačí k dostatečnému zisku tepelné energie. Pak ale vyvstává otázka, kam se získaným teplem bez velkých ztrát a navíc jak uložit tuto energii na pozdější užití. Lze říci, že právě těmito problémy se zbývá většina výzkumu a vývoje v oblasti solárních systémů [4].

Když už jsme zmínili hrubý princip činnosti solárních termálních systémů, který tedy tkví ve využití tepelné energie získané ze slunečního záření, měli bychom si takový systém popsat. Základem jsou následující části:

- Kolektor – ten je vystaven přímému slunečnímu světlu a mění sluneční energii na tepelnou.
- Zásobník – slouží k uložení a pozdějšímu použití získaného tepla.
- Transportní systém – převádí teplo z kolektoru do zásobníku nebo přímo do místa spotřeby (rozvody, čerpadlo, ventilátor).
- Regulační zařízení – zabezpečuje, aby teplo směřovalo z kolektoru do zásobníku a ne opačně.
- Záložní zdroj tepla – je to takový zdroj, který pokryje energetickou spotřebu v době bez slunečního svitu.

Výše zmíněné součásti se samozřejmě nemusí nacházet v každé soustavě. Pokud bychom chtěli ušetřit finanční náklady, můžeme spojit funkci kolektoru a zásobníku v jeden prvek, ale dosáhneme daleko menší účinnosti a sníží se i doba akumulace [4].



Obr. 1-5 Řez kolektorem Heliostar H300 [4].

### 1.4.1 Rozdělení solárních systémů

- 1) Podle využití získané energie
  - a) *Systémy pro ohřev teplé vody*
  - b) *Systémy pro ohřev bazénů*
  - c) *Systémy pro vytápění*
  - d) *Systémy pro chlazení a klimatizaci*
- 2) Podle způsobu zajištění přenosu tepla
  - a) *Systémy pasivní* (teplo je přenášeno bez nároků na elektrickou energii, teplo se tak přenáší přirozenou konvekcí=> jednoduchost a spolehlivost, na druhou stranu je tento systém málo flexibilní)
  - b) *Systémy aktivní* (k cirkulaci se využívá čerpadlo nebo ventilátor s vhodným regulačním zařízením=> flexibilita a dobrá regulace)
- 3) Podle užitého média k energetickému přenosu
  - a) *Systémy využívající jako médium vodu nebo nemrznoucí směs* (velice často využívaný systém v našich podmínkách, především z důvodu dobré integrace do existujících systémů vytápění)
  - b) *Systémy využívající vzduch* (hojně využívány především v USA, v našich podmínkách by se mohly uplatnit u nízkoenergetických domů, ale nevýhodou je, že pro rozvod vzduchu by se musely užívat potrubí o velkém průměru)

## 2 PRINCIP FOTOVOLTAICKÉ PŘEMĚNY VE FV ČLÁNCÍCH

### 2.1 Fotoelektrický jev

Už jsme se zmínili o energetických úrovních světelného záření a dokonce o jeho využití pro ohřev vody nebo vzduchu. Nyní se ale dostáváme k samotnému jádru věci, proč je energie z naší hvězdy tak často diskutovaným tématem v politických, ekonomických, ekologických i vědeckých kruzích. Abychom následující teorii pochopili, je potřeba začít od samotného základu, tedy od světla. Světlo vnímají lidé jako naprostou samozřejmost a nad jeho fyzikální podstatou prakticky ani nepřemýšlí. Přesto je tato problematika hodně zajímavá a řada vědců se jí zabývá. Když se podíváme do historie vývoje představ o světle, tak bychom asi měli začít Isaacem Newtonem, který považoval světlo za tok částic a díky jeho kreditu až do konce 18. století převládala korpuskulární představa světla. V následujícím století ale přišel rozvoj vlnové teorie, podpořený řadou experimentů s interferencí a ohybem. Tuto teorii navíc ještě více potvrdily objevy v oboru elektřiny a magnetismu. Dnes ale víme, že obě tyto teorie se dají použít a platí tedy korpuskulárně vlnový dualismus. Tedy světlo jsou příčné elektromagnetické vlny a současně se projevuje jako tok částic. S příchodem geniálního fyzika Alberta Einsteina dokonce tyto částice dostaly název. Od roku 1926 se jim tak říká fotony. Právě zmíněný Einstein přišel s hypotézou, která neplyne z Maxwellových rovnic. Při emisi nebo absorpci světla atomem se totiž energie nepředává spojitě, ale diskrétně. Atom tedy přijímá nebo vyzařuje energii po malých „kouscích“, tedy kvantech. Má-li světelná vlna frekvenci  $f$ , pak podle Einsteinovy hypotézy je energie jednoho fotonu  $E$  rovna

$$E = h \cdot f \quad (\text{J; Js, s}^{-1}) \quad (2.1)$$

Ve výše zmíněném vztahu figuruje ještě konstanta  $h$ , kterou jsme si zatím nepopsali. Jedná se o Planckovu konstantu a má hodnotu

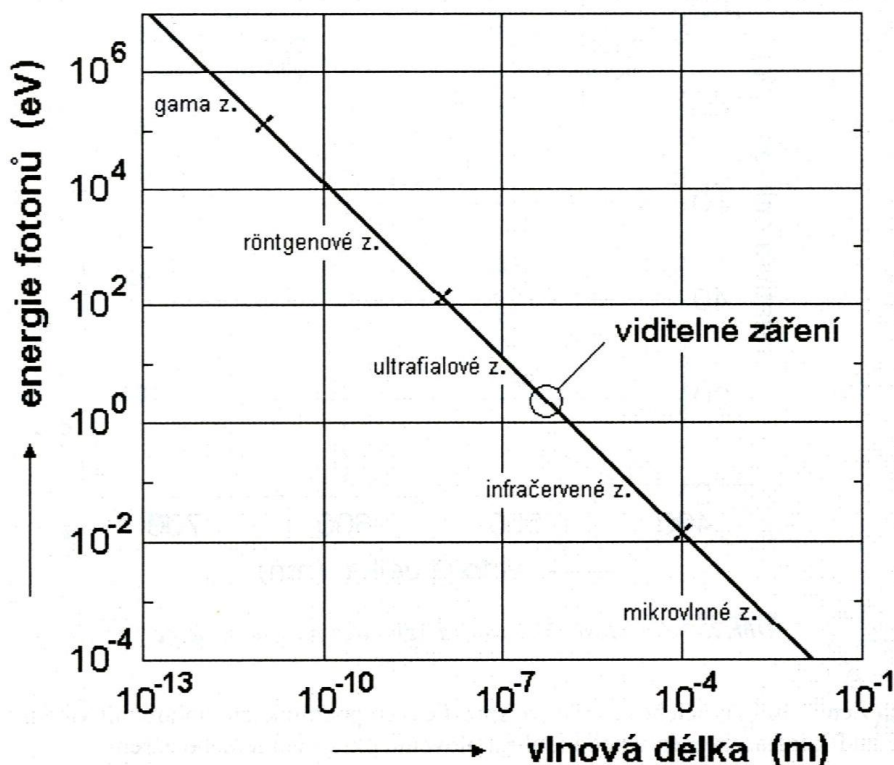
$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

Tato Planckova konstanta je základní konstantou v kvantové fyzice, stejně jako rychlost světla  $c$  je základní konstantou v relativistické fyzice. Rychlost světla  $c$  je velká, ale konečná. Kdyby byla nekonečná, nebylo by potřeba teorie relativity. Stejně tomu je i u Planckovy konstanty  $h$ . Ta je malá, ale nenulová. Kdyby byla nulová, nebylo by potřeba kvantové teorie [5].

Jak je ze vztahu patrné, energie s narůstající frekvencí roste lineárně a s vlnovou délkou  $\lambda$ , která je převrácenou hodnotou frekvence ( $\lambda = f^{-1}$ ) lineárně klesá. Právě tuto závislost ukazuje Obr. 2-1. Jednoduše řečeno znamená Einsteinova hypotéza, že když ozáříme svazkem světla s dostatečně krátkou vlnovou délkou čistý kovový povrch, vyrazí světlo z tohoto povrchu elektrony. Einstein svoji hypotézu obhájil díky dvěma pokusům na zařízení, která můžete vidět na Obr. 2-2. V prvním pokusu byl na kolektoru K nastaven záporný potenciál oproti terčíku T. Vyražené elektrony z terčíku jsou tak tímto brzdícím napětím  $U_b$  zpomalovány a pokud regulujeme  $U$  až do doby, kdy pro proud  $I$  bude platit  $I=0$ , získáme hodnotu kinetické energie vyražených elektronů  $E_{kmax}$  s největší energií [5].

$$E_{kmax} = e \cdot U_b \quad (\text{J; C, V}) \quad (2.2)$$

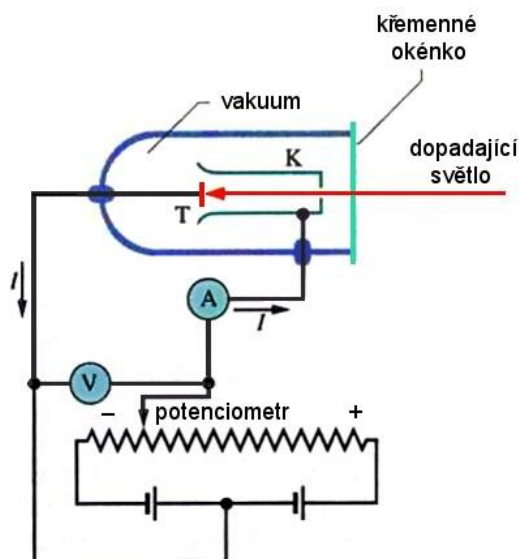
Právě tento pokus ukázal, že energie  $E_{kmax}$  nezávisí na intenzitě zdroje světla. Vyražené elektrony tak mají hodnotu nejvyšší kinetické energie stále stejnou, bez ohledu na to, je-li zdroj světla oslnivě jasný nebo stěží pozorovatelný. Pokus tak potvrzuje částicovou představu světla, tedy jako proud fotonů. Maximální energii, kterou elektron v terčiku může získat je tak energie fotonu podle vztahu 2.2. Zvyšováním intenzity světla zvyšujeme pouze počet dopadajících fotonů, ale nezvyšujeme jejich energii, což je podstatné. Maximální kinetická energie dodaná elektronu se tak nemění [5].



Obr. 2-1 Závislost energie fotonu na vlnové délce [6].

Ve druhém pokusu se mění ve stejném zařízení frekvence dopadajícího záření a zkoumá se její závislost na brzděném napětí  $U_b$ . Byla tak zjištěna závislost, kdy při frekvenci nižší, než je frekvence  $f_0$ , takzvaná prahová frekvence, fotoelektrický jev nenastává. Opět i v tomto pokusu bylo zjištěno, že je zde bez vlivu intenzita dopadajícího záření. To stejně jako v předchozím pokusu odporuje vlnové teorii světla, protože v klasickém pojetí fyziky bychom museli předpokládat, že nezávisle na frekvenci jsou elektrony emitovány vždy, když jim dodáme dostatečnou energii. Tak to ale nefunguje. Jak už jsme zmínili, fotoelektrický jen nastane, pokud není frekvence světelného záření vyšší než prahová. Ale protože jsou elektrony v terči drženy elektrostatickými silami, musí tyto elektrony získat energii, aby unikly z tohoto terče. Tuto minimální energii, kterou značíme  $\Phi$  nazýváme výstupní práce a je vlastností každého materiálu. Pokud energie fotonu podle vztahu 2.1 je větší než prahová energie (pokud tedy platí  $hf > \Phi$ ), pak může elektron opravdu uniknout z povrchu terčiku. Pokud tomu tak ale není, elektron uniknout nemůže ( $hf < \Phi$ ). Výsledky těchto dvou pokusů nakonec Einstein shrnul a formuloval fotoelektrický zákon viz rovnice 2.3 [5].

$$h \cdot f = E_{k \max} + \Phi \quad (\text{Js, s}^{-1}; \text{J, J}) \quad (2.3)$$



Obr. 2-2 Zařízení pro studium fotoelektrického jevu [5].

Tento zákon tak vyjadřuje zákon zachování energie při interakci fotonu o frekvenci  $f$  a elektronu z terče o výstupní práci  $\Phi$ . Zbývající energie ( $hf - \Phi$ ), kterou elektron při interakci získal je pak rovna jeho kinetické energii. Za nejvýhodnějších podmínek může elektron vystoupit z povrchu, aniž by nějakou část této energie ztratil. V takovém případě má pak kinetickou energii rovnou  $E_{kmax}$  [5].

## 2.2 Polovodičová technologie

Jen velice těžko si dokážeme představit dnešní svět bez použití moderních technologií, které se zakládají na polovodičových prvcích. Přitom je tato technologie už poměrně stará, protože již v 19. století byly poprvé pozorovány polovodičové vlastnosti a s příchodem 20. století nabyly prvky zakládající se na této technologii svého významu. V elektrotechnice se tak po dlouhé době začaly dělit látky na tři skupiny a to na vodiče, izolanty a nově polovodiče (toto rozdělení se provádí podle hodnot rezistivity materiálu). Protože je polovodičová technologie základem dnešní civilizace a vyskytuje se prakticky v každém elektrickém zařízení, a protože je tato technologie základem diskutovaných fotovoltaických článků, budeme se v následujících částech této práce fyzikou polovodičů zabývat.

### 2.2.1 Struktura atomu

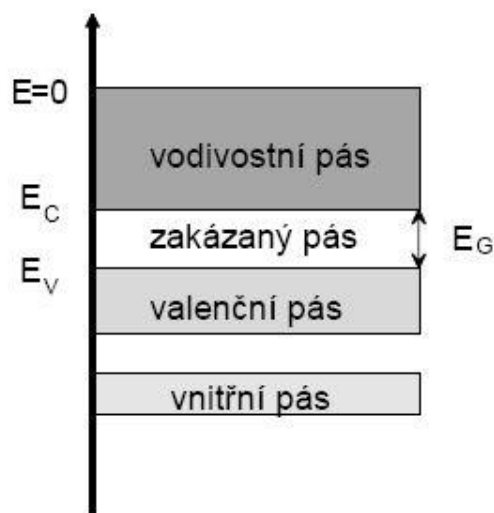
Když na začátku 20. století Ernest Rutherford zjistil, že v samotném centru atomu je soustředěna prakticky veškerá hmotnost atomu a toto centrum nebo-li jádro má kladný náboj, byl svět ještě poměrně daleko před pravým poznáním atomové struktury. Dnes je tak obecně známo, že atom se skládá z kladně nabitého jádra, ve kterém jsou soustředěny protony, neutrony, a záporného elektronového obalu. Například elektronový obal ale měl zprvopočátku podle nejruznějších fyziků různé podoby. S příchodem kvantové mechaniky se ale dospělo k názoru, že elektrony lze spíše než jako hmotné body popsat jako vlnové funkce definující pravděpodobnosti. Elektron se tak s určitou pravděpodobností nachází na orbitalech, které se rozdělují podle energetické úrovně. Ve vyšším nebo-li energeticky náročnějším obalu, se tak vyskytují elektrony s vyšší energií. Přechody mezi těmito vrstvami jsou možné pouze za předpokladu absorpce nebo

vyzáření určitého kvanta energie. Na atomu křemíku si můžeme popsat následné rozdělení elektronů v jednotlivých orbitalech [7].

Křemík má 14 elektronů a z tohoto počtu elektronů je 10 obsaženo ve velice energeticky nízkých orbitalech. Jsou tak poměrně těsně svázány s atomovým jádrem a hovoříme o vnitřních elektronech. Zbývající čtyři elektrony jsou vázány relativně slabě, účastní se chemických vazem a nazýváme je valenčními elektrony [7].

Rozložení těchto elektronů v jednotlivých energetických hladinách si můžeme představit díky pásovému modelu pevných látek. Budeme tak hovořit o dvou skupinách a to o dovolených pásích, tedy pásích s dovolenou hladinou energie elektronu a o zakázaných pásích. To jsou oblasti zakázaných hodnot energie elektronu a vyskytují se mezi dovolenými pásy. Jednoduchý pásový model pevné látky je na Obr. 2-3. Stejně jako na zmíněném obrázku dělíme pásy na následující skupiny:

- *Vnitřní pásy:* V těchto pásích se vyskytují vnitřní elektrony, tedy elektrony vázané k jádrům. Tyto pásy jsou poměrně úzké a pro přenos elektrického náboje nemají význam [7].
- *Valenční pás:* Právě v tomto pásu se vyskytují elektrony, které nás v naší problematice nejvíce zajímají, protože se podílí na chemických vazbách [7].
- *Vodivý pás:* Pokud se elektrony pohybují v tomto pásu, jsou uvolněné z chemických vazeb. Tyto elektrony se tak mohou pohybovat v meziatomovém prostoru a vytváří tak vodivost látky. Jedná se o nejvyšší dovolený energetický pás [7].
- *Zakázané pásy:* Oddělují od sebe pásy dovolených energií [7].

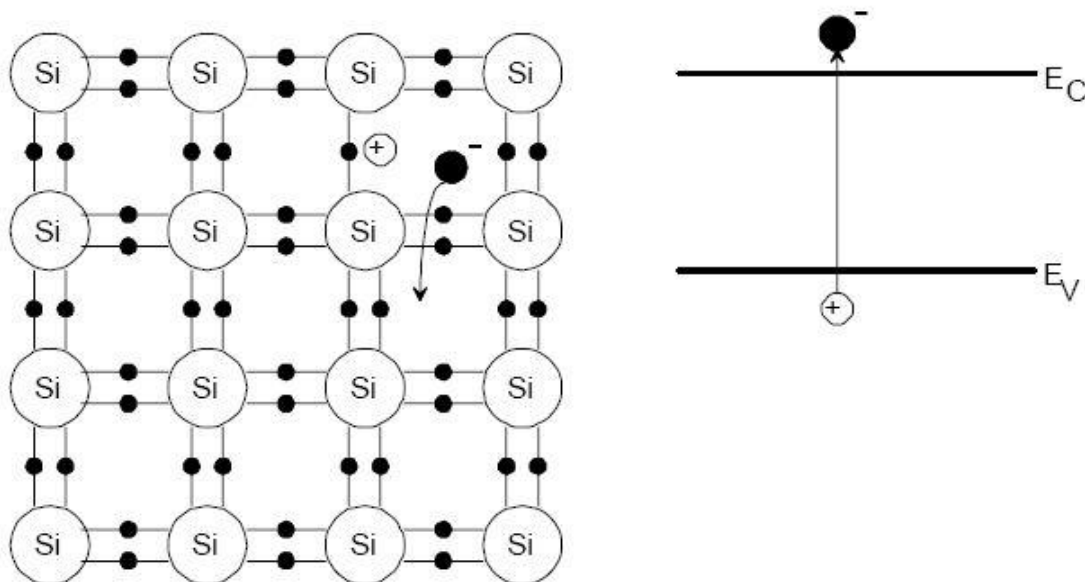


Obr. 2-3 Jednoduchý pásový model pevné látky [7].

Právě poslední tři pásy, tedy valenční, vodivostní a zakázaný, svojí polohou určují základní vlastnosti pevných látek z hlediska vedení elektrického proudu. Dolní okraj *vodivostního pásu* se většinou značí  $E_C$  (C=conductivity), horní okraj *valenčního pásu*  $E_V$  (V=valence) a šířka *zakázaného pásu* je většinou značená jako  $E_G$  (nebo také  $\Delta E$ , G=gap) a je rovna  $E_G = E_C - E_V$ . Právě díky hodnotám zde zmíněných pásů můžeme rozdělit pevné látky do tří skupin na vodiče, izolanty a polovodiče. Podrobný popis je uveden v publikaci [7], ale určitě bychom ještě měli zmínit, že zatímco vodiče mají zakázaný pás velice malý ( $E_G < 0,1 \text{ eV}$ ) a izolanty naopak značně velký ( $E_G > 3 \text{ eV}$ ) u polovodičů se tyto hodnoty pohybují v rozmezí 0,1 eV až 2 eV. Například nejpoužívanější polovodič křemík Si má při teplotě 0 K 1,12 eV a další velice často užívaný polovodič germanium Ge má při stejné teplotě šířku zakázaného pásu téměř poloviční 0,66 eV. Pokud zde zmiňujeme teplotu absolutní nuly, měly bychom ještě dodat, že při této teplotě se ve vodivostním pásu nenachází žádné volné elektrony. Látka se tak chová jako izolant. Pokud ale teplotu látky zvyšujeme, mohou některé elektrony z valenční vrstvy získat takovou energii, která postačí na překonání zakázaného pásu a dostanou se tak do vodivostního pásu. Tím se tak z izolantu stává vodič a s rostoucí teplotou klesá odpor látky exponenciálně [7].

### 2.2.2 Vlastní polovodič

Již jsme zmínili existenci polovodičových látek, které se za určitých podmínek chovají jako izolanty a za jiných jako vodiče. Nyní bychom si ale měli rozdělit tyto látky podle obsahu příměsí a to na ty, které příměs neobsahují, tedy *vlastní (intrinzičné) polovodiče* a *nevlastní (extrinzičné)*, ale o těch až později.



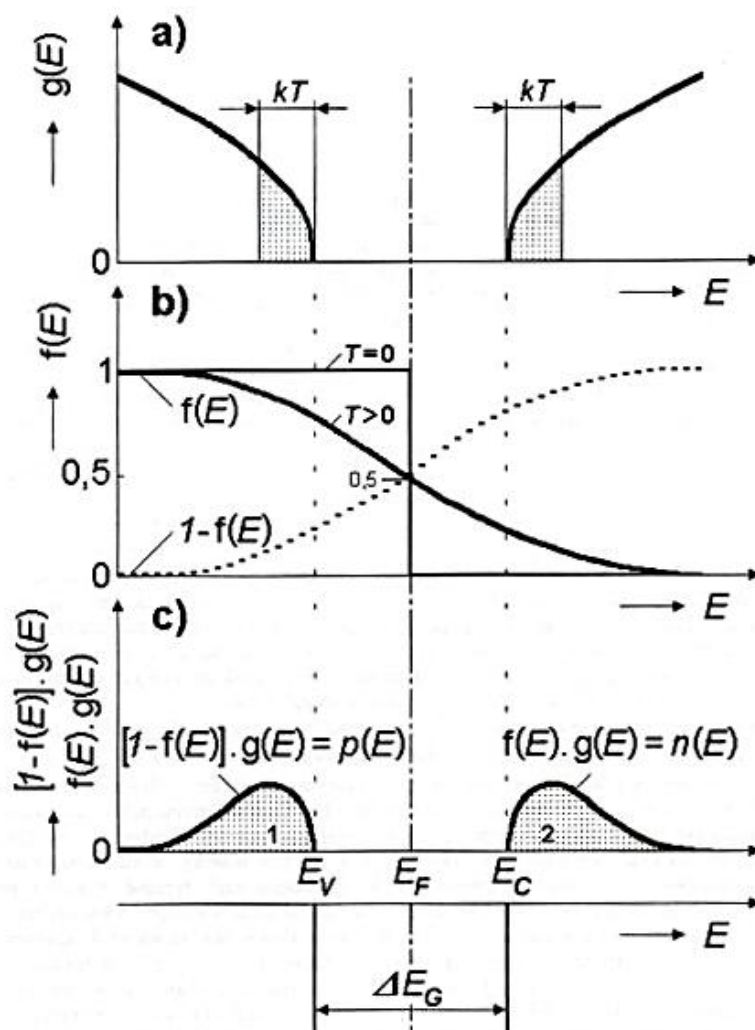
Obr. 2-4 Vznik páru elektron díra ve vlastním polovodiči [7].

Dokonalý vlastní polovodič, který nemá poruchu krystalu nebo příměs, jako je tomu na Obr. 2-4, se v přírodě sice nevyskytuje, ale pečlivou výrobou se můžeme tomuto ideálu přiblížit. Takovýto polovodič má při teplotě 0 K všechny své vnější elektrony ve valenční vrstvě a chová se tak jako izolant. Rostoucí teplotou, nebo jiným vnějším vlivem ale můžeme docílit toho, že elektrony přeskočí do vodivostního pásu. V takovém případě hovoříme o *ionizaci* atomu a energie, kterou musel elektron získat pro překonání zakázaného pásu o energii  $E_G$ , nazýváme

ionizační energií. Pokud si vezmeme jako příklad opět oblíbený krystal křemíku, vznikne po uvolněním elektronu atom postrádající jeden elektron a chová se tak jako kladný iont. Tento kladný iont ovlivňuje valenční elektrony sousedních atomů a přijetím právě elektronu ze sousedního atomu se iont zneutralizuje. I když se atomy mřížky nepohybují, vidíme, že kladný náboj se v krystalu pohybuje a hovoříme tak o *díře*. Při vzniku volného elektronu se nám tak vždy generuje kladná díra a proto koncentrace těchto dvou nosičů náboje je vždy stejná a platí

$$n = p = n_i \quad (\text{m}^{-3}; \text{m}^{-3}; \text{m}^{-3}) \quad (2.4)$$

kde  $n$  je počet elektronů,  $p$  je počet děr a  $n_i$  je intrinzičná koncentrace nosičů na jednotku objemu. Následující Obr. 2-5 pak ukazuje poměrně důležité charakteristiky vlastního polovodiče. Na prvním obrázku (Obr. 2-5a) je znázorněna funkce  $g(E)$ , která představuje hustotu stavů ve valenčním a vodivostním pásu v závislosti na energii. Další obrázek (Obr. 2-5b) znázorňuje funkci  $f(E)$ , tedy rozdělovací funkci, která udává pravděpodobnost obsazení stavu s energií  $E$  elektronem. Funkce  $1-f(E)$  udává pravděpodobnost neobsazení elektronem. Na posledním obrázku (Obr. 2-5c) udává funkce  $f(E)g(E)=n(E)$  koncentraci elektronů ve vodivostním pásu při nenulové teplotě a funkce  $[1-f(E)]g(E)=p(E)$  udává koncentraci děr ve valenčním pásu při nenulové teplotě [6].

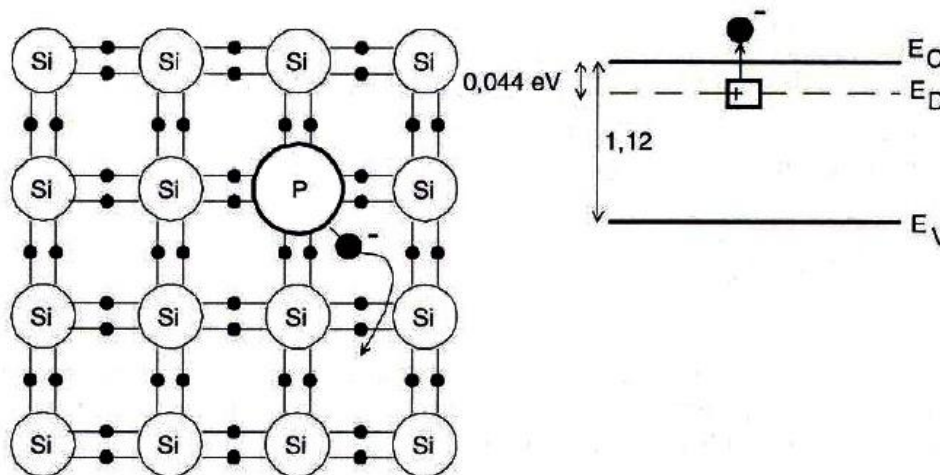


Obr. 2-5 Model elektronů a děr v případě vlastního polovodiče [6].

### 2.2.3 Nevlastní polovodič typu N

Pokud do krystalické mřížky křemíku či germania umístíme atom z jiné skupiny prvků (III.A, V.A), hovoříme o takzvaném dotování a vzniká nám nevlastní polovodič. Získáme tak materiál s vhodnými elektrickými vlastnostmi. Pro případ extrinzického polovodiče typu *N* musíme zvolit příměsi ze skupiny V.A, ve které mají prvky pět valenčních elektronů. Častou příměsí jsou tak atomy fosforu *P*, arzenu *As* nebo antimonu *Sb* [7].

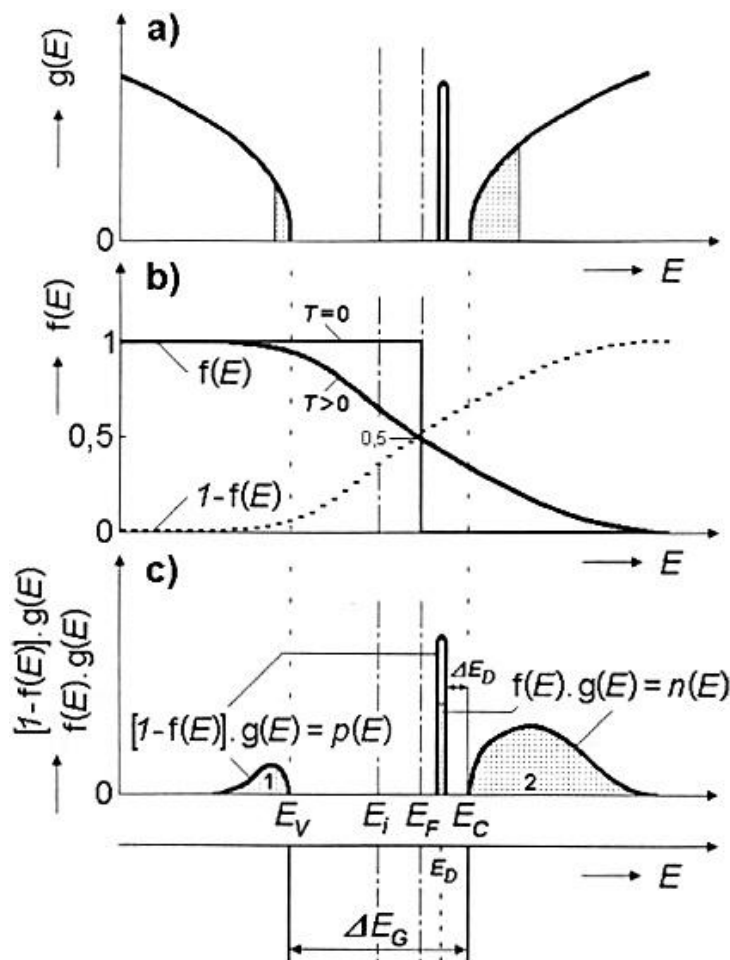
Tyto pětimocné prvky mají ve valenční vrstvě pět elektronů a z toho čtyři elektrony se účastní tvorby vazeb se sousedními atomy. Zbývající pátý elektron je ale velice slabě vázán a může být z této vazby uvolněn poměrně malým množstvím energie. Hovoříme o aktivační energii, jejíž velikost je závislá na typu příměsi. Například pro křemík je tato hodnota 0,05 eV. Protože se tak jedná o skutečně malé množství energie, získá elektron takovou hodnotu již při nízkých teplotách, takže při pokojové teplotě jsou prakticky všechny atomy příměsi ionizované. V krystalové mřížce nám tak vznikají kladné ionty, které zůstávají na svých místech a volné elektrony. Pokud tak krystalová mřížka obsahuje pětimocný atom, hovoříme o *donorové* příměsi, tedy příměsi, která dodává elektrony do vodivostního pásu [7].



Obr. 2-6 Krystalová mřížka Si s jedním atomem P a pásový model polovodiče typu N [7].

Jak vidíme na Obr. 2-6, vytváří donorové atomy tzv. donorovou hladinu o energii  $E_D$ , která se nachází v zakázaném pásu a to pod dnem vodivostního pásu. V tomto typu polovodiče jsou majoritními nosiči náboje elektrony a minoritními nosiči díry, a proto hovoříme o polovodiči typu *N* (z anglického slova *negative*) [7].

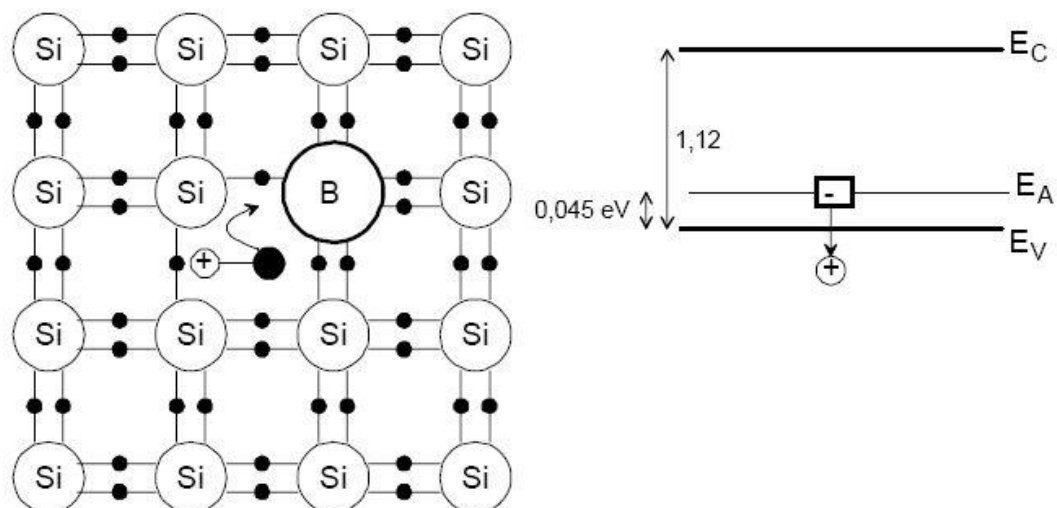
Na následujícím obrázku (Obr. 2-7) si pak můžeme prohlédnout, jak se změnil průběhy jednotlivých charakteristik ve vztahu k vlastnímu polovodiči. Z obrázku jsou tak patrné posuny zobrazených průběhů a taky posun Fermiho energie směrem k vodivostnímu pásu. O této hladině jsme se doposud příliš nezmínili, protože přesná definice by přesahovala rámec této práce. Podrobně se touto hladinou a Fermi-Diracovou rozdělovací funkcí zabývá monografie [7]. Z obrázku je ještě patrné, že koncentrace elektronů ve vodivostním pásu je daleko větší, než koncentrace děr ve valenčním pásu [6].



Obr. 2-7 Model elektronů a děr v případě polovodiče typu N [6].

### 2.2.4 Nevlastní polovodič typu P

V předchozí podkapitole jsme se bavili o možnosti dopovat krystal křemíku pětimocným atomem za vzniku extrinzického polovodiče typu N. Už jsme ale zmínili, že pokud se budeme bavit o nevlastních polovodičích, můžeme krystal křemíku nebo jiného prvku dopovat také třímaným prvkem, tedy prvkem ze skupiny III.A. Přesněji se tak jedná o atomy bóru B, hliníku Al, galia Ga a india In. Protože má tento trojmocný atom pouze tři valenční elektrony, účastní se všechny tři vazem s okolními atomy křemíku, ale čtvrtá vazba zůstane neúplná. Výsledkem je proces, během kterého se za pomoci malé energie uvolní jeden elektron z okolních atomů a zaplní neúplnou vazbu trojmocného atomu jak je tomu na Obr. 2-8. Trojmocný atom se tak ale ionizuje záporně a vytvoří v sousedství kladnou díru, která se může v rámci krystalu pohybovat a umožňuje vedení proudu. Protože trojmocné příměsi přijímají elektrony, hovoříme o nich jako o *akceptorech* a v pásovém diagramu vytváří akceptorové příměsi, tedy takzvanou *akceptorovou hladinu* s energií  $E_A$ . Tato hladina se nachází v těsné blízkosti nad stropem valenčního pásu [7].



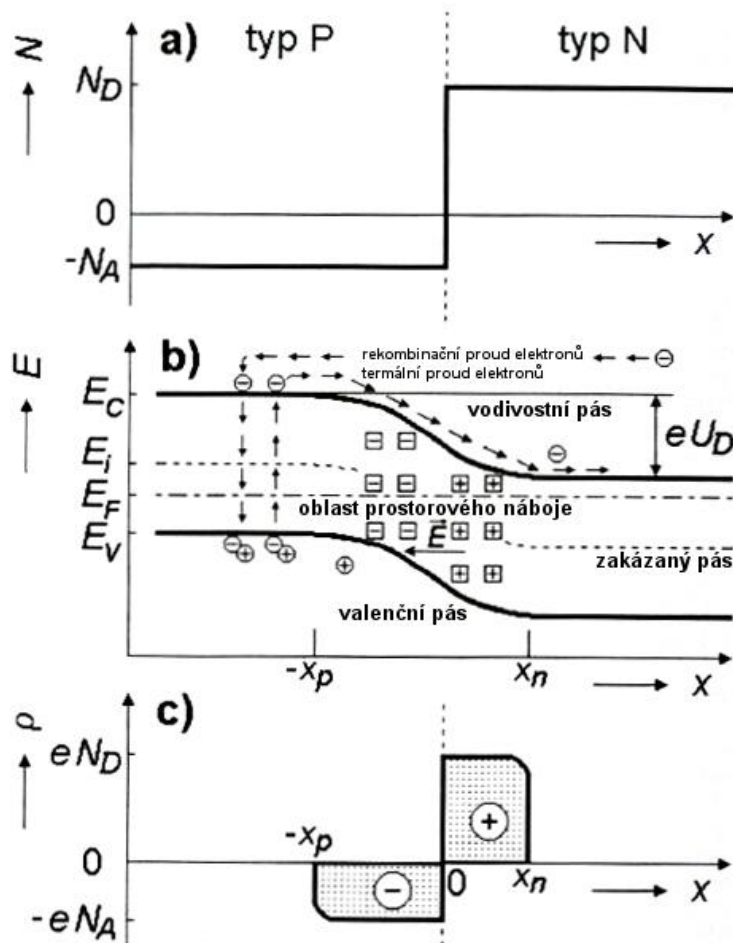
Obr. 2-8 Krystalová mřížka Si s jedním atomem B a pásový model polovodiče typu P [7].

Stejně jako tomu bylo u polovodiče typu  $N$ , tak i u tohoto polovodiče jsou již při poměrně nízké teplotě všechny atomy příměsi ionizovány a ve valenčním pásu nám tak vznikají díry, které v polovodiči typu  $P$  tvoří většinové nosiče proudu, zatím co minoritními nosiči jsou zde elektrony [7].

### 2.3 Polovodičová dioda jako FV článek

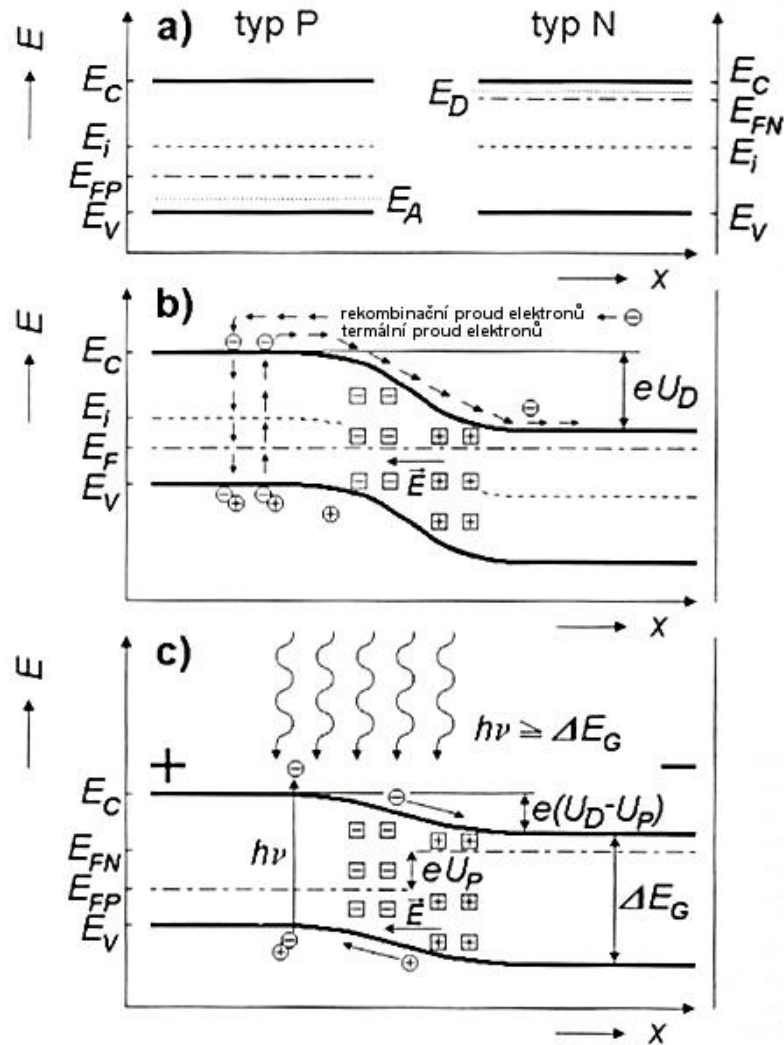
Ve výše zmíněných kapitolách jsme si poměrně podrobně přiblížili struktury jednotlivých typů polovodiče. FV článek ale není tvořen jedním či druhým typem polovodiče, ale je tvořen právě polovodičovou diodou, která představuje spojení polovodičů typu  $P$  a  $N$ . Pokud je tak v krystalu nehomogenní koncentrace příměsí, tedy některá oblast je dopována více a jiná méně stejným či opačným typem příměsí, pohybují se volné nosiče náboje podle zákonitostí difúze. To znamená, že se pohybují z oblastí s vyšší koncentrací do oblastí s nižší koncentrací. Pro polovodičovou diodu tvořenou přechodem p-n to tak znamená, že volné elektrony se snaží přejít do části  $P$  a díry do části  $N$ . Pokud se tento přechod jednotlivým nosičům náboje podaří, dochází tak k takzvané rekombinaci nábojů, tedy splynutí elektronu s dírou. Uniklé volné nosiče náboje ale po sobě zanechávají pevně vázané náboje ionizovaných příměsí s opačným znaménkem. Tím tak vzniká prostorový náboj, který vytváří v této polovodičové diodě poměrně silná lokální elektrická pole. Tato pole už dalšímu vyrovnávání koncentrací brání a systém se ustálí v rovnovážném stavu. Dojde tak k výraznému snížení vodivosti v oblasti p-n přechodu a vzniku potenciálu na tomto rozhraní (část  $P$  má záporný náboj a část  $N$  kladný náboj). Názorně můžeme tento popsany proces vidět na Obr. 2-9, kde v části  $a$ ) vidíme strmý p-n přechod kde  $N_A$  je koncentrace akceptorů a  $N_D$  je koncentrace donorů. Protože musí být Fermiho hladina v rovnovážném stavu vyrovnána v celém krystalu, dochází v místě přechodu k ohybu pásů, jak je to naznačeno na Obr. 2-9b. Šířku přechodu označuje  $x_p$ ,  $x_n$  a  $U_D$  je potenciálový rozdíl mezi různě dopovanými oblastmi. Měli bychom ale ještě dodat, že rekombinace v polovodičové diodě se úplně nezastaví. Na Obr. 2-9c je znázorněn proud elektronů přes přechod. Pro proud děr je proces analogický. V polovodiči typu  $N$  totiž mohou mít některé elektrony vyšší energii, než jaká odpovídá potenciálové bariéře difúzního napětí. Tyto elektrony tak mohou přecházet přes přechod p-n do oblasti  $P$ , kde rekombinují s volnými dírami. Tento proud nazýváme rekombinačním. Současně s tímto procesem dochází v polovodiči  $P$  ke generaci páru elektron

díra a volný elektron je urychlován v elektrickém poli přechodu p-n do oblasti  $N$ . tento proud se nazývá termální nebo-li difúzní. Pokud tak na polovodič nepřiložíme vnější napětí, proudy se vyrovnají a navenek se neprojeví. Pokud ale vnější napětí přiložíme a to tak, že kladný potenciál bude na polovodiči  $P$ , dojde ke snížení potenciálové bariéry  $U_D$  a tím k převládnutí proudu elektronů do polovodiče typu  $P$  a děr opačně. Mluvíme tak o propustném směru p-n přechodu. Při opačné orientaci vnějšího napětí dojde ke zvýšení potenciálové bariéry  $U_D$  a tím se sníží i rekombinační proudy. Převládá tedy termální proud, který je nižší v důsledku nízké koncentrace elektronů v polovodiči  $P$ . Hovoříme tak o závěrném směru p-n přechodu [6].



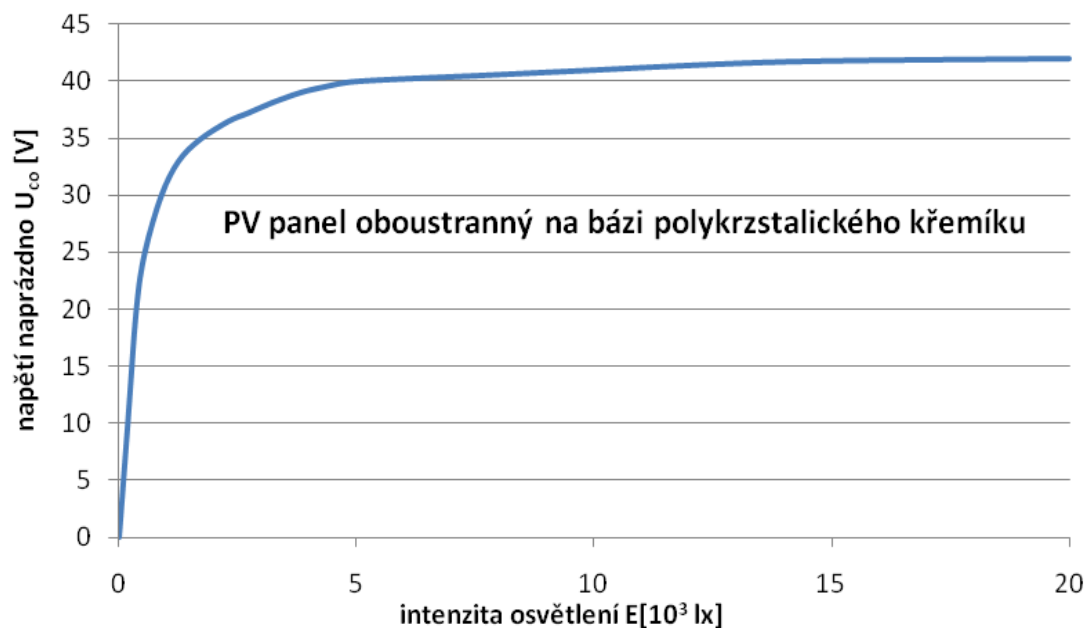
Obr. 2-9 Model polovodičového přechodu P-N [6].

Nyní se tak dostáváme k vlastnímu FV článku, který si můžeme představit jako velkoplošnou diodu. V tenkém plátku křemíku je v malé hloubce pod povrchem vytvořen p-n přechod, který je z obou stran opatřen vhodnými kovovými kontakty. Když na FV článek dopadá světelné záření, tedy proud fotonů s energií větší, než je šířka zakázaného pásu. Dochází ke generaci volných elektronů a děr. Dopadající fotony tak většinu své energie předají a pohltní se. Pokud mají ještě přebytek energie, předají ji kmitům mřížky a přemění ho tak na teplo. Tím dochází k zahřívání FV článku. Generované páry elektron díra jsou pak, jak vidíme na Obr. 2-10, od sebe odděleny elektrickým polem  $\vec{E}$  mezi vázanými prostorovými náboji. Díry jsou tak urychlovány ve směru napětí a elektrony v opačném směru. Výsledkem je vznik elektrického potenciálu mezi opačnými póly FV článku. Po připojení tohoto FV článku do elektrického obvodu nám tak tímto uzavřeným okruhem teče stejnosměrný elektrický proud a FV článek je v tomto obvodu zdrojem elektrické energie [6].



Obr. 2-10 Model energetických hladin FV článku a fotovoltaické přeměny energie [6].

Na Obr. 2-10 vidíme graficky zobrazenou výše popsanou situaci, kdy v části a) je vidět rozložení energetických hladin. V části b) vidíme vyrovnání Fermiho energie a ohyb jednotlivých pásů při neosvětleném FV článku. Jsou zde znázorněny i již zmíněné rekombinační a termální proudy. Poslední část c) je nejdůležitější částí, tedy při osvětlení, kdy dopadající fotony poruší rovnováhu a zvýší se generace páru elektron-díra. Elektrické pole  $\vec{E}$  usměrňuje proudění jednotlivých částic (část P se nabíjí kladně a část N záporně). Dále se sníží potenciálová bariéra  $U_D$  a Fermiho hladina se v oblastech typu P a N rozdělí. Rozdíl mezi těmito hladinami je fotovoltaické napětí  $U_p$ . U křemíkových FV článků toto napětí odpovídá přibližně hodnotě  $U_p \approx 0,6V$ . Zvýšením intenzity ozáření FV článku už ale zvýšení napětí naprázdno nedosáhneme. Názorně to ukazuje Obr. 2-11. Fotovoltaické napětí se totiž vykompenzuje s opačným napětím prostorových nábojů na p-n přechodu a směr pohybu volných elektronů a děr už se tak neodděluje (POZN: V grafu na Obr. 2-11 jsou FV články v sério-paralelním řazení, maximální hodnoty osvětlení přímým slunečním zářením na povrchu Země přesahují hodnoty 100 000 lx) [6].



Obr. 2-11 Závislost napětí naprázdno na osvětlení u FV panelu [6].

## 3 CHARAKTERISTIKA SOUČASNÉHO STAVU ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

### 3.1 Praktické využití FV článků

FV články byly vyvinuty ve 20. století především pro účely vesmírných misí, ve kterých cena za takovéto panely nehrála roli. V posledních letech se ale tato technologie osvědčila i v běžném životě a rychlost rozvoje zmiňované technologie nabrala na obrátkách a výrobní náklady na zhotovení FV článku prudce klesají. Není se tedy čemu divit, že ve vyspělých zemích za státní podpory se žádosti o připojení nových elektráren do distribuční sítě jenom hrnou. Měli bychom se ale stále dívat na danou problematiku střízlivě. Pokud totiž chceme vyrábět z FV článků elektřinu, tak nás podle Evropské komise stojí jedna kilowatthodina 25 eurocentů, což je v porovnání s jednou kilowatthodinou z fosilních paliv nesrovnatelné. Ta nás totiž přijde asi na 4 eurocenty. Faktem je, že v současné době se provozovatel distribučních sítí ČEZ Distribuce vyjadřuje k žádostem o připojení výroben z obnovitelných zdrojů energie (OZE) s instalovaným výkonem 11 000 MW a z tohoto doslova gigantického instalovaného výkonu se v bez mála 100 % případech jedná o fotovoltaickou elektrárnu [9]. Takto velký počet nově vznikajících FV elektráren bychom asi těžko získali, nebýt tučné podpory a výraznému poklesu pořizovací ceny těchto elektráren. Ta totiž za poslední tři roky klesala v průměru o 48 % [11] a právě díky tomu a již zmíněné podpoře od státu, formou zeleného bonusu, se FV elektrárny staly spíše byznysem než zbraní ekologů a zastánců alternativních zdrojů energie. Zavádění FV článků do života tak lze realizovat tedy pouze v zemích, jako je například Německo, Španělsko a i v České republice, kde se tato investice pojí s velkými dotacemi.

### 3.2 Druhy FV článků

#### 3.2.1 FV články na bázi křemíku

V současné době je drtivá většina (asi 90 %) komerčně dostupných FV panelů vyrobena na bázi křemíku. Tento prvek, který je opravdovým stavebním kamenem dnešních polovodičových technologií je tak využíván nejenom v mikroelektronice a ve všech integrovaných systémech, ale i ve FV článcích vyrábějících elektřinu. Navíc velikou výhodou tohoto prvku je i neodmyslitelný fakt, že v zemské kůře je tento prvek zastoupen 26 %. I když je kladen veliký důraz na jeho čistotu (až 99,9999999 %) je vyrobena většina FV článků prostřednictvím křemíkových ingotů [2].

- **Články z monokrystalického křemíku**

Jedná se o základní a nejstarší typ FV článků. Výroba probíhá z již zmíněných ingotů, které se většinou získávají Czochralského metodou, tedy pomalým tažením zárodku krystalu z taveniny velice čistého křemíku. Drátovou pilou je pak tento ingot rozřezán na tenké plátky (0,1 mm až 0,35 mm). Plátky jsou následně vyrovnávány, leštěny, odleptávány a přidáním fosforu (typ *N*) se vytvoří p-n přechod. Asi největší ztráta při výrobě těchto monokrystalických článků vzniká při samotném řezání ingotu. Dříve nebyly dostatečně vyspělé technologie na řezání tenkých plátek a navíc se v průmyslu stále bojuje s velkým procentem odpadu. Ingot má totiž tvar válce a pro výrobu FV článků se upravují plátky na čtverec, nejčastěji o rozměrech 10x10 cm. Účinnost těchto článků se běžně pohybuje mezi 14 až 17 % [2].

- **Články z polykrystalického křemíku**

Články vyrobené z polykrystalického křemíku jsou asi nejrozšířenějším typem článků. Jejich velkou devízou je právě cena výroby, která je v porovnání s cenou monokrystalického článku menší. Tyto články se totiž vyrábějí odléváním do forem tvaru čtverce nebo obdélníků a prakticky tak nevzniká žádný odpad. Na rozdíl od monokrystalických článků ale mají o něco horší elektrické vlastnosti, tedy nižší proud a účinnost, která se běžně pohybuje mezi 13 až 16 % [2].

- **Články z amorfního křemíku**

Tento typ článků má oproti zmíněným dvou typům velkou výhodu v ceně. Je podstatně levnější, protože v procesu výroby se spotřebuje podstatně méně materiálu. V procesu výroby se vychází z rozkladu vhodné křemíkové sloučeniny na skleněnou, nerezovou či plastovou destičku. Výsledné články tak mohou být velice tenké a dokonce ohebné. Protože se ale jedná o nepravidelnou strukturu s velkým počtem poruch, má tento článek daleko menší účinnost, tedy asi 5 až 7 % [2].

### 3.2.2 Nekřemíkové FV články

Protože zažívají fotovoltaické systémy v posledních letech velký boom, je velký tlak investorů na výrobce, kteří doslova nestačí produkovat FV články na bázi křemíku. V minulosti se tak objevila celá řada FV článků, které nebyly založeny na křemíkové struktuře. Drtivá většina se ale v praxi příliš neujala, protože náklady na výrobu byly příliš velké. Navíc se o výrobu elektrické energie ve FV člancích začíná hodně zajímat USA, Japonsko a Evropa a díky státním investicím se snaží vyvinout takové technologie, které by FV články výrazně zlevnily, aby cena fotovoltaické elektřiny byla stejná jako cena elektřiny z klasických zdrojů [2].

- **Galiumarsenid (GaAs)**

Jedná se o monokrystalické tenkovrstvé články s vysokou absorpcí slunečního záření. Vedle této výhody mají i řadu jiných výhod, jako odolnost vůči vyšším teplotám, vyšší účinnost. Právě s článkem na bázi *GaAs* bylo v laboratoři dosaženo doposud největší účinnosti 28 % [9]. Velkou nevýhodou těchto článků je ale dostupnost galia, které je velice vzácné a vyskytuje se dokonce méně než zlato. Arsen na tom není o moc lépe a navíc se jedná o jedovatý prvek [2].

- **Diselenid mědi a india (CuInSe<sub>2</sub>, CIS)**

Tyto články se vyznačují velkou absorbitivou a mohou tak být velice tenké (90 % záření se pohltí v jednom mikrometru tloušťky). Dosahují tak vysoké účinnosti (v laboratoři až 18 %). Často se užívá i varianta s obsahem galia (*Cu(InGa)Se<sub>2</sub>*, *CIGS*) [2].

- **Telurid kadmia (CdTe)**

Tento materiál má téměř ideální vzdálenost valenčního a vodivostního pásu (1,44eV) a velkou absorptivitu pro sluneční záření. Stejně jako předchozí typ lze i *CdTe* článek vyrábět nízkonákladovými technologiemi [2].

- **Články využívající organické látky**

Vývoj v oblasti organických FV článků je zaměřen na nízkou cenu, pružnost a ohebnost článků. Výzkum v této oblasti je ale hodně nepřehledný a zatím taky málo prakticky využíván. Od organických fotovoltaických článků si ale lze hodně slibovat, protože potenciál je zde značný.

V 90. letech vytvořil Grätzel FV články s organickým barvivem, které se podle něho jmenují Graetzelovy články. Základem je  $TiO_2$  díky kterému se dosahuje poměrně vysoké účinnosti. Článek se skládá z vysoce porézní vrstvy oxidu titaničitého, v němž je nasáknut vodný roztok elektrolytu obsahující redox dvojici (jód, jodid) a vhodné barvivo (organický komplex ruthenia). Zachycením fotonu je vytvořen excitovaný stav a elektron je přenesen na  $TiO_2$ . Elektron projde skrz strukturu  $TiO_2$  a je odveden do vnějšího obvodu. Obvod je uzavřen tak, že na druhé elektrodě je elektron vstupující z vnějšího obvodu přenesen na jód, vytvoří se trijodidový anion a ten redukuje oxidovanou formu barviva, jež je tak připravena na přijetí dalšího fotonu. Výhodou těchto Graetzelových článků je menší nárok na čistotu použitých materiálů, ale nevýhodou je potíže s kapalným a korozivním elektrolytem, který musí být dostatečně izolován. Navíc použité barvivo musí vydržet dlouhou dobu slunečního svitu a nesmí se rozkládat. Co se týče účinnosti těchto článků, tak v nedávné době bylo dosaženo 7,3 % [2].

- **Nanostruktury**

Díky novodobé technologii, která umí vytvořit dostatečně malé struktury, takzvané kvantové tečky, lze v takovýchto strukturách nastavit potřebnou šířku zakázaného pásu. Navíc kromě této výhody by mělo být možné nanášet tyto struktury na povrch vhodného substrátu naléváním suspenze v odstředivce. Dosažené účinnosti takovýchto struktur jsou ale zatím velice malé, pohybují se v okolí 3 % [2].

- **FV články z vodivých polymerů**

Tento typ je určitou analogií klasického FV článku s p-n přechodem. Jedná se tak o vodivou směs dvou polymerních molekul. Zatímco jedna má elektron-akceptorové vlastnosti, druhá má elektron-donorové vlastnosti. Při pohlcení fotonu dojde k vytvoření vázaného páru elektron-díra a za určitých podmínek dojde k přenosu náboje na elektron-akceptorovou molekulu. Jako elektron-donorová molekula slouží třeba poly(3-oktyl-thiofen) a jako akceptor elektronů slouží uhlíková trubice. Samotná účinnost těchto článků je ale velkým problémem. Pohyblivost elektronů v organických systémech je horší než v anorganických polovodičích a je tedy velká šance, že dojde k rekombinaci nábojů [2].

- **Vícepřechodové struktury (multijunction)**

Běžný FV článek s jedním p-n přechodem má účinnost závislou na tom, jakou část slunečního spektra může využít a taky na tom, jak velká část energie fotonu se přemění na elektrický proud a jaká na teplo. Pokud je šířka zakázaného pásu malá, pak může FV článek využít širší část spektra, ale „zaplatí“ to nižším napětím a účinností. Když je naopak zakázaný pás hodně široký, dojde k využití jen malého počtu fotonů, ale napětí je zase vyšší. Existuje tedy optimální šíře zakázaného pásu, kdy je účinnost článku maximální. Například monokrystalické křemíkové články jsou velice blízko tohoto optima a  $GaAs$  články jsou zase velice výhodné pro družice, tedy mimo zemskou atmosféru [2].

Dosáhnout podstatně lepšího využití dopadajícího slunečního záření lze ale vytvořením vícevrstvé struktury, kdy každá část je optimalizována pro určitou část slunečního spektra. Proud článku je sice redukovaný, ale dostatečně to kompenzuje vyšší napětí článku. Tyto články tak dosahují daleko vyšších účinností, protože teoreticky lze využít plné sluneční spektrum. Běžně se používají takové struktury, kdy vrchní vrstva zachycuje fotony s vyšší energií a fotony s nižší energií jsou zachyceny v dalších polovodičových vrstvách. Jako materiál jsou často používány prvky ze III. a V. skupiny, tedy  $InP$ ,  $GaSb$ ,  $GaAs$ . Pečlivým nastavením lze doslova vyladit

využití celého slunečního spektra. V současné době využívané třívrstvé články budou možná v brzké budoucnosti nahrazeny čtyřvrstvémi a dokonce se pracuje už i na šestivrstvých. Zatímco u třívrstvých se dosahuje účinnosti 41 %, u zmíněných šestivrstvých se odhaduje účinnost na skvělých 58 % [2].

### 3.3 Ekonomika FV systémů

V současné době můžeme hovořit o tom, že FV elektrárny jsou v kurzu. Především to způsobuje výhodně nastavená podpora těchto systémů a neustále klesající pořizovací cena celé elektrárny. V České republice se tak investoři doslova hrnou s projekty na vybudování nových slunečních elektráren. Dokazuje to i statistika z roku 2008, kdy z 909 nových obnovitelných zdrojů bylo 836 FV elektráren, tedy neuvěřitelných 92 %. Bohužel jejich zájem je tak markantní nikoli z ekologického cítění těchto businessmanů, ale právě z důvodu silné podpory. Výkupní cena elektřiny dodané do sítě z FV elektrárny spuštěné v roce 2009 totiž činila 12,79 Kč/kWh [10]. Navíc projekt FV elektrárny lze realizovat v průběhu několika měsíců, což je pro investory výhodné a současně elektrárny zkolaudované v roce 2009 mají dvacetiletou garanci výkupu elektrické energie distributorem. Současná situace navíc do České republiky přitahuje i investory ze zahraničí, protože podmínky pro vznik FV elektrárny jsou u nás jedny z nejlepších v celé Evropě. Meziroční nárůst instalovaného výkonu FV elektráren se tak pohybuje okolo 300 %.

Vstupní údaje pro ekonomické hodnocení

- *Investiční výdaje* – jednorázové výdaje na přípravu stavby, dodávky technologie, montáž, výkup pozemků, atd.
- *Doba životnosti zařízení* – doba, po kterou bude možné zařízení využívat. Většina výrobců garantuje, že účinnost článků nepoklesne pod 80 % dříve jak po 20 letech.
- *Provozní výdaje* – peníze na obsluhu zařízení, jeho údržbu, opravy, pojištění, poplatky
- *Velikost roční produkce energie* – příznivým faktorem v ekonomickém hodnocení je samozřejmě samotná výroba elektrické energie.
- *Způsob financování* – tedy doba splácení, úrokové sazby nebo cena vlastních peněz investora, případně dotace.

Součtem vstupních údajů se tak dostaneme k ekonomické efektivnosti projektu, tedy poměru mezi příjmy a výdaji. Racionálního investora totiž zajímá pouze to, kolik bude projekt stát a jaký je ekonomický efekt. V současné době je totiž investice do FV elektráren nejvýhodnější investicí, což ukazuje i tabulka Tab. 3-1. Navíc se současnými technologiemi a výkupními cenami se investiční náklady u většiny FV elektráren na území České republiky vrátí v průběhu sedmi let [2].

Tab. 3-1 Výnosy nízkorizikových investic [11].

Běžný účet	0 až 1%
Termínovaný vklad	2 až 3%
Státní dluhopisy	2 až 6%
Hodnota zvolená ERÚ pro výnosnost všech OZE	7%
Současná výnosnost malých FV elektráren	10 až 15%
Současná výnosnost velkých FV elektráren	14 až 17%

### 3.3.1 Státní podpora FV elektráren

Česká republika se před několika lety zavázala splnit osmiprocentní podíl hrubé vyrobené elektřiny z obnovitelných zdrojů na tuzemské hrubé spotřebě a to do roku 2010. Došlo tak k vytvoření potřebné legislativy a dobrých tržních podmínek, aby byl tento cíl dosažitelný. V zákoně č. 180/2005 Sb. je tak definován mechanismus výkupu elektřiny prostřednictvím výkupních cen a zelených bonusů, tzv. **feed-in tariff**. Z výše zmíněného zákona sice vyplývá povinnost pro provozovatele přenosové sítě nebo distribuční soustavy připojit FV elektrárnu do přenosové soustavy, ale v poslední době právě díky rapidnímu nárůstu připojených FV elektráren došlo k pozastavení připojování viz *Tisková zpráva ERÚ v příloze A*. Pokud se ale vrátíme zpátky k tzv. feed-in tariff, tak si zákazník vybere ze dvou již zmíněných možností [14].

Pokud zvolíme cestu výkupních cen, probíhá výkup za cenu určenou pro daný rok ERÚ a tato cena bude vyplácena jako minimální, navyšující se o index PPI po dobu následujících dvaceti let. Rozdíl mezi podporou systémem výkupních cen a zelených bonusů je následující. Rozhodne-li se investor pro systém výkupních cen, bude v následujících patnácti letech dostávat minimálně cenu stanovenou ERÚ pro daný rok, kdy byla elektrárna uvedena do provozu [14].

Druhou možností je zelený bonus. V tomto případě si musí vlastník FV elektrárny najít obchodníka, kterému elektřinu prodá za tržní cenu. Cena je nižší než u konvenčních zdrojů, protože se jedná o nestabilní zdroj elektrické energie. Jakmile výrobce prodá elektřinu obchodníkovi, získá majitel FV elektrárny od provozovatele distribuční soustavy již zmíněný zelený bonus. Jedná se v podstatě o prémii, jejíž výši stanovuje opět ERÚ. Výška zeleného bonusu by měla být taková, aby výrobce získal za jednotku prodané elektřiny o něco více než v systému pevných výkupních cen. Přehled výkupních cen a zelených bonusů naleznete v Tab. 3-2. Z uvedených cen je patrné, že právě díky velkému množství nově připojených zdrojů elektrické energie z FV elektráren došlo ke snížení státní podpory. Meziroční pokles je u obou typů státní podpory stejný, tedy **5 %**, což je maximum, které dovoluje zákon č. 180/2005 Sb. [14].

V rámci podpory státu je třeba ještě dodat, že kromě těchto výše zmíněných způsobů podpory je velice důležitý zákon č. 586/1992 Sb., o daních z příjmů. Příjmy z provozu OZE jsou tak od roku uvedení do provozu po dobu pěti let osvobozeny od daní ze zisku (§ 4 písmeno e) [14].

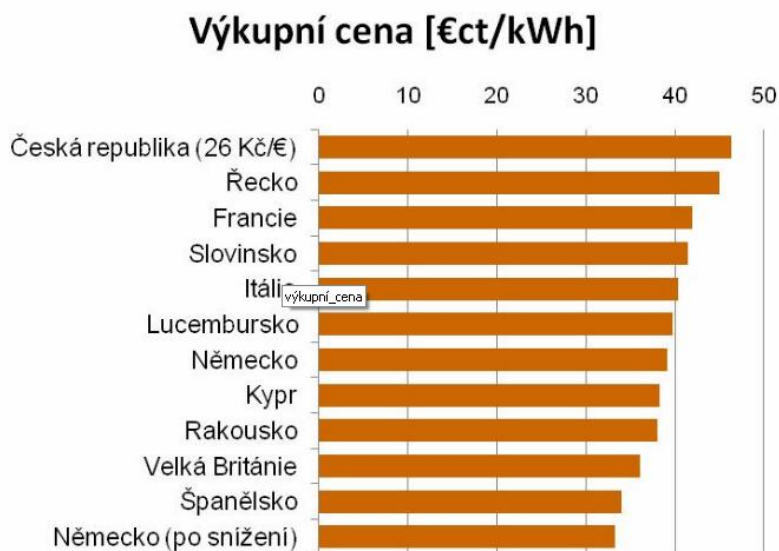
Tab. 3-2 Státní podpora FV systémů [15].

Fotovoltaické elektrárny	Výkupní ceny elektřiny dodané do sítě v Kč za 1 MWh	Zelené bonusy v Kč za 1 MWh
Výroba elektřiny využitím slunečního záření pro zdroj s instalovaným výkonem do 30 kW včetně a uvedeným do provozu od 1. ledna 2010 do 31. prosince 2010	12 250	11 280
Výroba elektřiny využitím slunečního záření po 1. lednu 2009 pro zdroj s instalovaným výkonem nad 30 kW včetně a uvedeným do provozu od 1. ledna 2010 do 31. prosince 2010	12 150	11 180
Výroba elektřiny využitím slunečního záření pro zdroj s instalovaným výkonem do 30 kW včetně a uvedeným do provozu od 1. ledna 2009 do 31. prosince 2009	13 150(12 890)	12 180(11 910)
Výroba elektřiny využitím slunečního záření po 1. lednu 2009 pro zdroj s instalovaným výkonem nad 30 kW včetně a uvedeným do provozu od 1. ledna 2009 do 31. prosince 2009	13 050(12 790)	12 080(12 320)

POZN.: čísla v závorkách v tabulce jsou výkupní ceny pro rok 2009. Rozdíl mezi závorkovanými nezávorkovanými hodnotami jsou 2 %, které tvoří meziroční růst podle indexu PPI.

### 3.3.2 Státní podpora FV elektráren ČR versus Evropa

Protože je státní podpora v rámci Evropské unie a tedy i u nás jasně definovaná podle tabulkových hodnot, můžeme s jistotou říct, že výkupní ceny pro elektřinu z FV elektráren jsou v České republice nejvyšší ze států evropské sedmadvacítky. Důkazem je toho i Obr. 3-1, který ukazuje velikost výkupních cen pro FV elektrárny s instalovaným výkonem do 30 kW<sub>p</sub>.



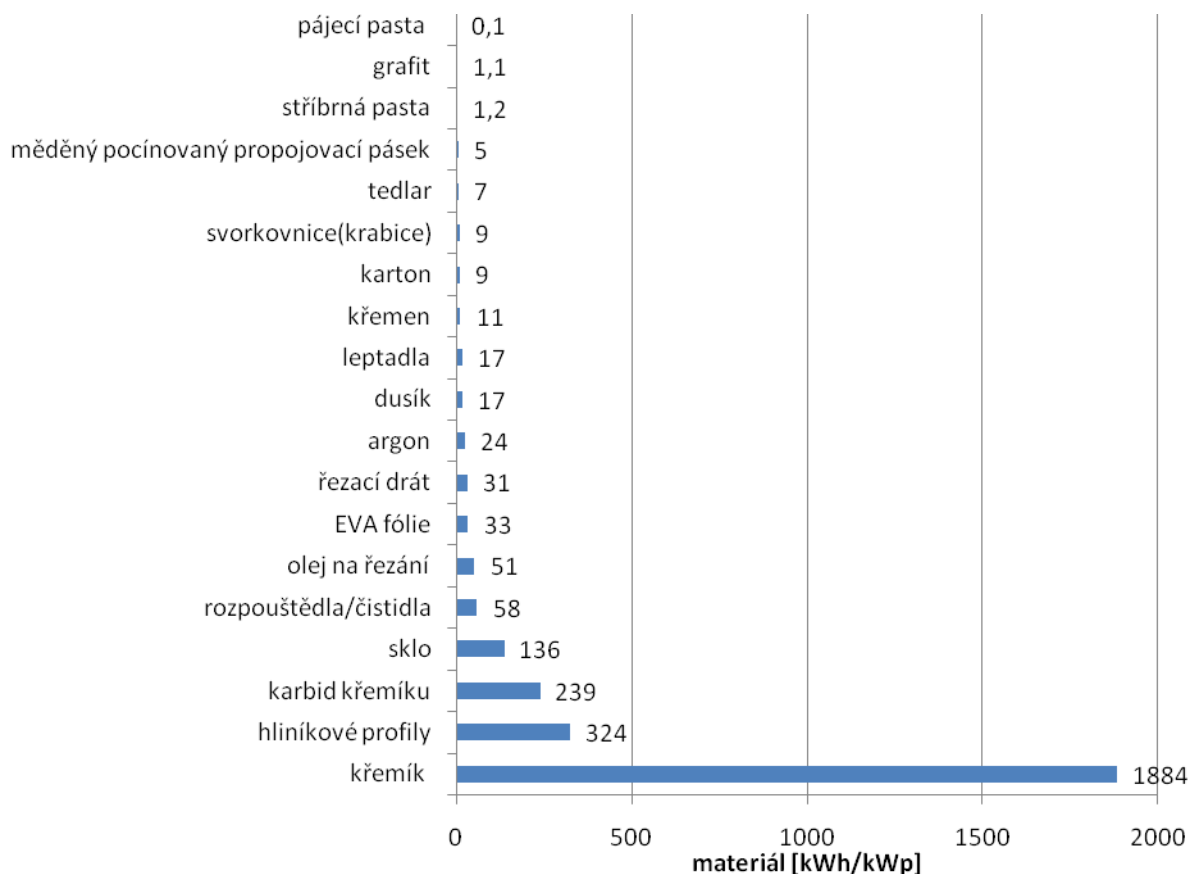
Obr. 3-1 Výše výkupních cen v rámci Evropské unie [16].

Z grafu tak velice jasně vidíme, že výkupní ceny elektřiny jsou u nás daleko vyšší, než u vyspělých států jako je Německo, Velká Británie nebo Francie.

Dalším faktem je, že i když na územích jako je například Kypr, Řecko nebo Španělsko je státní podpora FV elektráren nižší, vyplatí se jejich stavba daleko více než u nás, protože je v těchto lokalitách intenzita slunečního záření a počet slunečných dnů daleko vyšší než v našich zeměpisných šířkách. Jedná se tak především o klimatické faktory, které celkové výnosy z FV elektrárny značně ovlivňují. Jednotlivé závislosti lze nalézt v *Příloze B*.

### 3.4 Struktura energetických nákladů na výrobu FV panelů

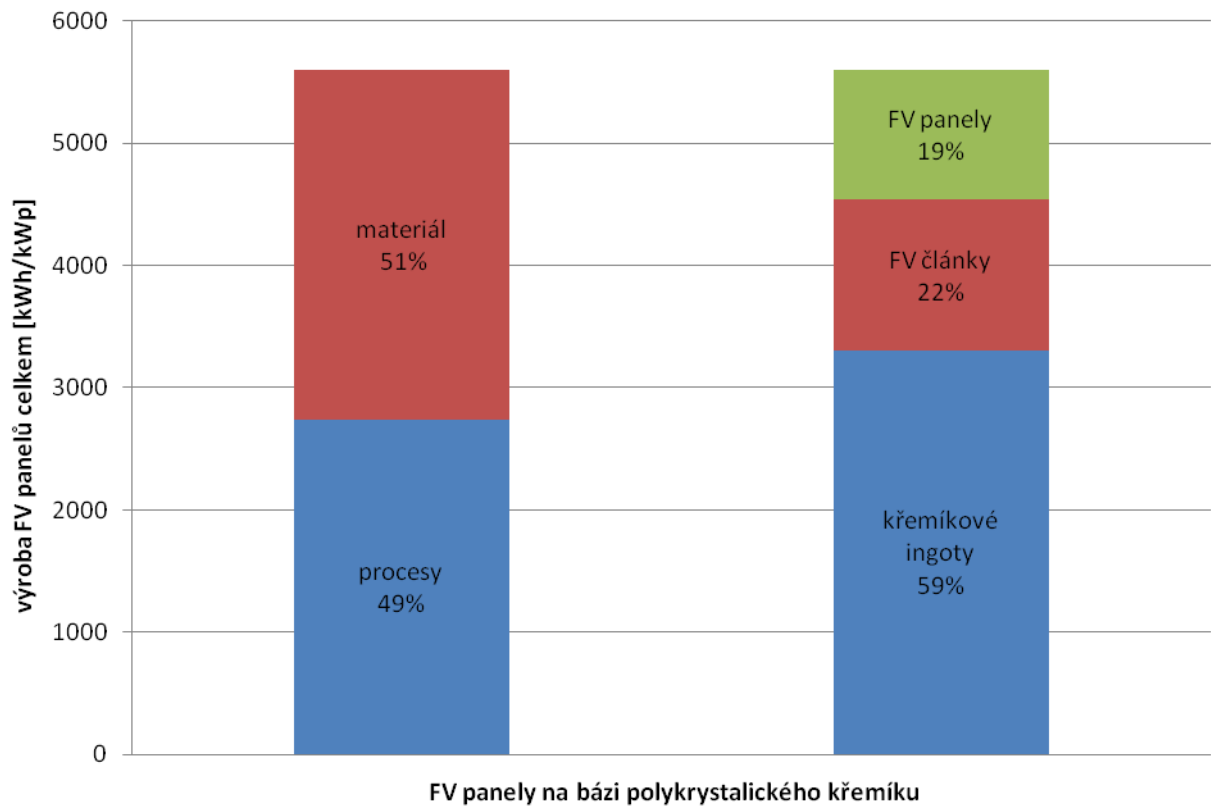
Bez povšimnutí by určitě neměly zůstat ani energetické náklady na výrobu jednotlivých FV panelů. Odpůrci FV energie totiž neustále argumentují faktem, že za dobu života těchto panelů, tedy přibližně 20 let, nevyrobí dostatek energie, aby pokryly vlastní výrobu. Dnes můžeme s jistotou říct, že tento argument se ukázal jako lichý. Jak je vidět na Obr. 3-2 a 3-3, velikost energie potřebné k výrobě FV panelů je konečná. Pro výrobu monokrystalických panelů o výkonu 1 kW<sub>p</sub> se tak pohybuje okolo 5600 kWh [6].



Obr. 3-2 Potřebná energie k přípravě materiálů pro výrobu FV panelu o výkonu 1 kW<sub>p</sub> [6].

Na Obr. 3-2 je pak názorně vidět, že největší část energie připadne na získání křemíku. Na Obr.3-3 je pak vidět, že na celkové zpracování křemíku pro FV systém připadá něco kolem 60% veškeré energie. Jedná se tak o poměrně velkou část, ale jak již bylo řečeno, konečného čísla. Samozřejmě, že v závislosti na poloze na Zemi, kde bude systém instalován, hodně záleží a bude se od toho odvíjet fakt, jestli spotřebovanou energii pro svoji výrobu vyprodukuje již za dva nebo za sedm let. V našich zeměpisných polohách se většinou udává, že FV panely vyprodukují

energii do nich vloženou za šest až sedm let. Dalších třináct let pak tedy budou vyrábět nad rámec primárně vložené energie [6].



Obr. 3-3 Poměry spotřeba energie při výrobě FV panelu o výkonu 1 kW<sub>p</sub> [6].

### 3.5 Výhody a nevýhody FV systémů

V této práci už byly zmíněny faktory, které staví FV elektrárny jak do pozice výhodných zařízení, tak i značný počet aspektů, které naopak nejsou pro FV elektrárny příliš lichotivé. Pojďme si nyní tyto aspekty shrnout.

#### 3.5.1 Výhody FV systémů

- Alternativní zdroj energie, který při výrobě elektrické energie neznečišťuje ovzduší skleníkovými plyny
- Decentralizace zdroje energie – FV elektrárna na střeše rodinného domu může v případě výpadku distributora zásobovat dům energií.
- Využití sluneční energie
- Ekonomicky výhodná investice

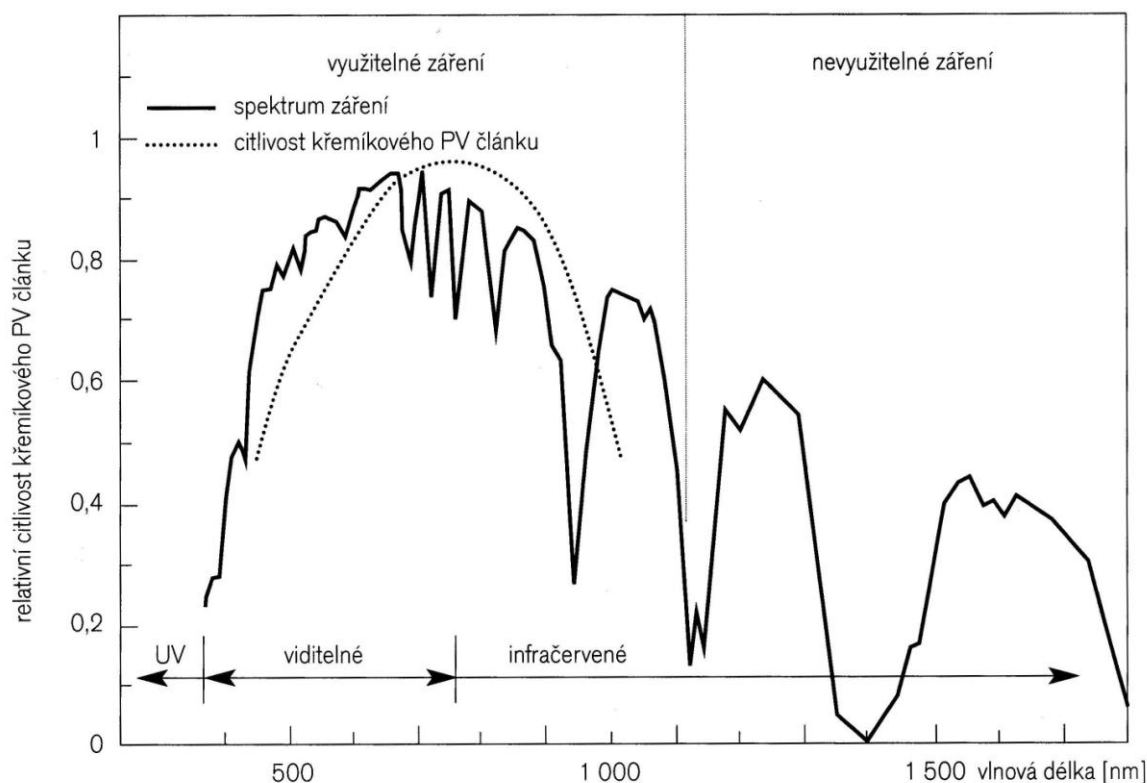
#### 3.5.2 Nevýhody FV systémů

- Dopusud velká energetická náročnost při výrobě článků
- Pokles účinnosti s teplotou a se stárnutím článku
- Zabírání zemědělské půdy (aktuální především pro Evropu)
- Při výrobě CdTe článků vypouštění  $\text{NF}_3$  (sloučenina je 17000 krát účinnější při oteplování atmosféry než  $\text{CO}_2$  [10])
- Nestálé zdroje energie (v závislosti na oblačnosti a ročním období)
- Nesrovnatelně vyšší cena kWh oproti klasickým zdrojům
- S vysloužilými FV články se musí nakládat jako s nebezpečným opadem podle Zákona o odpadech č. 185/2001 Sb a vyhlášky 381/2001 Sb

## 4 VLIV TEPLoty NA KVALITATIVNÍ PARAMETRY FV ČLÁNKŮ

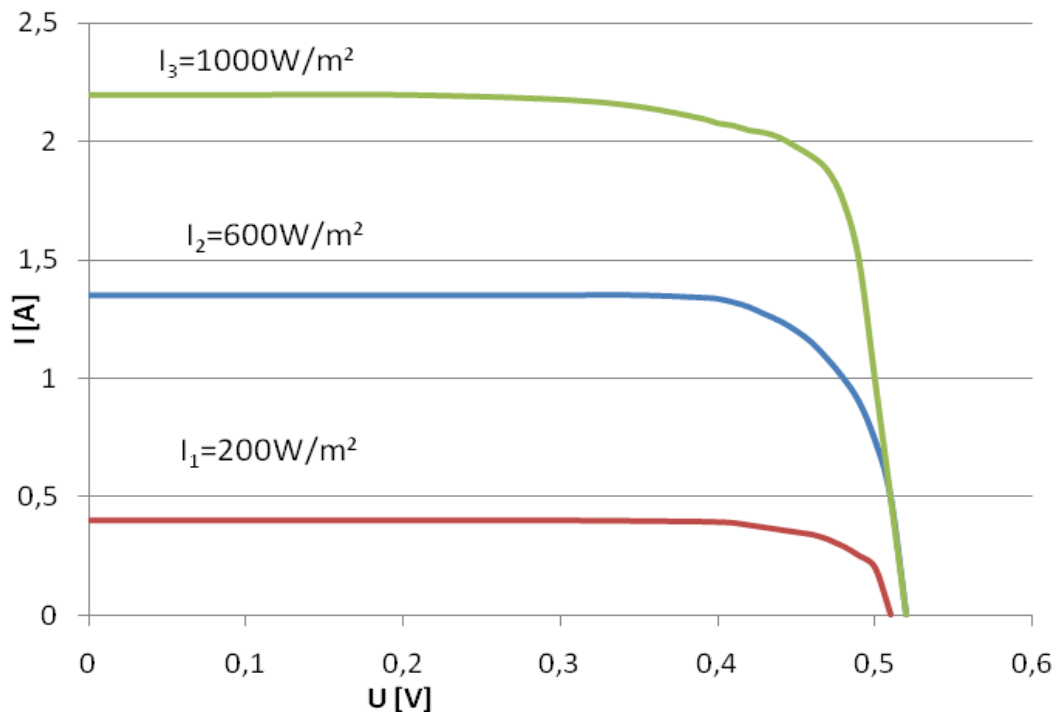
### 4.1 Faktory ovlivňující výkon FV článků

Už jsme si řekli, na jakém principu je přeměna sluneční energie na elektrickou založena. Neměli bychom ale zapomenout ještě zmínit, že výkon FV článků závisí na řadě faktorů. Například na dopadajícím spektru fotonů, které souvisí s fotoelektrickým jevem, který jsme probrali v druhé kapitole. Protože pro křemík odpovídá šířka zakázaného pásu hodnotě  $E_G \approx 1,1\text{eV}$ , jsou krystalické křemíkové FV články citlivé na fotony viditelného a blízkého infračerveného záření. Jedná se tak o fotony s vlnovou délkou kratší než  $\lambda \leq 1100\text{nm}$ . Na Obr. 4-1 vidíme právě spektrum slunečního záření po průchodu atmosférou. Je zde současně vyznačena vlnová délka fotonů a šířka zakázaného pásu křemíku, tedy absorpční hrana.



Obr. 4-1 Spektrum slunečního záření po průchodu atmosférou [6].

Dalším významným faktorem je pak intenzita osvětlení, která taky významně ovlivňuje výkon FV článku. Z VA charakteristiky na Obr. 4-2 vidíme, že se zvyšujícím se osvětlením roste především proud FV článkem a tedy i výkon. Bod, kde se křivky sbíhají na vodorovné ose napětí lze označit za napětí naprázdno při nekonečném odporu a průsečíky křivek se svislou osou odpovídají hodnotám proudů nakrátko při „nulovém“ odporu. Právě z této charakteristiky vycházíme při nastavení výkonu, protože při nastavování zatížení FV článku musíme zvolit ideální zátěž, při které nám bude dodávat FV článek maximální výkon, tedy součin napětí a proudu bude největší [6].



Obr. 4-2 VA charakteristika FV článku při různých intenzitách osvětlení a  $t=50\text{ °C}$  [6].

## 4.2 Fyzikální podstata změny elektrických parametrů FV článků v závislosti na teplotě

Nejdříve bychom si měli zavést důležité parametry, které u osvětleného FV článku sledujeme:

- Proud nakrátko  $I_{SC}$  – je získáván při napětí  $U=0$
- Napětí naprázdno  $U_{OC}$  – je získáno pro  $I=0$  a platí

$$U_{OC} = \frac{k \cdot T}{q} \cdot L_n \cdot \left[ \frac{I_L}{I_S} + 1 \right] \quad (\text{V; JK}^{-1}, \text{K, C, m, A, A}) \quad (4.1)$$

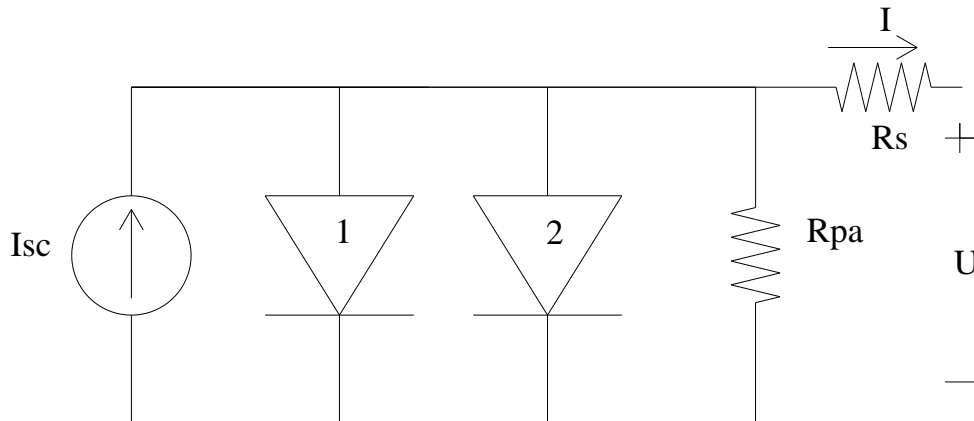
Kde  $k$  je Boltzmanova konstanta ( $k=1,38 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ ),  $T$  teplota v Kelvinech,  $q$  je velikost elementárního náboje ( $q=1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ),  $L_n$  je střední difúzní délka minoritních nosičů elektronů,  $I_L$  je proud generovaný světlem,  $I_S$  je saturační proud.

- Faktor plnění  $FF$  (Fill factor) – určuje maximální možnou plochu pro danou proudově napěťovou charakteristiku

$$FF = \frac{U_{mp} \cdot I_{mp}}{U_{OC} \cdot I_{SC}} \quad (-; \text{V, A, V, A}) \quad (4.2)$$

Kde  $U_{mp}$  je maximální napětí,  $I_{mp}$  maximální proud.

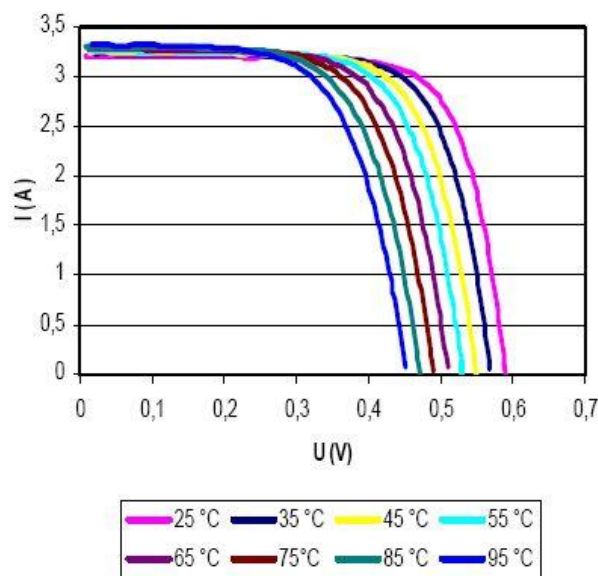
- Sériový odpor  $R_S$  – viz Obr. 4-3, původ sériového parazitního odporu můžeme hledat v celkovém odporu hmoty polovodiče a odporu kontaktů a propojení.
- Paralelní odpor  $R_{PA}$  – viz Obr. 4-3, příčiny vzniku paralelního parazitního odporu lze zase hledat v rozsáhlých defektech krystalické mřížky nebo může být způsoben svodovými proudy kolem okrajů článků. Pod pojmem rozsáhlé defekty krystalové mřížky rozumíme dislokace, hranice zrnitosti, především u levných FV článků.



Obr. 4-3 Model obvodu solárního článku obsahujícího parazitní sériový a paralelní odpor [12].

#### 4.2.1 Vliv teploty na parametry článků

FV články jsou vystaveny přímému slunečnímu svitu a jejich teplota v průběhu dne a v průběhu ročních období se hodně mění. Je tedy důležité porozumět vlivům a významu teploty na výkon FV článku.



Obr. 4-4 Vliv teploty na VA charakteristiku FV článku při  $1000 \text{ W/m}^2$  [13].

Proud nakrátko  $I_{SC}$  je na teplotě závislý jen velice málo. S rostoucí teplotou se tak proud nakrátko mírně zvyšuje. Tento jev může být způsoben zvýšenou absorpcí, protože šířka zakázaného pásu u polovodiče se s rostoucí teplotou zmenšuje. Pro proud nakrátko tak platí

$$I_{SC} = I_0 \left( e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right) \quad (\text{A; A, -}) \quad (4.3)$$

Další významné parametry FV článku jako napětí naprázdno  $U_{OC}$  a faktor plnění  $FF$  s rostoucí teplotou klesají a poměrně výrazně tak ovlivňují pokles výkonnosti FV článku. S poklesem výstupního výkonu FV článku tak klesá i jeho účinnost. Pro závislost napětí naprázdno  $U_{OC}$  platí vztah 4.4

$$\frac{dU_{OC}}{dT} = - \frac{U_{g0} - U_{OC} + \gamma \cdot \frac{k \cdot T}{q}}{T} \quad (\text{V, K; V, V, -, JK}^{-1}, \text{K, C, K}) \quad (4.4)$$

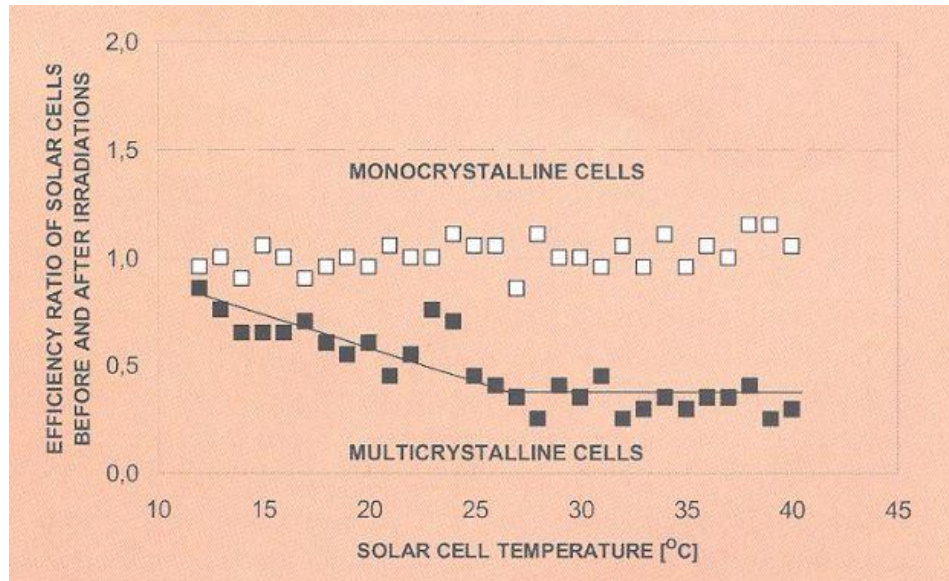
Ve vztahu 4.4 značí  $\gamma$  koeficient zahrnující teplotní závislosti ostatních parametrů  $I_0$  a výraz  $kT/q$  už jsme si vysvětlili dříve. Tento zlomek je také znám pod pojmem teplotní napětí  $U_T$ . Posledním parametrem je napětí  $U_{g0}$ , pro které platí

$$U_{g0} = \frac{E_{g0}}{q} \quad (\text{V; J, C}) \quad (4.4)$$

Kde  $E_{g0}$  značí šířku zakázaného pásu polovodiče použitého v článku získanou extrapolováním do nulové teploty. Po dosazení do vztahu 4.3 za  $U_{g0} \sim 1,2 \text{ V}$ ,  $U_{OC} \sim 0,6 \text{ V}$ ,  $\gamma \sim 3$  a  $T = 300 \text{ K}$ , tedy typických hodnot pro křemík, dostaneme  $\frac{dU_{OC}}{dT} = -2,3 \frac{\text{mV}}{\text{K}}$ , tedy lineární pokles napětí naprázdno v závislosti na teplotě. Tento výsledek velice dobře odpovídá experimentálním výsledkům, které prokázaly, že u křemíkových FV článků dochází k poklesu přibližně o 0,4 % na 1 K [12].

Mohlo by se zdát, že mírný růst proudu nakrátko a pokles napětí naprázdno by se navzájem mohly vykompenzovat. Bohužel tomu tak není a s rostoucí teplotou se snižuje jak výkon, tak účinnost. Pro křemík tak klesne výstupní výkon o 0,4 až 0,5 % na 1 K. Závislost poklesu napětí a růstu proudu na teplotě je znázorněna na Obr. 4-3. Společně se změnou napětí naprázdno a proudu nakrátko se mění i parazitní odpory, zatímco hodnota sériového odporu se v závislosti na vzrůstající teplotě téměř lineárně zvyšuje o 0,32 % na 1 K, hodnota parazitního paralelního odporu téměř lineárně klesá o 0,7 % na 1 K [13].

Na závěr je třeba ještě dodat, že závislost změny elektrických parametrů na teplotě je taky závislá na druhu FV článků. Jinak je tomu u monokrystalických křemíkových článků, které jsou téměř nezávislé a polykrystalických, jejichž účinnost klesá, viz. Obr. 4-4.



Obr. 4-5 Závislost poměrů účinnosti pro FV články před a po ozáření [9].

Z výše uvedených faktů vyplývá, že při provozu FV článků je požadavek na co nejnižší teplotu těchto článků. Je tak nezbytné disponovat konstrukcí umožňující efektivní chlazení (například přirozenou cirkulací vzduchu). Optimální metodou chlazení jsou hybridní panely, které navíc ještě využívají tepelnou energii, kterou získávají při chlazení FV článků. Dochází tak ke kombinaci FV panelu se solárním tepelným kolektorem pro ohřev vody. Poměrně jednoduše tak vznikají kombinované systémy pro využití sluneční energie, protože zadní povrch FV článků je propojen elektricky izolující, ale tepelně vodivou vrstvou se soustavou trubek s cirkulujícím chladícím médiem, které slouží k výměně tepla. Teplo je následně skladováno v zásobníku jako ohřátá voda [13].

## 5 MĚŘICÍ SYSTÉM V RÁMCI ÚSTAVU ELEKTROENERGETIKY

### 5.1 Popis měřicího systému

Ústav elektroenergetiky na FEKT VUT Brno disponuje měřicím systémem, díky kterému dochází k praktickému ověření některých závislostí, které se s FV systémy pojí. Zařízení, které vyrobila česká firma Solartec má následující parametry:

- Typ: Solartec SP17-100
- Jmenovitý výkon: 100 W<sub>p</sub>
- Jmenovité napětí: 24/12 V
- Max. sys. vol: 750 W
- Plocha: 0.845 m<sup>2</sup>

FV panel o výše zmíněných parametrech je umístěn na střešní terase budovy U2 v areálu děkanátu VUT v Brně na ulici Údolní 53 (fotografie viz *Příloha D*). Abychom mohli z tohoto FV panelu získávat údaje, které nám poslouží k požadovaným měřením, je tento systém ještě vybaven dalším zařízeními:

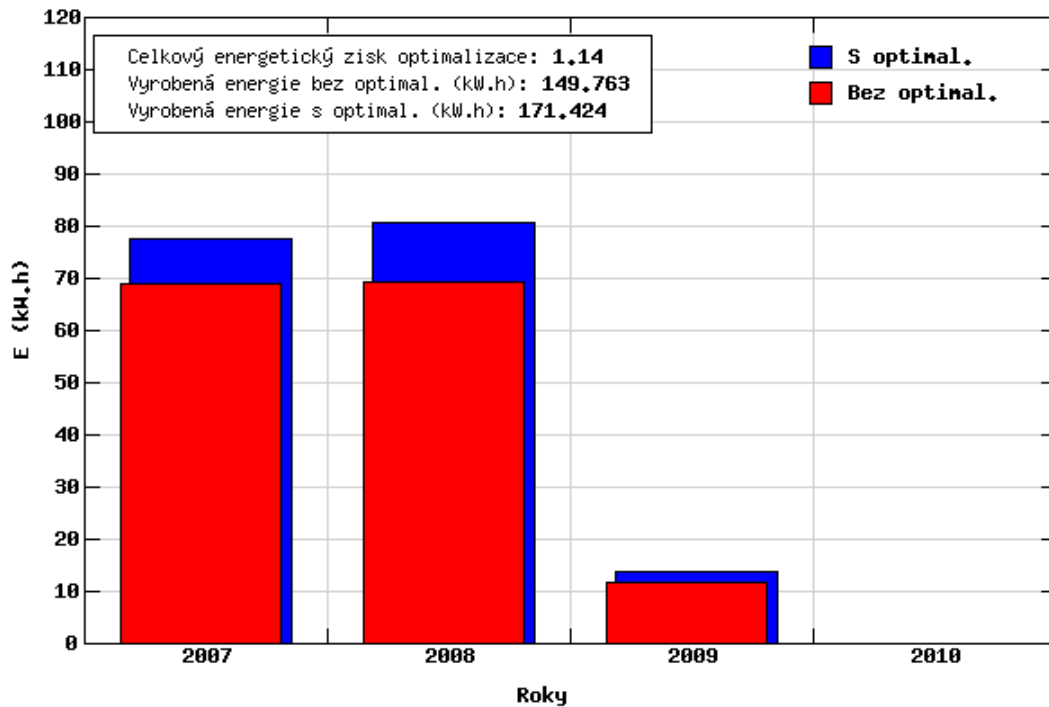
- Pyranometr (pro měření globálního slunečního záření): Tlust'ák, typ: SG010, U<sub>n</sub> = 15 V
- Teplotní čidla: KTY81-210
- Měřicí karta: NI 6024E
- Baterie: Auto akumulátor 5/15 V
- Bočník: Metra 10 mΩ/30A

### 5.2 On-line měření

Na základě přístrojů zmíněných v kapitole 5.1. jsme tak schopni na tomto FV panelu měřit parametry, které pak přenášíme do on-line laboratoře a prostřednictvím internetového prohlížeče můžeme sledovat aktuální nebo i archivní naměřené hodnoty. Celý systém nám tak zaznamenává následující parametry:

- Datum
- Čas
- Teplotu okolního vzduchu (čidlo je umístěno v ochranném „domečku“, aby se eliminoval vliv proudění vzduchu, vliv deště a přímý sluneční osvit)
- Teplotu samotného panelu na osvětlené straně
- Intenzitu dopadajícího záření
- Skutečný a optimalizovaný okamžitý výkon

Teoretické info Grafy on-line Denní Měsíční Roční Celkové



Obr. 1: Vyrobená energie (s optimalizací a bez optimalizace zatížení FV panelu) v jednotlivých rocích.

Obr. 5-1 Roční výtěžek z FV panelů za jednotlivé roky provozu [19].

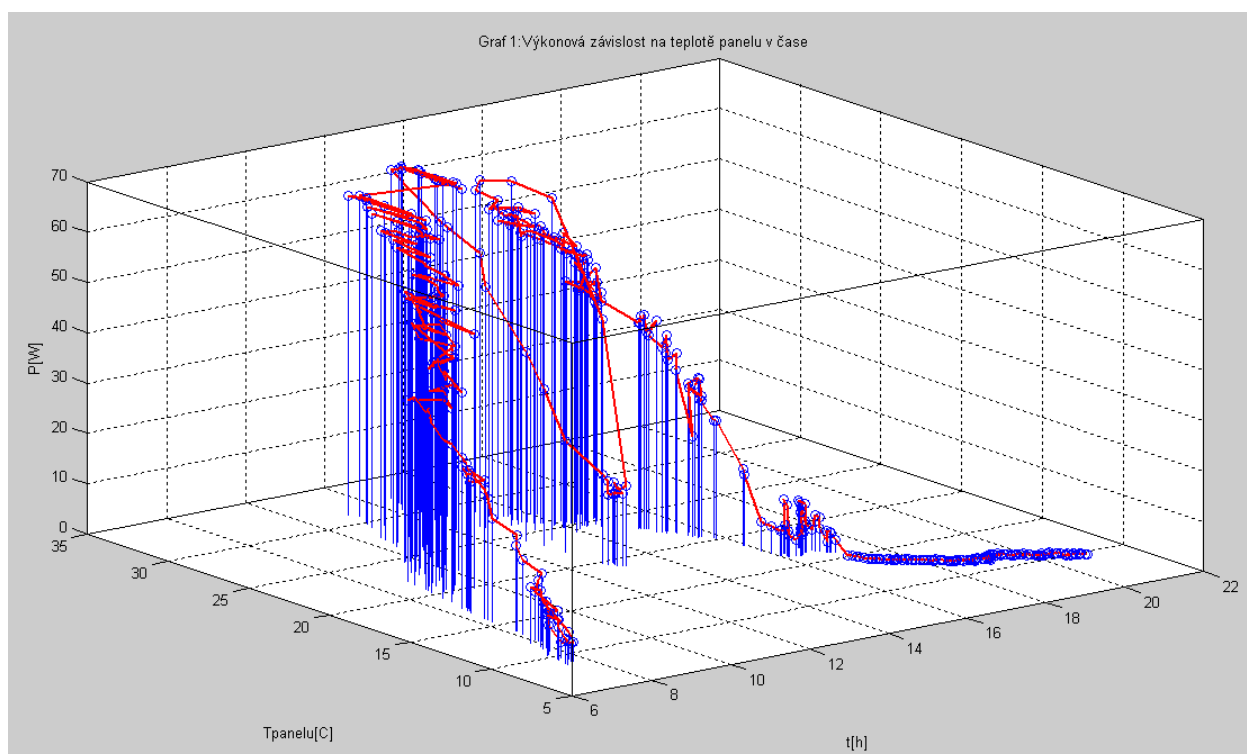
Na internetu si pak můžeme v této on-line laboratoři zobrazit ve vybraných časových úsecích šest možných grafických závislostí. V podstatě se ale jedná o jednotlivé veličiny změřené systémem v závislosti na čase a datu, kdy byly změřeny. Grafické závislosti jsou tedy následující:

- $P=f(t)$  – výkon panelu
- $I=f(t)$  – intenzita dopadajícího záření na panel
- $E=f(t)$  – vyrobená denní energie
- $\varepsilon=f(t)$  – energetický zisk
- $\eta=f(t)$  – účinnost
- $T=f(t)$  – teplota vzduchu a panelu

## 6 NÁVRH ROZŠIŘUJÍCÍHO ZPRACOVÁNÍ HODNOT

### 6.1 Výkonová závislost na teplotě panelu v čase

Při navrhování nových grafických závislostí jsme vycházeli z doposud naměřených dat systémem, který byl popsán v předchozí kapitole. Návrh se tak soustředil na maximální využití získaných dat a jejich uspořádání do grafických závislostí, aby bylo docíleno co největší vypovídací hodnoty. První z navrhovaných grafů je závislost teploty panelu na výkonu a to vše v časové závislosti. Příklad takového grafu vidíme na Obr. 6-1.

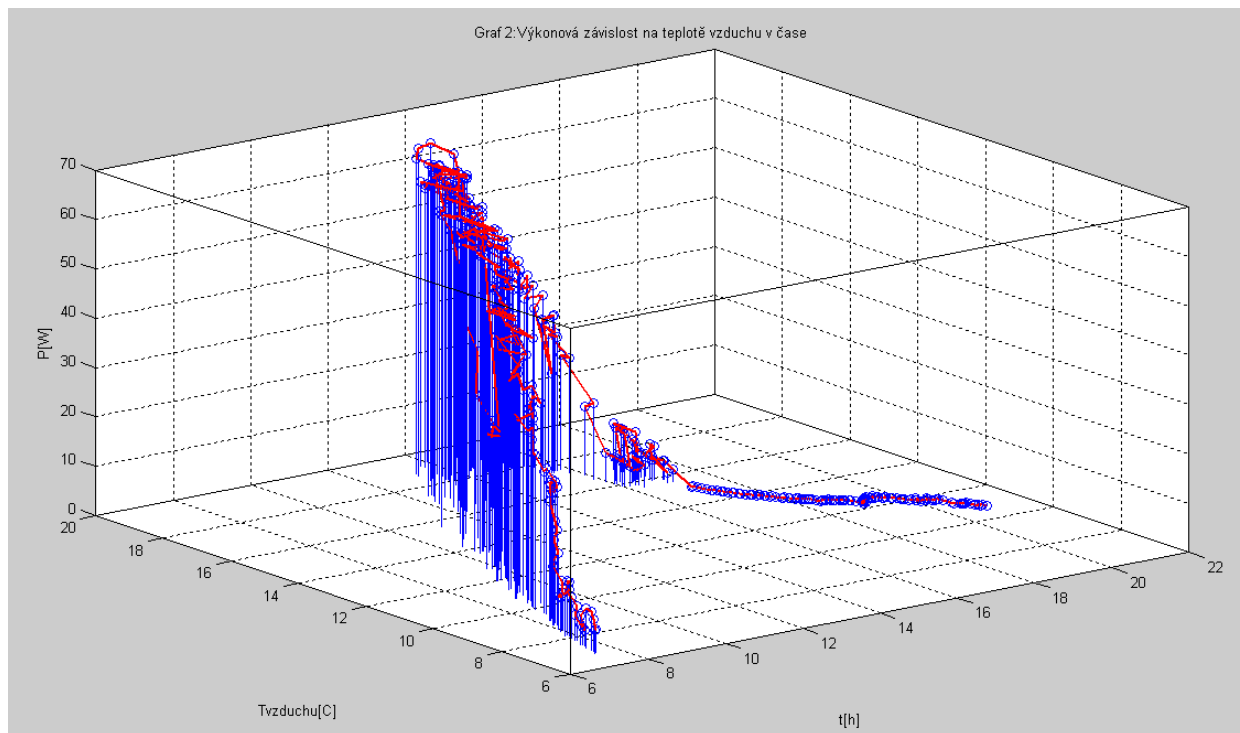


Obr. 6-1 Výkonová závislost na teplotě panelu v čase.

Na grafu je tak poměrně jasně vidět spojitost, mezi výkonem a teplotou. Pro o něco lepší pochopení je ještě třeba dodat, že výkon je přímo závislý na intenzitě dopadajícího záření. Rostoucí výkon s přibývajícím intenzitou v průběhu dne je tak poměrně logický. Samotná teplota jak vidíme přesahuje hranici 30 °C. Bohužel v této závislosti nemůžeme porovnat, jaký výkon bychom dosáhli, kdybychom například FV panely chladili na co nejnižší teplotu. Porovnání dvou stejných panelů, kdy jeden by byl chlazen na co nejnižší teplotu o konstantní hodnotě a druhý by byl ponechán v současném stavu, by bylo jistě hodně přínosné pro jasné popsání negativního vlivu rostoucí teploty na FV panely.

## 6.2 Výkonová závislost na teplotě vzduchu v čase

Další navrhovanou rozšiřující grafickou závislostí je prakticky podobná závislost jako v předchozím případě. Rozdílovou hodnotou ale bude vynášená teplota. Místo teploty panelu by se totiž tato závislost měla vztahovat k teplotě okolního vzduchu, která je měřena bez vlivu přímého slunečního svitu a samozřejmě i větru. Příklad takové závislosti můžeme vidět na Obr. 6-2.



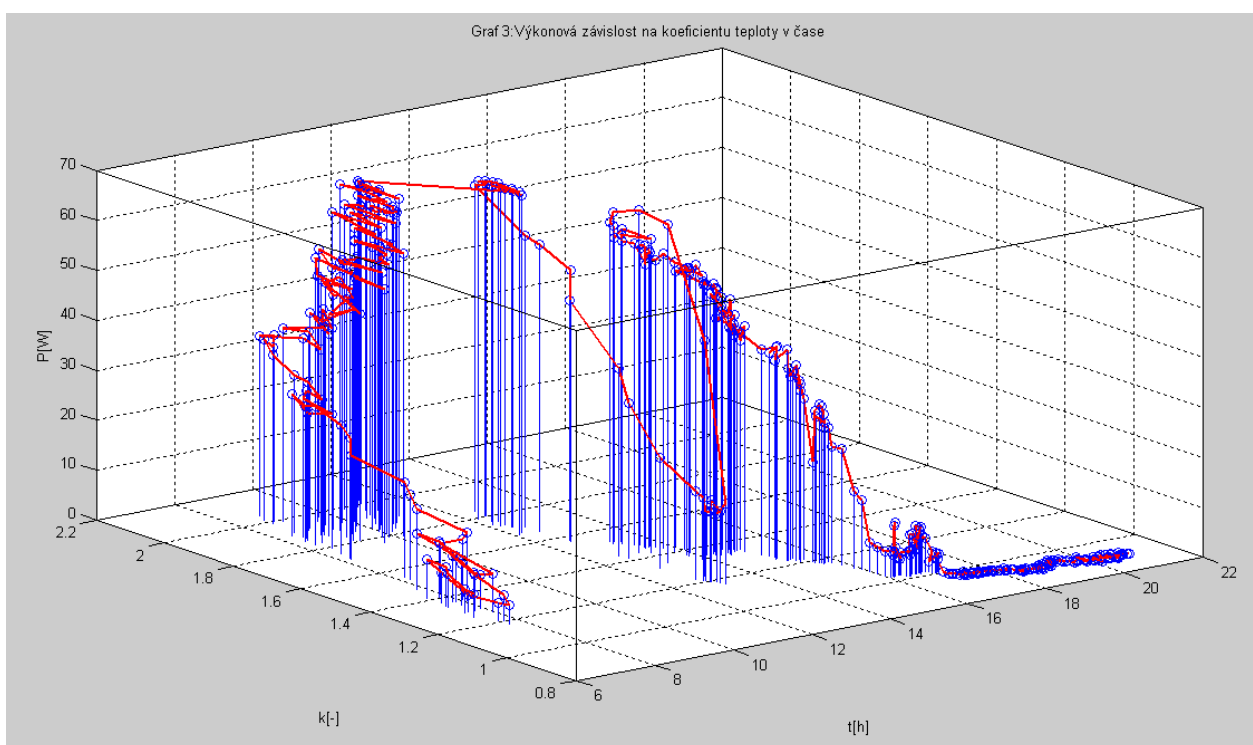
Obr. 6-2 Výkonová závislost na teplotě okolního vzduchu v čase.

Právě na tomto grafu ve srovnání s předchozím grafem vidíme, jak teplota vzduchu téměř lineárně roste a po dosažení vrcholové hodnoty opět klesá. Na výše zmíněném grafu se tak jedná o prakticky ideální denní průběh bez jakékoliv změny počasí. Teplota se tak mění bez větších výkyvů na rozdíl od předchozího grafu, tedy Obr. 6-1.

### 6.3 Výkonová závislost na teplotním koeficientu v čase

V návaznosti na předchozí dvě grafické závislosti bychom si měli zkusit tyto hodnoty teplot vzájemně porovnat. Vzhledem k tomu, že teplota panelu, který je vystaven přímému slunečnímu svitu by měla být vždycky vyšší, než teplota okolního vzduchu měřená v chráněném „domečku“, dostaneme jejich poměrem koeficient, který by měl být prakticky ve všech případech větší jak jedna.

$$k_{rep} = \frac{g_{paanelu}}{g_{vzduchu}} \geq 1 \quad (-; \text{ } ^\circ\text{C}, \text{ } ^\circ\text{C}) \quad (6.1)$$

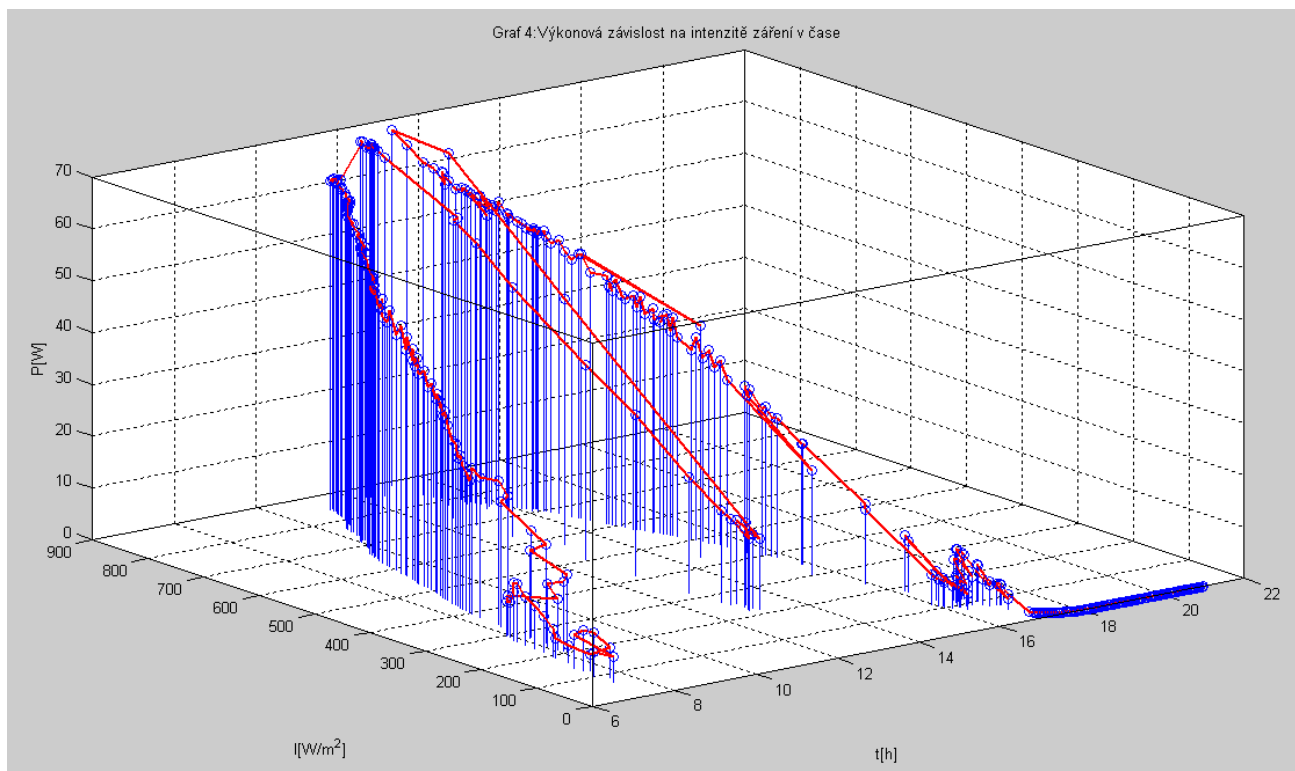


Obr. 6-3 Výkonová závislost na teplotním koeficientu v čase.

V předloženém grafu ale vidíme, že právě výše zmíněná rovnice neplatí, protože jsme nevyloučili jeden případ, kdy koeficient  $k_{rep}$  poklesne pod hodnotu jedné. Jedná se o případ větru, před kterým je teploměr vzduchu v domečku uchráněn, ale nikoli panel. Proudící vzduch kolem panelu z něj tak odvádí teplo a koeficient tak klesá pod danou hodnotu. Na grafu ještě vidíme, že ve „špičce“ je teplota panelu více jak dvojnásobná než teplota vzduchu. Teplotní koeficient, jak jsme tuto hodnotu nazvali, je tak opět silně závislý na intenzitě dopadajícího světla a tedy i výkonu daného panelu.

## 6.4 Výkonová závislost na intenzitě dopadajícího záření v čase

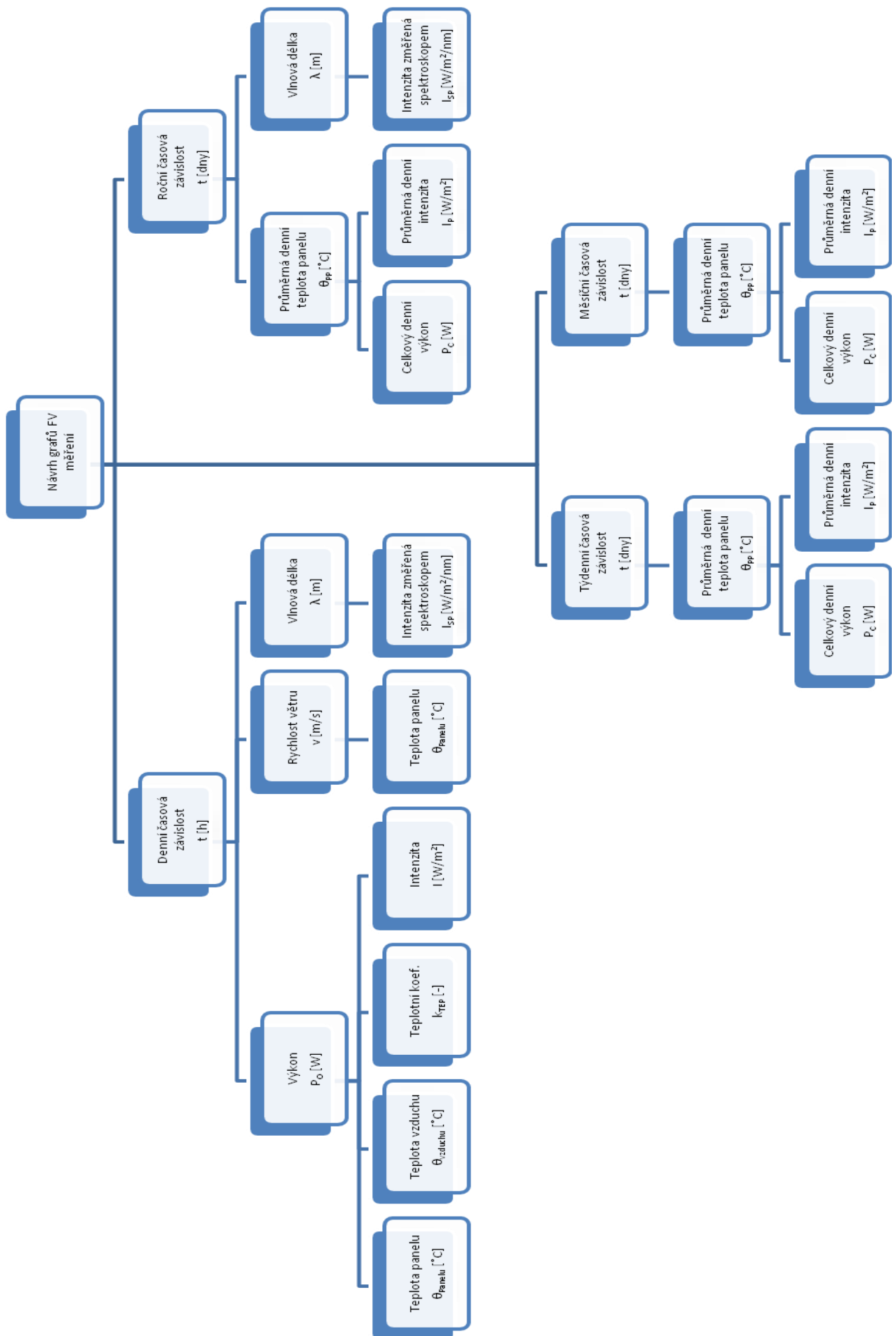
Z naměřených údajů jsme ještě nezařadili do grafických závislostí intenzitu dopadajícího záření. Ta je v podstatě alfou a omegou celého měření, protože na ní závisí jak teplota panelu, tak výkon panelu. Příklad takovéto závislosti tak vidíme na Obr. 6-4. Na předloženém obrázku je názorně vidět, kdy byl panel zastíněn mrakem a intenzita dopadajícího světla výrazně poklesla. Stejně tak se choval i výkon panelu.



Obr. 6-4 Výkonová závislost na intenzitě dopadajícího záření v čase.

## 6.5 Návrhy dalších grafických závislostí

V předchozích čtyřech podkapitolách je ukázáno, jak by mohly vypadat návrhy čtyř grafických závislostí v průběhu jednotlivých dnů. S ohledem na různé kombinace měřených veličin jsou na Obr. 6-5 zobrazeny jednotlivé typy grafických závislostí. Každý řádek v tomto schématu znamená jednu ze tří os 3D grafu. V tomto návrhu tak operujeme i s několika veličinami, které jsme doposud nezmínili. Protože se bude celá sestava FV panelů a měření přemísťovat, dojde k modernizaci měřicích zařízení. On-line laboratoř tak bude dodávat kromě stávajících hodnot i hodnoty z měření rychlosti větru, tlaku, srážek, vlhkosti vzduchu. Tato práce navíc ještě počítá s doplněním tohoto měření například o stejný FV panel chlazený na určitou teplotu viz podkapitola 6.1 nebo spektrální analyzátor, který by zkoumal změnu spektrálního složení dopadajícího světla ve vztahu k intenzitě záření na danou plochu, dosažené na jednotlivých vlnových délkách, jako je tomu například v příloze C.



Obr. 6-5 Návrhy rozšiřujících grafických závislostí pro on-line měření FV panelu.

Spektrálním analyzátozem, například od firmy Hamamatsu, by tak bylo možné měřit změnu slunečního spektra a rozložení dopadající energie ve vztahu k vlnovým délkám záření. Vzhledem k tomu, že on-line měření vzorkuje v určitý okamžik ze všech zařízení, bylo by poměrně jednoduché k danému slunečnímu spektru přiřadit i okamžitý výkon FV panelu a dostali bychom tak poměrně hodnotnou charakteristiku, ve které bychom viděli v čase se měnící spektrum a jak nám toto spektrum ovlivňuje výkon FV panelu. S ohledem na teorii FV panelu, která je podrobně rozebrána v kapitole 2 a 3, je třeba zmínit, že jde o hodně důležitá data. Zejména z toho důvodu, že každý p-n přechod potřebuje jinou energii dopadajícího fotonu, tedy foton o jiné vlnové délce. Intenzita nám pak v podstatě určuje množství takovýchto částic v záření a čím je tato intenzita větší, tím je samozřejmě i výstupní výkon FV větší. Právě z toho důvodu by bylo poměrně zajímavé toto měření na základě zmíněných měřících přístrojů realizovat.

## 7 ZÁVĚR

### 7.1 Současný stav

V současné době je měřicí systém FV panelu v rámci Ústavu elektroenergetiky mimo provoz z důvodu jeho rekonstrukce a modernizace. Právě na základě modernizace zařízení byla vypracována tato práce s cílem navrhnout nová měření a zkvalitnit tuto on-line laboratoř v rámci ústavu. V současné době jsou totiž možnosti měření značně omezené a lze si na internetovém portálu vygenerovat šest grafů v různých časových horizontech, jak je popsáno v kapitole 5.

### 7.2 Shrnutí vědeckých poznatků práce

Vzhledem k tomu, že lze zjednodušeně říci, že FV článek je velkoplošná polovodičová dioda s p-n přechodem, práce shrnuje teoretické základy z polovodičových technologií, které FV článek využívá a Einsteinův fotoelektrický jev, díky němuž se na polovodičovém přechodu p-n generuje pár elektron díry. V neposlední řadě práce teoreticky objasňuje, jak jsou závislé elektrické parametry FV článků na teplotě, jak výrazně může teplota ovlivnit jejich elektrický výkon a jak lze teplotu článků účinně snížit a naopak ještě tepelnou energii získat právě z chlazení daného FV článku.

Ačkoliv je v dnešní době teplotní závislost poměrně dobře známá, výrobci s tímto negativním faktem prakticky nic nedělají a většinou nevyžadují ani jeho měření. Úbytek není podle jejich mínění natolik značný a zaměřují se spíše na účinnost FV panelu ve vztahu ke skladbě světelného záření. Přesto se tato práce zaměřuje zejména na tuto teplotní závislost, protože jsme nabyli dojmu, že pokles výstupního výkonu v závislosti na rostoucí teplotě, jak je to popsáno v kapitole 4, je značný. Důkazem je i uvedený poměr ve výše zmíněné kapitole, tedy 0,5 % na 1 K. Vzhledem k tomu, že se uvažuje a již probíhají velkolepé projekty evropských energetických gigantů a zemí na FV elektrárny na pouštích, jako je například Sahara, kde jsou teplotní výkyvy značné, snadno si lze spočítat procentuelní pokles. Výkon na takovýchto panelech by tak mohl klesnout až o desítky procent.

### 7.3 Závěry práce, její přínos a další postup

Tato práce přináší řešení pro modernizovanou on-line laboratoř FV panelu. S návrhy, které obsahuje kapitola 6 lze rozšířit současné měření o další grafické závislosti, které mohou být v podobě 3D grafů. Z nových grafických závislostí by tak mělo být ještě více patrné, jak počasí v okolí FV panelu značně ovlivňuje výstupní výkon tohoto zařízení a taky jak se charakteristika FV panelu mění v průběhu celého roku. Pokud by se navíc tato laboratoř rozšířila i o navržené prvky z kapitoly 6. této práce, došlo by k měření dalších parametrů, které by nám dávaly jasnější náhled na problematiku výroby elektrické energie ze slunečního záření. Spektrální analyzátor by nám pro to poskytl dostatečné množství dat, stejně tak jako rozšíření laboratoře například o další panel stejného typu chlazený na konstantní teplotu. Význam měření a celé této on-line laboratoře by ještě více vzrostl, kdyby došlo k uskutečnění projektu Ústavu elektroenergetiky, který je zatím ve stádiu zrodu. Jednalo by se o rozšíření laboratoře o další FV panely různých typů (polykrystal, monokrystal, amorfni a další). Získaná data by tak dávala doslova širokospektrální pohled na danou problematiku a to ať už ve vztahu ke konstrukci jednotlivých panelů nebo ke změnám okolního klimatu.

**POUŽITÁ LITERATURA**

- [1] MCCRACKEN, G., SCOTT, P.: *Fúze-energje vesmíru*. Mladá Fronta, Praha 2006, 324 stran, ISBN 80-204-1453-3
- [2] MURTINGER, K., BERANOVSKÝ, J., TOMEŠ, M.: *Fotovoltaika, elektřina ze slunce*, ERA, Brno, 2008, 81 stran, ISBN 978-80-7366-133-5
- [3] ŘÍPA, M., WEINZETTL, V., MLYNÁŘ, J., ŽÁČEK, F.: *Řízená termojaderné syntéza*, Graffin, Praha, 2005
- [4] MURTINGER, K., TRUXA, J.: *Solární energie pro váš dům*, ERA, Brno, 2005, 91 stran, ISBN 80-7366-029-6
- [5] HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J.: *Fyzika : část 5, Moderní fyzika*. 1. vyd. Brno, Praha : Prometheus, VUTIUM, 2006. 164 s. ISBN 80-7196-213-9.
- [6] LIBRA, M., POULEK, V.: *Fotovoltaika : Teorie i praxe využití solární energie*. 1. vyd. Praha : ILSA, 2009. 160 s. ISBN 978-80-904311-0-2.
- [7] BRZOBOHATÝ, J., MUSIL, V., BAJER, A., BOUŠEK, J.: *Elektronické součástky*. 4. upr. vyd. Brno : VUTIUM, 2005. 205 s. ISBN 80-214-2627-6.
- [8] SCHREIER, M. 2009: Rok fotovoltaiky. *Alternativní energie*(2009) č.:2, České ekologické manažerské centrum, Praha 2009, str. 26, ISSN 1212-1673
- [9] KOZMA, P. Technologické perspektivy fotovoltaiky. *Alternativní energie*(2009) č.:3, České ekologické manažerské centrum, Praha 2009, str. 26 - 28, ISSN 1212-1673
- [10] DONOGHUE, A. Mračna nad fotovoltaikou. *Alternativní energie*(2009) č.:4, České ekologické manažerské centrum, Praha 2009, str. 25, ISSN 1212-1673
- [11] BECHNÍK, B. Kdy skončí boom fotovoltaiky?. *Alternativní energie*(2009) č.:5, České ekologické manažerské centrum, Praha 2009, str. 16, ISSN 1212-1673
- [12] VANĚK, J., KRIVÁK, P., NOVÁK, V.: *Alternativní zdroje energie*. Brno, 2006. 159 s. VUT ID: ETE603.
- [13] MACHÁČEK, Z.: *Vliv teploty na elektrické parametry solárních článků*. In Solární systémy s FV/FT panely a jejich využití. Praha : [s.n.], 2007. s. 17-19.
- [14] *Fotovoltaika pro každého* [online]. 2007 [cit. 2010-04-25]. Czech RE Agency. Dostupné z WWW: <http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fotovoltaika>.
- [15] *Výše výkupních cen a zelených bonusů pro rok 2010* [online]. 2010 [cit. 2010-04-25]. Dostupné z WWW: <http://www.tzb-info.cz/t.py?i=91&t=4>.
- [16] *Výkupní ceny v Evropě : malé systémy* [online]. 2010 [cit. 2010-04-25]. Czech RE Agency. Dostupné z WWW: <http://www.czrea.org/cs/studie-a-analyzy/vykupni-ceny-v-evrope>.
- [17] *Tisková zpráva ERÚ* [online]. 16.03.2010 [cit. 2010-05-21]. ČEPS, a.s. Dostupné z WWW: <http://www.ceps.cz/detail.asp?cepsmenu=2&IDP=28&PDM2=0&PDM3=0&PDM4=0>.
- [18] *Fotovoltaika : nejvýhodnější podpora v rámci EU* [online]. 2010 [cit. 2010-04-25]. Czech RE Agency. Dostupné z WWW: <http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fotovoltaika/fv-podpora-EU>.
- [19] *Solární laboratoř : Měření* [online]. 2009 [cit. 2010-04-25]. Dostupné z WWW: [http://www.ueen.fec.vutbr.cz/laboratory-of-unconventional-energy-conversion/flash/mereni\\_results.php](http://www.ueen.fec.vutbr.cz/laboratory-of-unconventional-energy-conversion/flash/mereni_results.php).

- 
- [20] Solar Spectrum.png In Wikipedia : the free encyclopedia [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, 7.9.2007, 7.9.2007 [cit. 2010-05-18]. Dostupné z WWW: [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Solar\\_Spectrum.png](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Solar_Spectrum.png).
- [21] Stav 2005 : Spectrum [online]. 2005 [cit. 2010-05-18]. Index od documents. Dostupné z WWW: <http://www.vicphysics.org/documents/events/stav2005/spectrum.JPG>.
- [22] Solární laboratoř [online]. 09. 03. 2007 [cit. 2010-05-24]. Fotogalerie. Dostupné z WWW: <http://www.ueen.feec.vutbr.cz/laboratory-of-unconventional-energy-conversion/fotogalerie/fotogalerie.php?folder=fotky>.

## Příloha A Tisková zpráva ERÚ, 16. března 2010

### **k prohlášení společnosti ČEPS, týkajícího se pozastavení vydávání kladných stanovisek k připojování nových větrných a fotovoltaických elektráren.**

Energetický regulační úřad obdržel na vědomí dopis ČEPS, a. s. adresovaný distribučním společnostem ČEZ Distribuce a. s., E.ON Distribuce a. s. a PŘEdistribuce, a. s. s výzvou k pozastavení vydávání kladných stanovisek k žádostem o připojení větrných (VTE) a fotovoltaických (FVE) elektráren.

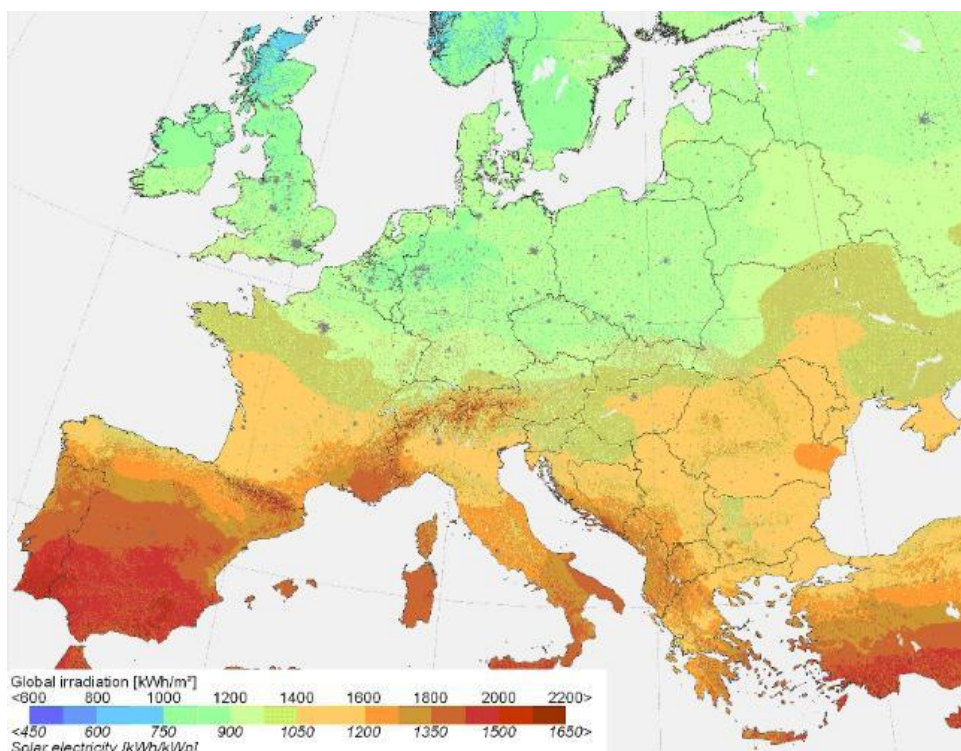
Úřad si je vědom vážnosti situace, kdy s rostoucím instalovaným výkonem zdrojů s nestabilním průběhem diagramu výroby neúměrně rostou nároky na regulaci elektrizační soustavy České republiky a dochází i k ohrožování jejího bezpečného provozu. Vážnost situace je podtržena i množstvím již vydaných kladných stanovisek k žádostem o připojení pro VTE a FVE. Ke konci ledna 2010 byl vydán souhlas s připojením přibližně 8 000 MW instalovaného výkonu pro VTE a FVE. Podrobnější informace je možné získat v odborné studii společnosti EGÚ Brno, a.s., která potvrdila oprávněnost pozastavení vydávání kladných stanovisek k připojení neregulovatelných obnovitelných zdrojů energie. Studie, včetně nezávislých odborných posudků, je k dispozici na internetových stránkách společnosti ČEPS, a.s. ([www.ceps.cz](http://www.ceps.cz)), v sekci Tiskové centrum – Tiskové zprávy.

V této souvislosti uvádíme, že ERÚ respektuje rozhodnutí provozovatele přenosové soustavy, který je podle § 24 energetického zákona č. 458/2000 Sb., v platném znění, zodpovědný za bezpečný a spolehlivý provoz elektrizační soustavy. Za současné situace je podle společnosti ČEPS, ohroženo v určitých obdobích roku bezpečné provozování elektrizační soustavy a je třeba zabránit tomu, aby se situace dále zhoršovala. Z tohoto důvodu je i postup provozovatelů distribučních soustav, kteří pozastavili vydávání kladných stanovisek k připojení větrných a fotovoltaických elektráren, v souladu s § 25, odst. 11, písm. a) energetického zákona. Podle tohoto ustanovení má provozovatel distribuční soustavy právo odmítnout žadatele o připojení při prokazatelném nedostatku kapacity zařízení pro distribuci **nebo při ohrožení spolehlivého provozu distribuční soustavy**. Z dostupných podkladů vyplývá, že bylo s ohledem na ohrožení spolehlivého provozu distribuční soustavy naplněno právo provozovatele distribuční soustavy nepovolovat připojování dalších zdrojů, a to bez ohledu na případnou volnou distribuční kapacitu v dané lokalitě.

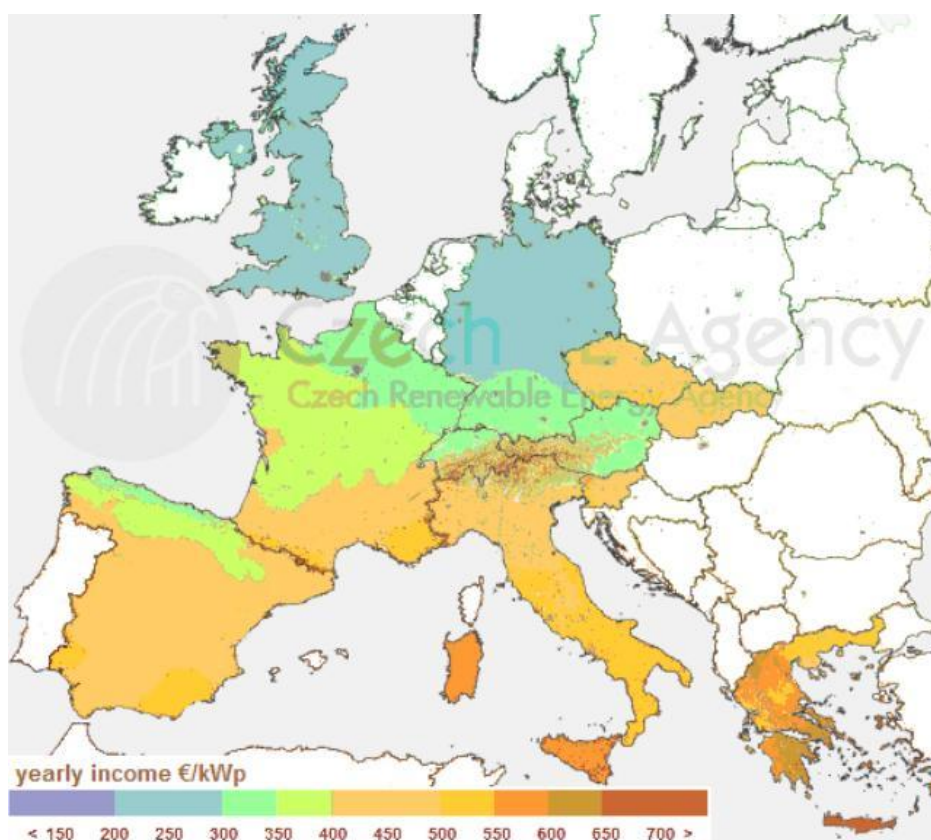
Upozorňujeme, že uvedené opatření se netýká žádostí o připojení zdrojů, u kterých již bylo vydáno kladné stanovisko o připojení výrobní do přenosové nebo distribuční soustavy. Provozovatelé přenosové i distribučních soustav jsou povinni i za současné situace vydat stanovisko k žádostem o připojení v termínech daných vyhláškou č. 51/2006 Sb., o podmínkách připojení k elektrizační soustavě.

Úřad bude situaci nadále sledovat a dbát na to, aby nedocházelo ke zhoršování situace s rizikem rostoucího stupně ohrožení bezpečného a spolehlivého provozu elektrizační soustavy České republiky a zároveň, aby všichni účastníci trhu s elektřinou postupovali v souladu s platnou legislativou [17].

## Příloha B Evropa z pohledu výnosu FV elektráren



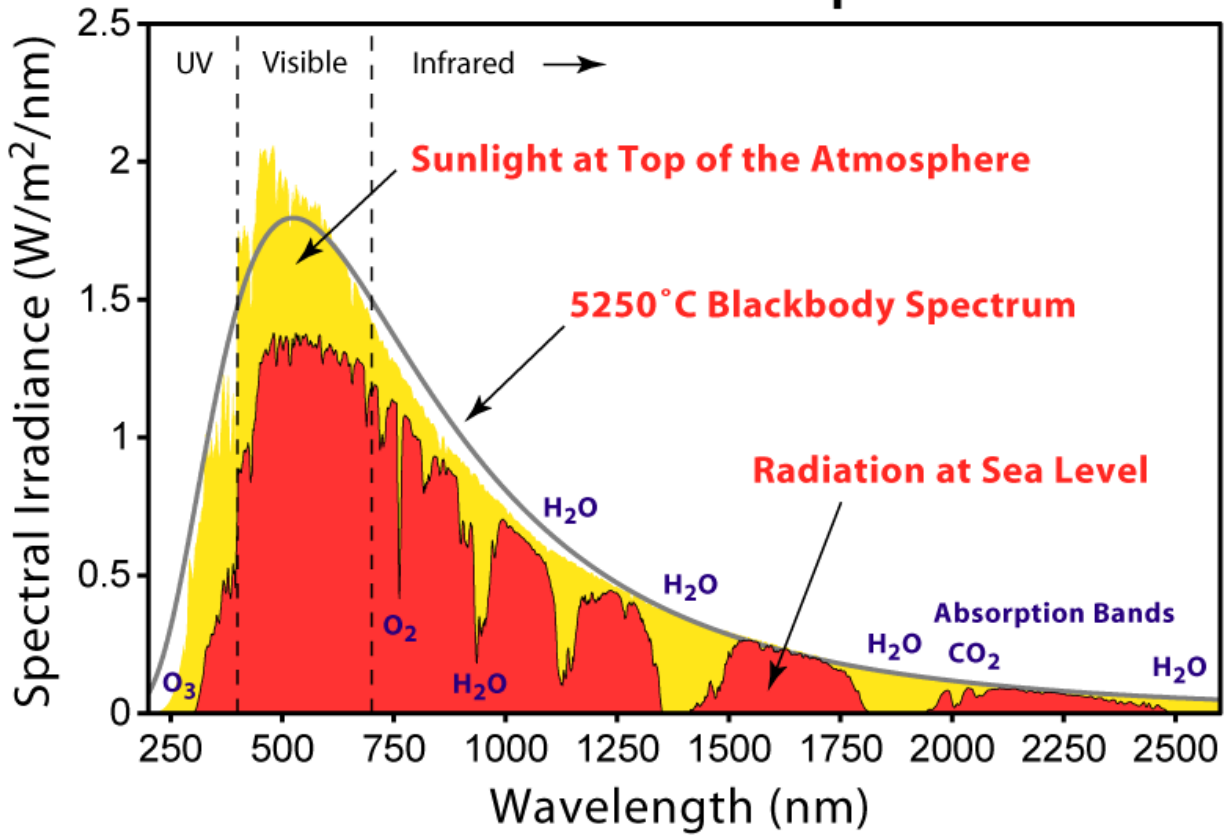
Úroveň slunečního záření v různých částech Evropy [18].



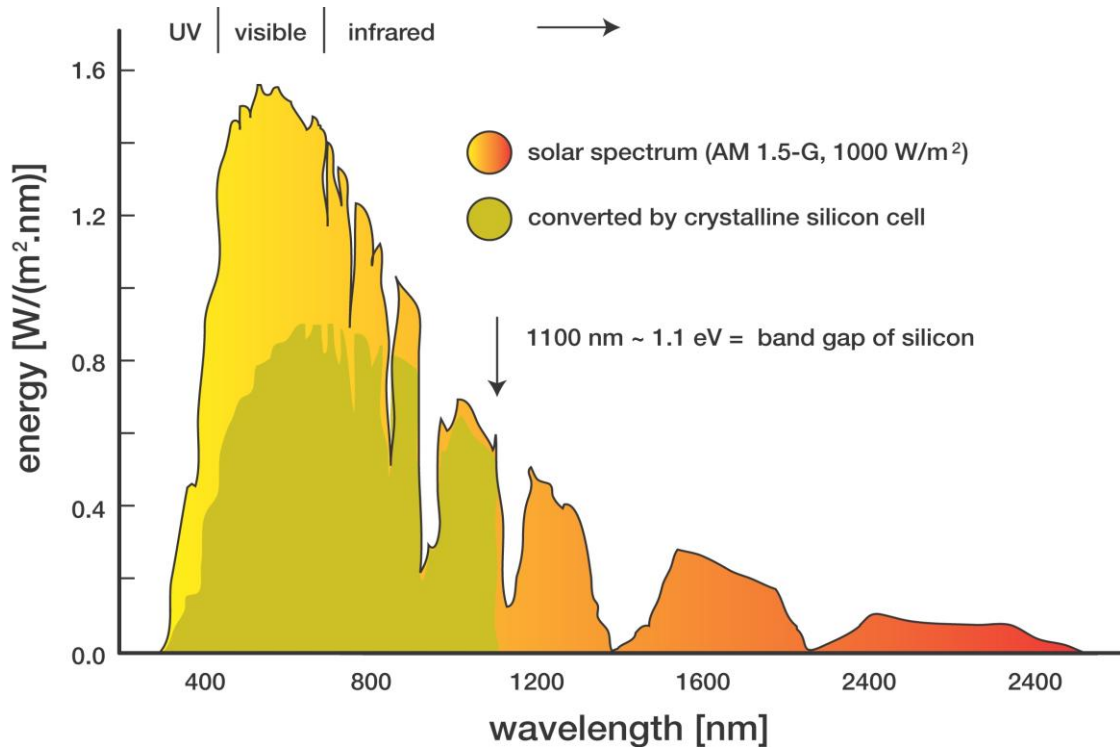
Finanční výnosnost FV systémů v různých částech Evropy (velké systémy) [18].

Příloha C Spektrální analýza slunečního záření

# Solar Radiation Spectrum



Příklad spektrálního složení slunečního záření [20].



Spektrum slunečního záření společně s užitečným zářením pro křemíkové FV články [21].

## Příloha D FV systém v rámci UEEN FEKT VUT Brno



*FV systém na terase budovy Údolní 53 [22].*



*FV systém na terase budovy Údolní 53 [22].*