

Univerzita Pardubice

Dopravní fakulta Jana Pernera

Využití fotovoltaických článků k napájení železničních vozidel

Bc. Daniel Hromádko

Diplomová práce

2017

Univerzita Pardubice  
Dopravní fakulta Jana Pernera  
Akademický rok: 2016/2017

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Daniel Hromádko**  
Osobní číslo: **D15451**  
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**  
Studijní obor: **Elektrotechnické a elektronické systémy v dopravě**  
Název tématu: **Využití fotovoltaických článků k napájení železničních vozidel**  
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Parametry soudobých a perspektivních fotovoltaických článků, kategorizace parametrů
2. Základní vlastnosti na zem dopadající sluneční energie
3. Dvouzdrojová elektrická trakční jednotka trolej - akumulátor
4. Energetická rozvaha elektrické dvouzdrojové trakční jednotky s přídatným FV zdrojem
5. Návrh a parametry střešního FV zdroje pro dvouzdrojovou elektrickou trakční jednotku
6. Experimentální ověření na modelovém vozidle
7. Návrh obvodového řešení přídatného FV zdroje

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

Danzer, J.: Elektrická trakce I., skriptum ZČU v Plzni, FEL, Plzeň 2000, ISBN 80 - 7082 - 633 - 9

Danzer, J.: Elektrická trakce II., skriptum ZČU v Plzni, FEL, Plzeň 2001, ISBN 80 - 7082 - 814 - 5

Danzer, J.: Elektrická trakce III., skriptum ZČU v Plzni, FEL, Plzeň 2003, ISBN 80 - 7082 - 945 - 1

Danzer, J.: Elektrická trakce IV., skriptum ZČU v Plzni, FEL, Plzeň 2007, ISBN 978 - 80 - 7043 - 586 - 1

Libra, M., Poulek, V.: Fotovoltaika : teorie i praxe využití solární energie. Praha: Ilsa, 2010. 165 s. ISBN 978-80-904311-5-7.

Murtinger, K., Beranovský, J., Tomeš, M.: Fotovoltaika : elektřina ze slunce. Praha: EkoWATT, 2008. 81 s. ISBN 978-80-7366-133-5.

Vedoucí diplomové práce:

**prof. Ing. Jaroslav Novák, CSc.**

Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací  
techniky v dopravě

Datum zadání diplomové práce: **25. února 2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2017**

  
doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.  
děkan

L.S.

  
Ing. Dušan Čermák, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 2. března 2017

## **Prohlášení autora**

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury. Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 21. 05. 2017

Daniel Hromádko

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu práce prof. Ing Jaroslavovi Novákovi CSc., který mi vždy rychle a ochotně pomohl při řešení problémů, které se vyskytly během realizace této práce. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Jiřímu Pohlovi z firmy Siemens s.r.o. za cenné rady, připomínky a množství času, který mi věnoval. Děkuji.

## **Anotace**

Diplomová práce „Využití fotovoltaických článků k napájení železničních vozidel“ se zabývá přidáním vhodných fotovoltaických panelů na střechu dvouzdrojové elektrické jednotky s hybridním pohonem. Nejprve popisují typy dvouzdrojových jednotek, poté se zmiňují o vlastnostech slunečního záření. Následně uvádím výčet základních typů solárních panelů a princip jejich činnosti. V dalších kapitolách uvádím průběhy spotřeby jednotky na konkrétních tratích, obvodové zapojení panelů, teoretické výpočty generované energie a porovnávám je s naměřenými údaji. V závěru hodnotím dosažené poznatky.

## **Klíčová slova**

Fotovoltaika, fotovoltaický panel, fotovoltaický článek, elektrická jednotka, sluneční záření, energie, výkon

## **Title**

Application of photovoltaic cells for powering railway vehicles

## **Annotation**

The diploma thesis " Application of photovoltaic cells for powering railway vehicles" deals with the addition of suitable photovoltaic panels to the roof of a two-source electric unit with hybrid drive. First, I describe types of two-source units, then I mention the properties of solar radiation. Then I list the basic types of solar panels and the principle of their operation. In the following chapters I present the course of consumption of the unit on specific lines, circuit connection of panels, theoretical calculations of generated energy and compare it with the measured data. In conclusion, I evaluate the findings.

## **Keywords**

Photovoltaics, photovoltaics panel, photovoltaics cell, electric multiple unit, sunlight, energy, power

# OBSAH

ÚVOD.....	10
1 DVOUZDROJOVÁ ELEKTRICKÁ TRAKČNÍ JEDNOTKA TROLEJ - AKUMULÁTOR .....	11
1.1 Struktura hybridního pohonu .....	13
2 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI NA ZEM DOPADAJÍCÍ SLUNEČNÍ ENERGIE .....	17
2.1 Fyzikální zákony záření těles a jejich aplikace na Slunce .....	18
2.1.1 Planckův zákon.....	18
2.1.2 Wienův posunovací zákon.....	20
2.1.3 Stefan-Boltzmannův zákon .....	20
2.2 Vyzařování kulového tělesa do prostoru.....	21
2.3 Vlivy eliptického pohybu Země okolo Slunce .....	22
2.4 Průchod slunečního záření atmosférou k povrchu Země .....	24
2.5 Sluneční záření na zemském povrchu.....	27
3 ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY A VLASTNOSTI SOUDOBÝCH A PERSPEKTIVNÍCH FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ .....	37
3.1 Základní parametry fotovoltaických článků.....	40
3.1.1 Účinnost .....	40
3.1.2 Proud nakrátko .....	42
3.1.3 Napětí naprázdno .....	43
3.1.4 Výkon.....	43
3.1.5 FF (fill factor) .....	44
3.1.6 Vliv teploty na parametry fotovoltaických článků .....	45
3.2 Spojování článků do panelu .....	46
3.2.1 Sériové řazení .....	46
3.2.2 Paralelní řazení .....	47
3.2.3 Sério-paralelní řazení .....	47
3.3 Struktura fotovoltaického panelu .....	48

3.4	Technologie solárních panelů.....	50
3.4.1	Monokrystalické solární panely.....	50
3.4.2	Polykrystalické solární panely.....	51
3.4.3	Tenkvrstvé solární panely.....	51
3.4.4	Hybridní HIT články.....	52
3.4.5	Vícevrstvé solární panely.....	53
3.4.6	Ostatní technologie.....	53
3.4.7	Porovnání vybraných typů fotovoltaických panelů.....	54
4	ENERGETICKÁ ROZVAHA ELEKTRICKÉ DVOUZDROJOVÉ TRAKČNÍ JEDNOTKY S PŘÍDAVNÝM FV ZDROJEM.....	58
4.1	Analýza jízdních odporů vlaku.....	59
4.1.1	Vozidlové odpory.....	59
4.1.2	Trat'ové odpory.....	63
4.1.3	Dynamické odpory.....	64
4.2	Celková spotřeba jednotky na konkrétních tratích.....	65
5	NÁVRH OBVODOVÉHO ŘEŠENÍ PŘÍDAVNÉHO FV ZDROJE.....	70
5.1	Zapojení amorfních fotovoltaických panelů.....	71
5.1.1	DC/DC měnič.....	74
5.2	Zapojení hybridních fotovoltaických panelů.....	74
5.3	Zapojení amorfních a hybridních fotovoltaických panelů.....	76
6	NÁVRH A PARAMETRY STŘEŠNÍHO FV ZDROJE PRO DVOUZDROJOVOU JEDNOTKU.....	77
6.1	Trat' Plzeň – Tachov denní hodnoty.....	80
6.2	Trat' Plzeň – Bezručice denní hodnoty.....	85
6.3	Trat' Brno – Třebíč denní hodnoty.....	88
6.4	Plzeňsko a Brněnsko měsíční hodnoty.....	93
7	EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ NA MODELOVÉM VOZIDLE.....	99
	ZÁVĚR.....	105



SEZNAMY .....	107
Seznam použité literatury .....	107
Seznam tabulek .....	110
Seznam obrázků .....	111
Seznam zkratk .....	114
Seznam symbolů .....	115
Seznam příloh.....	115
PŘÍLOHY .....	116

## ÚVOD

Doprava je v maximální míře celosvětově závislá na spalování ropných produktů, což z ní dělá jednoho z největších producentů skleníkových plynů na světě. Ke snížení emisí CO<sub>2</sub> i jiných škodlivin může výrazně pomoci elektrifikace v dopravě, což by v praxi znamenalo nejprve přechod na hybridní pohony a následně využití pohonů čistě elektrických. Nejefektivnějším způsobem realizace tohoto plánu ovšem není plošná elektrifikace dopravy, nýbrž zavedení bezemisních dopravních technologií a to nejdříve v oblastech, ve kterých tyto technologie disponují nejvhodnějšími podmínkami. Jako nejlepší se po technické stránce samozřejmě nabízí drážní doprava.

Uvažovaná jednotka, která je aktuálně pouze teoretická a zatím nebyla nikde fyzicky zrealizována, bude mít dva energetické zdroje - elektrický akumulátor a trolejové vedení. Hlavním cílem této diplomové práce je přidání třetího zdroje, fotovoltaických panelů, na střechu vozidla a problémy s tím souvisejícími jako např. výběr vhodných panelů, lokality či obvodového řešení.

# 1 DVOUZDROJOVÁ ELEKTRICKÁ TRAKČNÍ JEDNOTKA TROLEJ - AKUMULÁTOR

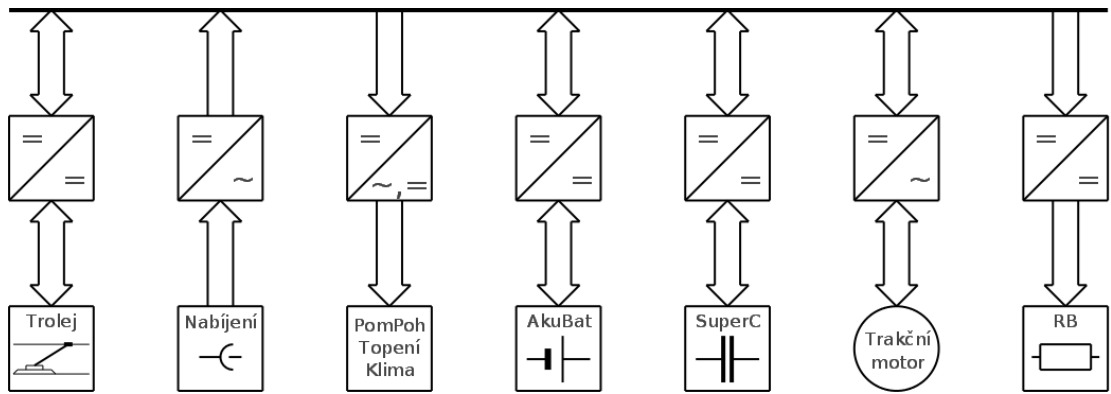
Takzvaný hybridní pohon, tedy typ pohonu, jenž využívá dva nebo více zdrojů energie v jednom dopravním prostředku, poslouží pro účely této práce jako pohon uvažované jednotky. Hybridních pohonů existuje v současnosti celá řada a jejich třídění je možné provést podle několika různých kritérií. V první řadě se tyto pohonné jednotky rozlišují dle toho, zda hybridní pohonný řetězec využívá elektrický pohon.

Pro drážní vozidla jsou často využívány hybridní pohony, v nichž elektrický pohon přítomen je. Z možných kombinací energetických zdrojů lze uvést například následující:

- spalovací motor + elektrický akumulátor
- spalovací motor + trolejové vedení
- spalovací motor + elektrický akumulátor + trolejové vedení
- spalovací motor + elektrický akumulátor + superkapacitor
- spalovací motor + elektrický akumulátor + superkapacitor + trolejové vedení
- spalovací motor + elektrický akumulátor + fotovoltaické články
- spalovací motor + mechanický setrvačnick
- spalovací motor + hydrostatický akumulátor
- trolejové vedení + elektrický akumulátor
- elektrický akumulátor + palivové články

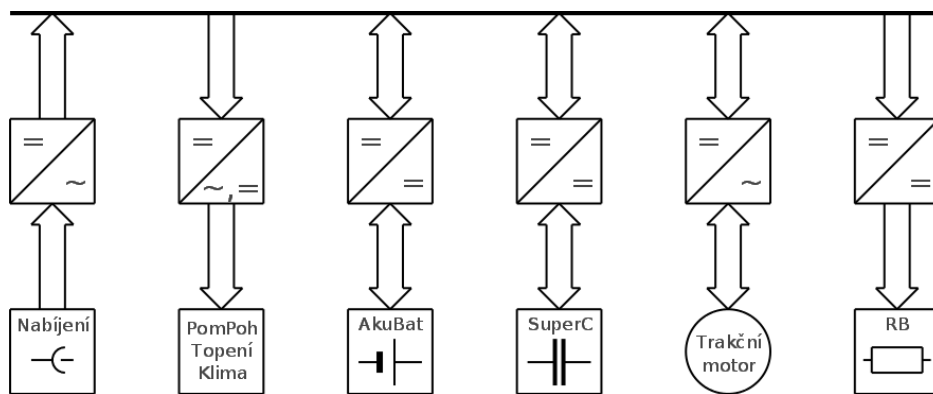
Vezmeme-li v úvahu pouze elektrické hybridní pohony bez spalovacího motoru, můžeme tyto struktury dále členit z hlediska závislosti vozidla na elektrické energii odebírané z pevných trakčních zařízení na trati. Dle tohoto rysu rozlišujeme vozidla závislé, resp. polozávislé trakce s uvažovaným trolejovým napájením, vozidla nezávislé trakce bez možnosti trolejového napájení a vozidla nezávislé trakce s alternativním zdrojem energie.

Základní rozhraní mezi zdrojovými a spotřebičovými systémy tvoří ve všech typech elektrických hybridních vozidel stejnosměrná trakční sběrnice neboli stejnosměrný meziobvod. Co se týče vozidel závislé, resp. polozávislé trakce s elektrickými zásobníky energie, v tomto případě je použitelná struktura výkonového obvodu s připojenými zdroji a spotřebiči ve stejnosměrném meziobvodu znázorněna na obr. 1-1.



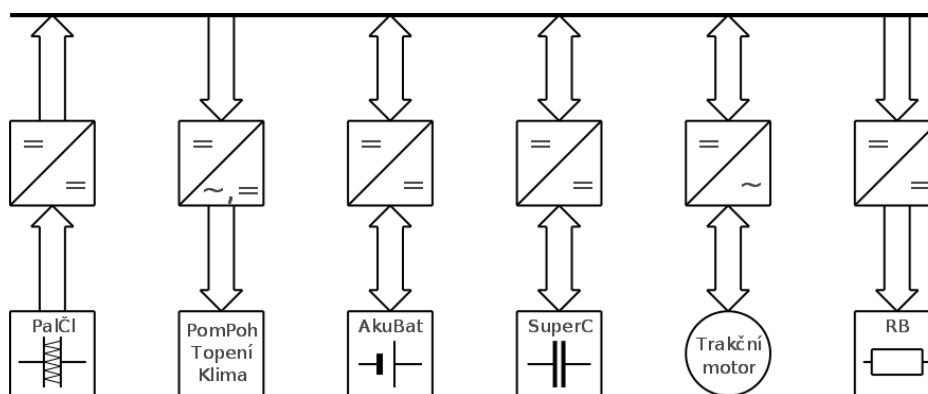
Obr. 1-1. Struktura hybridního pohonu s elektrickými zásobníky energie u vozidla závislé, resp. polozávislé trakce [26]

U vozidla nezávislé trakce s elektrickými zásobníky energie je možné využití struktury hybridního pohonu se superkapacitorem a elektrickým akumulátorem, která je zobrazena na obr. 1-2.



Obr. 1-2. Struktura hybridního pohonu s elektrickými zásobníky energie u vozidla nezávislé trakce [26]

Poslední skupina je tvořena hybridními elektrickými pohony s alternativními zdroji energie. V současnosti lze pro drážní vozidla reálně uvažovat dva typy alternativních zdrojů: palivové články (obr. 1-3.) nebo fotovoltaické zdroje.



Obr. 1-3. Příklad struktury hybridního pohonu s elektrickými zásobníky energie a alternativním zdrojem – palivovým článkem, [26]

Výše uvedené alternativní zdroje, tedy palivové články a fotovoltaické zdroje, nejsou schopny fungovat bez současné přítomnosti akumulátoru energie (optimálně elektrické) na uvažovaném vozidle. V případě palivového článku je tato závislost dána nemožností operativní regulace množství vyvíjené energie, na druhé straně u fotovoltaického zdroje nepředvídatelností průběhu okamžitého výkonu. Elektrické akumulátory tedy v obou zmínovaných případech vyrovnávají disproporce mezi okamžitou produkcí a skutečnou spotřebou energie na vozidle. Fotovoltaické zdroje lze spojovat s dalšími typy hybridních pohonů, například u vozidla s kombinovaným napájením z troleje a akumulátoru.

Pro účely této práce budu uvažovat, jak bylo již zmíněno v úvodu, o jednotce typu trolejové vedení s akumulátorem. Ostatní typy jsou uvedeny pouze jako existující varianta. [26]

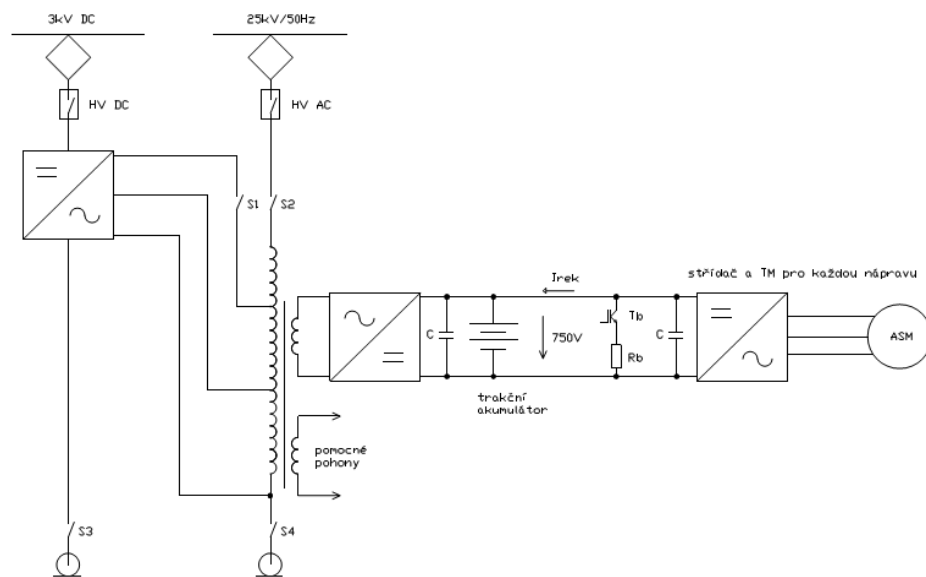
## 1.1 Struktura hybridního pohonu

Pro provoz na linkách regionální osobní dopavy, kde část trasy vede po elektrifikované trati a část po trati bez elektrifikace, je uvažována elektrická jednotka. Trakční vedení na elektrifikovaných tratích může být zároveň využito jako nabíjecí infrastruktura pro akumulátory.

U jednotek pro regionální dopravu s možností trolejového napájení vychází navržená koncepce elektrické výzbroje z elektrických výzbrojí dvousystémových vozidel závislé trakce pro soustavy 3 kV ss a 25 kV 50 Hz. V situaci, kdy jednotka s hybridním pohonem jede po neelektrifikované trati, je využívána energie akumulátorů. Vozidlo má vyjádřený stejnosměrný meziobvod podle obr. 1-1., na který jsou paralelně připojeny zdroje i spotřebiče energie. Energetickými zdroji jsou v tomto případě trolejové napájení a elektrický akumulátor.

Pro účely regionální dopravy není z důvodu tlaku dopravců na maximální obsazenost vozidla cestujícími, tedy minimalizaci pohonných a dalších technologií, uvažována varianta jednotky s trolejovým napájením, spalovacím motorem s generátorem a akumulátory. Pokud by taková jednotka skutečně byla vytvořena, jednalo by se pravděpodobně z pohledu dopravců o vysoce neatraktivní vozidlo. Na jedné straně pro své velké nároky na hmotnost i prostor pro trakční zařízení a zároveň i pro vysokou cenu.

Na obr. 1-4. je demonstrována navržená a uvažovaná bloková struktura trakční výzbroje hybridní jednotky pro regionální dopravu s kombinovaným napájením z troleje a z akumulátoru.



Obr. 1-4 Navržená a analyzovaná struktura elektrické výzbroje pro jednotku pro regionální osobní dopravu s kombinovaným napájením z troleje a z akumulátoru [26]

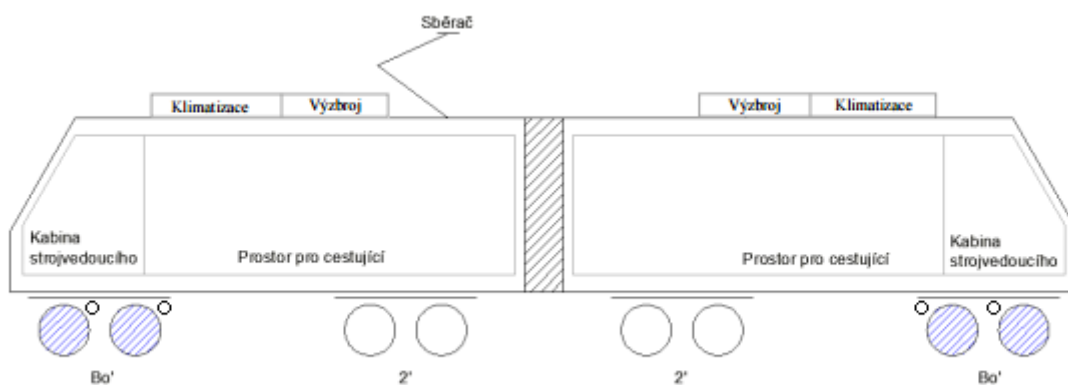
Jednotka je uvažována jako dvousystémová s možností napájení soustavou 3 kV ss nebo 25 kV 50 Hz. Návrh trakční výzbroje respektuje požadavky maximálně hospodárneho nakládání s energií, zejména procházející akumulátorem. Stejnoseměrný meziobvod a obvody trakčních motorů jsou navrženy na napětí do 1000 V, konkrétně 750 V.

Volba napětí stejnosměrného meziobvodu do 1000 V je motivována těmito faktory:

- Konstrukce trakčního obvodu a komponent elektrické výzbroje do 1000 V je jednodušší a méně nákladná oproti obvodu vysokonapětovému.
- Výkonové polovodičové součástky trakčního střídače pro napětí do 1000 V mají menší ztrátové výkony a lepší dynamické vlastnosti oproti součástkám vysokonapětovým.

- Napětí stejnosměrného meziobvodu do 1000 V umožňuje přímé připojení akumulátorové baterie do tohoto meziobvodu bez vloženého DC/DC měniče, zjednodušuje strukturu elektrické výzbroje a zvyšuje účinnost využití energie z akumulátoru.

Uvažovaná jednotka s elektrickou výzbrojí podle obr. 1-4 je myšlena jako dvouvozová. Tento počet vozů je pro jednotky s hybridním pohonem ideálním, vzhledem ke skutečnosti, že v případě zapojení vyššího počtu vozů a jim odpovídající hustotě dopravy je velmi pravděpodobná rentabilita elektrizace trati a provoz vozidel závislé trakce.



Obr. 1-5 Přibližná koncepce elektrické dvouvozové jednotky

Stejnou směrný meziobvod jednotky podle obr. 1-4. je při jízdě po trati elektrifikované soustavou 25 kV, 50 Hz napájen přes trakční transformátor a pulsní usměrňovač. Při jízdě po trati elektrifikované soustavou 3 kV ss je vstupní stejnosměrné napětí převedeno střídačem na střídavé a toto střídavé napětí je přivedeno na primární odbočku trakčního transformátoru, sekundární vinutí trakčního transformátoru opět napájí pulsní usměrňovač. Popsaný řetězec pro napájení soustavou 3 kV ss zajišťuje transformaci trolejového napětí na napětí využitě k napájení stejnosměrného meziobvodu a zároveň realizuje galvanické oddělení trakční sítě od trakčního obvodu s připojenou akumulátorovou baterií.

Výkon odebíraný z trakční sítě pokrývá trakční a pomocné spotřeby, zároveň je jeho část využita k dobíjení akumulátorové baterie. Řiditelnost velikosti výkonu, který prochází pulsním usměrňovačem, umožňuje nastavení dobíjecího výkonu akumulátoru na potřebnou hodnotu. Na obr. 1-4. je blokově naznačen trakční střídač a trakční motor. U analyzované dvouvozové jednotky pro osobní dopravu je uvažován pohon poloviny z celkového počtu osmi

dvojkolí, ze stejnosměrného meziobvodu je tedy napájena čtveřice trakčních střídačů a motorů. Z odděleného vinutí trakčního transformátoru jsou napájeny pomocné spotřeby vozidla. V případě jízdy s akumulátorovým napájením pokrývá akumulátorová baterie trakční spotřeby, pulsní usměrňovač je provozován jako střídač a přes transformátor jsou napájeny pomocné spotřeby. Popsaný pohon principiálně nepotřebuje brzdový odporník, neboť se předpokládá rekuperace brzděné energie do akumulátoru, ve stejnosměrném meziobvodu naznačený odpor a spínací tranzistor jsou dimenzovány jen na malý výkon a slouží v případě potřeby rychlého vybití kondenzátorů připojených paralelně ke stejnosměrnému meziobvodu. [26]

**Parametry:**

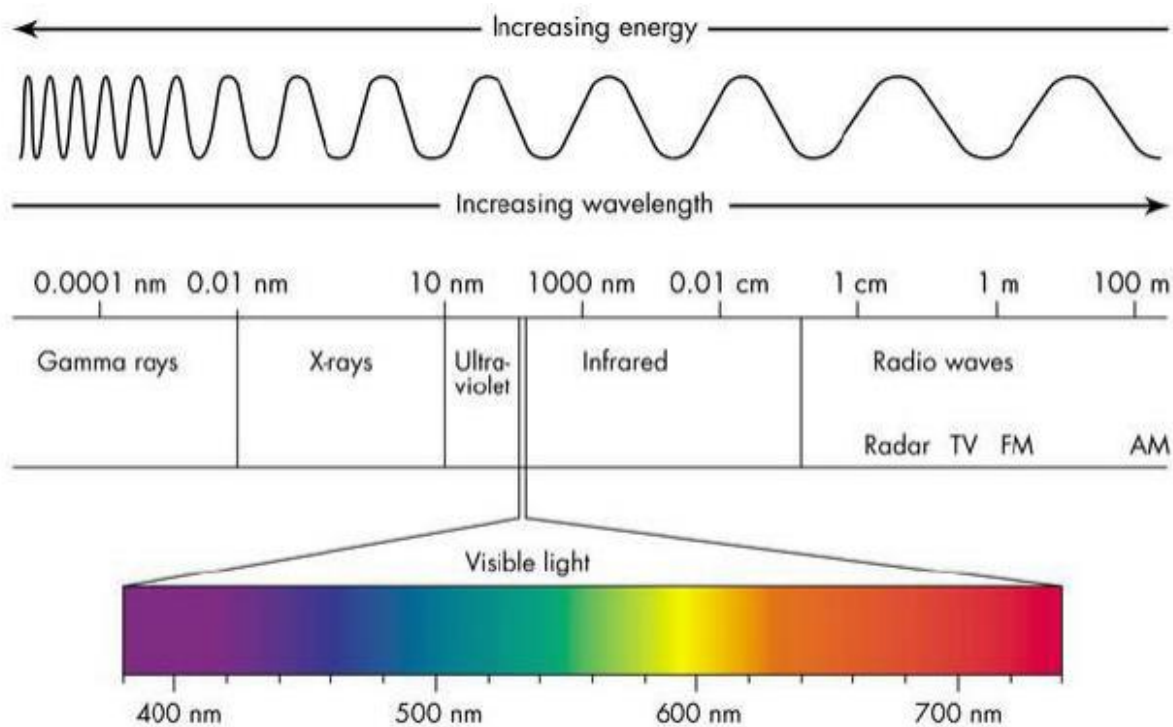
Systém napájení: AC 25 kV 50 Hz/ DC 3 kV + akumulátor
Uspořádání pojezdu: Bo'2' + Bo'2'
Počet vozů: 2
Provozní rychlost: 160 km/h
Hmotnost: 110 t (adhezních 55 t)
Trakční výkon: 1600 kW (pro napájení z troleje nebo baterie)
Energie baterie: 750 kWh
Nejnižší rychlost elektrického brzdění 5 km/h

Tab. 1-1 Parametry elektrické trakční jednotky [26]



## 2 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI NA ZEM DOPADAJÍCÍ SLUNEČNÍ ENERGIE

V centrálních oblastech Slunce je tvořena solární energie. Vzniká tak, že se atomy vodíku slučují do atomu hélia, a to za extrémních podmínek, kterými jsou jednak extrémně vysoké teploty (15 milionů Kelvinů), extrémně vysoký tlak (2,48 petapascallů-  $10^{15}$ ) a zároveň nadprůměrná hustota (stokrát vyšší, než je hustota vody). Pro ilustraci výše popsaných podmínek uvádím, že  $1 \text{ dm}^3$  tohoto prostředí váží přibližně 100 kg. Při termonukleární reakci se část hmoty „ztrácí“. Nedojde samozřejmě k žádnému „zmizení“, energie se pouze přeměňuje v záření, tedy energii fotonů. Důležitým faktorem je i četnost takových reakcí. Během jediné sekundy se na Slunci přemění 560 milionů tun vodíku. Hmotnost hvězdy se tak sníží zhruba o 4 miliony tun, což demonstruje energetický výkon tohoto zdroje. Vzniklé fotony vytvoří elektromagnetické záření. Záření se podle vlnových délek, resp. frekvence, rozděluje na několik druhů, viz obr. 2-1 : gama paprsky, paprsky X (rentgenové záření), ultrafialové, viditelné, infračervené a rádiové vlny. Vlnové délky viditelného záření se pohybují mezi 400 (fialová) a 800 (červená) nm. Vysoce energetické fotony jsou na obrázku znázorněny vlevo.



Obr. 2-1 Elektromagnetické spektrum se zvýrazněním viditelné oblasti [24]

Mezi základní druhy sdílení tepla řadíme kromě již zmíněného záření (radiace) i kondukcii a konvekci (proudění). Jediná radiace však pro přenos energie nevyžaduje hmotné prostředí, může se tedy šířit i vzduchoprázdňem. V teoretické rovině bylo, na základě jejich vlastností při vyzařování energie do okolí nebo naopak při pohlcování záření z okolních zdrojů, definováno tzv. „absolutně černé těleso“, „absolutně bílé těleso“ a „absolutně průzračné těleso“. Černé těleso, jak je někdy zkráceně označováno výše zmíněné absolutně černé těleso (jinak též černý zářič), je ideálním tělesem, které do svého okolí vyzařuje největší možné množství energie ze všech možných těles o stejné teplotě. Kromě toho pohlcuje veškeré záření všech vlnových délek dopadajících na jeho povrch. Opakem absolutně černého je těleso absolutně bílé. To se vyznačuje schopností jakékoliv záření z jiného zdroje odrážet zpět do prostoru jako zrcadlo. Z absolutně bílého tělesa při jakékoliv teplotě žádné záření neodchází. Třetím popsaným typem je tzv. absolutně průzračné těleso, které žádné záření nevyzařuje a pokud na něj z jiných zdrojů jakékoliv záření dopadne, tělesem pouze projde.

Na pomezí mezi výše popsanými je tzv. „šedé těleso“, které vyzařuje jen určitou část energie a na druhé straně pouze určitou část energie přicházející z okolí pohltí. Takové těleso je ale stále ideálním, a to z důvodu, že míra určující, jakou část energie těleso vyzaří, resp. pohltí, je pro všechny vlnové délky konstantní. Tuto míru nazýváme emisivita.

Jak již bylo zmíněno výše, jedná se ve všech případech pouze o teoretické modely a žádný z nich není ve skutečnosti realizovatelný. Důvodem je především předpoklad stejného chování záření všech vlnových délek. Takže například vezmeme-li stěnu domu, je pro rádiové vlny prostupná (dle výše uvedené terminologie průzračná), avšak pro viditelné záření prostupná není a pohlcuje jej, případně odráží. [24]

## 2.1 Fyzikální zákony záření těles a jejich aplikace na Slunce

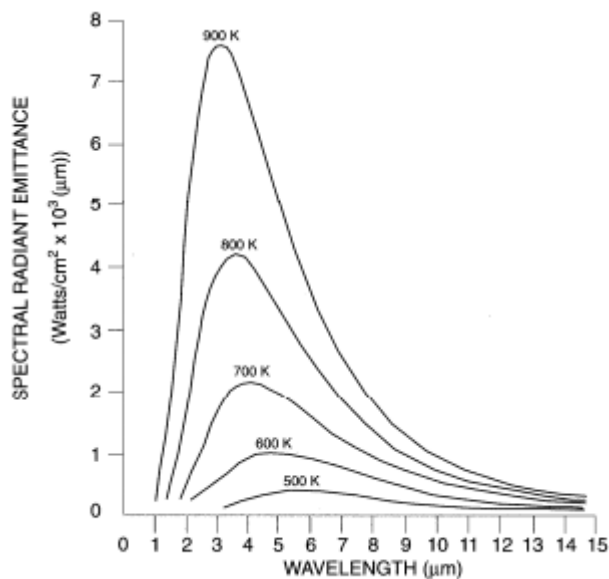
### 2.1.1 Planckův zákon

Planckův zákon popisuje hemisférickou intenzitu spektrálního vyzařování černého tělesa. Jinými slovy demonstrovuje, jakou část celkového vyzařování tělesa tvaru polokoule do svého okolí tvoří fotony s určitou vlnovou délkou (vyzařování se uvažuje ze strany vydaté kulové plochy).

$$W_{\lambda b} = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \cdot \left( e^{\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot T}} - 1 \right)} \quad [24] \quad (2.1)$$

$W_{\lambda b} [(W \cdot m^{-2})/m]$	- spektrální hustota intenzity vyzařování černého tělesa při vlnové délce $\lambda$
$c = 2,997925 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	- rychlost světla
$h = 6,626196 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$	- Planckova konstanta
$k = 1,380622 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$	- Boltzmannova konstanta
$T [\text{K}]$	- absolutní teplota černého tělesa
$\lambda [\text{m}]$	- vlnová délka záření (fotonu)

Při prozkoumání popsaného vztahu zjistíme, že hemisférická intenzita spektrálního vyzařování je funkcí pouze dvou proměnných, a to absolutní teploty povrchu tělesa  $T$  a vlnové délky  $\lambda$ . Jedná se tedy o funkci 2 proměnných. Vzorec ukazuje, že z tělesa o dané povrchové teplotě  $T$  budou fotony s určitou vlnovou délkou vyzařovat zářivý výkon  $W_{\lambda b}$ . Pravděpodobně nejčastěji se výsledky Planckova zákona zobrazují jako graf, do kterého se jako konstantní zanáší povrchová teplota tělesa  $T$ .



Obr. 2-2 Intenzita spektrálního vyzařování černého tělesa při různých absolutních teplotách

[24]

Z grafického znázornění je patrné, že energie z černého tělesa dané povrchové teploty není vyzařována fotony různých vlnových délek rovnoměrně. Každá teplota dosahuje určitého maxima funkce, které ukazuje vlnovou délku fotonů přenášejících největší množství energie.

Fotony o vlnové délce majících hodnoty blízké tomuto maximu odnáší z tělesa převážnou část energie. Naopak okrajové vlnové délky umí vyžářit pouze minimální část energie. [24]

### 2.1.2 Wienův posunovací zákon

Wienův posunovací zákon stanovuje vlnovou délku, při níž bude funkce popisující Planckův zákon (rovnice 2.1), za dané teploty dosahovat maxima. Dle matematických pravidel lze maximum funkce určit tak, že její derivaci dle hledané proměnné položíme rovnu nule. Tedy derivací vztahu (2.1) podle vlnové délky  $\lambda$  získáme výsledek (pro Slunce a jeho povrchovou teplotu 5780 K):

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T} = \frac{2898}{5780} = 0,5 \mu m \quad [24] \quad (2.2)$$

Z obrázku 2-1 je patrné, že hodnota maxima se nachází téměř uprostřed viditelné oblasti elektromagnetického spektra, což znamená, že největší část energie vyzařuje Slunce v oblasti, kterou jsme schopni vnímat zrakem (říkáme jí světlo). [24]

### 2.1.3 Stefan-Boltzmannův zákon

Stefan-Boltzmannův zákon určuje výsledný vyzařovaný výkon černého tělesa. Oproti Planckově zákonu, jenž vyjadřuje intenzitu jen pro určitou vlnovou délku, tento vzorec popisuje sumární hodnotu intenzity záření, v níž je zahrnuta energie všech fotonů všech vlnových délek mezi nulou a nekonečnem. Konečný vztah pro Stefan-Boltzmannův zákon lze matematicky získat integrací vztahu (2.1) Planckova zákona podle vlnové délky  $\lambda$  a geometricky se jedná o plochu pod křivkami průběhů funkcí v grafu na obr. 2-3. Výsledný vyzařovaný výkon černého tělesa pak bude:

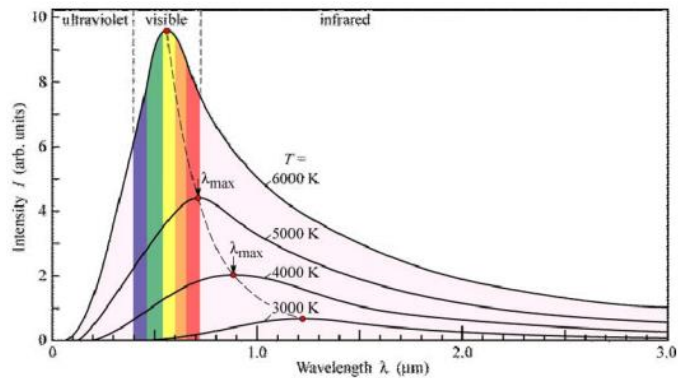
$$W_b = \int_0^{\infty} W_{\lambda b} d\lambda = \sigma T^2 \quad [24] \quad (2.3)$$

$$\sigma = 5,66961 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4} \quad \text{Stefan-Boltzmannova konstanta [24]}$$

Pro Slunce a jeho povrchovou teplotu 5780 K je pak možno stanovit, že:

$$W_b = \sigma T^2 = 5,66961 \cdot 10^{-8} \cdot 5780^4 = 6,328 \cdot 10^7 = 63 \text{ MW/m}^2 \quad (2.4)$$

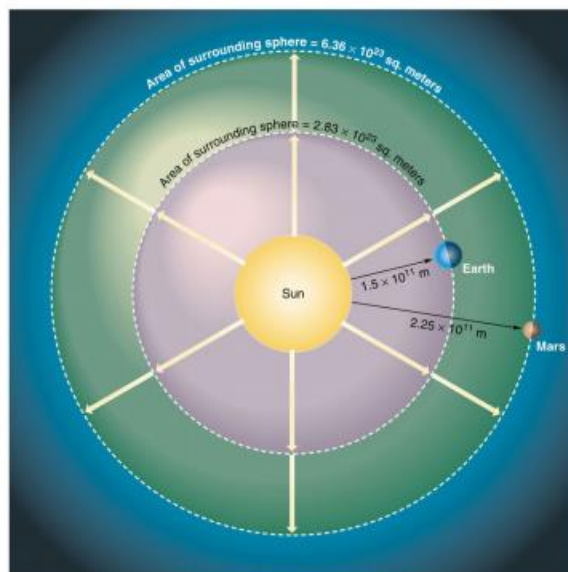
Výsledek říká, že z 1 m<sup>2</sup> povrchu Slunce je vyzařeno 63 MW zářivé energie. [24]



Obr. 2-3 Znárodnění intenzity spektrálního vyzařování černého tělesa blízkého Slunci (6000 K) [24]

## 2.2 Vyzařování kulového tělesa do prostoru

Z výše uvedeného vyplývá, že intenzita záření z povrchu Slunce je přibližně  $63 \text{ MW/m}^2$ . Pokud uvažujeme Slunce jako dokonalou kouli, záření se rozšiřuje z této kulové plochy všemi směry a tím se rozptyluje do prostoru. Na základě toho můžeme za použití energetické bilance vycházející z celkové energie vyzařené povrchem Slunce, která se musí rovnat energii, jež musí projít kulovou plochou o poloměru odpovídajícímu vzdálenosti Země od Slunce vypočítat, jaká intenzita záření dopadá na vnější obal atmosféry Země před tím, než paprsky vstoupí do atmosféry. Výpočet je nutné provést s jistou dávkou zjednodušení, tedy zanedbáním především eliptického pohybu Země okolo Slunce a samotné velikosti Země včetně atmosféry. Obdobný výpočet je možný provést pro libovolnou planetu viz obr. 2-4.



Obr. 2-4 Znárodnění kulových ploch pro energetickou bilanci vyzařování slunečního záření do okolního prostoru [24]

Energii, jež je vyzařována z celého povrchu Slunce, tedy přesněji jeho zářivý výkon, lze vyjádřit jako plochu Slunce vynásobenou celkovou intenzitou záření vypočtenou ve vztahu (2.4). Výsledný zářivý výkon musí projít kulovou plochou o poloměru vzdálenosti Země od Slunce ovšem již se sníženou intenzitou, neboť, jak již bylo řečeno, paprsky se v prostoru rozptylují.

$$4 \cdot \pi \cdot r_{slunce}^2 \cdot W_{b_{slunce}} = 4 \cdot \pi \cdot r_{AU}^2 \cdot W_{b_{AU}} \quad [24] \quad (2.5)$$

$r_{Slunce} = 6378$  tis. km - poloměr Slunce

$r_{AU} = 149,59$  mil. km - střední vzdálenost Země od Slunce, tzv. astronomická jednotka AU

$W_{b_{Slunce}} [W/m^2]$  - výsledný vyzařovaný výkon (intenzita záření) Slunce do prostoru

$W_{b_{AU}} [W/m^2]$  - výsledný přijímaný výkon (intenzita záření) na kulové ploše o poloměru  $r_{AU}$

Použijeme-li číselného výsledku z výpočtu (2.4) a dosadíme ho do osamocené  $W_{b_{AU}}$ , bude výsledný přijímaný výkon  $W_{b_{AU}}$  na  $1 \text{ m}^2$  kulové plochy poloměru  $r_{AU}$ :

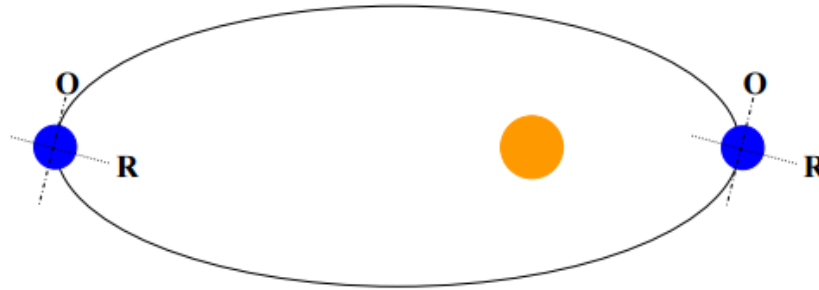
$$W_{b_{AU}} = \frac{1}{46200} \cdot 63000000 = 1364 \text{ W/m}^2 \quad [24] \quad (2.6)$$

Hodnotu výsledku považujeme za intenzitu slunečního záření dopadajícího na povrch zemské atmosféry. Tento výsledek vychází z čistě teoretických vztahů daných pro dokonale černé těleso a přes to se velice přibližuje průměrům skutečně naměřených hodnot slunečního záření dopadajícího na povrch atmosféry. Nekonstantní sluneční aktivita a eliptický pohyb Země okolo Slunce samozřejmě činí okamžité hodnoty intenzity záření značně proměnlivými a v návaznosti na tuto skutečnost byl v minulosti zaveden pojen sluneční (solární) konstanta  $G_{sc}$ . Ta vyjadřuje průměrnou hodnotu intenzity slunečního záření dopadajícího na povrch atmosféry a její hodnota se uvádí ve výši  $G_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$ . [24]

### 2.3 Vlivy eliptického pohybu Země okolo Slunce

Země se pohybuje po eliptické dráze, v jejímž ohnisku leží Slunce (obr. 2-5). Tato skutečnost je jedním ze základních přírodních zákonů, jež v historii popsal jeden z největších německých matematiků, astrolog a astronom Johannes Kepler.

V obrázku je osa rotace označena „O“ a rovina rovníku „R“. Je tedy patrné, že změna vzdálenosti Země od Slunce bude ovlivňovat celkovou intenzitu záření, oproti dříve uvažovanému předpokladu kruhové dráhy.



Obr. 2-5 Eliptický pohyb Země okolo Slunce [24]

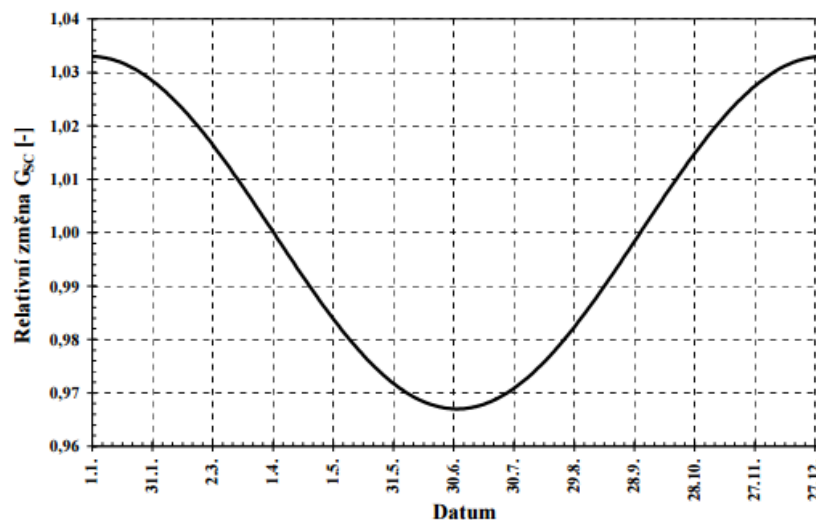
Přes to, že je solární konstanta považována za konstantu, existují zpracované vztahy, které demonstrují její proměnlivost v průběhu roku právě díky eliptické dráze Země. Tzv. efektivní velikost solární konstanty pro určitý den v roce se stanoví jako:

$$G_{SC_{ef}} = G_{SC} \cdot \left[ 1 + 0,033 \cdot \cos \left( 2 \cdot \pi \frac{n}{365,25} \right) \right] \quad [24] \quad (2.7)$$

$G_{SC}$  - sluneční konstanta  $\sim 1367 \text{ W/m}^2$

$n$  - den dle ročního Juliánského kalendáře (pořadový den v roce, pro 1. února je  $n = 32$ )

Relativně vyjádřený vztah (2.7) (bez činitele  $G_{SC}$  na pravé straně) pro období celého roku je na obr. 2-6.



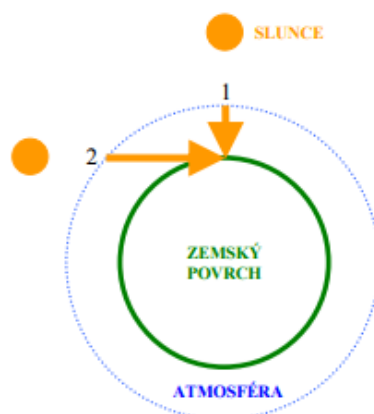
Obr. 2-6 Relativní změna solární konstanty v průběhu roku [24]

Jak je zřejmé z výpočtu a grafu, maximální relativní změna sluneční konstanty se pohybuje v průběhu přibližně okolo 3 % základní hodnoty.

Pro dotvoření obrazu co nejvíce přibližnému realitě je nutné zahrnout i další důsledek eliptické dráhy, a to konkrétně posun tzv. solárního (místního) času. K němu dochází z toho důvodu, že oběžná rychlost Země okolo Slunce se mění v závislosti na tom, jak je planeta od hvězdy vzdálena. Čím dál se Země od Slunce nachází, tím je její rychlost nižší a naopak. [24]

## 2.4 Průchod slunečního záření atmosférou k povrchu Země

Sluneční záření je neustále proměnlivé. Tyto změny se netýkají pouze celkové intenzity, ale i tvaru křivky intenzity spektrálního vyzařování. Skutečné Slunce nemá tak dokonale hladký průběh intenzity spektrálního vyzařování jako dokonale černé těleso. Proto bylo nutné, aby se vědci shodli na tvaru křivky intenzity spektrálního vyzařování, která bude co nejvěrohodněji odpovídat průměrnému chování Slunce, obdobně jako učinili v případě konstantní celkové intenzity záření, jíž nazvali solární konstantou. Dohodnuté průběhy jsou označovány jako referenční spektra. Tato referenční spektra jsou definována jak pro sluneční záření, které dopadá na vnější povrch atmosféry, tak pro záření dopadající na zemský povrch pod různými úhly, které určují nutnou velikost části atmosféry, jíž musí záření projít, než dopadne na zem - viz obr. 2-7. Zde jsou popsány dva mezní případy. Prvním z nich je stav, kdy je Slunce přímo nad hlavou, v nadhlavníku, tedy zenitu a druhým situace, kterou lze považovat za východ Slunce. Z ilustrace je viditelné, že dráha, kterou musí záření urazit přes atmosféru, je v druhém případě podstatně delší. Název, pro takovou dráhu užívaný, je „optická tloušťka atmosféry“.



Obr. 2-7 Naznačení změn tloušťky atmosféry, kterou musí projít sluneční záření před dopadem na zemský povrch [24]



Atmosféra je směs molekul různých plynů, a tyto mají různé vlastnosti, co se týče průchodu slunečního záření skrze ně. Proto je křivka intenzity spektrálního vyzařování slunečního záření jiná na zemském povrchu než před vstupem do atmosféry. Kromě toho je míra takové změny závislá i na tloušťce samotné atmosféry.

Referenční spektra jsou označována kombinací  $AMm_r$ . Písmena AM pocházejí z anglického označení této veličiny „relative Air Mass“ (česky relativní optická tloušťka atmosféry). Číslo  $m_r$  je poměrná hodnota. Porovnává optickou tloušťku atmosféry při kolmém dopadu na povrch (tedy když je Slunce v nadhlavníku) s optickou tloušťkou při hodnoceném úhlu dopadu. Uvažujeme-li optickou tloušťku atmosféry při kolmém dopadu na povrch jako 100 %, potom lze číslo  $m_r$  vyjádřit jako:

$$m_r = \frac{1}{\sin h} = \frac{1}{\cos \theta} \quad [24] \quad (2.8)$$

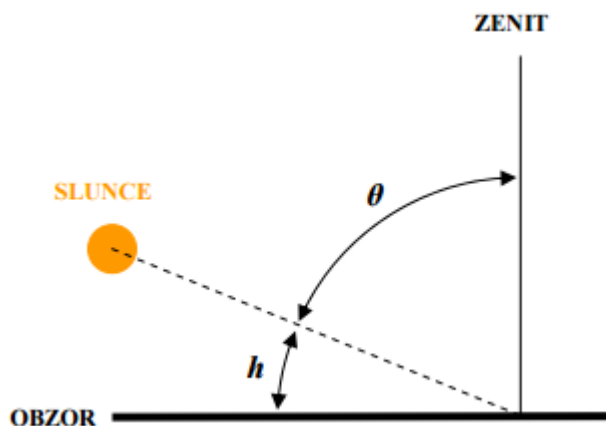
$h$  [rad nebo °] - výška Slunce nad obzorem

$\theta$  [rad nebo °] - zenitový úhel Slunce

Výška Slunce nad obzorem  $h$  je úhel, který svírá rovina obzoru (horizontu) s aktuální pozicí Slunce (přesně středem Slunce) na obloze a je shodný s úhlem, pod kterým dopadají sluneční paprsky na vodorovnou plochu ve sledovaném místě. Při východu a západu má tedy Slunce výšku nad obzorem nulovou a v poledne největší.

Takzvaná obzorníková soustava souřadnic, pomocí kterých je možné popsat polohu Slunce na obloze zahrnuje mimo jiné právě i výšku Slunce nad obzorem. Podobný systém souřadnic se kromě Slunce používá i pro ostatní objekty na obloze, jakými jsou například Měsíc, planety a ostatní hvězdy.

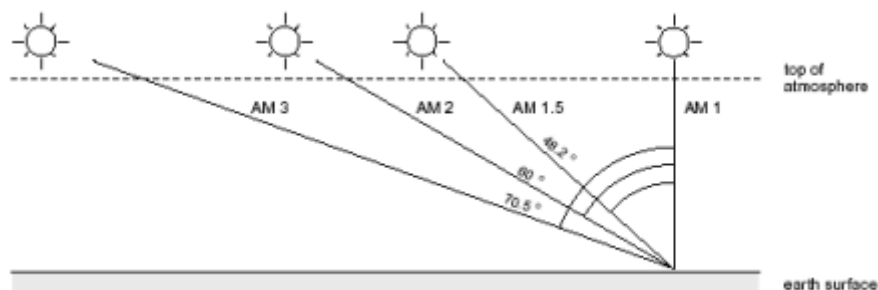
Výška Slunce nad obzorem může být někdy nahrazována zenitovým úhlem  $\theta$ , což je doplňkový úhel výšky Slunce nad obzorem do  $90^\circ$ , tedy úhel, který pozice Slunce svírá se zenitem.



Obr. 2-8 Výška Slunce nad obzorem a zenitový úhel [24]

Referenční spektra jsou na základě úmluvy definována pro zenitové úhly  $0^\circ$ ;  $48,2^\circ$ ;  $60^\circ$ ;  $70,2^\circ$  a od toho se po přepočtu podle (2.8) odvíjí jejich označení AM1, AM1.5, AM2 a AM3. Je však nutné zohlednit, že tato referenční spektra slunečního záření platí pouze pro průchod bezoblačnou atmosférou.

Soubor spekter doplňuje spektrum s označením AM0, což je sluneční spektrum dopadající na vnější hranici atmosféry.



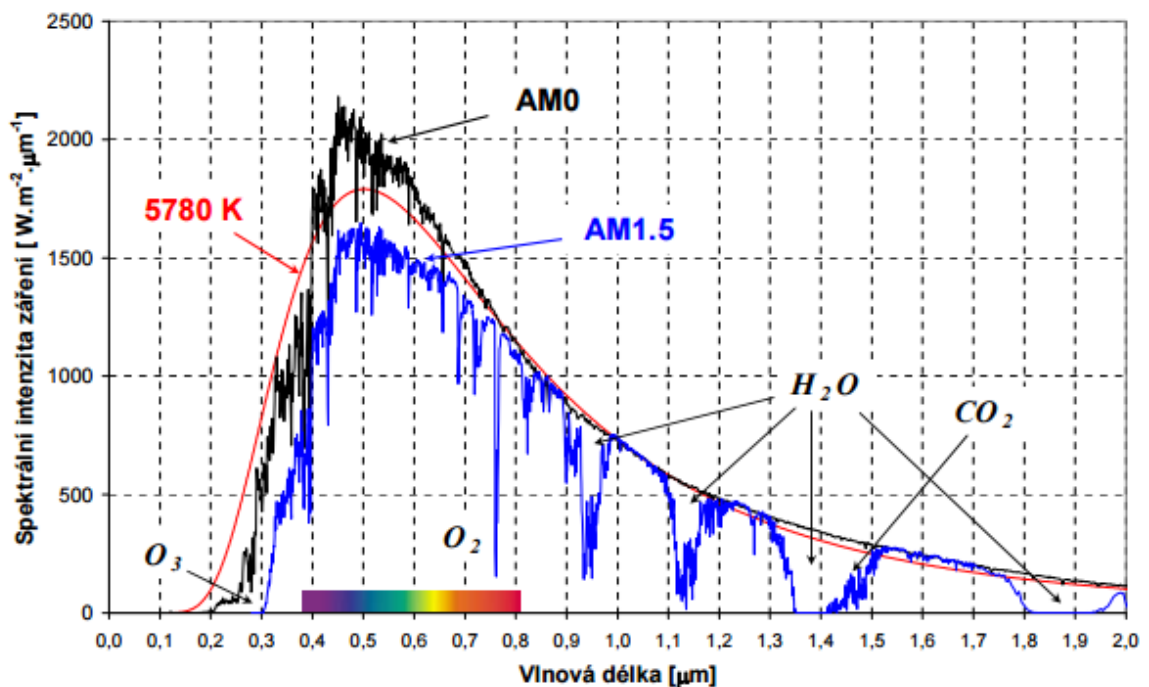
Obr. 2-9 Označení referenčních spekter pro různé pozice Slunce na obloze zadané zenitovým úhlem [24]

Níže vyobrazený graf na obr. 2-10 znázorňuje průběhy referenčních spekter AM0, AM1.5 a vedle nich je pro srovnání zanesena křivka spektrální intenzity záření pro dokonale černé těleso o povrchové teplotě  $5780\text{ K}$ , představující skutečné Slunce. Celková intenzita záření spektra AM0, tedy výsledný vyzařovaný výkon (plocha pod křivkou), je rovna sluneční konstantě  $1367\text{ W/m}^2$ . Celková intenzita záření pro černé těleso o povrchové teplotě  $5780\text{ K}$ , tak jak bylo vypočteno v (2.6), je téměř shodná.

Referenční spektrum AM1.5 bylo vybráno jako pro graf nejvhodnější, a to z důvodu, že se v praxi často používá. Definuje běžné vlastnosti ozáření ve středních zeměpisných šířkách a především je užíváno v solární energetice pro testování fotovoltaických panelů. Celková intenzita záření spektra AM1.5 je  $1000 \text{ W/m}^2$ .

Rozdíly mezi křivkami AM0 a AM1.5 znázorňují útlumy slunečního záření při průchodu atmosférou, které zapříčiňuje odraz a absorpce. V grafickém znázornění jsou viditelné oblasti, v nichž je sluneční záření atmosférou zvláště významně utlumováno.

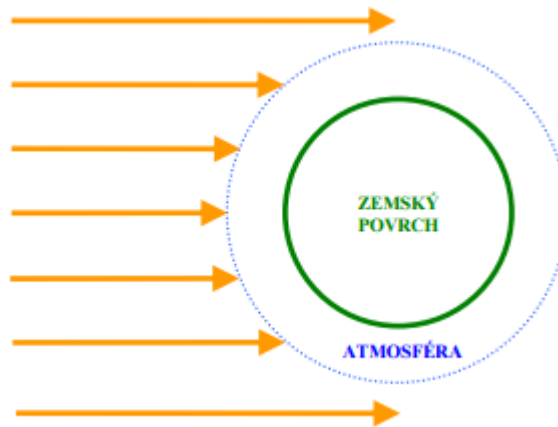
Při počátku v ultrafialové oblasti je zřetelný vliv ozónu  $\text{O}_3$ . Ten absorbuje část ultrafialového záření s vyšší energií a znemožňuje tedy určité části fotonů dopad na zemský povrch. Na konci viditelné části přiléhající k infračervené oblasti je vidět úzký propad zaviněný kyslíkem  $\text{O}_2$ . V grafu jsou viditelné i další výrazné útlumy, například v infračervené oblasti je způsobuje především vodní pára vyskytující se v atmosféře. Malá část v oblasti kolem 1,4 až 1,5  $\mu\text{m}$  je zapříčiněna oxidem uhličitým. [24]



Obr. 2-10 Spektrum AM0, AM1.5 a černého tělesa 5780 K [24]

## 2.5 Sluneční záření na zemském povrchu

Celková intenzita záření dopadajícího na hranici atmosféry země průměrně odpovídá velikosti solární konstanty  $G_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$ . Sluneční paprsky přicházející od Slunce již můžeme považovat za téměř rovnoběžné a tedy uvažovat, že takto vstupují do celé atmosféry, viz obr. 2-11.



Obr. 2-11 Vstup slunečního záření do atmosféry [24]

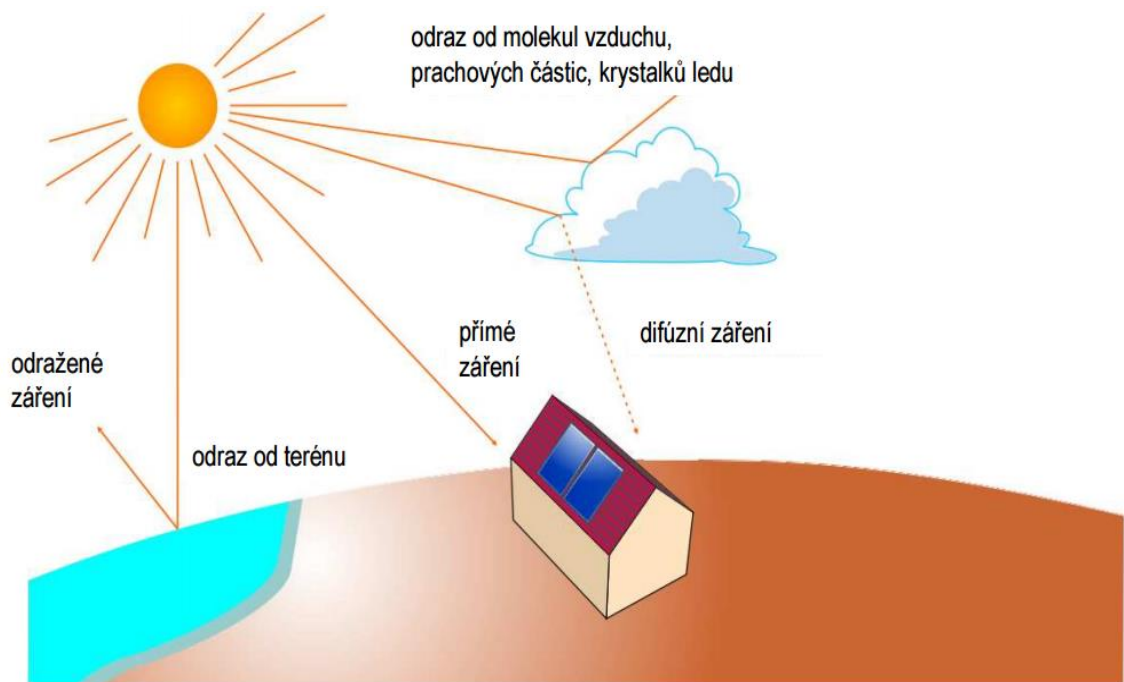
Část slunečních paprsků je při průchodu atmosférou, která kromě atmosférických plynů obsahuje částičky prachu, vodu ve formě krystalků a kapek nebo různé aerosoly, pohlcena a mění se v tzv. rozptýlené neboli difúzní záření. Difúzní záření dopadá na zemský povrch z celé oblohy. Za jasného počasí je obloha modrá, což je způsobeno tzv. Rayleighovým rozptylem, který zapříčiňuje, že fotony s kratší vlnovou délkou se v atmosféře rozptylují ochotněji než fotony s kratší vlnovou délkou, a to s čtvrtou mocninou vlnové délky. Z teoretického hlediska by obloha měla být fialová, protože viditelné světlo s nejmenší vlnovou délkou je fialové. Avšak „fialových“ fotonů není ve slunečním světle tolik, jako fotonů „modrých“, které v konečné bilanci fialovou složku přezáří.

Zbylé, nerozptýlené fotony přichází k povrchu (není-li zataženo) jako přímé záření. Ve výsledku tedy na zemský povrch dopadají dva typy záření, a to záření difúzní a přímé.

Kromě těchto dvou forem se a Zemi vyskytuje ještě jeden typ záření, záření odražené od okolních ploch. Mezi tento druh patří například i záření odražené od mraků, je-li Slunce nízko nad obzorem a svítí pak na mraky vlastně ze spodní strany.

Celkové (total) záření  $G_T$  dopadající na určitou plochu je možné vyjádřit jako součet záření přímého  $G_B$  (beam), difúzního  $G_D$  (diffuse) a případného záření odraženého od okolních ploch  $G_R$  (reflected).

$$G_T = G_B + G_D + G_R \quad [24] \quad (2.9)$$



Obr. 2-12 Znázornění jednotlivých typů záření [25]

Na zemském povrchu lze pro stanovení intenzity přímého záření dopadajícího na plochu kolmou k paprskům (ve směru normály plochy)  $G_{Bn}$  pro běžné energetické výpočty použít vztah vycházející z hodnoty sluneční konstanty  $G_{SC}$

$$G_{Bn} = G_{SC} \cdot \exp\left(-\frac{Z}{\chi}\right) \quad [24] \quad (2.10)$$

Parametr  $\chi$  je závislý především na aktuální výšce Slunce nad obzorem a v menší míře i na nadmořské výšce.

$$\chi = \frac{9,38076 \cdot (\sin h + \sqrt{0,003 + \sin^2 h})}{2,0015 \cdot (1 - H \cdot 10^{-4})} + 0,91018 \quad [24] \quad (2.11)$$

Parametr  $Z$  ve vztahu (2.10) zohledňuje propustnost atmosféry a je nazýván Linkeho součinitelem zakalení atmosféry, který může nabývat průměrných hodnot:

$Z = 1$  Rayleighova atmosféra - ideální atmosféra - bez vodní par, aerosolů, prachu

$Z = 2$  hory

$Z = 2$  až  $3$  venkov

$Z = 3$  až  $4$  město

$Z = 4$  až  $5$  průmyslová oblast

$Z = 8$  silně znečištěné prostředí, smog

Součinitel zákalu atmosféry ( $Z$ ) se mění v průběhu roku, a to především díky rozdílnému množství vlhkosti ve vzduchu. V létě je vlhkosti více, oproti tomu v zimě méně.

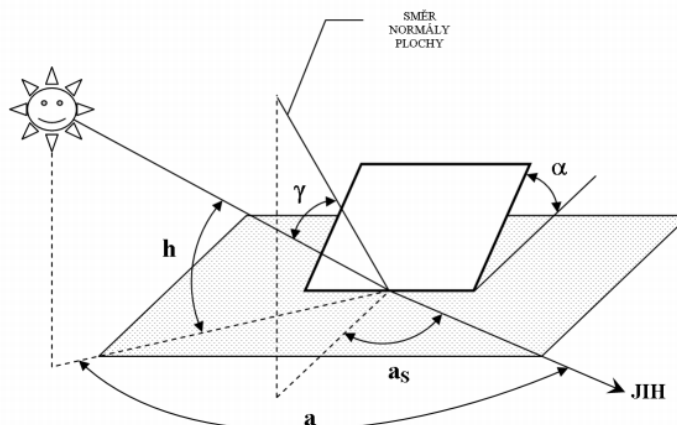
Měsíc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Průměr
Hory	1,5	1,6	1,8	1,9	2,0	2,3	2,3	2,3	2,1	1,8	1,6	1,5	1,89
Venkov	2,1	2,2	2,5	2,9	3,2	3,4	3,5	3,3	2,9	2,6	2,3	2,2	2,75
Město	3,1	3,2	3,5	4,0	4,2	4,3	4,4	4,3	4,0	3,6	3,3	3,1	3,75
Průmyslová oblast	4,1	4,3	4,7	5,3	5,5	5,7	5,8	5,7	5,3	4,9	4,5	4,2	5,00

Tab. 2-1 Běžné součinitele zákalu atmosféry v průběhu roku [24]

Obecně položenou plochu na zemském povrchu můžeme definovat sklonem  $\alpha$  vůči vodorovné rovině a orientací vůči jihu, tzv. azimutem plochy  $a_s$ .

Aby bylo možné stanovit intenzitu přímého záření dopadajícího na obecně položenou plochu při známé hodnotě  $G_{Bn}$  musíme nutně znát úhel  $\gamma$ , který svírá směr slunečních paprsků s normálou osluněné plochy (obr. 2-13). V případě, že je poloha osluněné plochy konstantní, mění se úhel  $\gamma$  pouze v závislosti na čase, tedy v závislosti na poloze Slunce, která je dána výškou Slunce nad obzorem  $h$  a azimutem Slunce  $a$ . Z goniometrických funkcí lze odvodit, že:

$$\cos \gamma = \sin h \cdot \cos \alpha + \cos h \cdot \sin \alpha \cdot \cos(a - a_s) \quad [24] \quad (2.12)$$



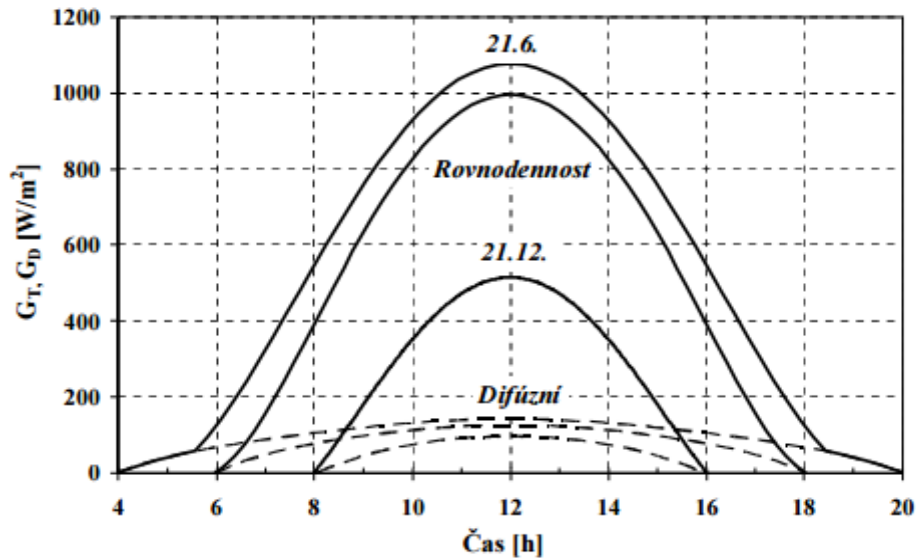
Obr. 2-13 Úhel dopadu slunečních paprsků na obecně položenou plochu [24]

Intenzita přímého záření dopadající na obecně položenou plochu  $G_{B\gamma}$  je potom tedy:

$$G_{B\gamma} = G_{Bn} \cdot \cos \gamma \quad [24] \quad (2.13)$$

Jak již bylo zmíněno výše, celková intenzita záření  $G_T$  dopadající na určitou plochu je dána součtem záření přímého  $G_B$ , difúzního  $G_D$  a případného záření odraženého od okolních ploch  $G_R$ .

Obr. 2-14 ilustruje průběh celkové intenzity záření během bezoblačného dne pro plochu orientovanou k jihu při rovnodennosti, letním a zimním slunovratu. Průběh difúzního záření zachycují spodní křivky. Znázornění je platné pro středoevropské podmínky, při sklonu plochy  $35^\circ$ , součiniteli zákalu  $Z = 3,5$  a albedu  $0,1$ .



Obr. 2-14 Příklad průběhu intenzity během bezoblačného dne [24]

Plocha pod křivkou je pak teoreticky možné denní množství energie  $E_{s \text{ den teor}}$  dopadající na  $1 \text{ m}^2$  plochy, tedy:

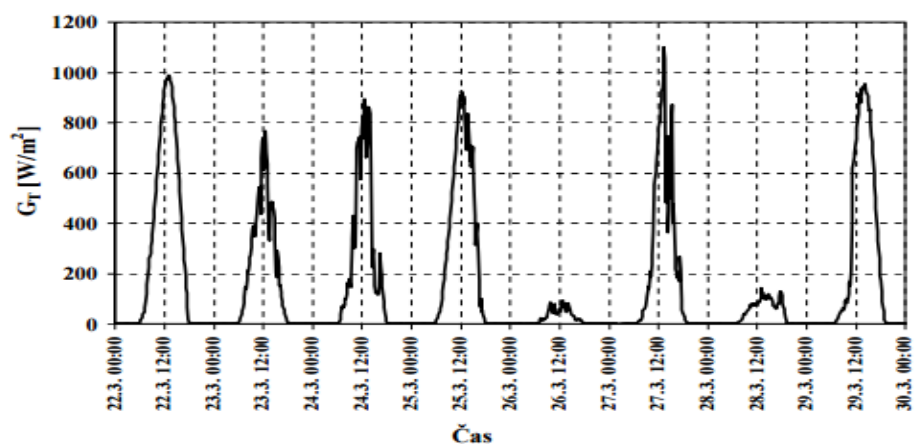
$$E_{s \text{ den teor}} = \int_{\tau_{h1}}^{\tau_{h2}} G_T d\tau_h \quad [24] \quad (2.14)$$

$\tau_h$  - hodinový úhel vyjádřený v hodinách

Uvedené integrační meze  $\tau_{h1}$  a  $\tau_{h2}$  jsou doby východu a západu Slunce v hodinách. Jejich rozdílem lze stanovit teoretickou dobu slunečního svitu.

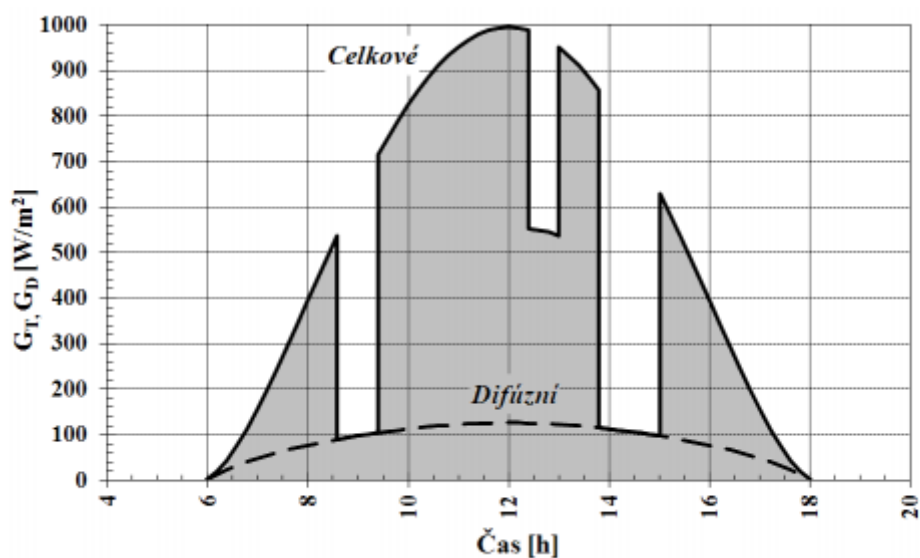
$$\Delta\tau_{h, \text{teor}} = \tau_{h2} - \tau_{h1} \quad [24] \quad (2.15)$$

V případě oblačných dní může být průběh intenzity velmi proměnlivý (obr. 2-15).



Obr. 2-15 Příklad skutečných průběhů celkové intenzity záření [24]

Na obr. 2-16 je provedena názorná ukázka proměnlivosti celkové intenzity záření, kdy je od doby východu Slunce jasno, poté dojde k úplnému zakrytí Slunce oblačností, přes poledne je opět jasno, kolem 13. hodiny dojde k pouze částečnému zakrytí Slunce, kdy část přímého slunečního záření oblačností prostupuje, poté je zase chvíli jasno, následuje úplné zakrytí Slunce a do západu Slunce je již opět jasno. Denní množství záření je specifikováno vyznačenou plochou pod křivkou. Skutečná doba přímého slunečního svitu  $\Delta\tau_{\text{h real}}$  se pro uvedený den liší od teoretické hodnoty.



Obr. 2-16 Ukázka proměnlivosti celkové intenzity záření v průběhu dne [24]

Skutečné doby slunečního svitu jsou měřeny hydrometeorologickými ústavami a jsou zpracovávány ve formě dlouhodobých měsíčních průměrů. Na základě těchto průměrů lze stanovit tzv. relativní dobu slunečního svitu  $\tau_{\text{h real}}$  pro daný měsíc, a to jako:



$$\tau_{h\_rel} = \frac{\Delta\tau_{h\_real}}{\Delta\tau_{h\_teor}} \quad [24] \quad (2.16)$$

Skutečné denní množství záření je pak odhadnutelné na základě dlouhodobých normálů jako:

$$E_{s\_den\_real} = \tau_{h\_rel} \cdot \int_{\tau_{h1}}^{\tau_{h2}} G_B d\tau_h + \int_{\tau_{h1}}^{\tau_{h2}} (G_D + G_{R*}) d\tau_h \quad [24] \quad (2.17)$$

$G_{R*}$  - redukované odražené záření zohledňující relativní dobu slunečního svitu

$$G_{R*} = \frac{1 - \cos \alpha}{2} \cdot r \cdot (\tau_{rel} \cdot G_{Ph} + G_{Dh}) \quad [24] \quad (2.18)$$

Výše uvedený vztah (2.17) platí pro solární zařízení, která jsou schopna pracovat i při zatažené obloze, tzn. jen při difúzním záření (fotovoltaické články), avšak většina termosolárních kolektorů (pro ohřev vody) je schopna provozu pouze pokud na ně dopadá i přímé sluneční záření. Pro tyto případy je nutno modifikovat vztah (2.17) na:

$$E_{s\_den\_real} = \tau_{h\_rel} \cdot \int_{\tau_{h1}}^{\tau_{h2}} (G_B + G_D + G_R) d\tau_h \quad [24] \quad (2.19)$$

kde jsou „aktivní“ pouze ty doby, kdy na hodnocenou plochu dopadá i přímé záření.

Celkové skutečné množství záření dopadající na 1 m<sup>2</sup> za měsíc s  $n$  dny:

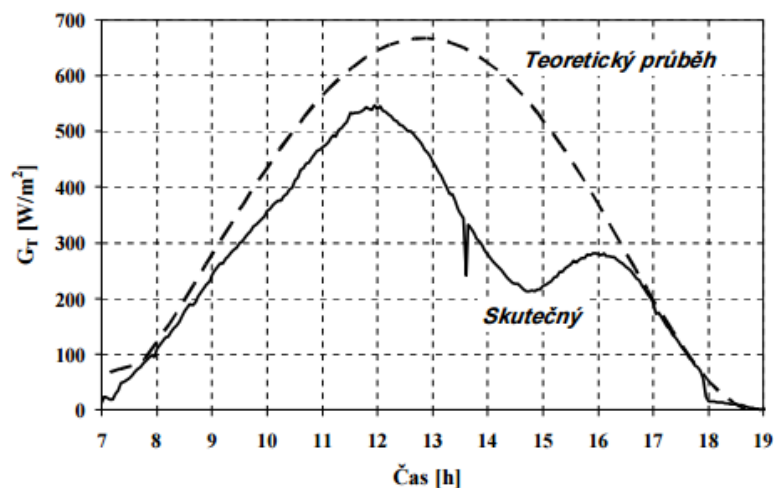
$$E_{s\_mes} = n \cdot E_{s\_den\_real} \quad [24] \quad (2.20)$$

Tento vzorec (2.20) je možno uplatnit za předpokladu, že pro výpočet denní sumy bude vybrán „průměrný“ den v daném měsíci. Takovým dnům se říká charakteristické dny a nemusí být vždy kolem 15. dne v měsíci viz tab. 2.2.

Měsíc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Charakteristický den	17	16	16	15	15	11	17	16	15	15	14	10

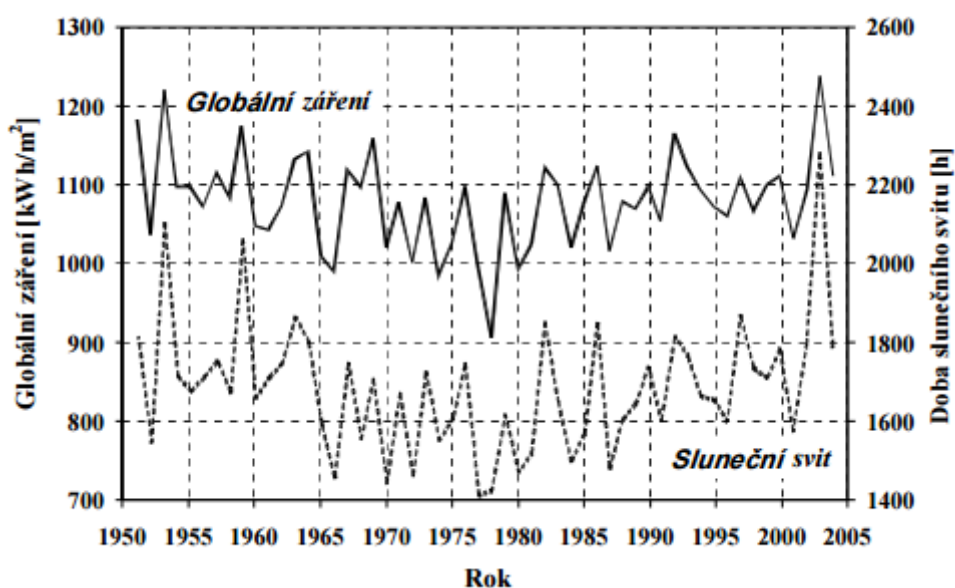
Tab. 2-2 Charakteristické dny v měsíci [24]

Obr. 2-17 pro zajímavost znázorňuje reálně naměřený průběh intenzity záření během bezoblačného dne s minimem okolo 15. hodiny. Úbytek skutečné intenzity oproti teoretickému průběhu (konst.  $Z = 4,5$ ) je zapříčiněn vlivem činnosti velkého hutního a strojírenského podniku. Podnik je situován jihozápadním směrem od místa měření a jeho exhalace zvyšují výrazně součinitel zákalu atmosféry a negativně ovlivňují intenzitu slunečního záření.



Obr. 2-17 Porovnání průběhu teoretické intenzity a skutečně naměřeného průběhu [24]

Skutečně naměřené hodnoty ročního globálního ozáření pro horizontálně položenou plochu za posledních cca 50 let jsou zachyceny na obr. 2-18, kde jsou zároveň uvedeny i roční doby slunečního svitu. [24]

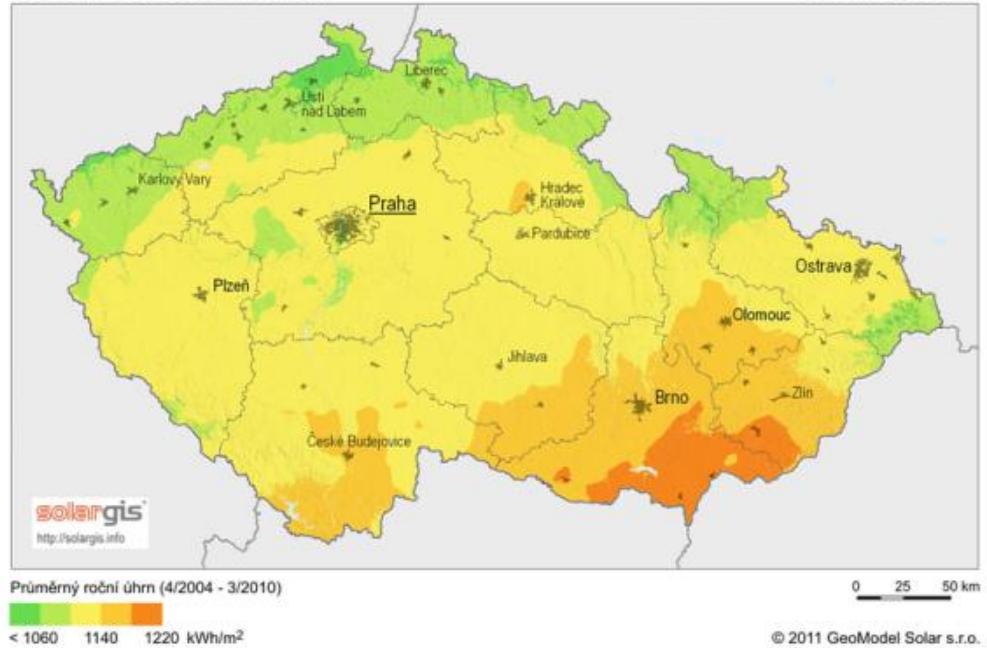


Obr. 2-18 Průběh ročního globálního záření a doby slunečního svitu pro Hradec Králové za období 1951 – 2004 [24]

Na základě dlouhodobých normálů je pak sestavena mapa ročních osvitových poměrů České republiky a Evropy (obr. 2-19 a 2-20). [24]

Globální horizontální záření

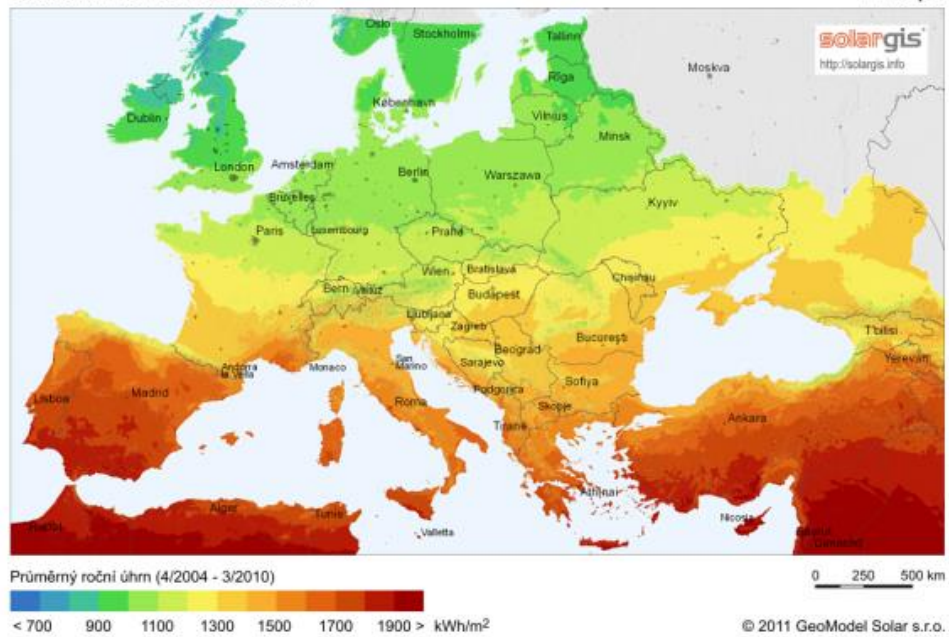
Česká republika



Obr. 2-19 Roční sumy globálního záření v ČR [24]

Globální horizontální záření

Evropa



Obr. 2-20 Roční sumy globálního záření pro Evropu [24]

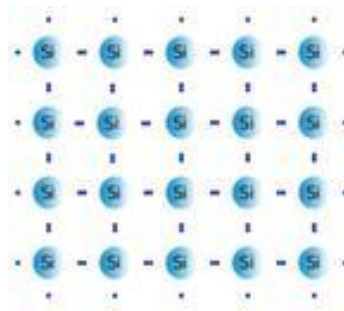
Skutečná energie záření dopadajícího na oslněnou plochu je na území České republiky poměrně nízká. Její celoroční průměr činí  $2,88 \text{ kWh/m}^2/\text{den}$ . Nejmenších hodnot dosahuje skutečná energie v prosinci ( $0,52 \text{ kWh/m}^2/\text{den}$ ) a maxim naopak očekávaně v měsíci červnu

(5,65 kWh/m<sup>2</sup>/den). Pro nízké hodnoty skutečné energie slunečního záření dopadajícího na naše území během roku a velmi nízké intenzitě záření je Česká republika pro celoroční provoz vozidla napájeného fotovoltaickými články naprosto nevhodná. Mnohonásobně lépe vyhovujícími jsou naopak oblasti v blízkosti rovníku, popřípadě jemu málo vzdálené. V Evropě by tedy byl takový provoz možný například na jihu Španělska, Itálie či Řecka. [23]

### 3 ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY A VLASTNOSTI SOUDOBYCH A PERSPEKTIVNÍCH FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ

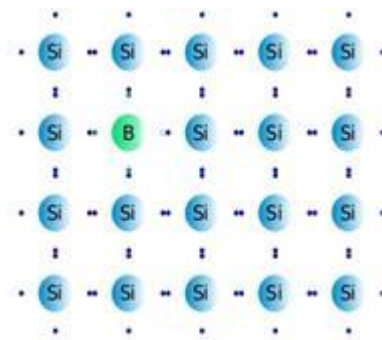
Fotovoltaický jev byl objeven v roce 1839 Edmundem Becquerelem, který si všiml přeměny elektromagnetického (slunečního) záření na elektrickou energii. Tento jev později fyzikálně popsal Albert Einstein, kde určil, že za určitých podmínek se sluneční záření chová jako tok částic, tzv. fotonů. Pokud dopadají tyto fotony na kov nebo polovodič dochází k uvolnění elektronů z jejich povrchu.

Zmíněná energetická přeměna se uskutečňuje v polovodičovém (solárním) článku, kdy naprostá většina těchto článků je vyrobená na bázi krystalického křemíku na kterém bude vysvětlen princip. V jiných materiálech je přeměna energie obdobná. Pro pochopení principu je nutné znát polovodiče typu P a typu N. Ty vznikají přidáním (dotováním) příměsí do struktury krystalu. Křemíkový krystal má ve svém valenčním pásu čtyři elektrony, kde tyto elektrony jsou vazbou spojeny s dalšími atomy křemíku. Elektrony jsou kolem jádra atomu uspořádány ve vrstvách, těchto vrstev je celkem sedm a poslední vrstva (nejdále od jádra) ve které se elektrony nachází, se nazývá valenční. Struktura krystalu křemíku je zobrazena na obrázku č. 3-1.



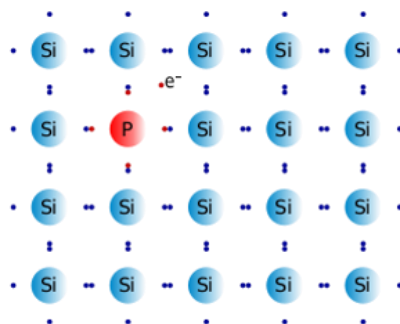
Obr. 3-1 struktura krystalu křemíku [1]

Pokud bychom do struktury přidali nějaký trojmocný prvek (akceptor) například atom boru (má jen tři atomy ve valenčním pásu) místo atomu křemíku jedna vazba zde bude chybět, vznikne zde tzv. „díra“ s kladným nábojem. Příměsí trojmocného prvku vznikne přebytek kladných (pozitivních) nábojů, odtud tedy polovodič typu P.



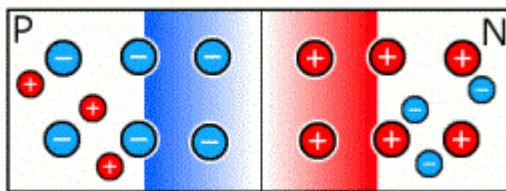
Obr. 3-2 Struktura polovodiče typu P [1]

Přidáním pětímocného prvku (donor) například fosforu bude ve struktuře krystalu jeden elektron navíc, převládnou tedy záporné (negativní) náboje, proto polovodič typu N.



Obr. 3-3 Struktura polovodiče typu N [1]

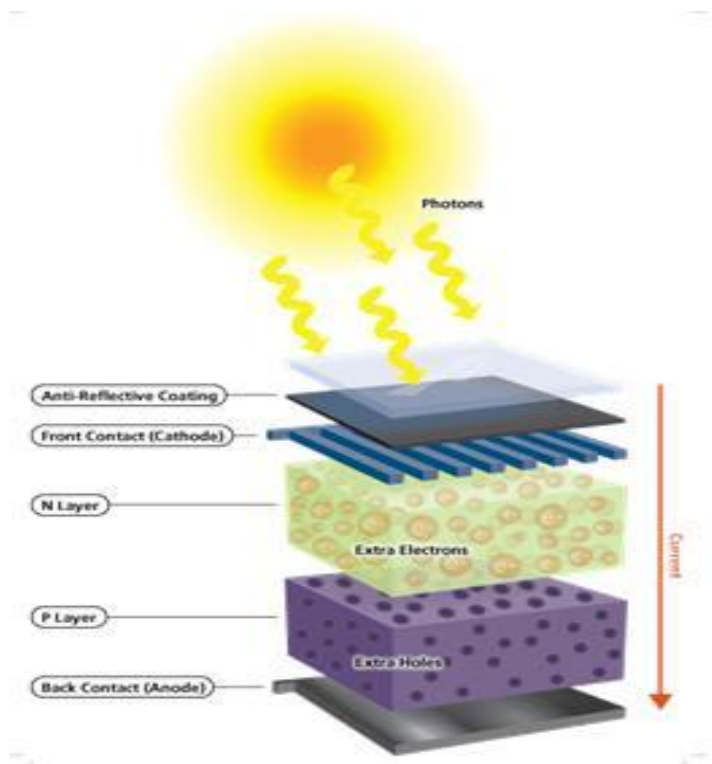
Spojením obou typů polovodičů a přidáním kontaktů dostaneme solární článek, který má mezi oběma typy polovodiče tzv. PN přechod. Jedná se o oblast styku dvou polovodičů s opačným typem vodivosti. Část volných elektronů přejde z oblasti N do oblasti P a tam rekombinují s děrami. Vytvoří se oblast bez volných nábojů nazývaná hradlová vrstva.



Obr. 3-4 Struktura polovodiče [2]

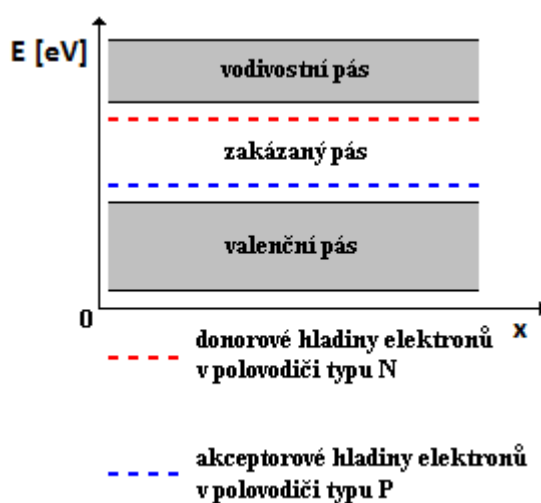
Osvětlením článku v něm začne vznikat vnitřní fotoelektrický jev a ze struktury polovodiče se začnou uvolňovat elektrony. Na PN přechodu se vytvoří elektrické napětí, které u křemíku je přibližně 0,6 V a lehce klesá se zatížením. Energie dopadajícího záření se tak mění

na elektrickou, pokud bychom k článku připojili zátěž, dojde k vyrovnání se kladné a záporné náboje a obvodem poteče elektrický proud. [1]



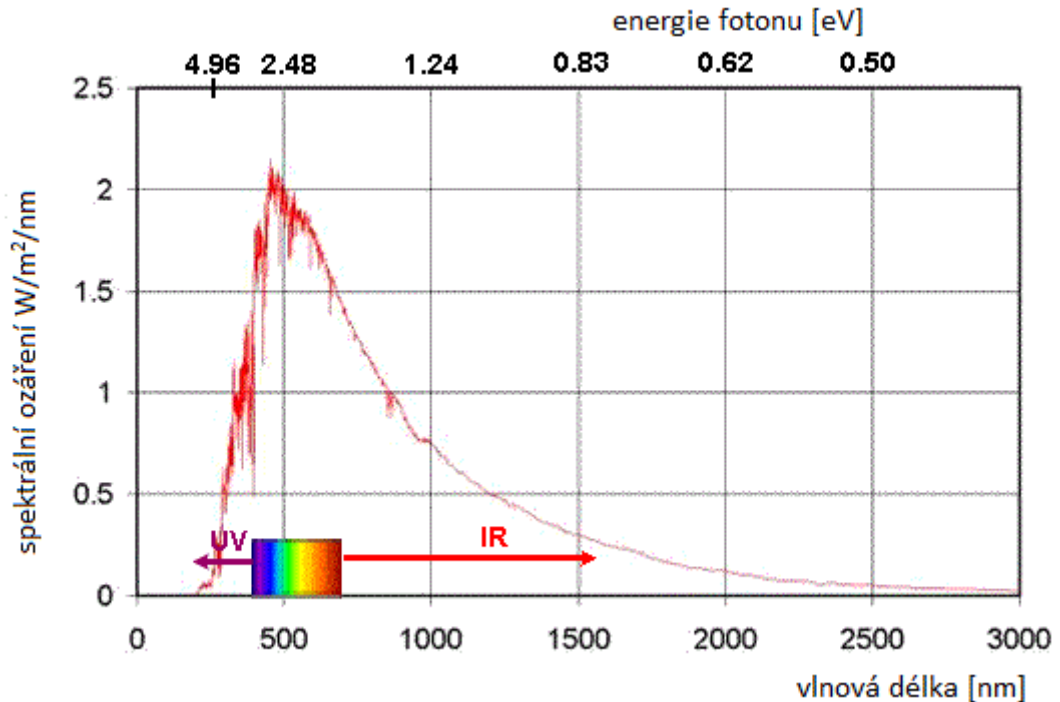
Obr. 3-5 Princip fotovoltaického článku [1]

Aby se elektron uvolnil z krystalové struktury, tedy aby překonal zakázaný pás a přešel z valenčního do vodivostního pásu, je nutné mu předat potřebnou energii (tepelnou, světelnou). U křemíku to je 1,1 eV.



Obr. 3-6 Pásový model polovodiče [3]

Sluneční záření obsahuje fotony s energiemi od 0,5 eV (infračervené) do 2,9 eV (ultrafialové). Lze tedy využít fotony od vlnové délky 1100 nm níže, právě proto se u většiny panelů používá křemík, kvůli své schopnosti využít velkou část slunečního záření. Předaná energie se spotřebuje na uvolnění energie a zbytek se přemění v teplo, proto nelze dosáhnout vysokých účinností. [3]



Obr. 3-7 Spektrum světelného záření [4]

### 3.1 Základní parametry fotovoltaických článků

#### 3.1.1 Účinnost

Účinnost je nejběžněji používaným parametrem pro porovnání výkonů solárních článků. Účinnost je definována jako poměr energie ze solárního článku vystupující ku vstupní energii ze slunce, tedy jak velká část slunečního záření je přeměněna na elektrickou energii.

$$\mu = \frac{P_{mpp}}{E \cdot S} \quad [5] \quad (3.1)$$

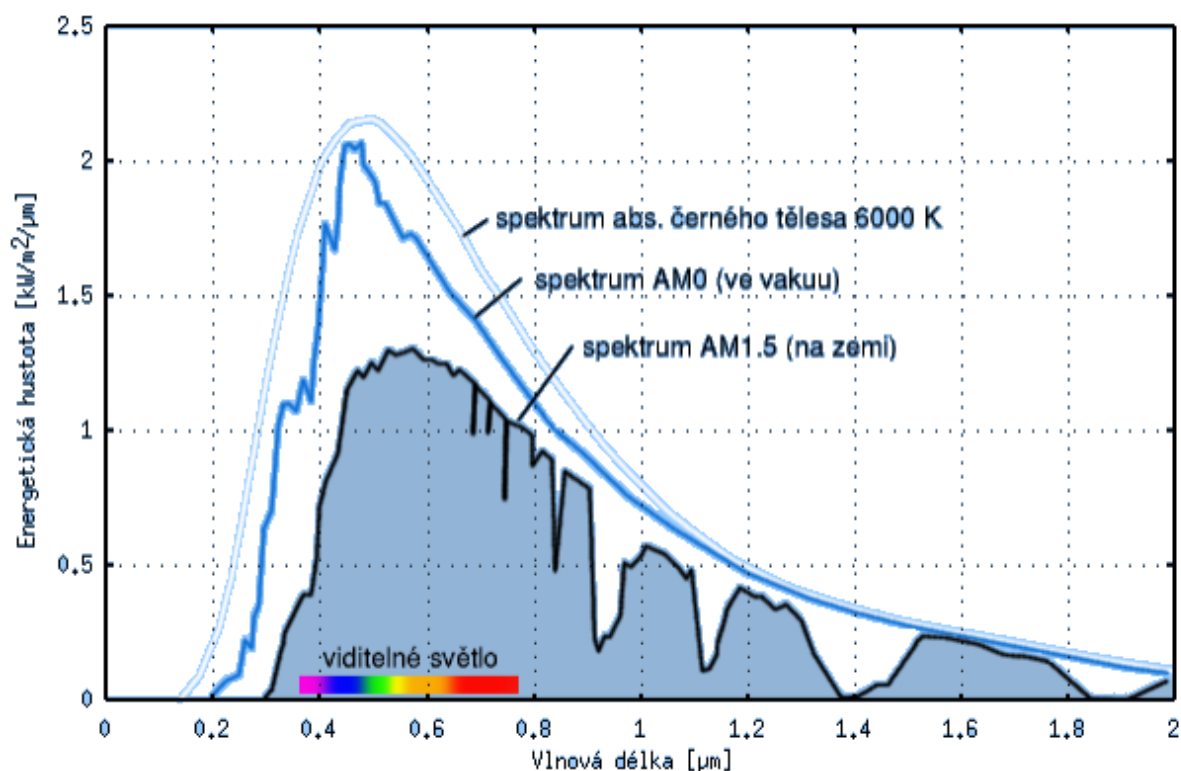
$P_{mpp}$  – jmenovitý výkon článku, uvádí se hodnota změřená v bodě maximálního výkonu [W]

$E$  – Intenzita slunečního záření – udává se ve wattech na metr čtvereční [ $W/m^2$ ], nejvyšší intenzita slunečního záření se v České republice za ideálních povětrnostních podmínek při kolmém dopadu slunečních paprsků pohybuje kolem  $1100 W/m^2$ .



$S$  – plocha fotovoltaického článku [ $\text{m}^2$ ]

Kromě odpovídajících vlastností samotného solárního článku je účinnost závislá na spektru a intenzitě dopadajícího slunečního záření a teplotě solárního článku. Proto podmínky, za kterých je účinnost měřená musí být pečlivě kontrolovány. Pozemní solární články jsou měřeny při teplotě  $25\text{ }^\circ\text{C}$  intenzitě záření  $1000\text{ W/m}^2$  a spektrum AM1,5. AM1.5 je spektrum slunečního záření po průchodu bezoblačnou atmosférou. Energetická hustota tohoto spektra je  $1\text{ kW/m}^2$ , ale silně závisí na průhlednosti atmosféry. Celkový využitelný výkon slunečního záření odpovídá modré ploše pod křivkou AM1.5 na obrázku 3-8. Solární články určené do vesmíru jsou měřeny za jiného spektra (AM0). AM0 (air mass) je spektrum slunečního záření v kosmickém prostoru ve vzdálenosti 150 milionů kilometrů od slunce bez ovlivnění atmosférou. Celková energetická hustota tohoto spektra je  $1367 \pm 7\text{ W/m}^2$ . [8] Více v kapitole 2-4.



Obr. 3-8 ukázka spekter záření AM1.5 a AM0 [8]

Účinnost článků závisí na vlastnostech použitého materiálu, jak již bylo zmíněno výše, nejčastěji se používá křemík, který je citlivý na fotony viditelného a částečně i infračerveného záření o vlnových délkách kratších než  $1100\text{ nm}$ .

Ve fotovoltaickém panelu jsou články spojovány, protože samotný článek by dosahoval velmi malých hodnot výkonů, tím ovšem klesá účinnost vlivem prostoru nezbytného mezi jednotlivými články a vlivem rámu panelu.

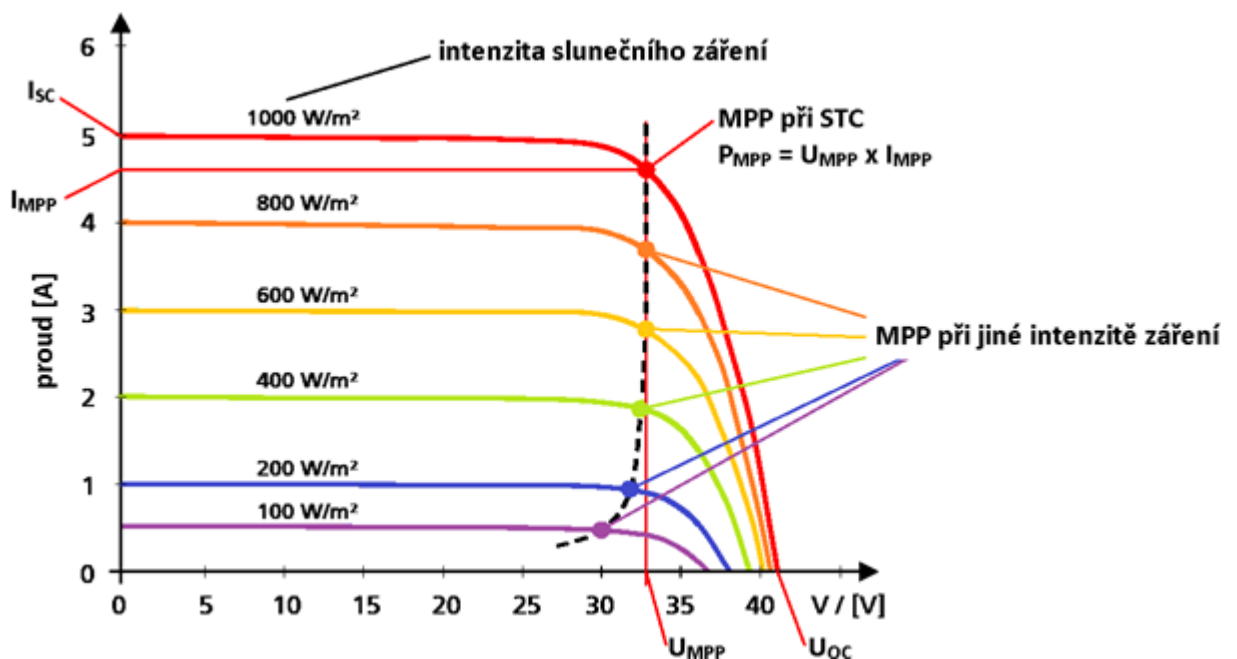
Pro zvýšení elektrického výkonu článků lze využít tzv. koncentrátory záření, což mohou být například zrcadla nebo čočky, které koncentrují záření dopadající na povrch článku. U vesmírných panelů se to bere jako samozřejmost, proto jsou jejich účinnosti vůbec nejvyšší což se ale projeví na ceně, která je mnohonásobně vyšší.

Další možností zvýšení účinnosti panelů je jejich připojení k tzv. sledovačům slunce, což jsou zařízení sloužící k natáčení solárních panelů tak, aby byl stále udržován ideální úhel dopadu slunečních paprsků na fotovoltaické panely v průběhu dne.

V příloze č.1 je vidět porovnání účinností jednotlivých technologií solárních článků měřených v laboratorních podmínkách. Je vidět, že k pravidelnému zvyšování účinnosti dochází pouze u vícevrstvých článků, účinnosti ostatních technologií se v posledních letech zvyšují jen minimálně.

### 3.1.2 Proud nakrátko

Zkratový proud je proud solárního článku, kdy napětí solárního článku je rovno nule (tj. když je solární článek zkratován). Obvykle se označuje jako  $I_{sc}$  (short-circuit), zkratový proud je znázorněn na volt-ampérové charakteristice. [5]



Obr. 3-9 VA charakteristika solárního článku [7]

MPP – bod maximálního výkonu (Maximum Power Point) – pracovní bod, ve kterém dodává fotovoltaický panel maximální výkon. MPP se mění v závislosti na intenzitě dopadajícího slunečního záření a na teplotě panelu.

STC – standardní testovací podmínky (Standard Test Condition) – podmínky, za nichž jsou měřeny charakteristiky fotovoltaických panelů a článků.  $U_{OC}$  a  $I_{SC}$  jsou v toleranci  $\pm 10\%$  při intenzitě záření  $1000 \text{ W/m}^2$ , teplotě  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  a slunečním spektru AM1.5.

$U_{MPP}$  – napětí při jmenovitém výkonu

$I_{MPP}$  – proud při jmenovitém výkonu

$U_{OC}$  – napětí naprázdno – napětí na fotovoltaickém panelu bez připojené zátěže

$I_{SC}$  – proud nakrátko – největší proud, který je panel schopen dodat

Z VA charakteristiky je vidět, že zkratový proud závisí na intenzitě slunečního záření, dále na ploše teplotě a spektrální citlivosti článku. Hodnota tohoto proudu se u fotovoltaických panelů pohybuje v jednotkách ampér. [7]

### 3.1.3 Napětí naprázdno

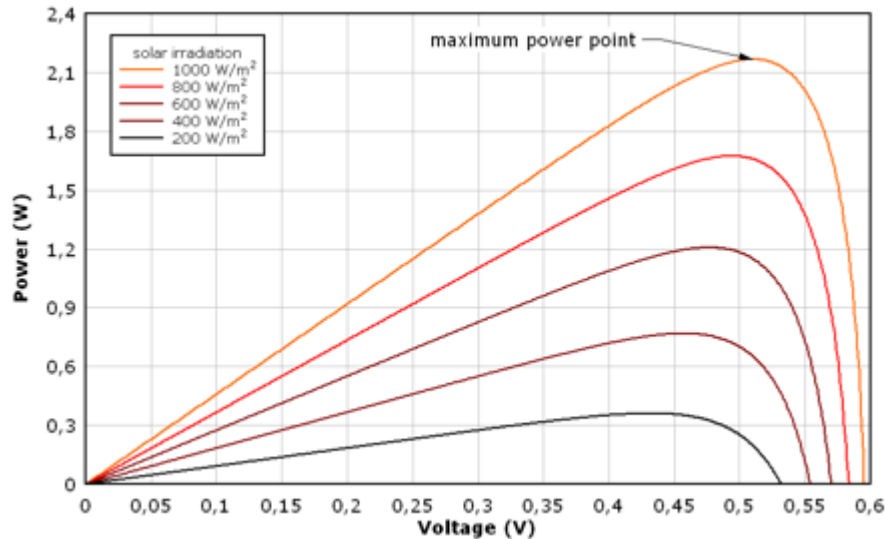
Pokud k článku není připojena zátěž, obvodem neteče žádný proud a napětí, které bude na svorkách, se nazývá napětí naprázdno označované  $U_{OC}$  (open circuit). Toto napětí je také zobrazeno ve VA charakteristice na obrázku 3-9. Hodnota napětí naprázdno jednoho křemíkového článku je přibližně  $0,6 \text{ V}$ , celého panelu potom desítky voltů. Opět i zde je vidět že hodnota je závislá na intenzitě záření.

### 3.1.4 Výkon

Na VA charakteristice (obr. 3.9) je vidět bod MPP, které udává maximální výkon panelu. Proud, který odpovídá tomuto bodu, se značí  $I_{MPP}$ , stejně tak napětí  $U_{MPP}$ . Součinem těchto dvou hodnot dostaneme maximální výkon panelu  $P_{MPP}$ .

$$P_{MPP} = U_{MPP} \cdot I_{MPP} \quad [5] \quad (3.2)$$

Charakteristika níže zobrazuje průběh výkonu v závislosti na výstupním napětí. I zde je vidět, že je výkon závislý na intenzitě světelného záření.



Obr. 3-10 Výkonová charakteristika fotovoltaického článku [38]

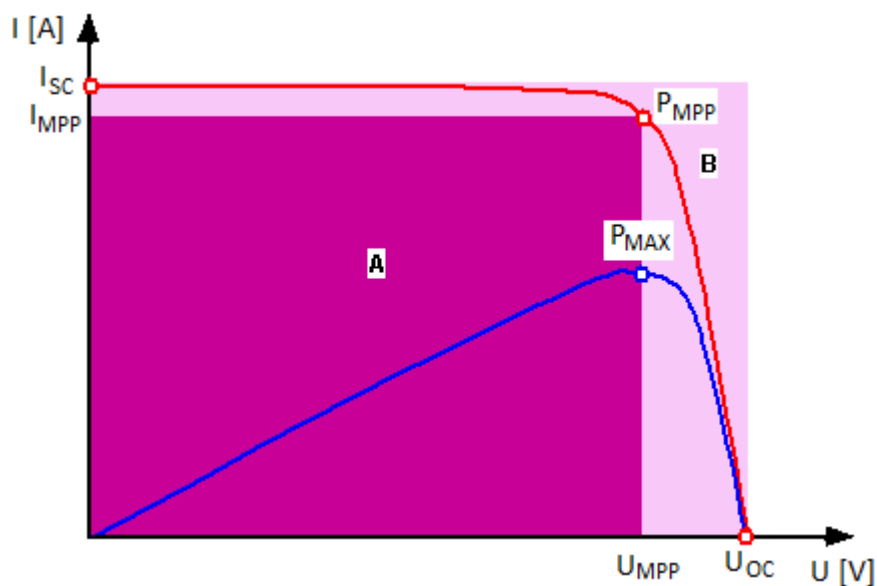
Snahou je přiblížit pracovní bod panelu k bodu MPP. Jednou z možností je připojit k panelu měnič, který bude nastavovat hodnotu  $U_{MPP}$ . Další variantou je, že panel bude napájet baterii a její napětí určí polohu pracovního bodu, v tomto případě by se jednalo o trakční baterii s vysokým napětím, proto by byla vhodnější varianta s měničem. Pokud by byl panel připojen k obecné zátěži, bude hodnota pracovního bodu dána odporem této zátěže.

### 3.1.5 FF (fill factor)

Součinem zkratového proudu  $I_{SC}$  a napětím naprázdno  $U_{OC}$  dostaneme potenciální maximální výkon článku, kterého nelze reálně dosáhnout. Reálný maximálně dosažitelný výkon se označuje  $P_{MPP}$ . Poměr mezi těmito dvěma výkony se nazývá činitel plnění z anglického fill factor. Čím více se FF blíží jedné, tím více je fotovoltaický panel kvalitní. Pro činitel plnění platí:

$$FF = \frac{U_{MPP} \cdot I_{MPP}}{U_{OC} \cdot I_{SC}} \quad [5] \quad (3.3)$$

Pro vyšší názornost je možné si FF představit jako poměr plochy A ku B na obrázku č. 3-11. Níže zobrazená charakteristika odpovídá poměrně vysoce kvalitnímu panelu, protože plochy jsou téměř shodné. Levnější panely budou mít plochu A podstatně menší. [5]



Obr. 3-11 Grafické znázornění činitele plnění FF [5]

### 3.1.6 Vliv teploty na parametry fotovoltaických článků

V datasheetech výrobců nalezneme i parametry, které jsou závislé na teplotě. S rostoucí teplotou článků nejčastěji způsobenou infračervenou složkou záření klesá výkon panelu. V oblastech s vysokými denními teplotami můžou panely dosahovat teploty až přes 80 °C. Fotovoltaické panely jsou obvykle měřeny při teplotě 25 °C a intenzitě slunečního záření 1000 W/m<sup>2</sup>. Nicméně při běžném provozu jsou panely vystaveny vyšší teplotě a nižší intenzitě záření. Za účelem zjištění výstupního výkonu solárního článku je důležité určení očekávané provozní teploty FV panelu. Jmenovitá provozní teplota článku (NOCT Nominal Operation Cell Temperature), která definuje teplotu fotovoltaického článku při teplotě okolí 20 °C, intenzitě záření 1000 W/m<sup>2</sup> a rychlosti větru 1 m/s. Hodnota NOCT je nejčastěji 45 °C. Výsledná teplota panelu je dána následujícím vzorcem:

$$T_{FV} = T_{ok} + \left( \frac{NOCT - 20}{80} \right) \cdot E \quad [5] \quad (3.4)$$

$T_{FV}$  – teplota fotovoltaického panelu [°C]

$T_{ok}$  – teplota okolí [°C]

$E$  – intenzita slunečního záření [mW/cm<sup>2</sup>]

Nejlepších hodnot dosahuje panel při  $NOCT = 38$  °C, nejhorších pak při  $NOCT = 58$  °C [5].

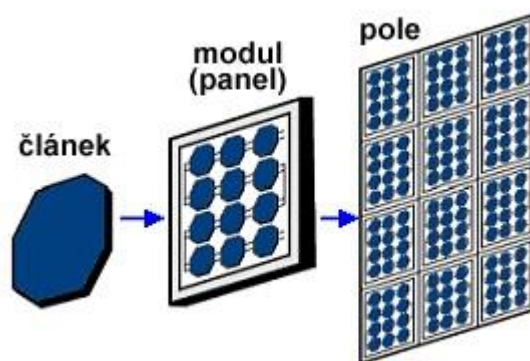
Proud nakrátko  $I_{sc}$  je přímo úměrný nejen intenzitě solárního záření, ale jeho hodnota se mění i s teplotou. Hodnota udává relativní přírůstek proudu nakrátko při vzrůstu teploty o jeden stupeň Celsia nad standardních 25 °C. Hodnota se udává buď v %°C nebo mA/°C.

Napětí naprázdno  $U_{oc}$  je také závislé na teplotě, s růstem teploty jeho hodnota klesá, proto je v katalogích uváděna záporná hodnota. I zde se jedná o změnu při oteplení jednoho stupně Celsia.

Opět i maximální výkon  $P_{MPP}$  se s teplotou mění, stejně jako napětí naprázdno jeho hodnota s rostoucí teplotou klesá. Všechny tři zmíněné parametry bývají rozdílné pro různé technologie solárních panelů.

### 3.2 Spojování článků do panelu

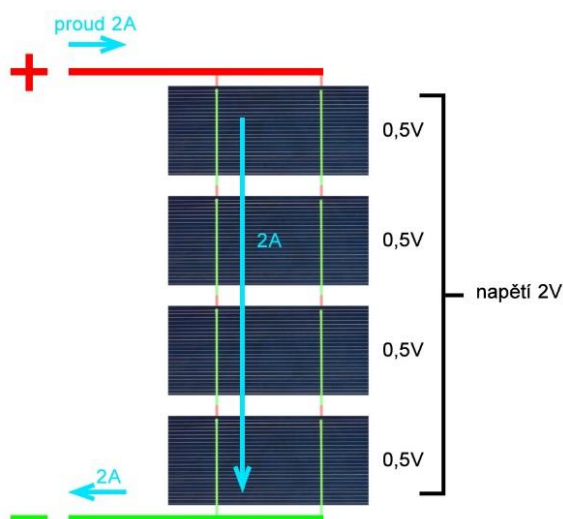
Jediný fotovoltaický článek má jen velmi malé využití. Výstupní napětí i výkon je pro většinu aplikací příliš malý. Proto se články podle požadovaného napětí a odebíraného proudu spojují a vytvářejí fotovoltaický panel (modul). Spojením více panelů vzniká rozměrné fotovoltaické pole, které se instaluje například na střechu nebo fasádu budovy, v tomto případě na střechu vlaku. Pro dosažení vysoké životnosti se panely ukládají do hermeticky uzavřených pouzder, která jsou opatřena vysoce průhledným tvrzeným sklem. Tato úprava chrání moduly před povětrnostními vlivy, udávaná životnost je 20 - 30 let. [10]



Obr. 3-12 Spojování fotovoltaických článků [10]

#### 3.2.1 Sériové řazení

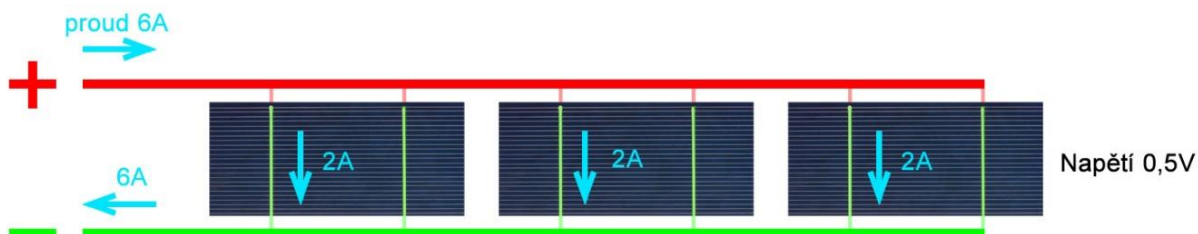
Sériovým zapojením solárních článků se zvýší výsledné napětí panelu. Proud panelu však bude stejný, jako proud jednoho článku. Např. jeden článek generuje napětí 0,5 V a proud 2 A. Při spojení čtyř článků do série vznikne panel, který bude generovat napětí 2 V a proud až 2 A. [11]



Obr. 3-13 Sériové spojení článků [11]

### 3.2.2 Paralelní řazení

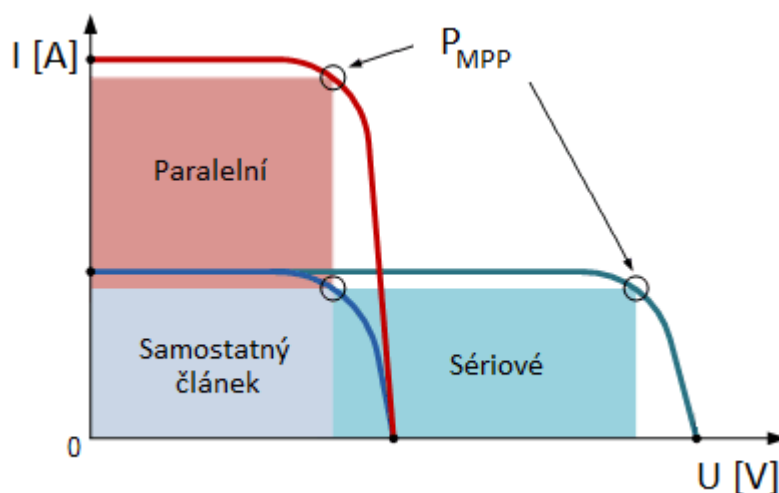
Paralelním zapojením solárních článků se zvyšuje výsledný proud panelu. Napětí panelu však bude stejné jako napětí jednoho článku. Pokud tedy spojíme např. tři články paralelně o stejných parametrech jako v příkladu výše, vznikne panel, který bude generovat napětí 0,5 V a proud 6 A. [11]



Obr. 3-14 Paralelní spojení článků [11]

### 3.2.3 Sério-paralelní řazení

Sério-paralelním zapojením je možné sestavit panel s požadovaným výstupním napětím a proudem. Počtem článků v jednotlivých sériích se určí napětí panelu, zatímco počtem paralelně propojených sérií se určí proud panelu. Podmínkou je mít všechny série stejné. Např. monokrystalické fotovoltaické panely jsou nejčastěji sestaveny z devadesáti šesti článků, kdy v sérii je osm článků po dvanácti paralelních sériích. Výkon stejného počtu paralelně a sériově zapojených článků je shodný. [11]



Obr. 3-15 VA charakteristika paralelně a sériově zapojených článků [12]

Za účelem ochrany jednotlivých článků před tepelným zničením a značnému poklesu výkonu jsou do solárních panelů integrovány bypassové (překlenovací) diody. Tyto diody jsou zapojeny antiparalelně a odpojují články v momentu jejich zastínění a umožňují tím eliminovat pokles výkonu solárního panelu a proudu, který by jinak procházel zastíněnými články.

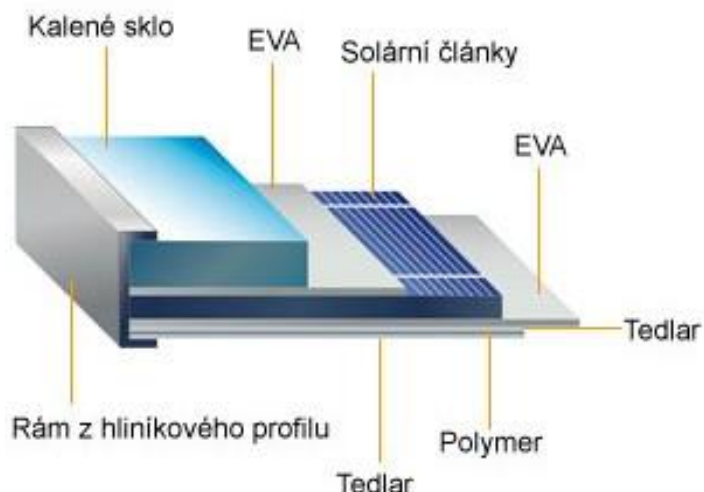
Dnes se nejčastěji bypassové diody zapojují tak, aby překlenovaly 36 až 40 článků. Pro dokonalou ochranu panelu a článků musí být tyto diody použity pro každý článek zvlášť. Důvodem, proč se bypassové diody nezapojují za každým článkem, jsou především ekonomické, ale i fakt, že způsobují určitý ztrátový proud, který se projeví snížením výsledného proudu dodávaného solárními články. Tyto diody jsou většinou integrovány do rámu panelu nebo spojovací skříňky.

Využitím polovodičové technologie mohou být bypassové diody také integrovány přímo do solárních článků. Solární panely s takto integrovanými diodami vykazují menší ztráty vlivem nesouměrného ozáření, ale jejich cena je poměrně vysoká. [14]

### 3.3 Struktura fotovoltaického panelu

Solární panel tvoří matice článků, které jsou spojeny letovanými spoji. Články chrání ze spodu pevná deska a z vrchu tvrzené leštěné sklo. Svým zpracováním jsou schopny odolat i nestandardním klimatickým podmínkám, jako je například krupobití.





Obr. 3-16 Struktura fotovoltaického panelu [13]

Tvrzené solární sklo chrání křemíkové články fotovoltaických panelů proti prachu, kroupám, dešti a jiným formám mechanického poškození. Solární sklo má vysokou propustnost a nízkou odrazivost slunečních paprsků.

EVA (ethylene-vinyl acetate) je zkratka pro speciální materiál vyvinutý společností Specialized Technology Resources, Inc. Tato vysoce světlo propustná vrstva odděluje tvrdé sklo a křehké křemíkové články tak, aby nedošlo k jejich poškození. EVA se nanáší ve vakuu, při teplotě 150 stupňů Celsia. Při této teplotě se vytvoří 70 % až 80 % EVA gel, který vytváří mechanickou podporu pro křemíkové články. Tato vrstva také snižuje odrazivost černo-šedého křemíku na přední ploše solárního článku, protože čím jsou články tmavší, tím méně světla odráží.

Zadní ochranné lamino má zejména ochrannou funkci. Tato odolná vrstva se skládá z několika vrstev zalaminovaných polyesterovým pojidlem. Vrchní vrstva je tvořena laminátem, který v sobě obsahuje EVA. Nižší vrstva je tvořena polyesterem (PET), který má fyzické a izolační schopnosti. Nejnižší vrstva tvořená z PVF má vynikající odolnost vůči povětrnostním vlivům a chrání celý panel proti mechanickému poškození zespodu.

Hliníkový rám tvoří lehkou a pevnou podporu pro fotovoltaické panely, která nepodléhá korozi. V rámu jsou připravené otvory na uchycení fotovoltaického panelu.

Propojovací box je umístěn na zadní části panelu. Box je tvořen z plastu odolávajícím povětrnostním vlivům. [13]

## 3.4 Technologie solárních panelů

### 3.4.1 Monokrystalické solární panely

Základem těchto panelů je monokrystalický křemík, ten se používá snad ve všech elektronických zařízeních. U FV panelů je důležitá jeho vlastnost absorbovat sluneční energii. Křemičitý písek, který je základní surovinou těchto panelů, se nejprve roztaví a promíchává, dokud zcela nezhomogenizuje, tedy jednotlivé krystaly se vzájemně stejně uspořádají. Finální solární články jsou nejčastěji vyráběny metodou Czochralski, kdy je křemík tvarován do ingotů až 2 metry na délku a váží několik set kilogramů.



Obr. 3-17 Křemíkový ingot [16]

Tyto válce jsou pak nakrájené na tenké plátky z několika stovek mikrometrů pro další zpracování. Protože ingot vznikl jako jeden velký krystal křemíku, jeho struktura je jednodušší a velice čistá. Čistota takto vyrobených článků je vyšší než 99 %. To určuje další vlastnosti monokrystalického článku. Jeho výhodou je poměrně vysoká účinnost, tedy větší výtěžnost výkonu ze stejné plochy. Pokles jeho výkonu se stářím panelu je poměrně malý a probarvení jeho buněk je homogenní.

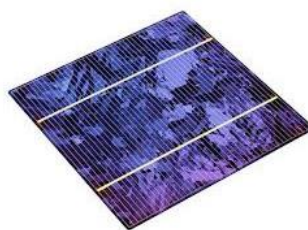


Obr. 3-18 Monokrystalický křemíkový článek [15]

Monokrystalické solární panely mají většinou tmavý odstín do hněda až černa. Je viditelná síť kovových vodičů, které tvoří horní kontakt. Solární elektrárna z těchto panelů pomaleji "startuje", ale poté lépe dodává energii. [16]

### 3.4.2 Polykrystalické solární panely

Polykrystalický křemík je vyroben chemickým čištěním tzv. Siemens procesem. Z křemíku je nejprve vyrobena těkavá sloučenina např. chlorid křemičitý, tento plyn se poté vede přes vrstvu čistého křemíku za vysokých teplot. Přitom dochází k jejich rozkladu a vzniklý křemík se ukládá v krystalické podobě na původní křemíkový substrát. Polykrystalický ingot se vyrobí slisováním křemíkových substrátů do jednoho celku. Je technologicky jednodušší nechat vykrytalizovat množství menších křemíkových krystalů, než jednoho kompaktního. Čistota křemíku je opět velice vysoká, přes 99 %, avšak o něco menší než u monokrystalického křemíku.



Obr. 3-19 Polykrystalický křemíkový článěk [15]

Vzhledem k tomu, že technologie výroby je jednodušší, je cena těchto panelů o něco málo nižší. Jejich další výhodou je o něco lepší výroba energie z rozptýleného světla (nepříznivé světelné podmínky) než u monokrystalických. Polykrystalické solární panely mají většinou modrý odstín, plocha článků je nerovnoměrná, rohy ostré. Solární elektrárna z těchto panelů má rovnoměrnější výkon. [17]

### 3.4.3 Tenkovrstvé solární panely

Tenkovrstvé solární články jsou druhá generace solárních článků, která je vyrobena nanosením jedné nebo více tenkých vrstev nebo tenkého filmu (TF) fotovoltaického materiálu na substrát, jako je sklo, plast nebo kov. Tenkovrstvé solární články jsou běžně používány v několika technologiích, včetně teluridu kadmia (CdTe), mědi, india, galia a selenidu (CIGS) a amorfní tenkovrstvého křemíku (a-Si, TF-Si). Tloušťka filmu se pohybuje od několika nanometrů až do desítek mikrometrů, jsou tedy mnohem tenčí než první generace krystalických křemíkových solárních článků (c-Si), jejich články mají tloušťku nad dvě stě mikrometrů. Díky své malé tloušťce jsou články flexibilní, mají nižší hmotnost a menší odpor nebo tření.

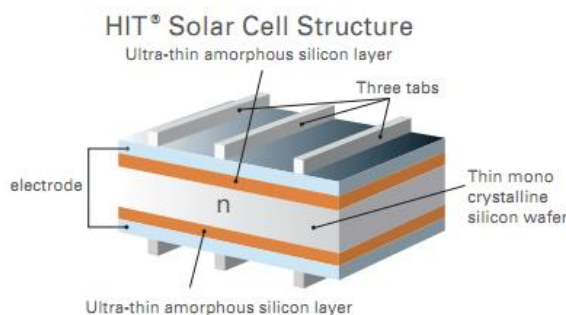
Tenkovrstvá technologie je levnější, ale méně efektivní než konvenční technologie c-Si. Nicméně se během posledních pár let výrazně zlepšila. Účinnost CdTe a CIGS je nyní srovnatelná s polykrystalickými články. Některé společnosti dokonce uvádějí, že je již překonaly, ale zatím pouze v laboratorních podmínkách. Amorfni křemík má proti krystalickému křemíku jednu velkou výhodu, netrpí totiž tolik na letní přehřívání. Jeho účinnost s rostoucí teplotou klesá podstatně pomaleji, než jak je tomu u krystalického křemíku. V letních měsících je z amorfni modulů lepší výtěžnost. Tenkovrstvé panely mají také vyšší citlivost na rozptýlené sluneční záření. [18]



Obr. 3-20 Tenkovrstvý solární panel [18]

#### 3.4.4 Hybridní HIT články

Solární článek HIT je tvořen monokrystalickou základní křemíkovou vrstvou, která je pokryta amorfni tenkým křemíkovým povlakem na což odhazuje zkratka těchto panelů HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin layer). V klasických krystalických článcích je PN přechod tvořen stejným polovodičovým materiálem, který je rozdílně dotován. HIT články mají PN přechod tvořen ze dvou strukturálně odlišných polovodičů. Přední vrstva amorfniho křemíku, která je polovodič typu P spolu s monokrystalickou destičkou, která je polovodič typu N, tvoří PN přechod.

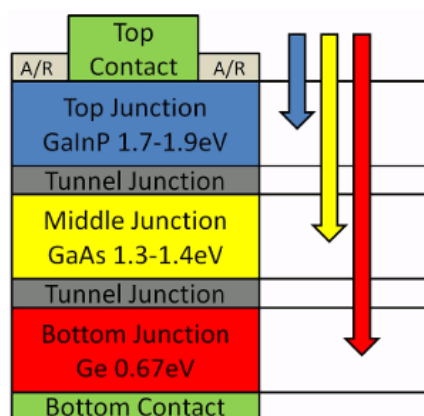


Obr. 3-21 Struktura HIT článku [19]

Hybridní solární články kombinují výhody organických a anorganických polovodičů. To přispívá ke snížení rekombinačních ztrát, tedy ztráty proudu a napětí v článku. Díky lepší průsvitnosti používaných materiálů se rovněž snížily absorpční ztráty článku. Další výhodou technologie HIT spočívá ve snížení odporu propojovacích elektrod. HIT panely svými účinnostmi již překonaly polykrystalické panely a pomalu začínají konkurovat monokrystalickým solárním panelům. [19]

### 3.4.5 Vícevrstvé solární panely

Vícevrstvé solární články jsou solární články obsahující více PN přechodů vyrobených z různých polovodičových materiálů. Každý materiál absorbuje různou část slunečního spektra. Čím více bude mít článek vrstev, tím širší pásmo vlnových délek světla absorbuje, čímž se razantně zvýší účinnost těchto článků. Nejvyšší možná teoretická účinnost těchto článků je 86,8 %. Aktuálně je světový rekord v dosažené účinnosti 46,6 %, ale pouze v laboratorních podmínkách. Rozměry těchto článků jsou o dost menší než klasické křemíkové články, aby se dosahovalo takových účinností, používají se odrazné plochy (zrcadla) nebo čočky, které koncentrují sluneční záření na solární článek a umožňují osvětlovat článek mnohem vyššími intenzitami světla (může se jednat až o 1 500 násobně koncentrované záření). Nicméně, takto vysoká účinnost se projevuje o dost zvýšenou cenou kvůli náročnosti výrobního procesu. Jejich vyšší cena omezuje jejich použití v kosmickém případně leteckém průmyslu, kde jejich vysoký poměr výkonu k hmotnosti je žádoucí. [21]



Obr. 3-22 Principiální struktura třívrstvého článku [20]

### 3.4.6 Ostatní technologie

Výše popsané technologie jsou nejvíce používané, protože dosahují největších účinností. Existuje spousta dalších technologií, které jsou spíše ve fázi vývoje nebo se nepoužívají kvůli velice nízkým účinnostem, ale časem se mohou dostat do popředí.

Mezi takové technologie patří organický solární článek nebo plastový solární článek, kde je využito organických polymerů nebo malých organických molekul pro světelnou absorpci. Jejich výroba je levná, lze měnit zakázané pásmo. Koeficient absorpce světla organických molekul je vysoký, takže velké množství světla může být absorbováno s malým množstvím materiálu. Jejich hlavní nevýhodou je nízká účinnost.

Další podobnou technologií jsou biohybridní solární články, ty jsou vyrobeny za použití kombinace organické hmoty a anorganické látky. Vědecký tým na Univerzitě Vanderbilt v Nashvillu dokázal izolovat protein umožňující fotosyntézu a následně ho nanést na anorganický křemík. Je využit princip fotosyntézy, který přeměňuje sluneční energii na chemickou energii a vytvoří tak proud, který projde buňkou. Tým využívá fotosyntézy pro větší účinnost přeměny sluneční energie. [22]

Kvůli neustálé poptávce po obnovitelných zdrojích energie je konkurence v solárních panelech opravdu velká a vznikají a vyvíjejí se stále nové technologie.

### 3.4.7 Porovnání vybraných typů fotovoltaických panelů

Vybrané fotovoltaické panely vyráběné odlišnými technologiemi uvádí následující tabulka. Jedná se o modely představující vrchol nabídky daných výrobců, které jsou určeny pro komerční sféru, cenu však mnohdy výrobci veřejně neudávají a je nutné kontaktovat je.

Tab. 3-1 Porovnání parametrů vybraných fotovoltaických panelů v roce 2011 na základě zkoušek při STC (tabulka zpracována na základě údajů společností Sunpower, Yingli Solar, Emcore, Sanyo a First Solar) [23]

Výrobce		Sunpower	Phono Solar	Emcore	Sanyo	First Solar
Označení		E19/320	PS330P-24/T	CTJ Concent.*	HIT-H250	FS-4117-2
Technologie		Monokrystalický Křemík	Polykrystalický křemík	Vícepřechodový článek	Hybridní články (HIT)	Tenkvrstvé články
$P_{mpp}$	W	320	235	0,0314	250	85
$P/m^2$	$W/m^2$	196,32	143,86	N	180	118,06
$\eta_{\text{článku}}$	%	N	N	31,4	20,8	N
$\eta_{\text{panelu}}$	%	19,6	14,39	N	18	11,81
$U_{mpp}$	V	54,7	29,5	2,33	34,9	48,5
$I_{mpp}$	A	5,86	7,97	0,0134	7,18	1,76
$U_{oc}$	V	64,8	37	2,605	43,1	61
$I_{sc}$	A	6,24	8,54	0,01385	7,74	1,98
$U_{max\_s}$	V	600	1000	N	1000	1000
$I_{mocr}$	A	15	N	N	15	N
NOCT	$^{\circ}C$	45	46	N	44	45

Teplotní koeficienty	$P_{mpp}$	%/°C	-0,38	-0,45	-0,06	-0,3	-0,25
	$U_{oc}$	mV/°C	-176,6	-109,15	-4	-108	-164,7
	$I_{sc}$	mA/°C	3,5	4,78	7,2	2,32	0,792
Mechanická data	$S_{panelu}$	m <sup>2</sup>	1,63	1,63	N	1,39	0,72
	$n_{článků}$	-	96	60	1	64	154
	Rozměry panelu	mm	N	N	N	N	N
	Rozměry článku	mm	N	156x156	10x10	N	N

N - výrobce údaj neuvádí

\* - platí pro použití koncentrátoru slunečního záření o 800 násobné koncentraci

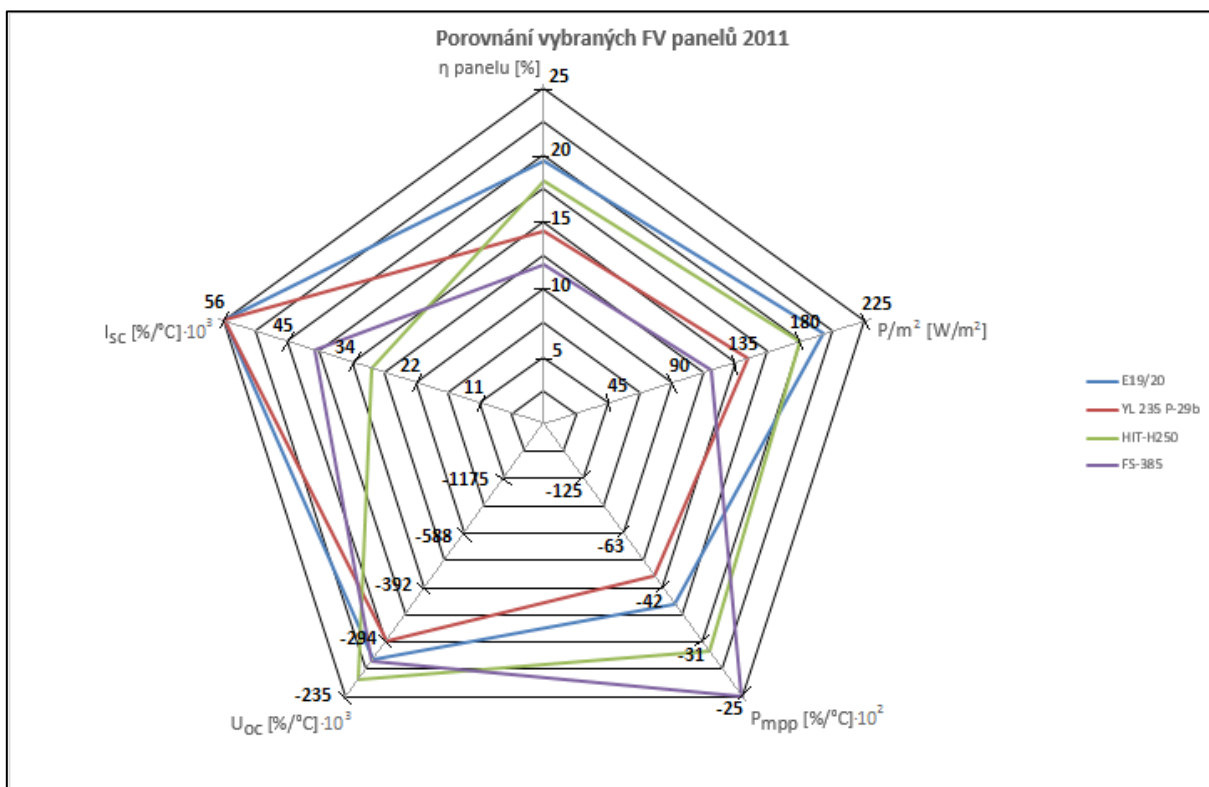
Tab. 3-2 Porovnání parametrů vybraných aktuálních fotovoltaických panelů na základě zkoušek při STC (tabulka zpracována na základě údajů společností Sunpower, Phono Solar, AZURSPACE, Panasonic a First Solar)

	Výrobce		Sunpower	Phono Solar	AZURSPACE	Panasonic	First Solar
	Označení		SPR-X22-360	PS330P-24/T	3C44 X250*	VBHN330SA16	FS-4117-2
	Technologie		Monokrystalický křemík	Polykrystalický křemík	Vícepřechodový článek	Hybridní články (HIT)	Tenkovrstvé články
		$P_{mpp}$	W	360	330	1,01	330
	$P/m^2$	W/m <sup>2</sup>	221,6	170,1	N	197,6	163,9
	$\eta_{článku}$	%	N	N	44	22,09	N
	$\eta_{panelu}$	%	22,2	17,01	N	19,7	16,3
	$U_{mpp}$	V	60,6	37,3	2,8	58	71,2
	$I_{mpp}$	A	5,94	8,87	0,36	5,7	1,65
	$U_{oc}$	V	69,5	46,8	3,05	69,7	88,2
	$I_{sc}$	A	6,48	9,10	0,37	6,07	1,79
	$U_{max_s}$	V	600	1000	N	600	1500
	$I_{mocr}$	A	15	15	N	15	4
	NOCT	°C	42	45	N	44	45
Teplotní koeficienty	$P_{mpp}$	%/°C	-0,3	-0,42	-0,106	-0,29	-0,34
	$U_{oc}$	mV/°C	-167,4	-142,27	-4,2	-174	-255,78
	$I_{sc}$	mA/°C	3,5	3,64	0,6	1,82	0,716
Mechanická data	$S_{panelu}$	m <sup>2</sup>	1,63	1,94	N	1,67	0,72
	$n_{článků}$	-	96	72	1	96	216
	Rozměry panelu	mm	1558x1046x46	1956x992x50	N	1590x1053x35	1200x600x6,8
	Rozměry článku	mm	N	156x156	3x3	N	N

N - výrobce údaj neuvádí

\* - platí pro použití koncentrátoru slunečního záření o 500 násobné koncentraci

Na základě těchto údajů jsem provedl grafické porovnání klíčových parametrů těchto panelů. V porovnání není uveden vícepřechodový článek, protože výrobce udává pouze parametry článku samotného a ne kompletního panelu. Tato data se mi nepodařilo sehnat, navíc by svými parametry byl těžko srovnatelný s ostatními.

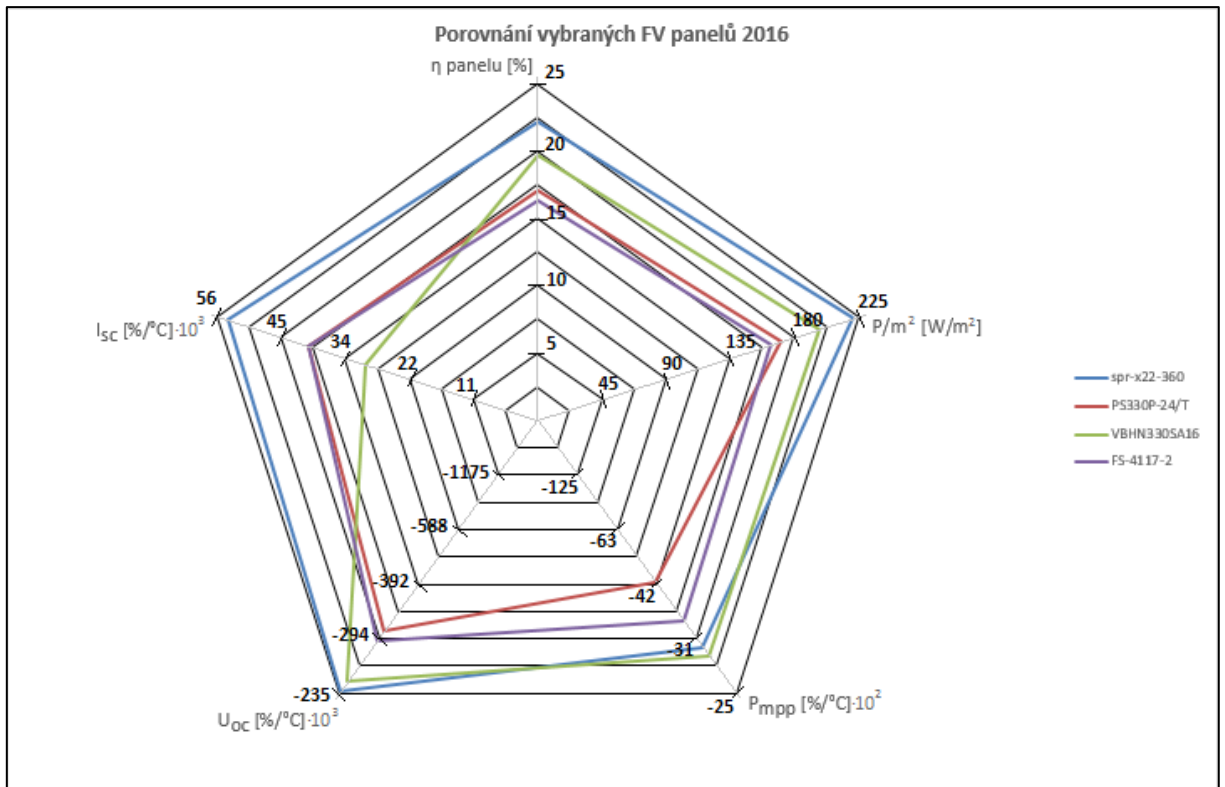


Obr. 3-23 Grafické porovnání parametrů vybraných FV panelů z roku 2011

Z grafu je patrná vysoká teplotní závislost parametrů fotovoltaických článků na bázi krystalického křemíku (monokrystalické a polykrystalické články) a naopak velmi dobré vlastnosti v tomto směru jsou zřejmé u tenkovrstvých článků. [23]

Porovnáním grafů je vidět že účinnosti panelů se nepatrně zvýšily, zvýšil se i jejich výkon. Teplotní závislost panelů zůstala poměrně stejná, jen u tenkovrstvých panelů se zhoršila, zase se ale zlepšila jejich účinnost.





Obr. 3-24 Grafické porovnání parametrů vybraných FV panelů roku 2016

Bylo by velice zajímavé porovnat parametry vícevrstvého solárního panelu s nějakými běžně dostupnými. Bohužel výrobci těchto panelů si veškeré parametry bedlivě střeží, jen pár výjimek udává strohé informace a to pouze o článku samotném nikoliv o panelu. Jediné co výrobci udávají, je účinnost článků a to jako reklamu, aby nalákali potenciální zákazníky. Nicméně ač pro tuto práci není rozhodujícím kritériem pro výběr panelu cena (v porovnání ceny vlaku) jsou tyto panely nerentabilní a jak již bylo řečeno, mají pouze úzké využití.

## 4 ENERGETICKÁ ROZVAHA ELEKTRICKÉ DVOUZDROJOVÉ TRAKČNÍ JEDNOTKY S PŘÍDAVNÝM FV ZDROJEM

Výroba elektrické energie pro elektrickou trakci je v České republice z velké části založena na neobnovitelných zdrojích. Jelikož je spotřeba energie pro trakci poměrně značná, je snaha o co největší výrobu energie z obnovitelných zdrojů, jako je např. umístění solárních panelů na střechu jednotky.

Energetická náročnost u železniční dopravy je dána trakční silou na obvodu hnacích kol, která je úměrná spotřebě energie.

Trakční práci při rovnoměrném pohybu po rovné přímé trati lze určit jako součin tažné síly na obvodu kol a délky dráhy, kterou vozidlo urazilo:

$$A_v = F_o \cdot l = p_o \cdot m \cdot g \cdot l \quad [29] \quad (4.1)$$

$A_v$  – trakční práce [kJ]

$F_o$  – tažná síla na obvodu kol [kN]

$l$  – délka dráhy, kterou vozidlo urazilo [km]

$p_o$  – měrný vozidlový odpor [N/kN]

$m$  – hmotnost vozidla [t]

$g$  – gravitační zrychlení [ $m \cdot s^{-2}$ ]

Obdobně lze určit i trakční výkon na základě znalosti rychlosti vozidla a tažné síly na obvodu kol.

$$P_v = (F_o \cdot v) / 3,6 \quad [29] \quad (4.2)$$

$P_v$  – trakční výkon [kW]

$F_o$  – tažná síla na obvodu kol [kN]

$v$  – rychlost vozidla [km/h]

Pro určení spotřeby energie, kterou bude vozidlo potřebovat k překonání traťových úseků, je nutné vyjít z obecně platných trakčních výpočtů.

## 4.1 Analýza jízdnicích odporů vlaku

V následující kapitole se budu zabývat problematikou odporových sil působících proti jízdě vozidla, které je nutné překonávat tažnou, potažmo brzdou silou.

Jízdnicí odpory rozlišujeme následovně:

- jízdnicí odpory vozidlové
- jízdnicí odpory traťové
- jízdnicí odpory dynamické

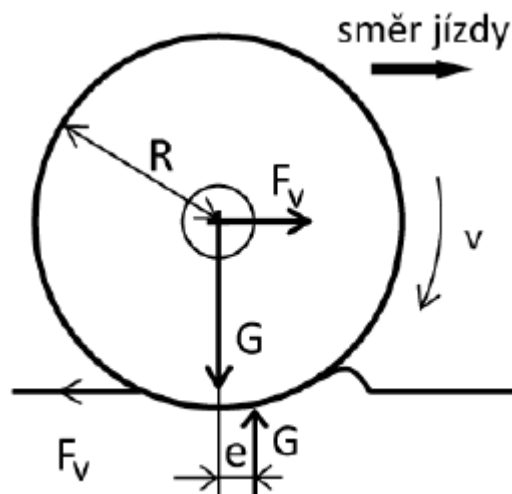
Jednotkou odporové síly byl pro přehlednost zvolen N/kN. Takový poměr vyjadřuje, jaká odporová síla v newtonech působí na jeden kN tíhy vozidla. [27]

### 4.1.1 Vozidlové odpory

Vozidlovými odpory rozumíme síly, působící proti jízdě vozidla a zároveň produkované jím samotným

#### **Odpor valivého tření – mezi vozidlem a kolejnicemi**

Vzhledem k tomu, že jsou kola i kolejnice vyrobeny z pružného materiálu (v případě kola je materiál tvrdší, než u kolejnice), je vlivem tíhy nevyhnutelná jejich částečná deformace. Pro zjednodušení však v modelu uvažujeme pružnost pouze u kolejnice, zatímco kolo simulujeme dokonale tuhé. Kolejnice se tedy působením síly začíná deformovat a kolo pak před sebou při jízdě tlačí „vlnu“ vznikající na kolejnici (obr. 4-1).



Obr. 4-1 Vznik valivého odporu [27]

Odpor valení je ovlivněn materiálem obručí kol, materiálem kolejnic, tíhovou silou působící na kolo, technickým stavem trati. Oproti tomu je absolutně nezávislý na rychlosti vozidla. Velikost odporu valení  $F_v$  můžeme definovat následovně:

$$F_v = G \frac{e}{R} \quad [\text{N}] \quad [27] \quad (4.3)$$

$G$  – tíhová síla vozidla [N]

$e$  – excentricita [m]

$R$  – poloměr kola vozidla [m]

Měrný odpor valení je definován jako podíl síly  $F_v$  a tíhy vozidla:

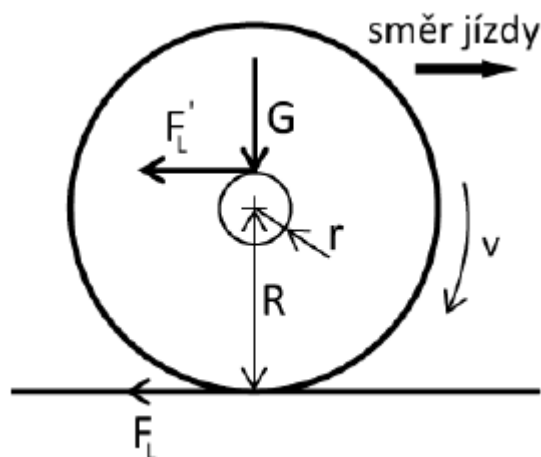
$$p_v = \frac{F_v}{m \cdot g} = \frac{e}{R} \quad [\text{N}/\text{kN}] \quad [27] \quad (4.4)$$

$m$  – hmotnost vozidla [t]

$g$  – gravitační zrychlení [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ]

#### Odpor čepového tření – v nápravových ložiskách

Odpor z tření v ložiskách závisí na konstrukci a materiálu ložiska, kvalitě maziva a druhu oleje, teplotě ložiska, otáčivé rychlosti ložiska, na zatížení ložiska, jeho opotřebení a některých dalších faktorech. Obr. 4-2 znázorňuje schéma působení síly na jedno kolo vozidla.



Obr. 4-2 Podstata vzniku odporu z tření v ložiskách [27]

Z rovnováhy momentů ke středu kola lze definovat velikost síly potřebné k překonání odporu ložiska kola jako:

$$F_L = F'_L \frac{r}{R} = \frac{r}{R} f_L \cdot G \quad [\text{N}] \quad [27] \quad (4.5)$$

$f_L$  – součinitel tření v čepu

$r$  – poloměr čepu

Měrný odpor z tření v ložiskách je vyjádřen ve vzorci:

$$p_L = \frac{F_L}{m \cdot g} = \frac{r}{R} \cdot f_L \quad [\text{N/kN}] \quad [27] \quad (4.6)$$

Valivá ložiska vykazují, zejména při rozjezdu, výrazně nižší odpor z tření než ložiska kluzná. Tento rozdíl může být až sedminásobný a valivá ložiska jsou navíc nejen energeticky úspornější, ale zároveň i relativně nenáročná na údržbu. Pro tyto důvody jsou v současnosti ložisky nejvyužívanějšími.

### **Odpor vzduchu – mezi vozidlem a vzduchem**

Působením vzduchu na vozidlo vzniká tzv. aerodynamický odpor. Tento odpor vzrůstá spolu s rychlostí, konkrétně s druhou mocninou rychlosti vozidla, je však výrazný i při nižších rychlostech (60 - 80 km/h), a to především, vzhledem k nepřímé úměrnosti k hmotnosti vozidla, u krátkých lehkých vozidel. Aerodynamický odpor je úměrný čelní ploše vozidla a dynamickému tlaku vzduchu:

$$F_{ae} = p_{dyn} \cdot C_x \cdot S = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot C_x \cdot S \quad [\text{N}] \quad [27] \quad (4.7)$$

$p_{dyn}$  – dynamický tlak vzduchu [N/ m<sup>2</sup>]

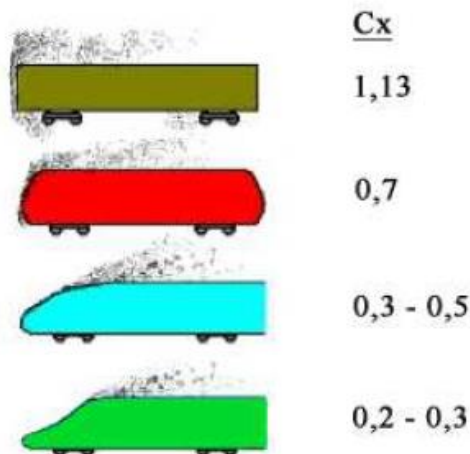
$C_x$  – součinitel tvaru vozidla [-]

$S$  – plocha čela vozidla [m<sup>2</sup>]

$\rho$  – měrná hustota vzduchu (1,2 kg/m<sup>3</sup>)

$v$  – okamžitá rychlost vozidla [m/s]

Z výše naznačeného vztahu je patrné, že ke snížení aerodynamického odporu je nutné navrhování vozidel se záměrem minimalizace hodnoty součinitele  $C_x$ , čímž dojde zároveň i ke snížení odporu, jež kladou vozidla vůči vzduchu, jak ilustruje obr. 4-3. Aerodynamiku ovlivňuje nejen vhodný tvar předního a zadního čela vlakové soupravy, ale i přechody mezi vozy, hladký povrch bočnic a střechy a zakrytí mechanických částí na spodní části vozu.



Obr. 4-3 Příklady vlivu tvaru skříně na hodnotu součinitele tvaru čela [27]

### Vozidlový odpor jako celek

Vzhledem k náročnosti a nutnosti praktického ověření určení vozidlového odporu jako algebraického součtu odporu valení, odporu tření v ložiskách a aerodynamického odporu se pro takovéto určení využívají empirické vztahy zjištěné měření. Nejvýhodnějším z matematických modelů vozidlového odporu se v praxi ukázal polynom druhého stupně. Obecným tvarem tohoto polynomu je:

$$F_o = A + Bv + Cv^2 \quad [\text{N}] \quad [27] \quad (4.8)$$

A- absolutní člen polynomu, tvořený odporem z valení a odporem z tření v ložiskách. Jeho velikost se pohybuje okolo 1 ‰ pro širokoplatní kolejnice, pro žlábkové kolejnice je hodnota cca. 2 ‰

B- lineární člen polynomu. Jedná se o tzv. přídavný odpor vznikající jízdou vozidla po nerovné trati, čímž dochází, díky vypružení vozu, ke kmitání vozidla a zvýšené spotřebě energie. Lineární složka polynomu je velikostně poměrně malá a je možné ji zanedbat

C- kvadratický člen polynomu. Představuje jej aerodynamický odpor rostoucí s kvadrátem okamžité rychlosti vozidla

v- okamžitá rychlost vozidla [km/h]

Jízdní odpory konkrétních vozidel jsou dohledatelné v dokumentaci k jednotlivým typům vozidel. [27]

#### 4.1.2 Traťové odpory

Mezi traťové odpory řadíme síly působící proti pohybu vlaku při stoupání, v traťových obloucích a tunelech.

##### **Odpor ze sklonu trati**

Tíha vozidla na sklonu je rozložitelná na dvě složky. Složku kolmou na rovinu koleje není nutné uvažovat, jelikož vyvolá stejně velkou složku opačného směru a tyto dvě složky se navzájem vyruší. Další složka  $R_s$ , která je rovnoběžná s rovinou koleje, působí v podélné ose vlaku a při jeho stoupání funguje jako odpor. V opačném případě se jedná o urychlující sílu, kterou je možné vyjádřit následujícím vztahem:

$$R_s = 1000 \cdot G \cdot \sin \alpha \quad [27] \quad (4.9)$$

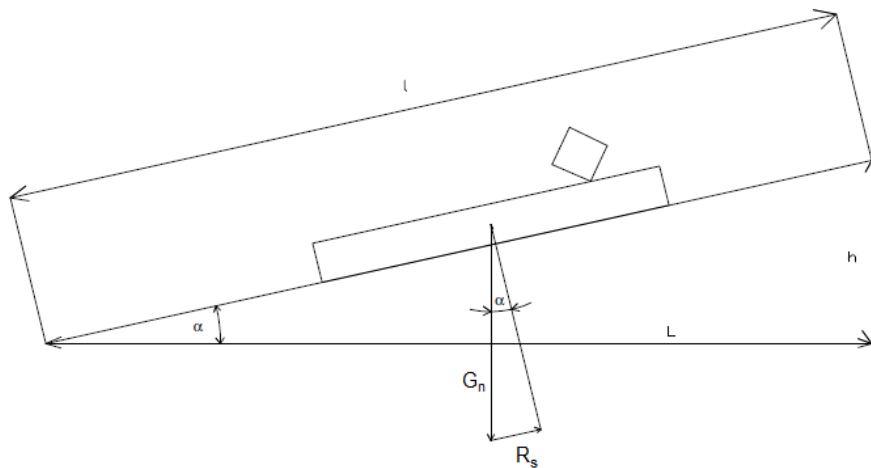
Jelikož je nejvhodnější odpory vyjadřovat v poměrných jednotkách, můžeme rovnici vydělit tíhou soupravy:

$$r_s = \frac{R_s}{G} \cdot 1000 \cdot \sin \alpha \quad [27] \quad (4.10)$$

Je-li sklon trati vyjádřen v promilích, tedy vztahem:

$$s = \frac{h}{l} \cdot 1000 = 1000 \cdot \sin \alpha \quad [27] \quad (4.11)$$

můžeme říci, že měrný odpor ze stoupání [N/kN] je číselně roven udávanému sklonu v promilích. V případě klesání je sklon zohledněn se znaménkem mínus.



Obr. 4-4 Měrný odpor ze stoupání [27]

Jednoznačně největší odporovou silou, kterou je nutné při jízdě překonávat, je odpor ze stoupání. Výjimkou může být jen odpor vzduchu při extrémně vysokých rychlostech.

### **Odpor z průjezdu obloukem**

Odporová síla vzniklá při průjezdu kolejového vozidla obloukem je též nezanedbatelná. Závisí na mnoha faktorech, jako jsou poloměr oblouku, rozvor vozidla a podvozku, rozchodu koleje a velikost převýšení.

Pro jednoduchost jsou používány tzv. Röcklovy vzorce. Tyto vzorce respektují především poloměr projížděného oblouku a v obecném tvaru:

$$r_0 = \frac{a}{R-b} \quad [27] \quad (4.12)$$

jsou měněny dle rozchodu uvažované trati. Standardní vzorec používaný na české železnici zní:

$$r_0 = \frac{650}{R-55} \left[ \frac{N}{kN} \right] \quad [27] \quad (4.13)$$

R – poloměr oblouku v metrech

### **Odpor z průjezdu tunelem**

Při průjezdu tunelem je čelem vlaku vytlačován sloupec vzduchu, čímž se zvyšuje odpor jízdy vlaku. Redukce sklonu o 2 ‰ oproti okolním sklonovým poměrům umožňuje projíždění tunelů konstantní tažnou silou. Díky této úpravě odpadá nutnost odpor z průjezdu tunelem v trakčních výpočtech zohledňovat. Výjimkou jsou pouze zvláštní případy, jako může být například metro. [27]

#### **4.1.3 Dynamické odpory**

V momentě, kdy tažné síla pokryje odpor z jízdy vozidla, ze stoupání i průjezdu obloukem, nastává pohyb konstantní rychlostí. Pokud vznikne požadavek na změnu rychlosti, je nutné tažnou sílu zvětšit. [27]

Takový rozdíl sil závisí na jedné straně na požadovaném zrychlení, a zároveň i na hmotnosti soupravy. V případě respektování poměrných jednotek jej můžeme zapsat rovnicí:

$$r_d = 102 \cdot \xi \cdot a \left[ \frac{N}{kN} \right] \quad [27] \quad (4.14)$$

a – požadované zrychlení [m/s<sup>2</sup>]



$\xi$  – součinitel rotujících hmot

Elektrické lokomotivy	1,2 – 1,3
Motorové vozy	1,2 – 1,25
Osobní vůz	1,05 – 1,06
Nákladní vůz	1,04 – 1,12

Tab. 4-1 Orientační hodnoty součinitele rotujících hmot [27]

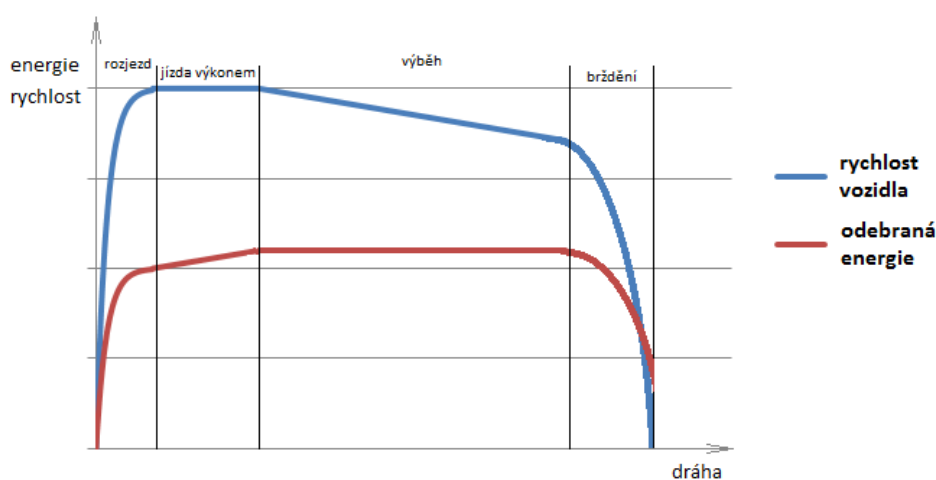
## 4.2 Celková spotřeba jednotky na konkrétních tratích

V této kapitole bude nastíněna trakční spotřeba jednotky na třech konkrétních tratích. Data jsou brána ze simulace, jsou tedy jen orientační. V simulaci jsou uvažovány veškeré traťové odpory. Zdroj dat: [28]

Vozidlové odpory jednotky lze charakterizovat touto rovnicí [28]:

$$0,752 + 0,0022v + 0,0003v^2 \quad (4.15)$$

Nejprve je nutné zmínit, že u vlaku rozlišujeme čtyři základní jízdní situace. Jsou to rozjezd (zrychlení), kdy je spotřebováno nejvíc energie pro vyvinutí tažné síly, tento pohyb je energeticky nejnáročnější, dále jízda výkonem (konstantní rychlostí), při té je odběr energie konstantní, poté jízda výběhem (u aut tzv. „neutrál“), kdy není spotřebovávána energie (mimo vedlejší/pomocné spotřeby, které nesouvisí s trakčním odběrem) a na vlak nepůsobí ani brzdná ani tažná síla, je pouze brzděn jízdními a traťovými odpory, poslední je brždění, kdy dochází k rekuperaci a vyrobená energie se ideálně akumuluje v trakční baterii.



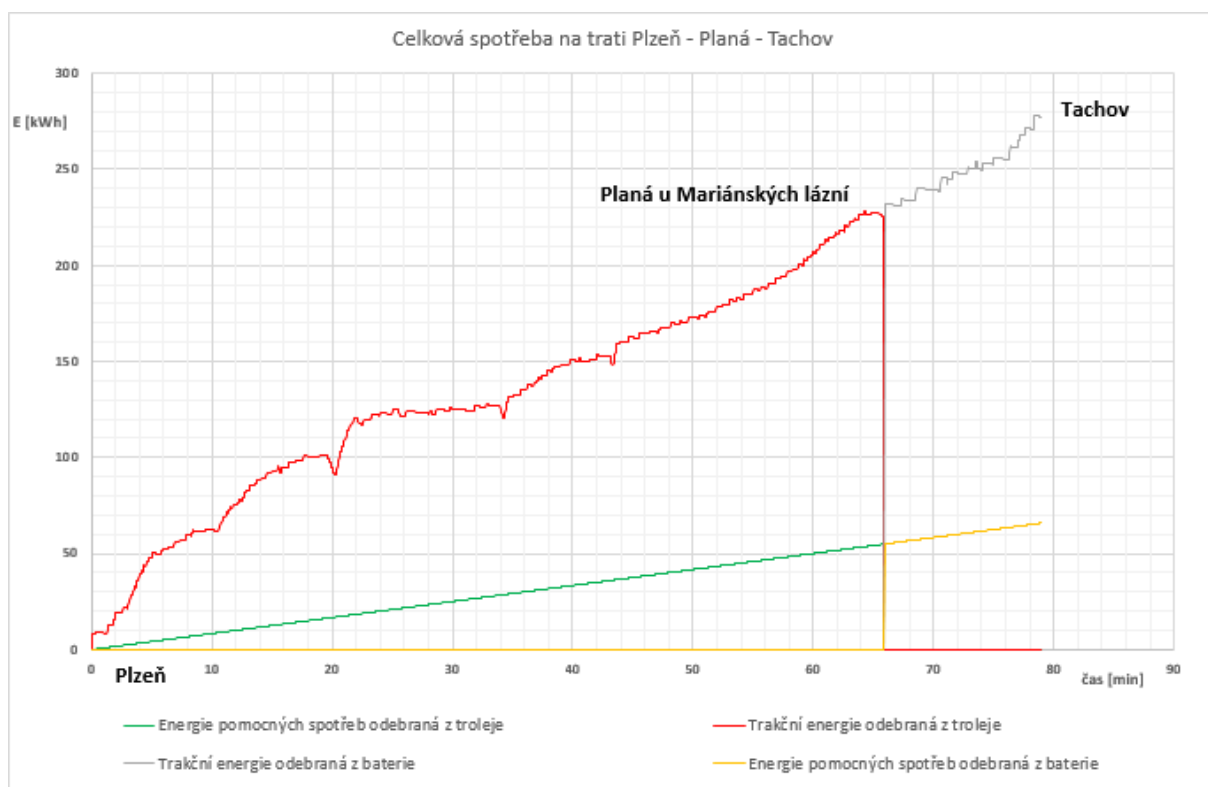
Obr. 4-5 Grafické znázornění jízdních režimů

## Trat' Plzeň – Planá u Mariánských lázní – Tachov

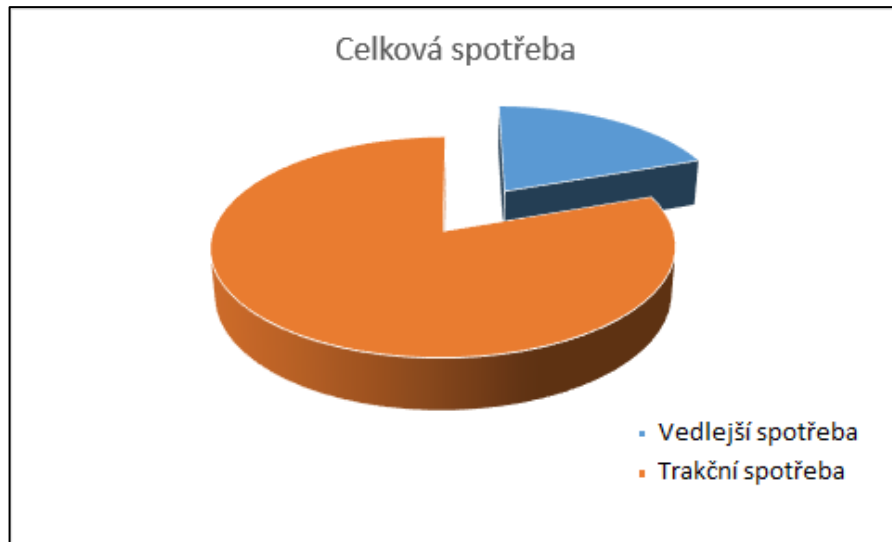
Trat' je elektrifikována pouze z Plzně do Plané u Mariánských lázní, zbytek trati do Tachova elektrifikován není a jednotka bude muset použít energii z akumulátoru. V současné době musí cestující v Plané u Mariánských lázní přestupovat na jiný vlak a cesta se prodlužuje. Použití jednotky popsané v první kapitole by zkrátilo dobu cesty a zvýšilo tak komfort pro cestující.

Na obr. 4-6 je znázorněna vedlejší a trakční spotřeba z troleje a akumulátoru. Prudké poklesy jsou způsobeny brzděním kvůli stavění ve stanicích. Z grafu je vidět, že od stanice Planá akumulátor plní funkci zdroje a pokrývá všechny spotřeby.

Na obr. 4-7 je nastíněno porovnání trakční a vedlejší spotřeby. Trakční spotřeba činí 225,2 kWh z troleje a 52,6 kWh z akumulátoru. Vedlejší spotřeba, která je pro jednoduchost charakterizována středním konstantním výkonem 50 kW odpovídá přímkové charakteristice a odběru energie o hodnotě 55 kWh z troleje a 11 kWh z akumulátoru. Zdroj dat: [28]



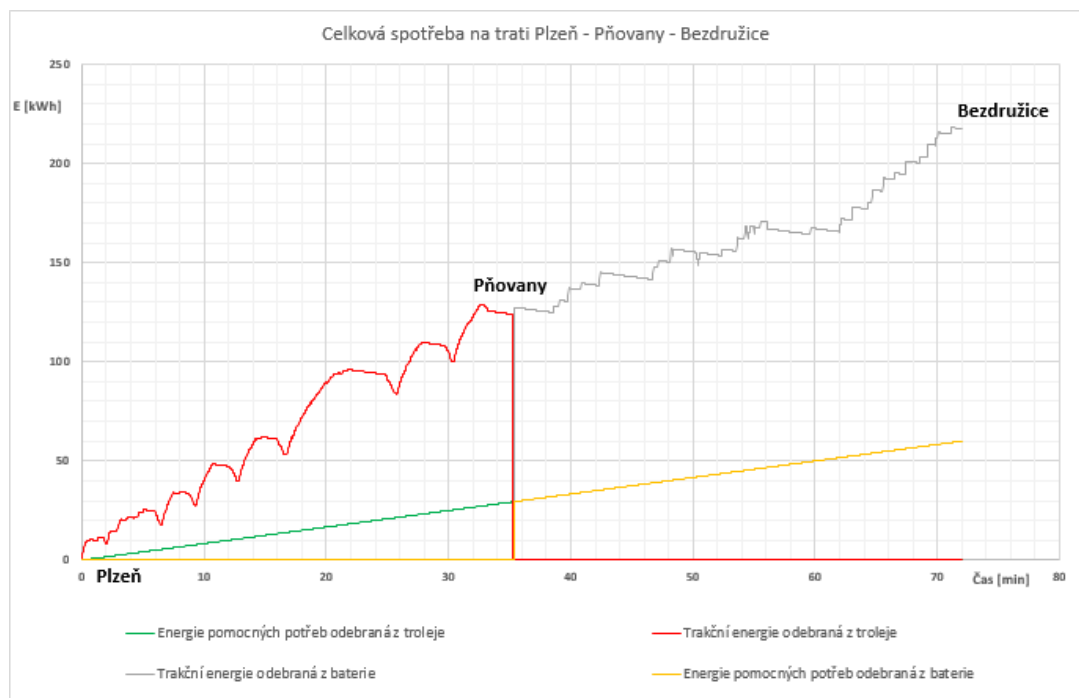
Obr. 4-6 Trakční spotřeba na trati Plzeň - Tachov



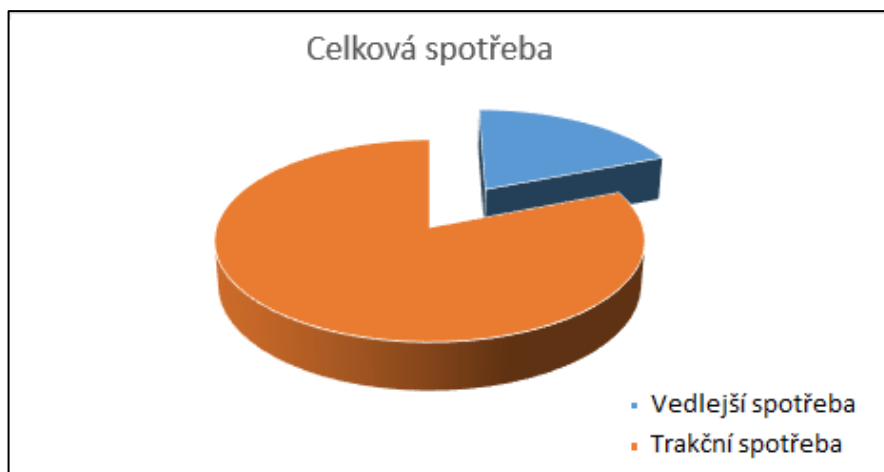
Obr. 4-7 Graf porovnání spotřeb na trati Plzeň - Tachov

### Trat' Plzeň – Pňovany – Bezručice

I tato trať není celá elektrifikována, pouze z Plzně do Pňovan, zbytek tratě musí být jednotka opět napájena z akumulátoru. Na obr. 4-8 je opět znázorněna vedlejší a trakční spotřeba s patrnými poklesy kvůli stavění ve stanicích. Obr. 4-9 je téměř shodný jako obr. 4-7 a to proto, že vedlejší spotřeby jsou opět charakterizovány středním konstantním výkonem 50 kW. Trakční spotřeba zde činí 124,3 kWh z troleje a 93,9 kWh z akumulátoru. Vedlejší spotřeba činí 29 kWh z troleje a 30,6 kWh z akumulátoru. Zdroj dat: [28]



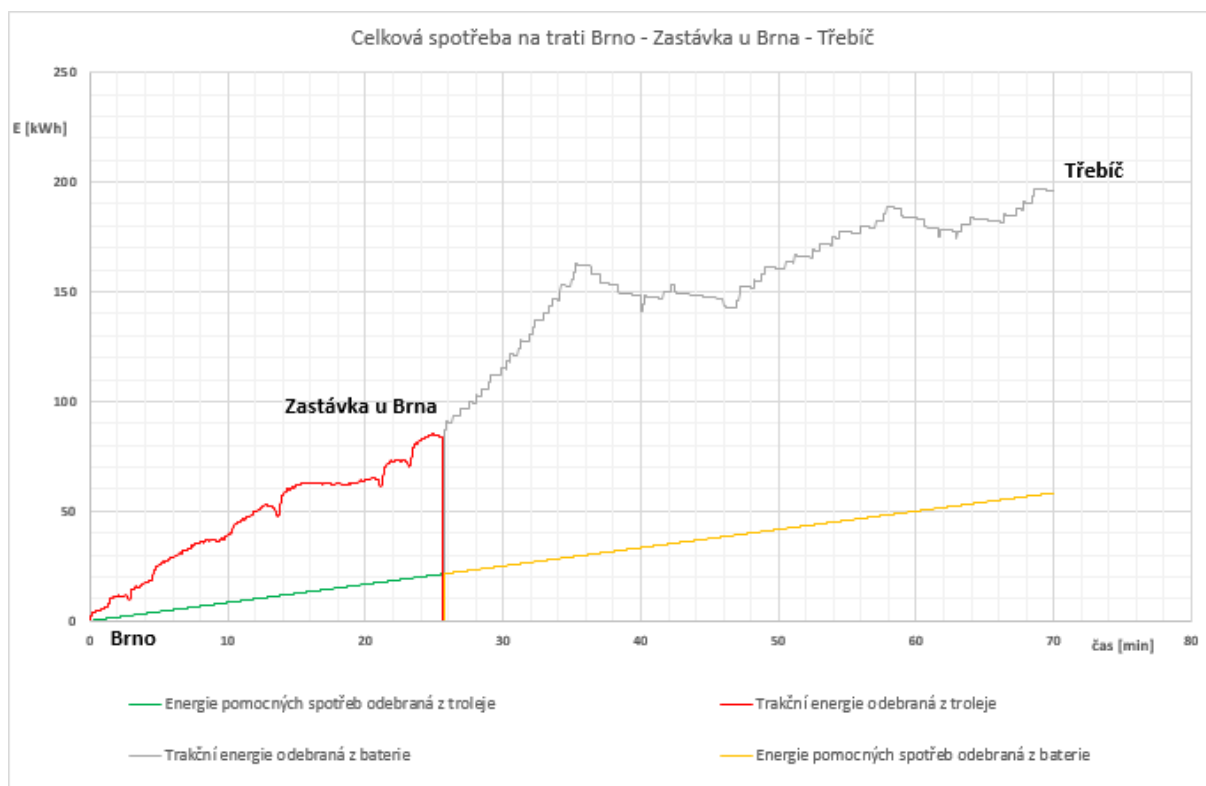
Obr. 4-8 Trakční spotřeba na trati Plzeň - Bezručice



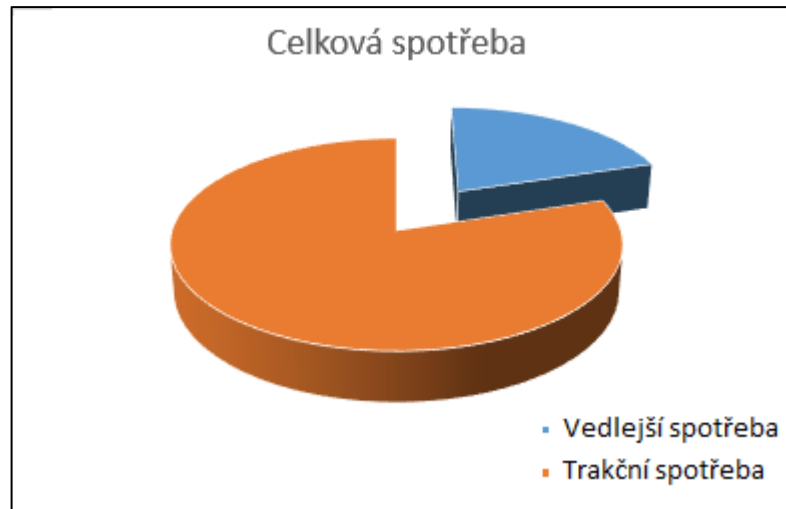
Obr. 4-9 Graf porovnání spotřeb na trati Plzeň - Bezručice

### Trat' Brno – Zastávka u Brna – Třebíč

Na této trati je uvažována budoucí elektrizovaná trať z Brna do Zastávky u Brna. Trakční spotřeba na této trati činí 84 kWh z troleje a 113,1 kWh z akumulátoru. Vedlejší spotřeby činí 21,2 kWh z troleje a 37 kWh z akumulátoru. Zdroj dat: [28]



Obr. 4-10 Trakční spotřeba na trati Brno - Třebíč



Obr. 4-11 Graf porovnání spotřeb na trati Brno – Třebíč

Na výše uvedených tratích je nastíněna trakční a vedlejší spotřeba a následně jsou graficky porovnány. Vidíme, že vedlejší spotřeba je přibližně čtvrtinová oproti trakční spotřebě. V následující kapitole přibližně určím, kolik energie vyrobí FV panely a porovnám ji s výše uvedenými spotřebami.

## 5 NÁVRH OBVODOVÉHO ŘEŠENÍ PŘÍDAVNÉHO FV ZDROJE

Jako nejvhodnější panel se jeví monokrystalický panel od firmy Sunpower typu SPR-X22-360. V porovnání s ostatními dosahuje vysokých výkonů s poměrně vysokou účinností a s měnící se teplotou se jeho parametry mění relativně málo. Cena těchto panelů bude o něco větší než ostatní technologie (mimo vícevrstevných panelů, ty jsou mnohonásobně dražší) nicméně jak již bylo dříve řečeno, cena není hlavní prioritou výběru panelu.

Dále je nutné brát v potaz to, že hodně trátí v ČR vede lesy, díky čemuž budou panely zastíněny a nebudou moci vyrábět elektrickou energii. Proto by bylo zajímavé použít panely, které jsou schopny absorbovat i difúzní záření, to umí nejlépe panely amorfní (tenkovrstvé). Jako aktuálně nejlepší na trhu jsem určil panel od firmy First Solar typ FS 4117-2.

Univerzita aktuálně vlastní hybridní (HIT) a amorfní panely. Na těchto panelech bude provedeno závěrečné měření, proto s nimi provedu i následující výpočty. Panely, které vlastní škola, patří svými parametry také mezi špičku na trhu a jsou v podstatě srovnatelné s výše zmíněnými.

SF165-S		
	$P_{max}$ [W]	165
	$\eta$ [%]	13,4
	$U_{oc}$ [V]	110
	$I_{sc}$ [A]	2,2
	$U_{mpp}$ [V]	85,5
	$I_{mpp}$ [A]	1,93
	NOCT [°C]	47
Teplotní koeficienty	$P_{mpp}$ [%/°C]	-0,31
	$U_{oc}$ [%/°C]	-0,3
	$I_{sc}$ [%/°C]	0,01
Mechanická data	Rozměry Panelu [mm]	1257 x 977 x 35
	Maximální systémové napětí [V]	1000
Cena	120,44 €	3199 Kč

Tab. 5-1 Parametry amorfních FV panelů vlastní univerzitou

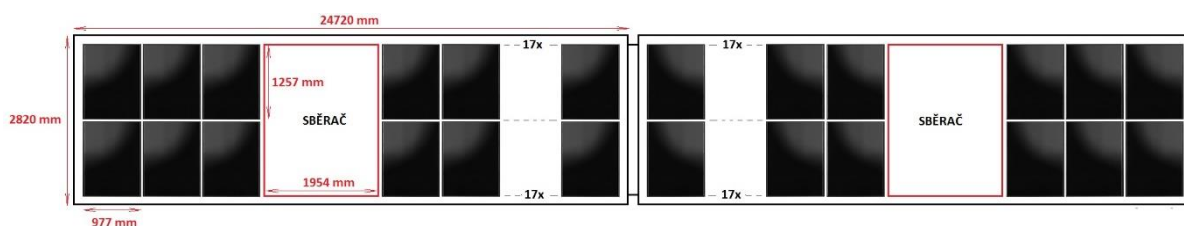
VBHN240SJ25		
	$P_{\max}$ [W]	240
	$\eta$ [%]	19
	$U_{oc}$ [V]	52,4
	$I_{sc}$ [A]	5,85
	$U_{mpp}$ [V]	43,6
	$I_{mpp}$ [A]	5,51
	NOCT [°C]	44
Teplotní koeficienty	$P_{mpp}$ [%/°C]	-0,29
	$U_{oc}$ [V/°C]	-0,131
	$I_{sc}$ [mA/°C]	1,76
Mechanická data	Rozměry Panelu [mm]	1580 x 798 x 35
	Maximální systémové napětí [V]	1000
Cena	251,70 €	6669 Kč

Tab. 5-2 Parametry hybridních FV panelů vlastníci univerzity

Amorfní FV panely jsou od firmy SOLAR FRONTIER typu SF165-S. Hybridní panely jsou od firmy Panasonic typu VBHN240SJ25.

### 5.1 Zapojení amorfních fotovoltaických panelů

Rozměry jednoho vozu činí 24720 mm na délku a 2820 mm na šířku. Na tuto plochu by se celkem vešlo 50 amorfních panelů po dvou sloupcích. Je nutné vynechat nějaké místo pro sběrač, pro tyto potřeby stačí vynechat dvě řady panelů.



Obr. 5.1 Přibližné znázornění rozmístění amorfních panelů na střeše jednotky

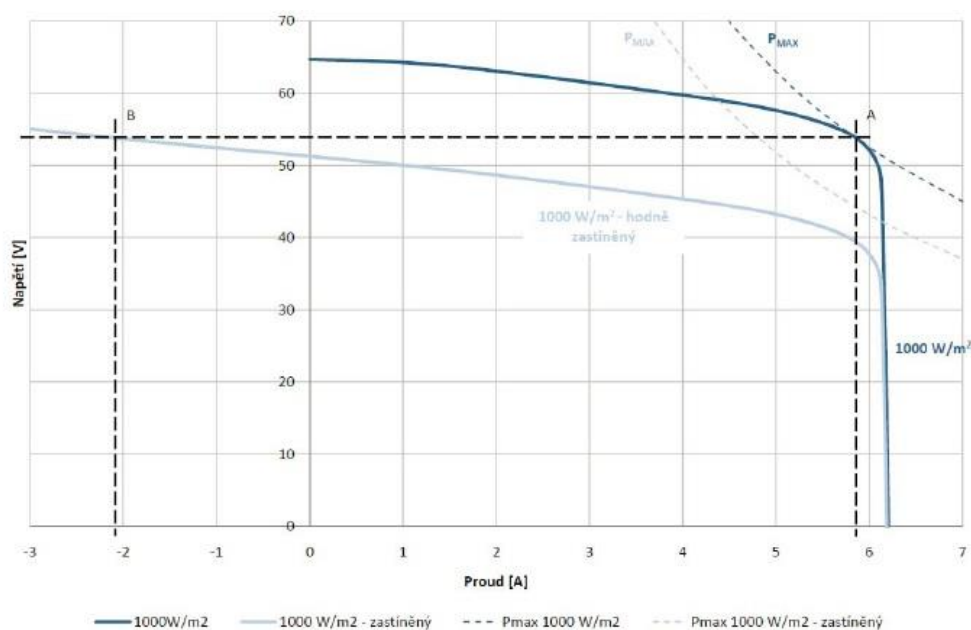
Celkem je tedy na jednom vozu 46 amorfních panelů. Je nutné použít identické FV panely, jinak systém nemusí pracovat správně. Rozhodl jsem se pro sérioparalelní zapojení, při počtu 46 panelů se jeví pouze kombinace 23 paralelních větví po dvou v sérii. Maximální výkon toho zapojení při dodržení podmínek NOCT je dán:

$$P_{max} = n_{sériově} \cdot U_{mpp} \cdot n_{paralelně} \cdot I_{mpp} \quad (5.1)$$

$$P_{max} = 2 \cdot 85,5 \cdot 23 \cdot 1,93 = 7,59 \text{ kW} \quad (5.2)$$

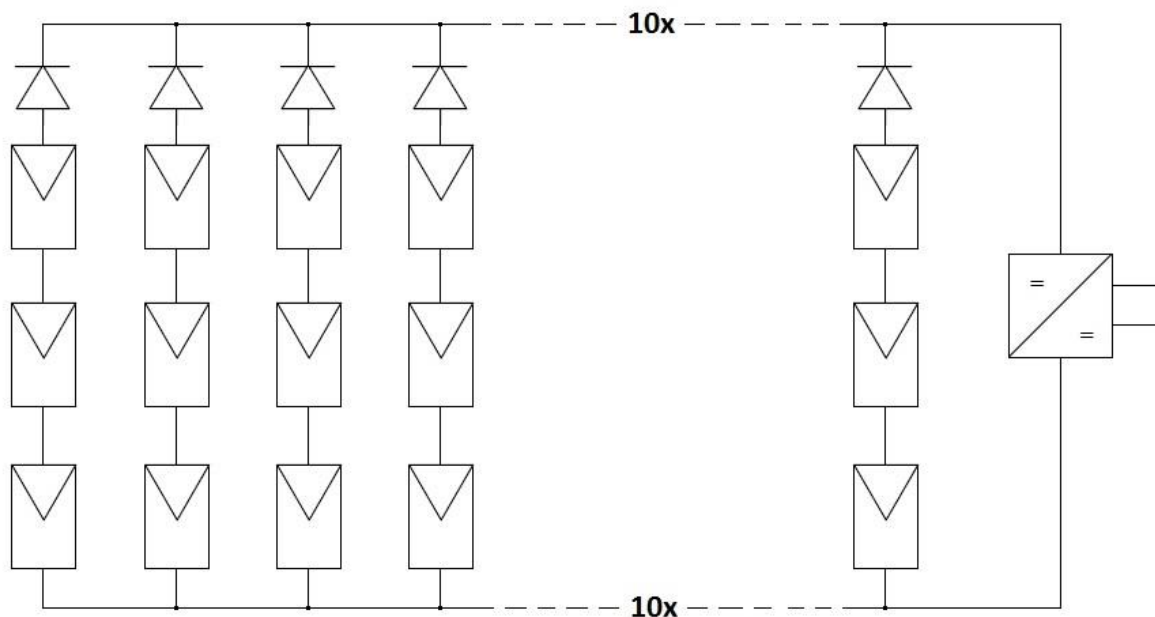
Výše uvedený výkon je z panelů jednoho vozu, celkový možný maximální výkon dvouvozové jednotky by tedy byl dvojnásobný a to 15,18 kW. Toto zapojení má nevýhodu v tom, že napětí tohoto zapojení dosahuje pouze hodnoty 171 V a to je ještě teoreticky maximálně dosažitelná hodnota, proud pak hodnoty 44,39 A. Pro takto vysoké proudy by se musely použít kabely velkého průřezu s velkými ztrátami. Jako lepší se jeví varianta, kdy se vynechá jeden panel na každém voze, čímž bude možné zapojit panely do 15 paralelních větví po třech panelech v sérii. Napětí by maximálně dosahovalo hodnoty 256,5 V a proud hodnoty 28,95 A, výkon by klesl na přijatelných 7,426 kW (14,85 kW).

Nevýhoda tohoto zapojení je, že při částečném zastínění jednoho z panelů zapojených v sériové větvi dochází na VA charakteristice k posunu jeho pracovního bodu doleva (obr. 5.2) a každý panel generuje různý elektrický proud a výstupní proud celé větve odpovídá nejhůře osvětlenému prvku. Při dalším zastínění se však pracovní bod může dostat až do druhého kvadrantu. To vyvolá nežádoucí tok vyrovnávacího proudu mezi panelem plně osvětleným a panelem méně osvětleným. Je to nepříznivý jev, protože se rapidně zmenšuje výstupní výkon a protože zastíněný panel je namáhán vyrovnávacím proudem. Tento stav může dospět až ke zničení panelu. Vyrovnávacím proudům by se dalo zabránit přidáním diody do každé větve.



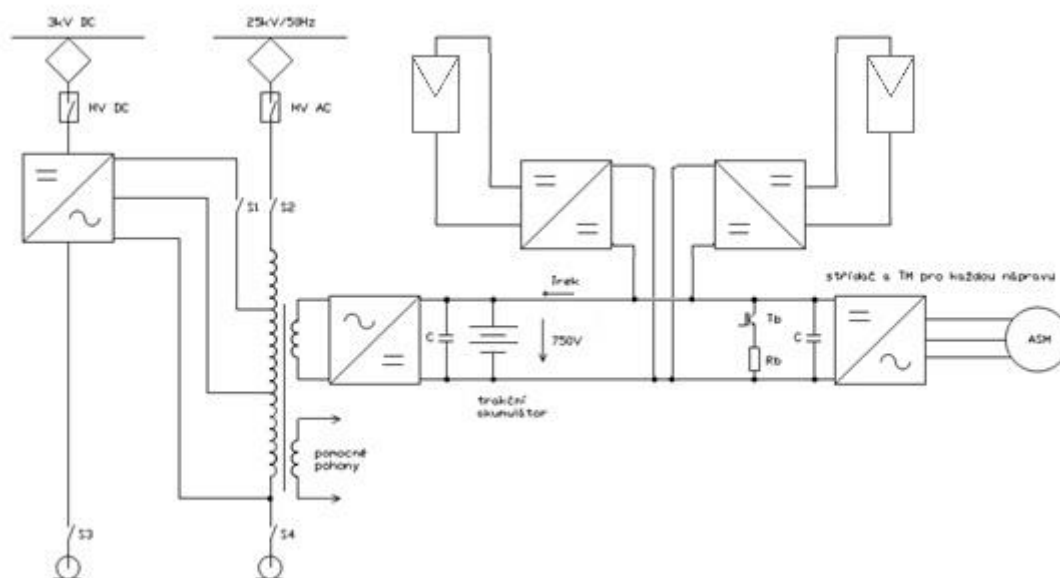
Obr. 5-2 VA charakteristika při celém ozáření panelu a při velkém zakrytí panelu [29]





Obr. 5-3 Obvodové zapojení amorfních panelů

Napětí tohoto zapojení může dosahovat hodnot od 0 V (při celkovém zakrytí všech panelů) až do napětí, které je dáno součinem počtu panelů v sériové větvi a napětím  $U_{mpp}$ . Zvolený měnič bude typu DC/DC. Jelikož bude měnič napojen na ss meziobvod, bude muset být výstup měniče dimenzován na 750 V a bude se tedy jednat o zvyšující měnič.

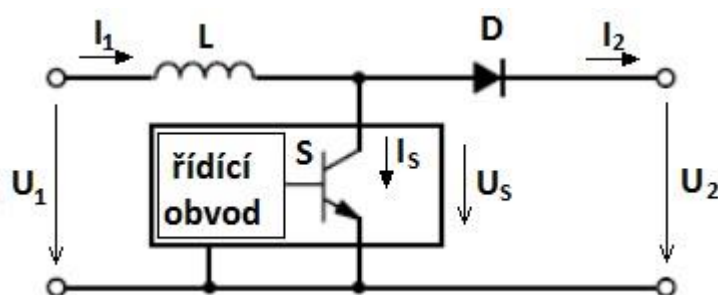


Obr. 5-4 Přibližná struktura elektrické výzbroje s přidanými FV panely

### 5.1.1 DC/DC měnič

Stejnosemřný měnič napětí slouží k přeměně stejnosměrné energie, charakterizované vstupním stejnosměrným napětím a proudem, na výstupní stejnosměrné napětí a proud. Stejnosemřné měniče lze provést jako přímé nebo nepřímé. Přímý měnič pracuje na principu periodického přerušování napájecího obvodu tj. pulzním způsobem. Proto se často setkáváme také s názvem „pulzní měnič“ nebo z angličtiny „chopper“. Nepřímý měnič je sestaven ze střídače, který ze stejnosměrného napětí vytvoří napětí střídavé o potřebné frekvenci, poté ze střídavého meziobvodu, většinou obsahující transformátor s vhodným převodem a izolační pevností a následně z řízeného usměrňovače, který střídavé napětí opět usměrní a umožňuje řízení výstupního napětí. I když se tento princip zdá složitější, používá se všude tam, kde je potřeba buď provést galvanické oddělení nebo kde transformace při vysoké frekvenci znamená podstatné snížení hmotnosti traťů.

Jak již bylo řečeno v zapojení budou dva zvyšující měniče. Na obrázku č. 5-5 je znázorněno principiální schéma takového měniče.



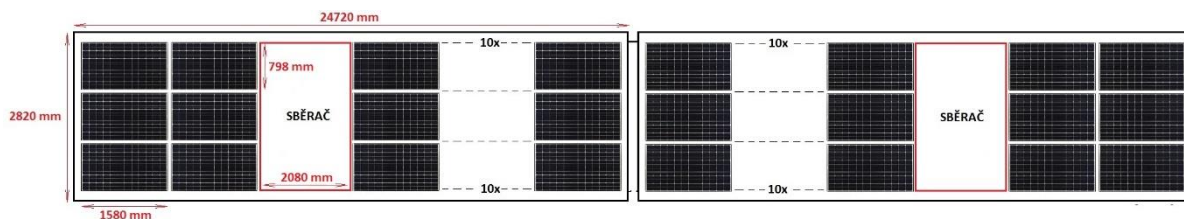
Obr. 5-5 Principiální schéma zvyšujícího DC/DC měniče

Spínací prvek S může mít dva stavy, a to sepnuto nebo rozepnuto. Obvod pracuje tak, že v době, kdy je spínací prvek sepnut narůstá proud  $I_1$  a v indukčnosti L se zvětšuje akumulovaná energie. V době rozepnutí spínacího prvku naopak indukčnost vydává svoji energii a snaží se protlačit proud do sítě s napětím  $U_2$  před diodu D. [30]

Výhodou je, že měnič nebude muset být galvanicky oddělen od stejnosměrné sběrnice, systémové napětí obou typů panelů je 1000 V a napětí sběrnice pouze 750 V.

## 5.2 Zapojení hybridních fotovoltaických panelů

Hybridních panelů se na střechu jednoho vozu vejde 45 ve třech sloupcích po 15. Opět je nutné vynechat nějaký prostor pro sběrač, proto se vynechá jedna řada se třemi panely s nějakou rezervou, celkem tedy bude na střeše 42 těchto panelů.

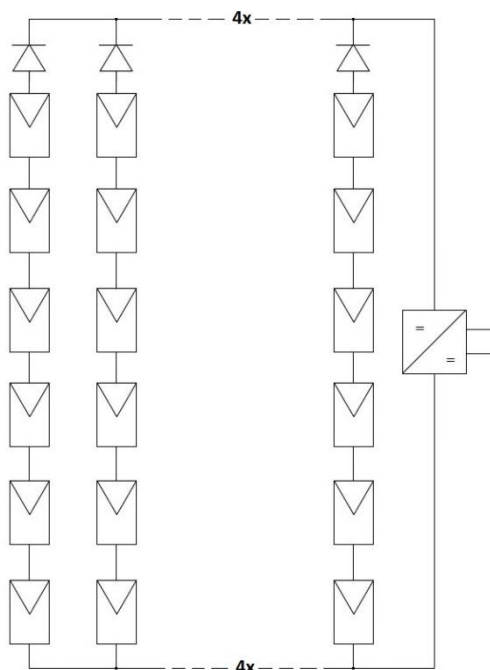


Obr. 5-6 Přibližné znázornění rozmístění hybridních panelů na střeše jednotky

Na střechu jednoho vozu se tedy vejde 42 hybridních panelů, pro správnou funkci systému je nutné zajistit identičnost panelů. I zde je vhodné použít sérioparalelní zapojení v sedmi paralelních větvích po šesti panelech. Při dodržení podmínek NOCT je maximální výkon tohoto zapojení:

$$P_{max} = 6 \cdot 43,6 \cdot 7 \cdot 5,51 = 10090 \text{ W} \quad (5.3)$$

Opět se jedná spíše o teoreticky dosažitelný maximální výkon z panelů na jednom voze. Napětí tohoto zapojení bude maximálně 261,6 V a proud 38,57 A.



Obr. 5-7 Obvodové zapojení hybridních panelů

I zde je nutné zapojit diody bránící průchodu vyrovnávacím proudům. Opět bude třeba dvou zvyšujících DC/DC měničů jako v předchozím případě. Měniče budou zapojeny stejně jako v předchozím případě na ss sběrnici.

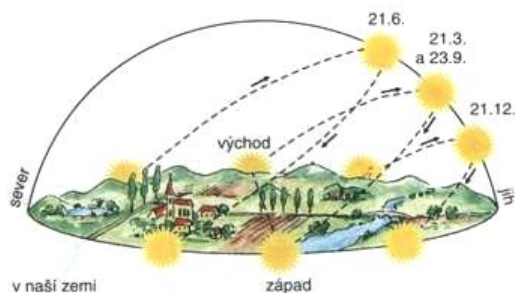
### 5.3 Zapojení amorfních a hybridních fotovoltaických panelů

Toto zapojení se ničím od předešlých neliší. Jen na jednom voze budou panely amorfní (celkem tedy 45 panelů) a na druhém voze panely pouze hybridní (42 panelů). Panely budou zapojeny úplně totožně jako výše uvedené.

V následující kapitole budou provedeny příslušné výpočty a ukáže se která z těchto tří variant bude nejefektivnější.

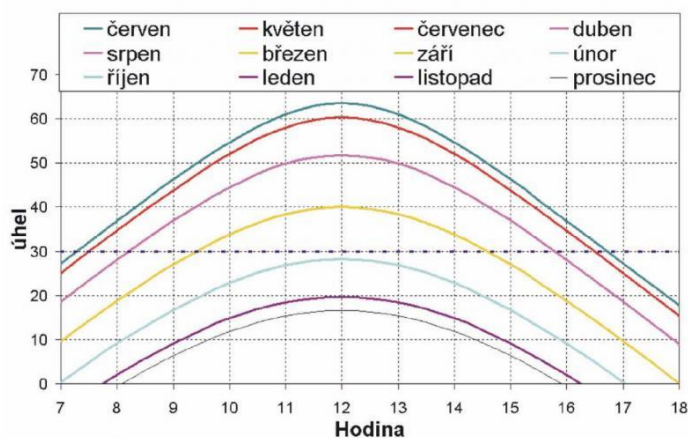
## 6 NÁVRH A PARAMETRY STŘEŠNÍHO FV ZDROJE PRO DVOUZDROJOVOU JEDNOTKU

Je nutné si uvědomit faktory ovlivňující činnost panelů. Jedním jsou orientace a sklon panelů, dále teplota panelů, s jejím růstem rapidně klesá účinnost panelů, zastínění panelů a nejdůležitější je samozřejmě hodnota dopadající intenzity záření na plochu panelů. Vše zmíněné úzce souvisí s pohybem Země kolem Slunce.



Obr. 6-1 Pohyb slunce v našich podmínkách [31]

Z pohybu slunce nad ČR plyne, že ideální nastavení panelů je sklon  $35^\circ$  s orientací na jih v období od března do října. V zimním období je ideální panely "zvednout" na vyšší úhel, tedy třeba až na  $50^\circ$ , aby nízko položené zimní slunce osvětlovalo rovinu panelu kolmo a tím by bylo možné ve špatných zimních podmínkách získat ze systému o trochu více el. energie. Je jisté, že na střeše jednotky budou mít panely nulový sklon, a proto je nutné zjistit, o kolik klesne efektivita pro tento sklon. Vycházel jsem z obrázku č. 6-2, kdy je nutné hodnotu intenzity dopadajícího záření vynásobit cosinem úhlu dopadu slunečního záření na osluněnou plochu.



Obr. 6-2 Vliv orientace a sklonu FV panelů na jejich výkon [32]

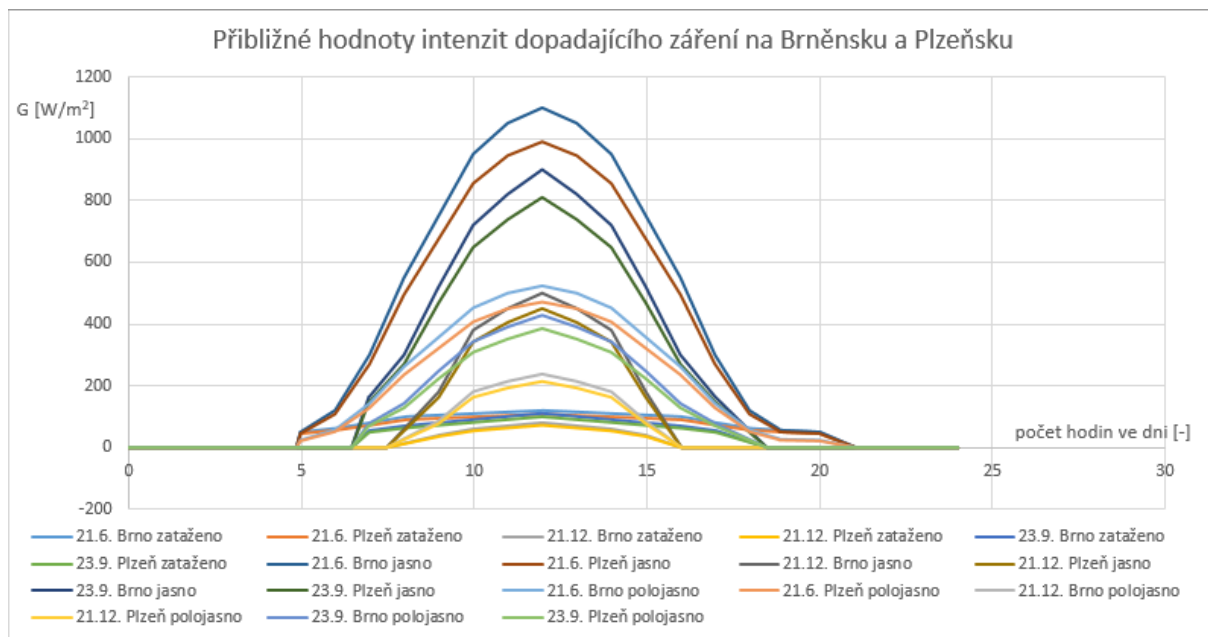
Standartní teplota panelů, pro které jsou určeny jejich tabulkové hodnoty je 20 °C. Po překročení této teploty začne hodnota produkovaného výkonu klesat s každým stupněm o teplotní koeficient, který výrobce udává, jde přibližně o hodnotu - 0,3 %/°C. Je problém určit teplotu na slunci (udává se jen teplota ve stínu), z které by se dalo určit oteplení panelů od standartní hodnoty. Proto jsem vycházel z teploty ve stínu (zdroj dat: [34]), kterou je ale stejně nutné ještě vynásobit koeficientem oteplení pro dosažení přibližně reálných hodnot. Zde je důležité uvědomit si, že při jízdě jednotky budou panely chlazeny proudem větru, ale při stání na místě ne. Po konzultaci s vedoucím práce jsme se dohodli, že velikost koeficientu oteplení bude 1,5. Vliv teploty panelů se však projeví jen v některých měsících, nejvíce v květnu, červnu, červenci a srpnu (případně v dubnu a září). V těchto měsících vyrobí panely nejvíce energie, ale paradoxně mají také největší ztráty kvůli teplotě. Ideálním stavem je tedy co největší intenzita záření, ale co nejmenší teplota což je téměř nemožné.

Příklad výpočtu: řekněme, že výkon generovaný panely je 20 kW. Bude měsíc červenec a teplota ve stínu 22 °C. Jak bylo řečeno, teplotu ve stínu je nutné vynásobit koeficientem oteplení, dostaneme hodnotu 33 °C. Ta se od normativních 20 °C liší o 13 °C. Výsledný výkon klesne o výrobcem udávaný teplotní koeficient násobený rozdílem teplot, což je pokles o přibližně 4 %, tedy 0,8 kW. Z experimentálních měření se ukazuje, že tato hodnota je nereálná a není vůbec vyloučené, že generovaný výkon klesne kvůli teplotě až o polovinu.

Nejdůležitější jsou pro výpočet vyrobené energie hodnoty intenzity dopadajícího záření. K mému překvapení jsem zjistil, že je poměrně problém nějaké přesnější hodnoty dohledat. Proto jsem kontaktoval Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ) se zájmem o data intenzit záření. Přestože byl ČHMÚ velice vstřícný, díky administrativním krokům souvisejících s uzavřením smlouvy na poskytnutí dat mezi ČHMÚ a Univerzitou Pardubice se veškeré náležitosti nestihly včas tak, aby mohla být data zpracována do diplomové práce. Musel jsem se tedy spokojit s obecně dostupnými daty.

Rozhodl jsem se, že pro všechny tři zapojení (pouze Amorfni FV panely, pouze Hybridní panely a kombinace obou) vypočítám kolik energie by byly schopny vyrobit za jasného, polojasného a zataženého podnebí ve dnech 21.6., 23.9. a 21.12. Vycházel jsem z obrázku č. 2-14, pomocí programu im2graph, který je zdarma dostupný. Z něj jsem vygeneroval tabulky hodnot pro zmíněné dny s předpokladem, že jde o zcela bezmračný den (popřípadě úplně zatažený – difúzní záření). Následně bylo nutné aproximovat hodnoty pro ČR a to z hlediska délky dnů v daných termínech. Hodnoty intenzit jsem přizpůsobil hodnotám na

Brněnsku a Plzeňsku na základě mapy intenzity slunečního záření v ČR [33]. Pro polojasné podnebí jsem určil, že jde o poloviční hodnotu jasného podnebí. Výsledkem je graf níže.



Obr. 6-3 Orientační hodnoty intenzit záření na Brněnsku a Plzeňsku

Ted' k samotnému výpočtu. Výkon, který jsou FV panely schopny generovat, se počítá podle následujícího vztahu:

$$P_{FV} = E_K \cdot \cos \gamma \cdot S \cdot \eta \cdot k_z [W] \quad (6.1)$$

$E_K$  – intenzita záření dopadajícího povrch na plochu kolmou ke směru paprsků [ $W/m^2$ ]

$S$  – plocha FV článků na střeše jednotky [ $m^2$ ]

$\eta$  – účinnost FV panelu udávaná výrobcem [%]

$k_z$  – koeficient zastínění panelu [-]

Koeficientem zastínění je nutno vynásobit generovaný výkon, protože je nereálné, aby na uvažovaných tratích nebyly překážky, které by vrhaly stín na FV panely a snížili tak jejich účinnost (např. větve stromů) o čem jsem se přesvědčil i při měření na FV panelech. Po zkušenostech z měření a konzultaci s vedoucím práce jsme se rozhodli nastavit jeho hodnotu na 0,5. Z tohoto faktu je jasné, že je třeba panely pravidelně čistit od jakýchkoliv nečistot, aby nezastiňovaly články a nesnižovaly účinnost panelů. Účinnost panelů je poměrně nízká, její hodnota se pohybuje v rozmezí 15 až 20 %.

Ještě je nutné uvést vliv teploty na výsledný generovaný výkon  $P_V$ :

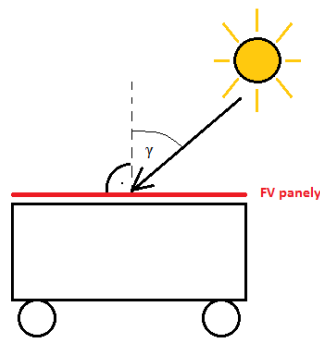
$$P_V = P_{FV} + (P_{FV}/100) \cdot [(T_{OK} \cdot k_o) - T_{FV}] \cdot k_{TP} [W] \quad (6.2)$$

$T_{OK}$  – teplota okolí ve stínu [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$k_o$  – koeficient oteplení (hodnota určena na 1,5) [-]

$T_{FV}$  – standartní teplota FV panelů (výrobci určena na 20  $^{\circ}\text{C}$ ) [ $^{\circ}\text{C}$ ]

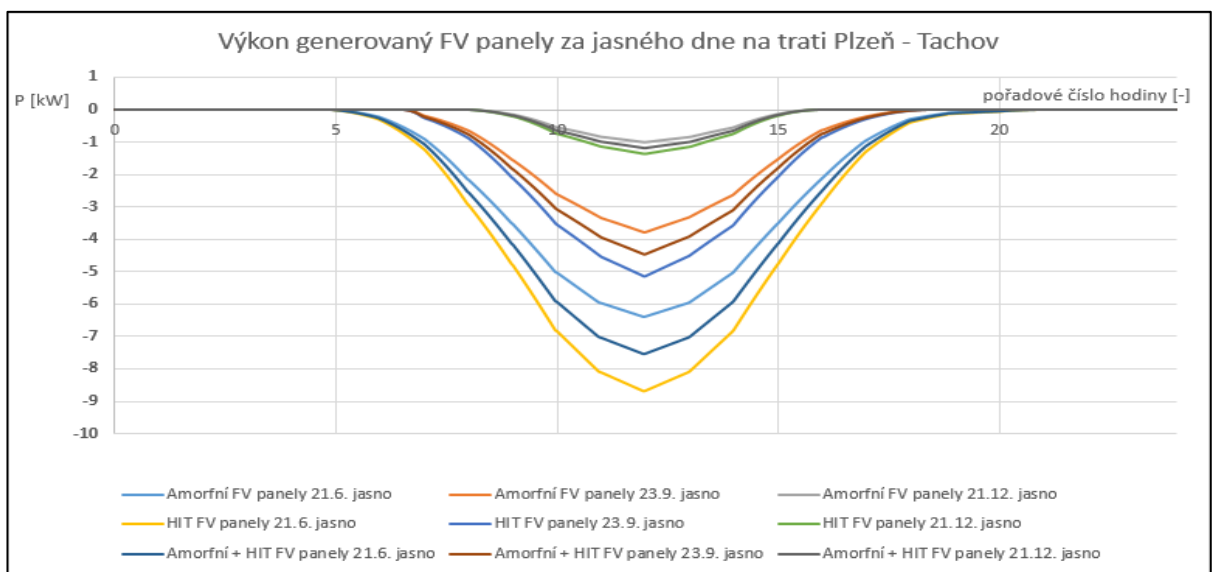
$k_{TP}$  – výkonový teplotní koeficient udávaný výrobcem [%/ $^{\circ}\text{C}$ ]



Obr. 6-4 Úhel dopadu slunečního záření na osluněnou plochu

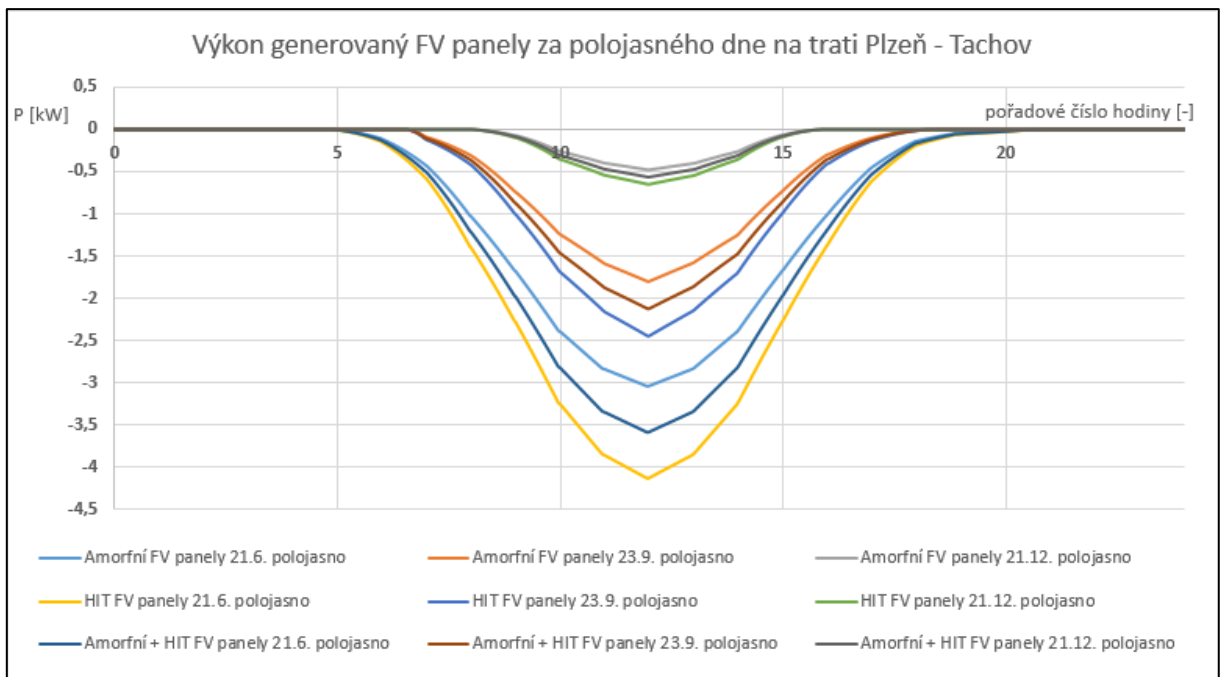
## 6.1 Trať Plzeň – Tachov denní hodnoty

Na následujících třech grafech je zobrazen teoretický průběh výkonu za jasné, polojasné a zatažené oblohy.

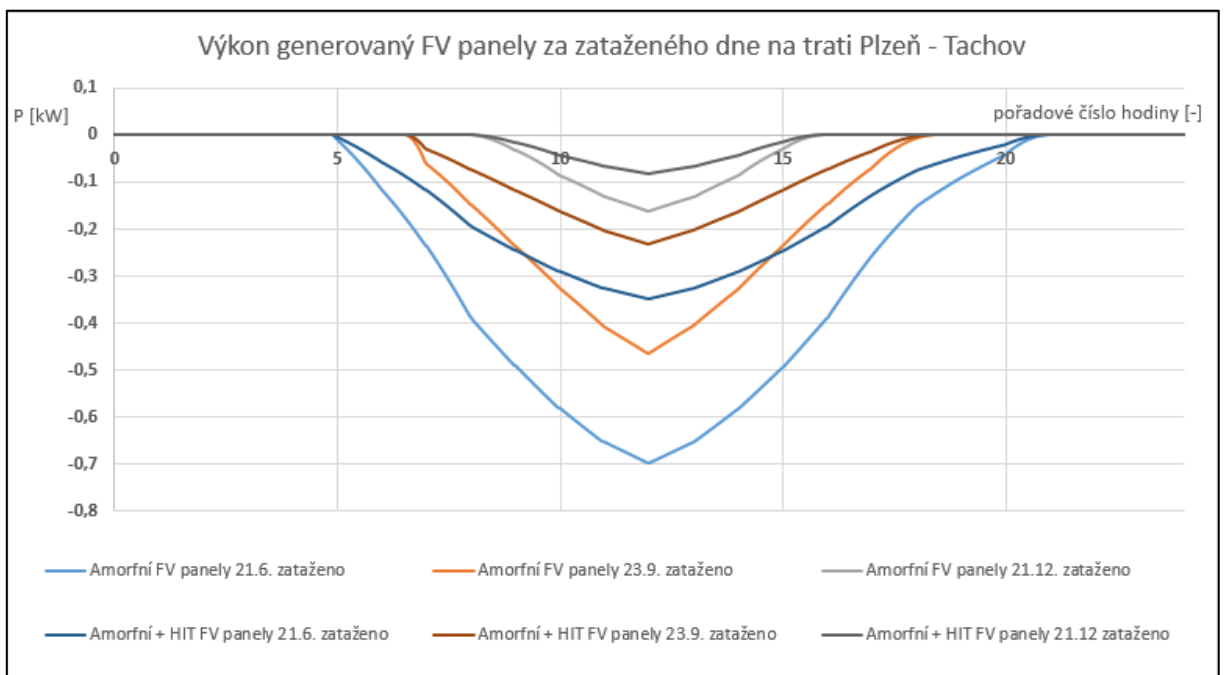


Obr. 6-5 Teoretický výkon generovaný FV panely za jasného dne na Plzeňsku



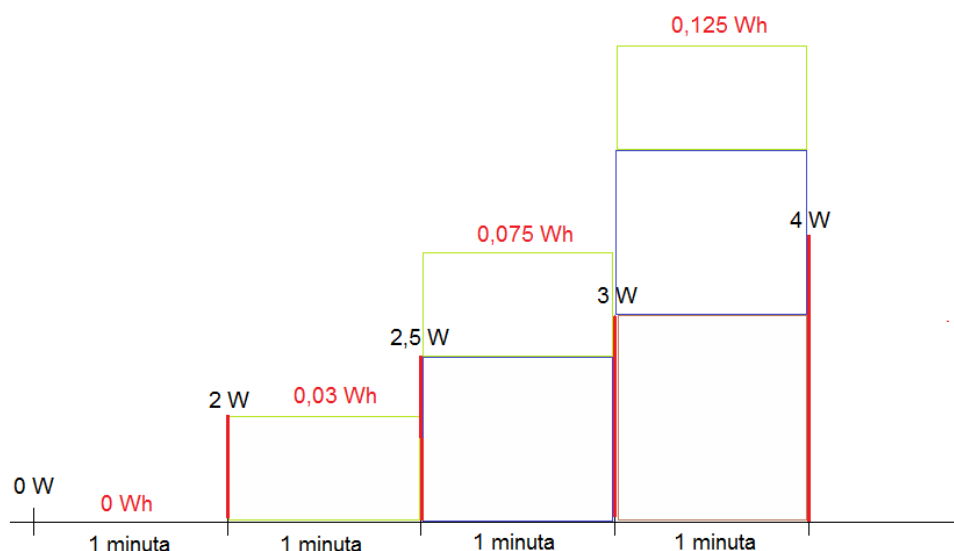


Obr. 6-6 Teoretický výkon generovaný FV panely za polojasného dne na Plzeňsku



Obr. 6-7 Teoretický výkon generovaný FV panely za zataženého dne na Plzeňsku

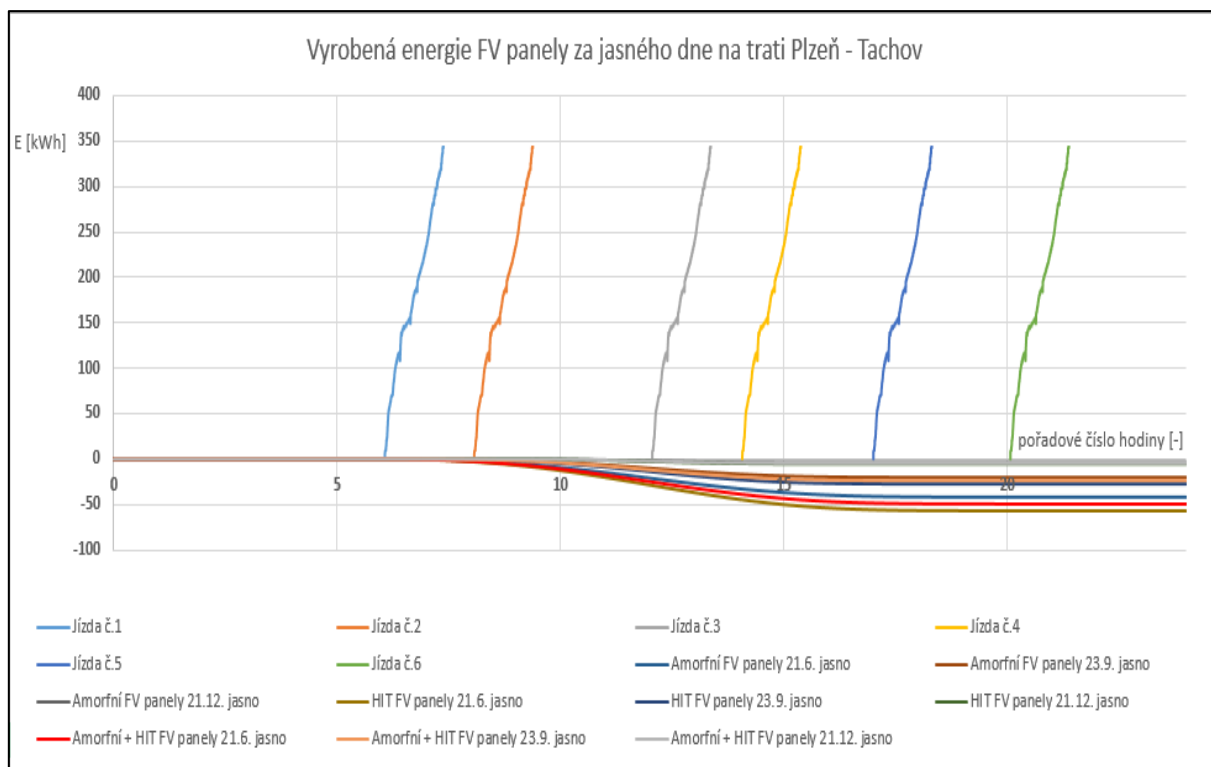
Vyrobená energie FV panely je integrál plochy ohraničené výkonovými křivkami výše. Jelikož jsem veškeré výpočty prováděl v programu Microsoft Excel 2016 a ten integrální funkce neumí, použil jsem obdélníkovou integrační metodu. Princip se pokusím nastínit na následujícím obrázku číslo 6-8.



Obr. 6-8 Princip obdélníkové integrační metody

Máme hodnoty výkonu generované FV panely (červené svislé čáry) v pravidelných intervalech, v tomto případě po jedné minutě. Nyní hodnoty výkonu vynásobíme minutovým intervalem (děleným šedesáti – energie se udává ve wattodinách), čímž získáme z názvu vyplývající obdélníky, které můžeme vidět na obrázku. První krok je nulový (0 W násobený jednou šedesátinou). V druhém kroku už začíná integrace, opět vynásobíme hodnotu výkonu časovým intervalem, dostaneme zelený obdélník a přičteme k němu předchozí obdélník a takto se pořád pokračuje dále. Z obrázku je vidět, jak hodnota energie narůstá – obdélníky narůstají.

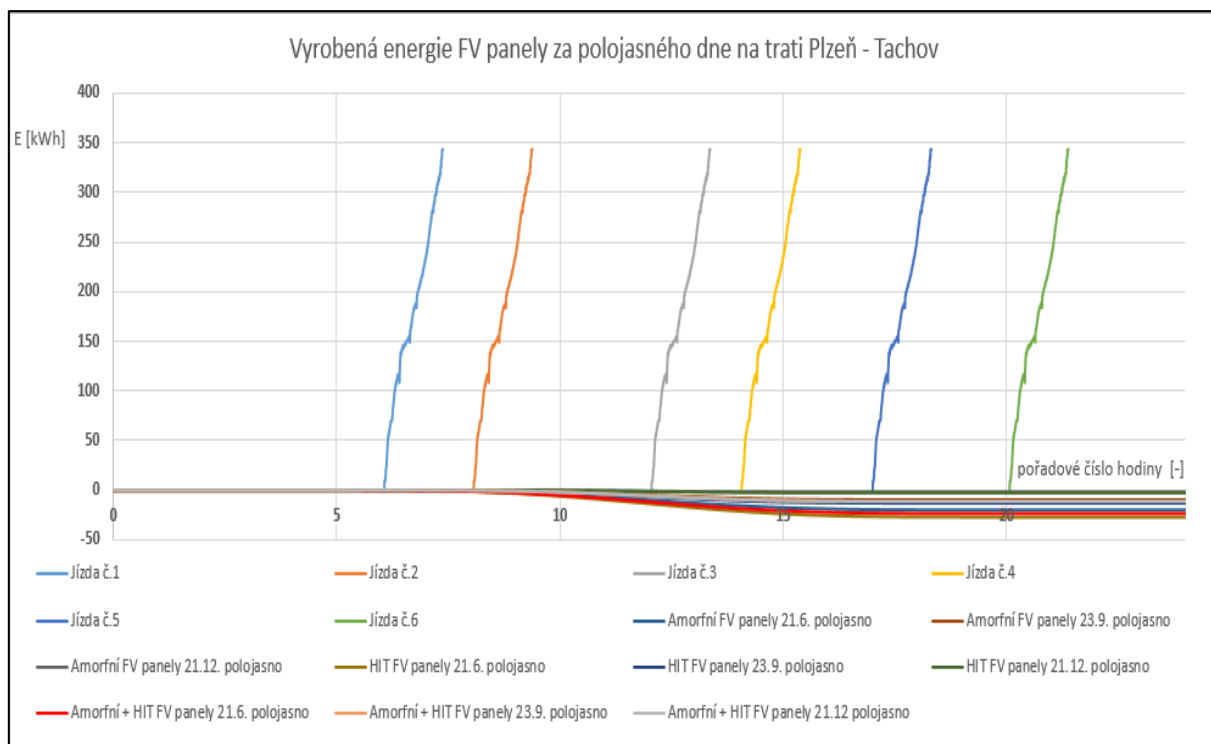
Na následujících obrázcích budou zobrazeny křivky vyrobené energie v porovnání s celkovou spotřebou jednotky. Kladné hodnoty znamenají celkovou spotřebu pro jednotlivé jízdy jednotky, záporné hodnoty reprezentují energii vyrobenou FV panely za předpokladu, že jednotka bude od východu do západu stát na slunci.



Obr. 6-9 Vyrobená energie FV panely za během dne na Plzeňsku

Spotřeba jednotky	6 x (277,8 + 65,8)	kWh
Amorfní FV panely 21.6. jasno	42,2	kWh
Amorfní FV panely 23.9. jasno	20,3	kWh
Amorfní FV panely 21.12. jasno	4	kWh
HIT FV panely 21.6. jasno	57,3	kWh
HIT FV panely 23.9. jasno	27,6	kWh
HIT FV panely 21.12. jasno	5,4	kWh
Amorfní + HIT FV panely 21.6. jasno	49,7	kWh
Amorfní + HIT FV panely 23.9. jasno	24	kWh
Amorfní + HIT FV panely 21.12. jasno	4,7	kWh

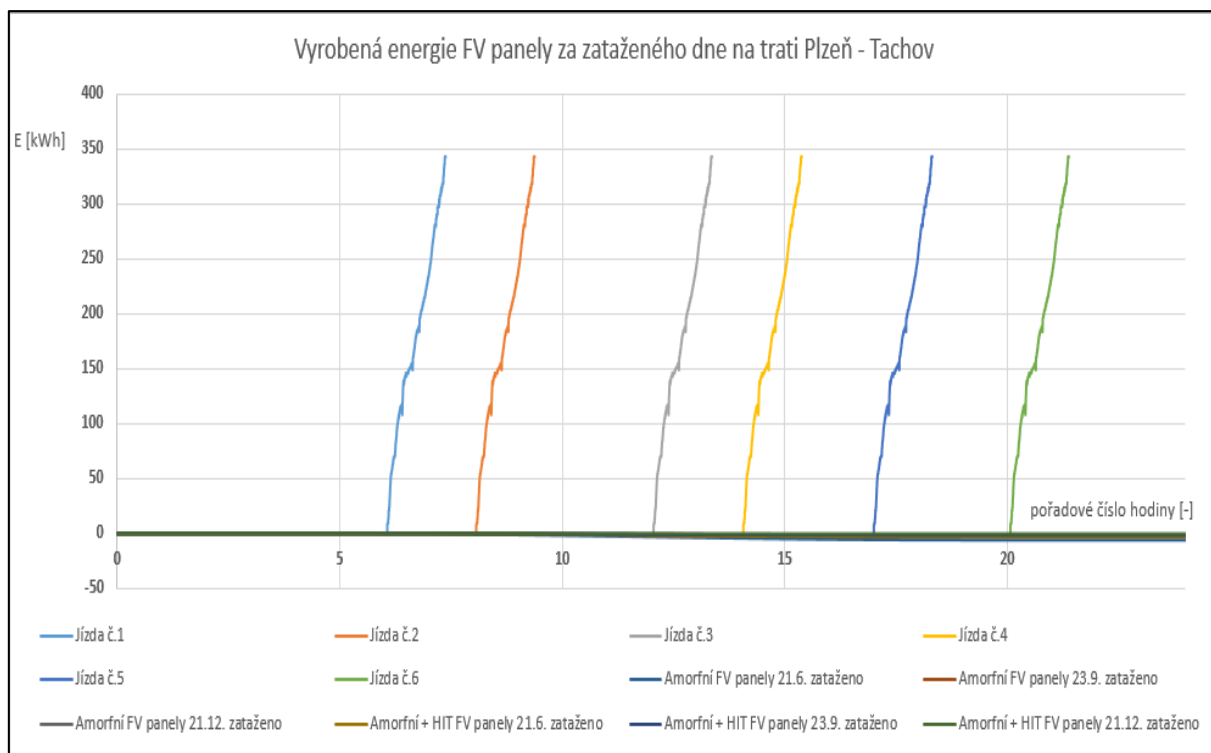
Tab. 6-1 Hodnoty energií vyrobených FV panely za jasných dnů na Plzeňsku



Obr. 6-10 Vyrobená energie FV panely během polojasného dne na Plzeňsku

Spotřeba jednotky	6 x (277,8 + 65,8)	kWh
Amorfnní FV panely 21.6. polojasno	20,1	kWh
Amorfnní FV panely 23.9. polojasno	9,7	kWh
Amorfnní FV panely 21.12. polojasno	1,9	kWh
HIT FV panely 21.6. polojasno	27,3	kWh
HIT FV panely 23.9. polojasno	13,2	kWh
HIT FV panely 21.12. polojasno	2,6	kWh
Amorfnní + HIT FV panely 21.6. polojasno	23,7	kWh
Amorfnní + HIT FV panely 23.9. polojasno	11,4	kWh
Amorfnní + HIT FV panely 21.12. polojasno	2,2	kWh

Tab. 6-2 Hodnoty energií vyrobených FV panely během polojasných dnů



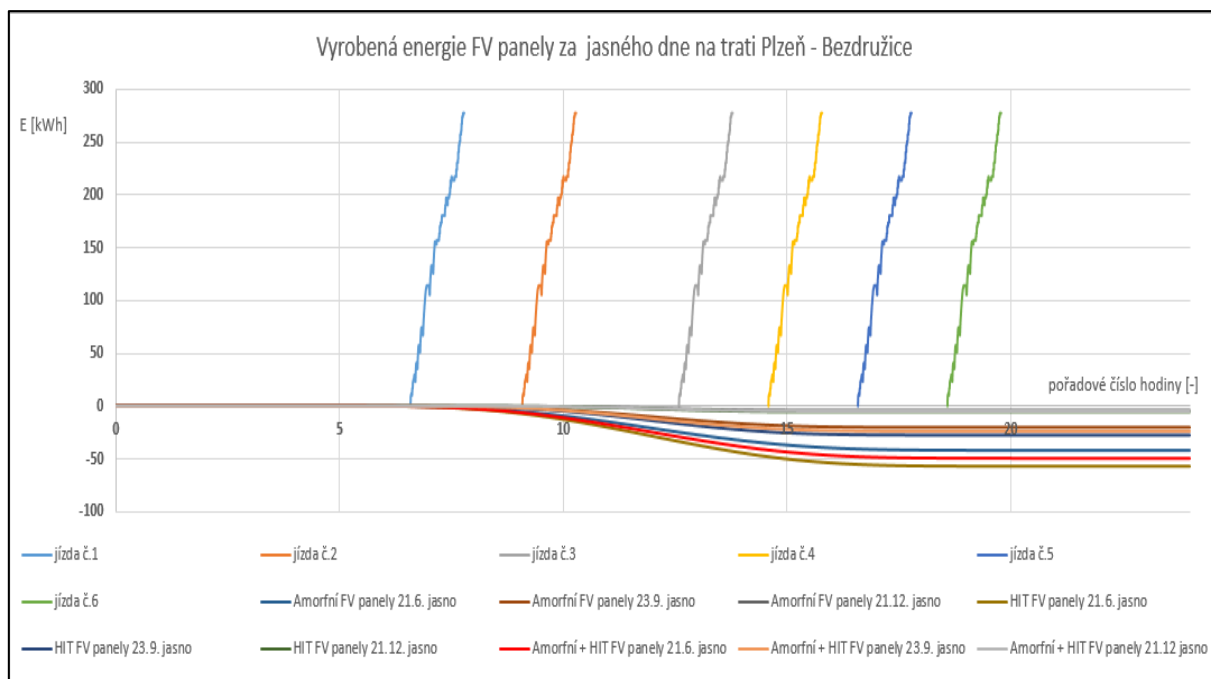
Obr. 6-11 Vyrobená energie FV panely během zataženého dne na Plzeňsku

Spotřeba jednotky	6 x (277,8 + 65,8)	kWh
Amorfní FV panely 21.6. zataženo	5,8	kWh
Amorfní FV panely 23.9. zataženo	2,8	kWh
Amorfní FV panely 21.12. zataženo	0,6	kWh
Amorfní + HIT FV panely 21.6. zataženo	2,9	kWh
Amorfní + HIT FV panely 23.9. zataženo	1,41	kWh
Amorfní + HIT FV panely 21.12. zataženo	0,3	kWh

Tab. 6-3 Hodnoty energií vyrobených FV panely během polojasných dnů

## 6.2 Trať Plzeň – Bezručice denní hodnoty

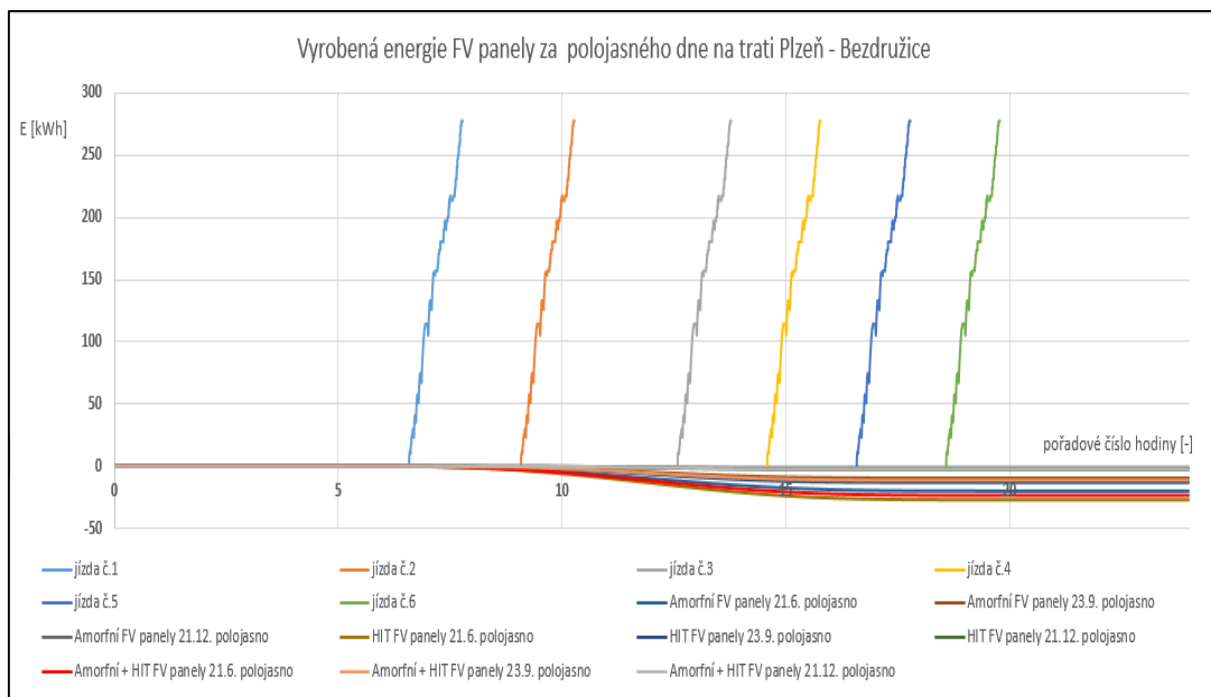
Jelikož je tato trať také na Plzeňsku, jsou hodnoty generovaných výkonů stejné jako na trati Plzeň – Tachov. Proto grafy výkonů uvádět nebudu - jsou úplně shodné jako předešlé, uvedu pouze grafy vyrobených energií. Veškeré výpočty jsou totožné s předchozími, protože jsem uvažoval shodné hodnoty intenzit záření pro obě trati na Plzeňsku.



Obr. 6-12 Vyrobená energie FV panely během jasného dne na Plzeňsku

Spotřeba jednotky	$6 \times (218,2 + 60)$	kWh
Amorfnní FV panely 21.6. jasno	42,2	kWh
Amorfnní FV panely 23.9. jasno	20,3	kWh
Amorfnní FV panely 21.12. jasno	4	kWh
HIT FV panely 21.6. jasno	57,3	kWh
HIT FV panely 23.9. jasno	27,6	kWh
HIT FV panely 21.12. jasno	5,4	kWh
Amorfnní + HIT FV panely 21.6. jasno	49,7	kWh
Amorfnní + HIT FV panely 23.9. jasno	24	kWh
Amorfnní + HIT FV panely 21.12. jasno	4,7	kWh

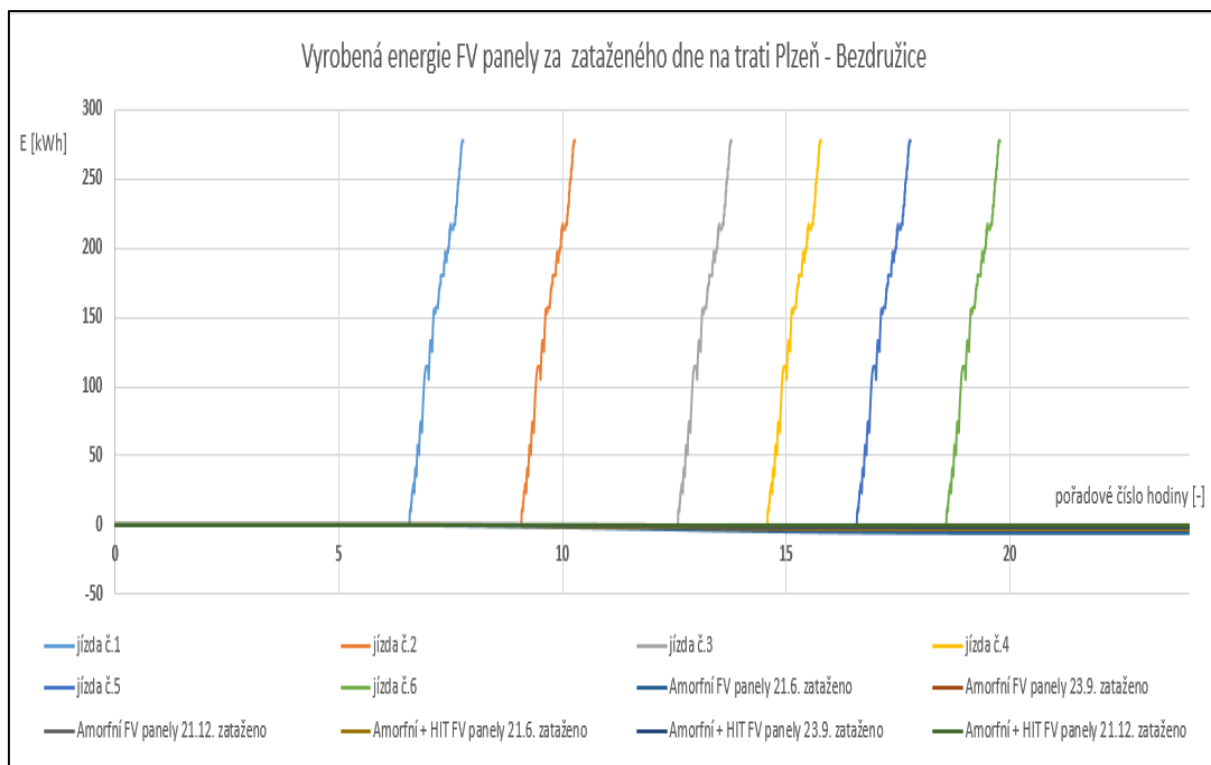
Tab. 6-4 Hodnoty energií vyrobených FV panely za jasných dnů na Plzeňsku



Obr. 6-13 Vyrobená energie FV panely během polojasného dne na Plzeňsku

Spotřeba jednotky	6 x (218,2 + 60)	kWh
Amorfnní FV panely 21.6. polojasno	20,1	kWh
Amorfnní FV panely 23.9. polojasno	9,7	kWh
Amorfnní FV panely 21.12. polojasno	1,9	kWh
HIT FV panely 21.6. polojasno	27,3	kWh
HIT FV panely 23.9. polojasno	13,2	kWh
HIT FV panely 21.12. polojasno	2,6	kWh
Amorfnní + HIT FV panely 21.6. polojasno	23,7	kWh
Amorfnní + HIT FV panely 23.9. polojasno	11,4	kWh
Amorfnní + HIT FV panely 21.12. polojasno	2,2	kWh

Tab. 6-5 Hodnoty energií vyrobených FV panely během polojasných dnů na Plzeňsku



Obr. 6-14 Vyrobená energie FV panely během zataženého dne na Plzeňsku

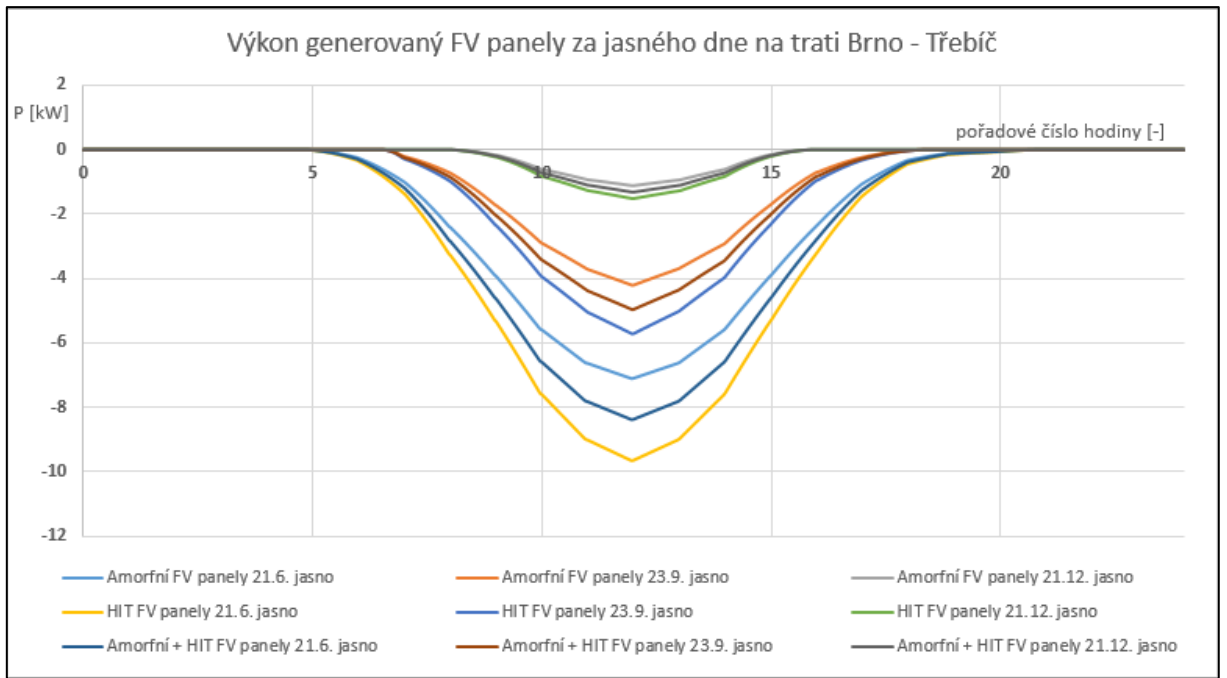
Spotřeba jednotky	6 x (277,8 + 65,8)	kWh
Amorfní FV panely 21.6. zataženo	5,8	kWh
Amorfní FV panely 23.9. zataženo	2,8	kWh
Amorfní FV panely 21.12. zataženo	0,6	kWh
Amorfní + HIT FV panely 21.6. zataženo	2,9	kWh
Amorfní + HIT FV panely 23.9. zataženo	1,4	kWh
Amorfní + HIT FV panely 21.12. zataženo	0,3	kWh

Tab. 6-6 Hodnoty energií vyrobených FV panely během zatažených dnů na Plzeňsku

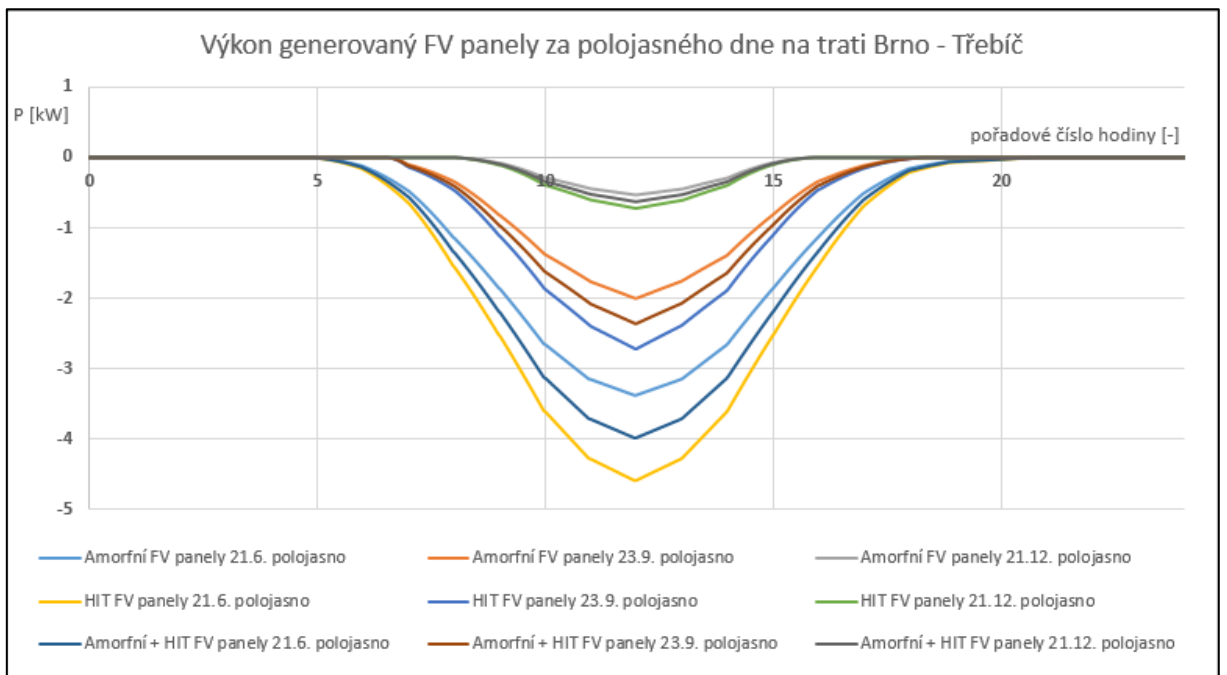
### 6.3 Trať Brno – Třebíč denní hodnoty

Na této trati už budou výkony generované FV panely rozdílné oproti těm na Plzeňsku, protože hodnoty intenzit záření jsou zde vyšší, tím pádem i výkony a stejně tak energie budou vycházet o něco větší.

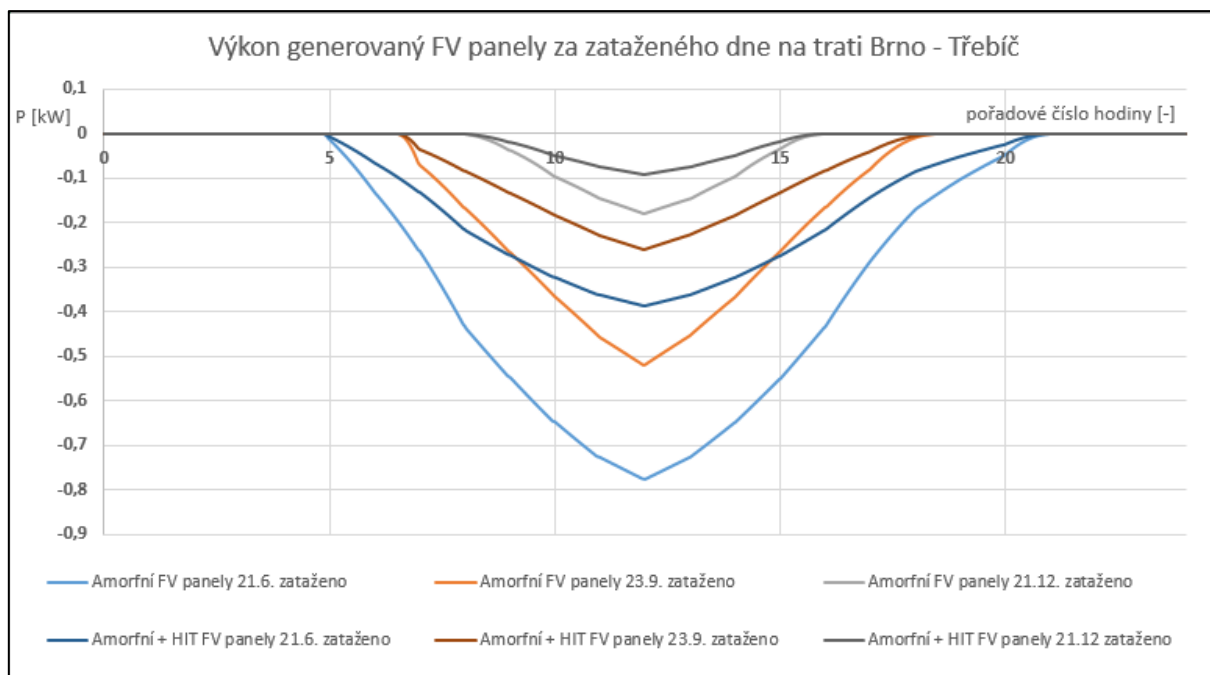




Obr. 6-15 Teoretický výkon generovaný FV panely během jasného dne na Brněnsku

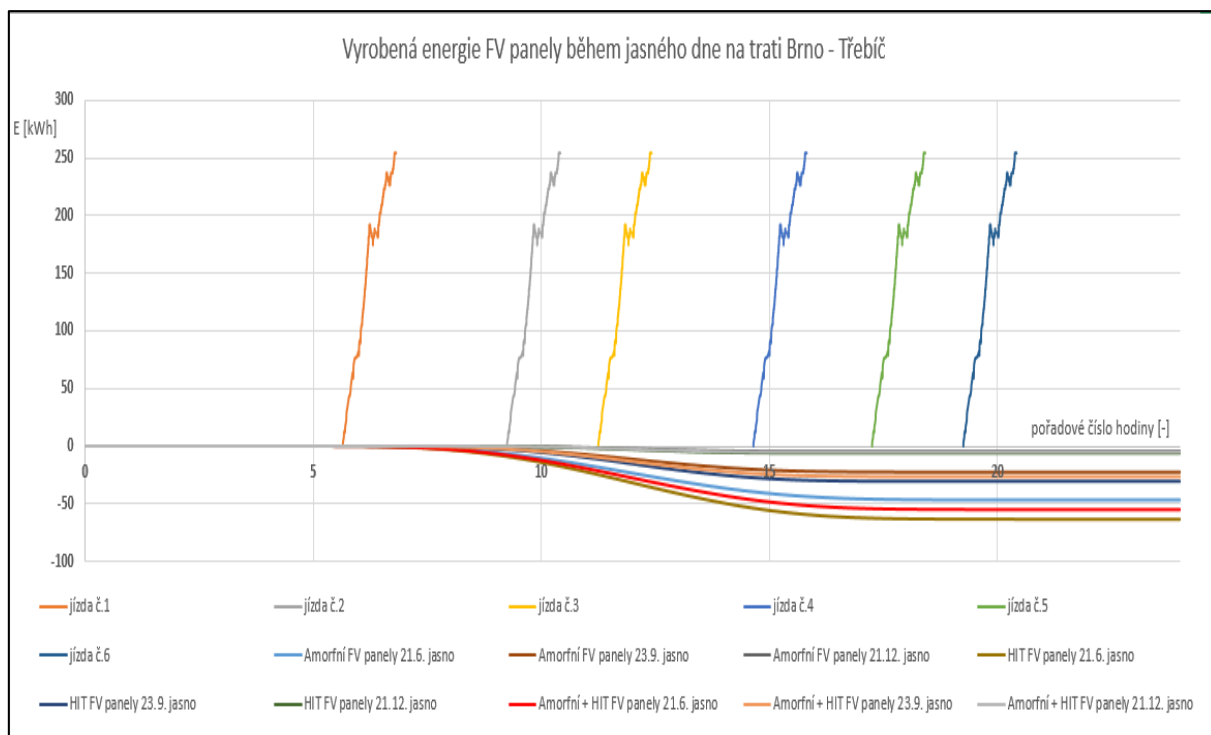


Obr. 6-16 Teoretický výkon generovaný FV panely během polojasného dne na Brněnsku



Obr. 6-17 Teoretický výkon generovaný FV panely během zataženého dne na Brněnsku

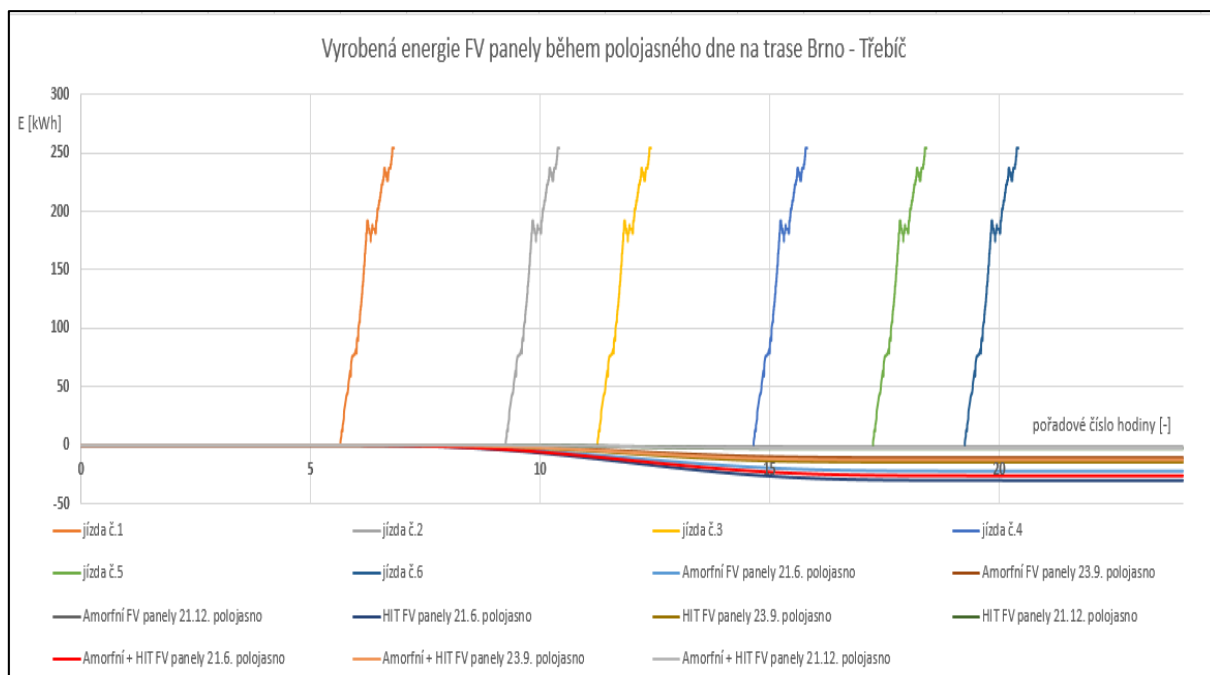
Při porovnání grafů s těmi z oblasti na Plzeňsku je skutečně vidět, že produkují o něco menší výkon. Během jasného dne je to přibližně o 1 kW méně, během polojasného dne zhruba o 0,5 kW méně a během zataženého dne téměř o 0,1 kW méně.



Obr. 6-18 Vyrobená energie FV panely během jasného dne na Brněnsku

Spotřeba jednotky	6 x (197,1 + 58,3)	kWh
Amorfnní FV panely 21.6. jasno	46,7	kWh
Amorfnní FV panely 23.9. jasno	22,5	kWh
Amorfnní FV panely 21.12. jasno	4,4	kWh
HIT FV panely 21.6. jasno	63,4	kWh
HIT FV panely 23.9. jasno	30,6	kWh
HIT FV panely 21.12. jasno	6	kWh
Amorfnní + HIT FV panely 21.6. jasno	55,1	kWh
Amorfnní + HIT FV panely 23.9. jasno	26,5	kWh
Amorfnní + HIT FV panely 21.12. jasno	5,2	kWh

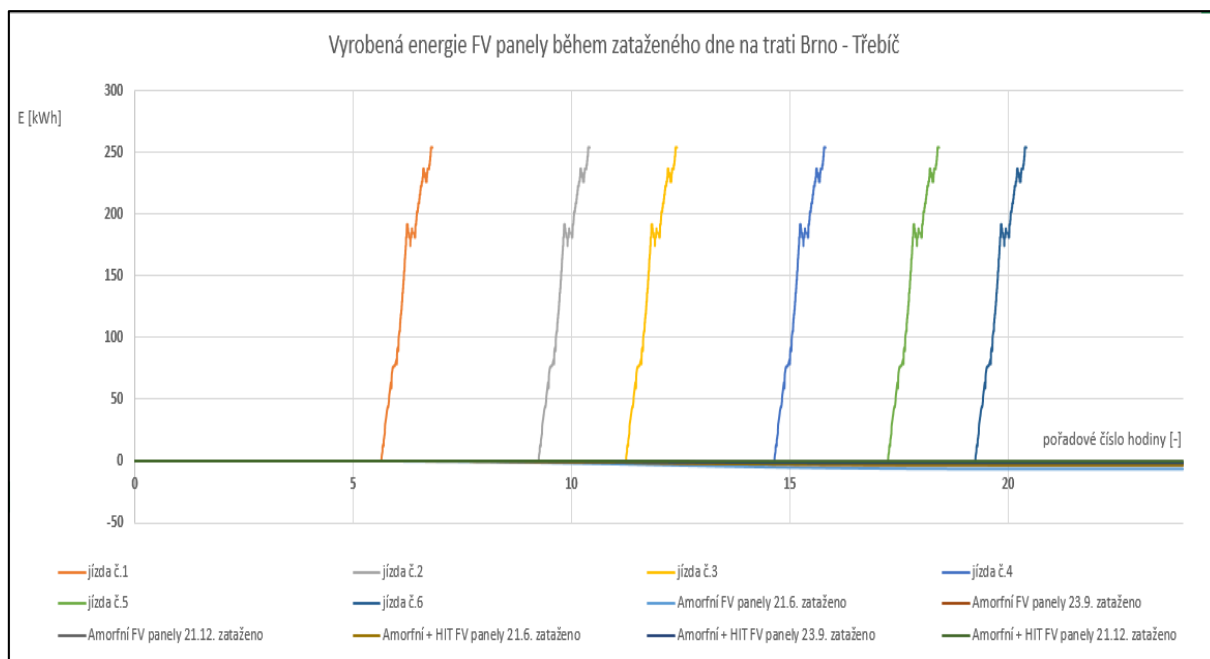
Tab. 6-7 Hodnoty energií vyrobených FV panely během jasných dnů na Brněnsku



Obr. 6-19 Vyrobená energie FV panely během polojasného dne na Brněnsku

Spotřeba jednotky	6 x (218,2 + 60)	kWh
Amorfnní FV panely 21.6. polojasno	22,2	kWh
Amorfnní FV panely 23.9. polojasno	10,7	kWh
Amorfnní FV panely 21.12. polojasno	2,1	kWh
HIT FV panely 21.6. polojasno	30,2	kWh
HIT FV panely 23.9. polojasno	14,5	kWh
HIT FV panely 21.12. polojasno	2,9	kWh
Amorfnní + HIT FV panely 21.6. polojasno	26,2	kWh
Amorfnní + HIT FV panely 23.9. polojasno	12,6	kWh
Amorfnní + HIT FV panely 21.12. polojasno	2,5	kWh

Tab. 6-8 Hodnoty energií vyrobených FV panely během polojasných dnů na Brněnsku



Obr. 6-20 Vyrobena energie FV panely během zataženého dne na Brněnsku

Spotřeba jednotky	6 x (277,8 + 65,8)	kWh
Amorfnní FV panely 21.6. zataženo	6,5	kWh
Amorfnní FV panely 23.9. zataženo	3,1	kWh
Amorfnní FV panely 21.12. zataženo	0,7	kWh
Amorfnní + HIT FV panely 21.6. zataženo	3,2	kWh
Amorfnní + HIT FV panely 23.9. zataženo	1,6	kWh
Amorfnní + HIT FV panely 21.12. zataženo	0,4	kWh

Tab. 6-9 Hodnoty energií vyrobených FV panely během zatažených dnů na Brněnsku

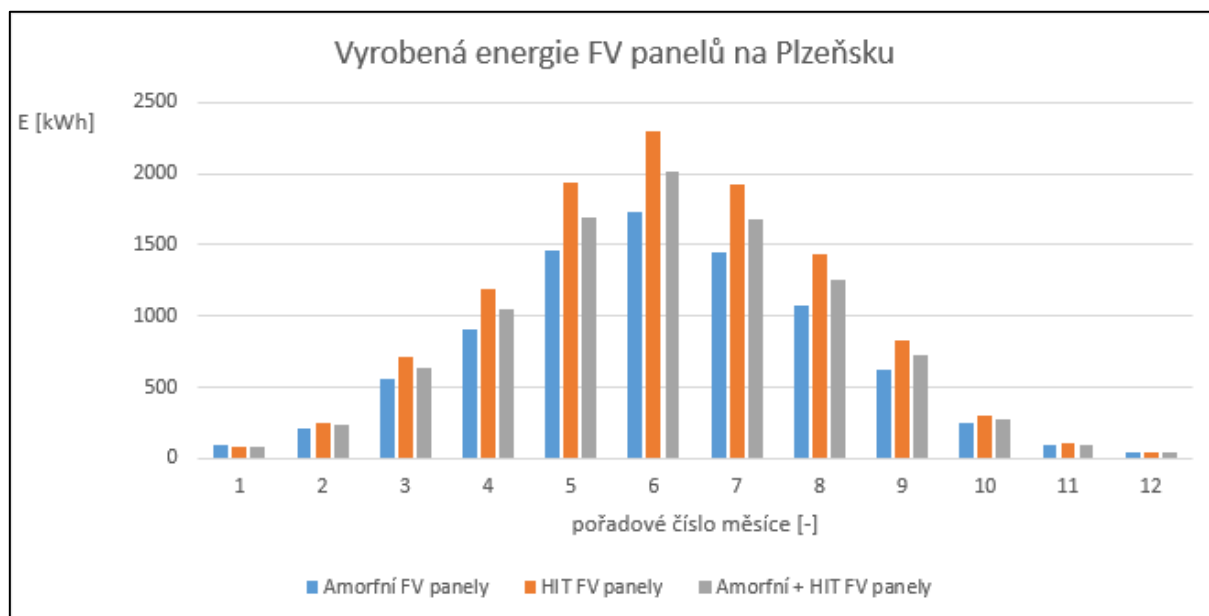
## 6.4 Plzeňsko a Brněnsko měsíční hodnoty

Vše výše uvedené bylo pouze pro pár konkrétních dní, zajímavější však jsou měsíční hodnoty, aby bylo přehledné, kolik jsou jednotlivá zapojení schopna vyrobit energie za rok. Nejprve je nutné zjistit pro každý den dobu slunečního svitu, tedy čas od východu do západu slunce (zdroj dat: [35]). Dále je potřeba zjistit kolik hodin v každém měsíci bylo jasno, kolik bylo zataženo (případně polojasno). Tyto údaje jsou na internetu dohledatelné (zdroj dat: [32], [36], [37]).

Pořadí měsíce [-]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Součet
Délka svitu [hod]	268	294	371	416	481	489	491	446	377	331	270	253	4487
„Jasně“ hodiny Brno [hod]	41	67	127	156	224	218	212	219	155	117	44	37	1620
„Jasně“ hodiny Plzeň [hod]	31	56	118	139	195	200	197	202	134	86	46	37	1441
„Zatažené“ hodiny Brno [hod]	171	147	116	90	81	82	79	72	73	174	180	212	1477
„Zatažené“ hodiny Plzeň [hod]	199	162	136	97	84	86	86	76	76	187	179	212	1580
„Polojasně“ hodiny Brno [hod]	56	80	128	167	177	190	200	155	149	40	46	4	1390
„Polojasně“ hodiny Plzeň [hod]	38	76	117	180	203	203	209	168	167	58	45	4	1466

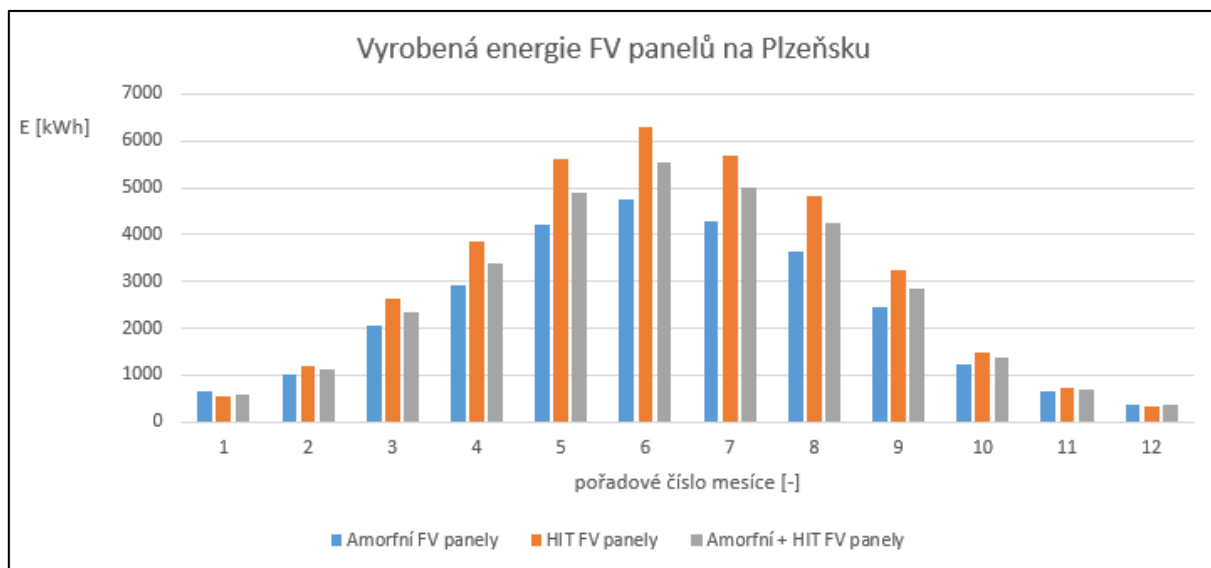
Tab. 6-10 Průměrné měsíční doby slunečního svitu v ČR

Výše uvedené hodnoty jsou v hodinách za daný měsíc uváděny na základě dlouhodobé statistiky. Délku svitu jsem zvlášť pro Brno a Plzeň neuváděl - rozdíl je necelých 10 minut, což je zanedbatelná hodnota. Proto jsem volil hodnoty délky svitu pro Prahu, která činí průměr mezi těmito lokalitami. Následně bylo nutné přiřadit ke každému měsíci hodnotu intenzity dopadajícího záření, zde jsem opět vycházel z obrázku číslo 2-14. Poté už jsem pokračoval stejně jako u výpočtů pro denní hodnoty, tedy vzal jsem v potaz vliv teploty, stínu a úhel dopadu slunečního záření na osluněnou plochu. Výsledkem jsou grafy níže.



Obr. 6-21 Měsíční sumy vyrobené energie FV panely na Plzeňsku

Jen pro zajímavost uvedu ten samý graf, jen bez vlivů ovlivňující vyrobenou energii, tedy bez vlivu teploty, zastínění a úhlu dopadu paprsků.



Obr. 6-22 Měsíční sumy vyrobené energie FV panely na Plzeňsku bez faktorů ovlivňující jejich činnost

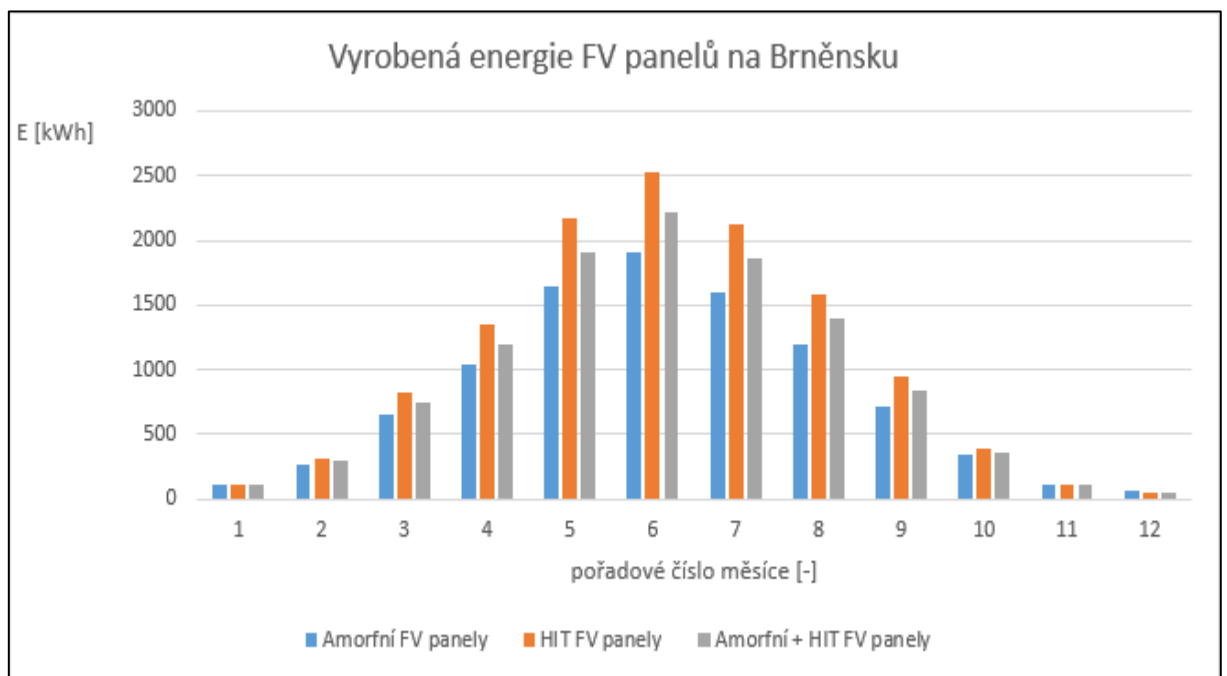
Pořadí měsíce [-]	Amorfnní FV panely (s faktory ovlivňující činnost) [kWh]	Amorfnní FV panely (bez faktorů ovlivňující činnost) [kWh]	HIT FV panely (s faktory ovlivňující činnost) [kWh]	HIT FV panely (bez faktorů ovlivňující činnost) [kWh]	Amorfnní + HIT FV panely (s faktory ovlivňující činnost) [kWh]	Amorfnní + HIT FV panely (bez faktorů ovlivňující činnost) [kWh]
1	89,5	640,6	75,5	542,5	82,5	591,5
2	211,5	1016,3	250,1	1204,6	230,8	1110,4
3	556,6	2055,6	709,2	2625,4	632,9	2340,5
4	909,2	2938,1	1193,1	3859,2	1051,1	3398,6
5	1455,7	4215,8	1936,3	5603	1696	4909,4
6	1728,1	4744,7	2301,6	6307,4	2014,9	5526,1
7	1442	4287,5	1921,4	5697,9	1681,7	4992,7
8	1075,7	3637	1433,5	4837,2	1254,6	4237,1
9	625	2449	826,7	3235	725,9	2842
10	253,6	1244,9	302,8	1488,2	278,2	1366,5
11	91,6	673	101,1	744,7	96,3	708,9
12	42,9	383,7	39,1	350,8	41	367,3
Součet	8481,2	28286,1	11090,5	36496	9785,8	32391,1

Tab. 6-11 Měsíční hodnoty vyrobené energie FV panely na Plzeňsku

Amorfní FV panely tedy za rok na Plzeňsku teoreticky vyrobí 8481,2 kWh, při ceně 2,60,- Kč za kWh a ceně jednoho panelu 3199,- Kč (287910,- Kč za všechny panely) je návratnost investice přibližně za 13 let a 1 měsíc.

HIT FV panely by za rok teoreticky vyrobily 11090,5 kWh, při ceně panelu 6669,- Kč (560196,- Kč za všechny panely) a opět ceně 2,60,- za kWh je návratnost investice přibližně za 19 let a 5 měsíců.

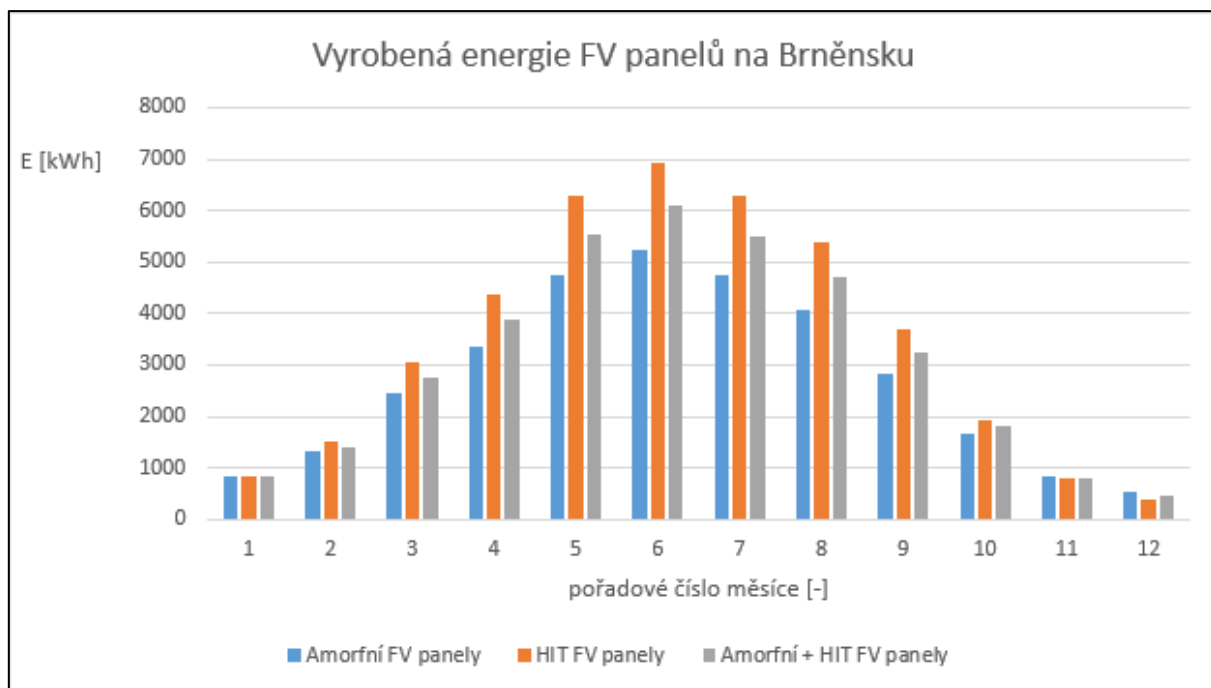
Kombinace FV panelů by vyrobila 9785,8 kWh při nákladech 424053,- Kč by se částka vrátila přibližně za 16 let a 8 měsíců.



Obr. 6-23 Měsíční sumy vyrobené energie FV panely na Brněnsku

I zde pro porovnání uvedu graf vyrobené energie FV panely bez faktorů ovlivňující jejich činnost.





Obr. 6-24 Měsíční sumy vyrobené energie FV panely na Brněnsku bez faktorů ovlivňujících jejich činnost

Pořadí měsíce [-]	Amorphní FV panely (s faktory ovlivňující činnost) [kWh]	Amorphní FV panely (bez faktorů ovlivňující činnost) [kWh]	HIT FV panely (s faktory ovlivňující činnost) [kWh]	HIT FV panely (bez faktorů ovlivňující činnost) [kWh]	Amorphní + HIT FV panely (s faktory ovlivňující činnost) [kWh]	Amorphní + HIT FV panely (bez faktorů ovlivňující činnost) [kWh]
1	116,3	832,5	115,7	831,6	116	832
2	273,3	1313,2	312,7	1506,4	293	1409,8
3	659,7	2436,3	830,4	3074,2	745	2755,2
4	1043,8	3373,2	1356,4	4387,4	1200,1	3880,3
5	1644,4	4762,4	2172,1	6285,3	1908,3	5523,9
6	1909,2	5242	2527,1	6925,3	2218,1	6083,6
7	1599,3	4755	2117,3	6278,8	1858,3	5516,9
8	1202,6	4066,1	1590,9	5368,3	1396,7	4717,2
9	721,6	2827,6	944	3693,8	832,8	3260,7
10	338,8	1663,1	392,7	1930,2	365,7	1796,7
11	112,7	828,3	110	809,7	111,3	819
12	60,3	538,8	43,6	391,1	51,9	464,9
Součet	9681,9	32638,6	12512,9	41482,1	11097,4	37060,4

Tab. 6-12 Měsíční hodnoty vyrobené energie FV panely na Brněnsku

Amorfní FV panely teoreticky vyrobí na Brněnsku o něco více než na Plzeňsku a to 9681,9 kWh, vstupní investice je stejná tedy 287910,- Kč při ceně 2,60 Kč/kWh bude návratnost investice za 11 let a 5 měsíců.

HIV FV panely by teoreticky vyrobily 12512,9 kWh za totožných nákladů jako na Plzeňsku by se vstupní investice vrátila přibližně za 17 let a 3 měsíce.

Kombinace FV panelů by vyrobila 11097,4 kWh s návratností 14 let a 9 měsíců.

Typ technologie	Amorfní FV panely	HIT FV panely	Amorfní + HIT FV panely
Vyrobená energie Plzeňsko [kWh]	8481,2	11090,5	9785,8
Návratnost - Plzeňsko [roky]	13,06	19,43	16,67
Vyrobená energie Brněnsko [kWh]	9681,9	12512,9	11097,4
Návratnost - Brněnsko [roky]	11,44	17,22	14,7

Tab. 6-13 Porovnání hodnot vyrobené energie a jejich návratnosti

## 7 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ NA MODELOVÉM VOZIDLE

Nejprve chci poděkovat vyučujícím Ing. Petru Sýkorovi a Ing. Tomáši Lelkovi Ph.D. za jejich pomoc při měření.

Měření probíhalo na experimentálním vozidle na úzkokolejně Mladějovské dráze. Na střeše jsou aktuálně 4 hybridní FV panely typu VBHN240SJ25 od firmy Panasonic zapojeny sérioparalelně. Panely jsou připojeny na baterii přes diodu, která brání toku proudu z baterie do panelů. Baterie je tvrdý zdroj napětí a jelikož jsou panely spojeny přímo s baterií, je napětí panelů určeno napětím baterie v závislosti na jízdním režimu. Měření proběhlo dne 11.5.2017 – byl téměř bezmračný den, tedy naprosto ideální pro měření.

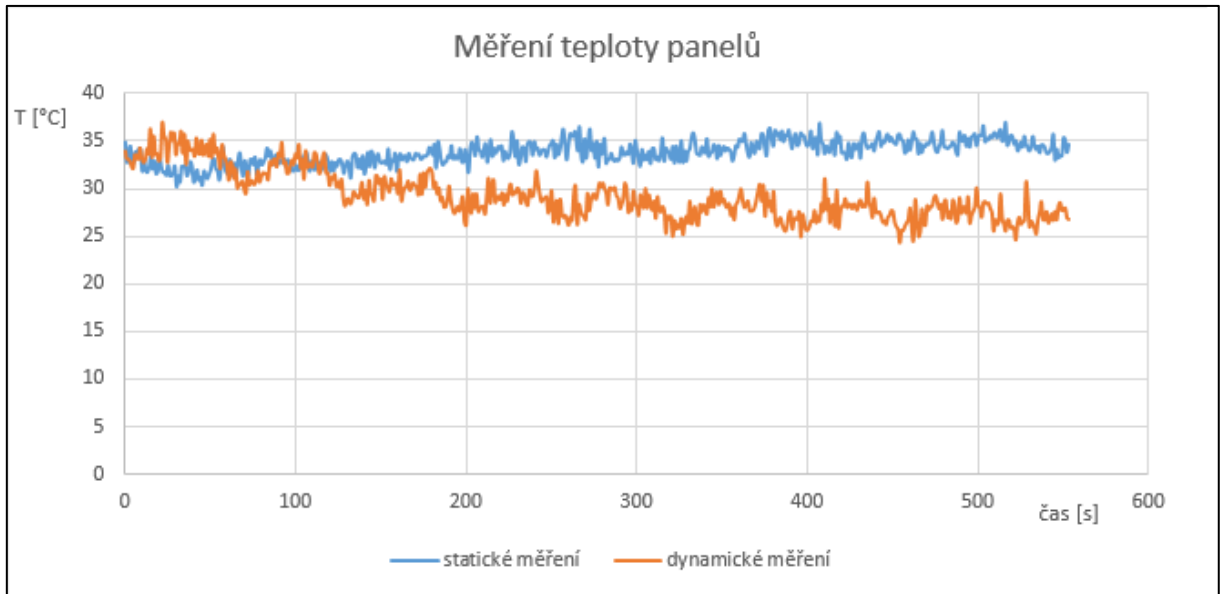
Hodnoty napětí a proudu jsou snímány čidly LEM s Halloovou sondou pracujícími na kompenzačním principu. Sběr, vyhodnocení a archivaci naměřených dat zajišťoval nadřazený řídicí systém vozidla Compact Rio NI. Výstupní soubory s naměřenými daty jsou ve formátu CSV, které je možné dále zpracovat v programu Microsoft Excel.



Obr. 7-1 Experimentální vozidlo na kterém probíhalo měření

Jako první jsme měřili teplotu panelů za jízdy a při stání - 10 min jsme stáli a měřili teplotu panelů, poté jsme 10 minut soustavně jezdili, aby byly panely chlazeny proudem vzduchu. Na obrázku níže (7-2) vidíme dva průběhy, modrý reprezentuje teplotu panelů měřenou na místě (tedy bez chlazení), hodnota pomalu roste. Oranžová reprezentuje teplotu panelů měřenou za jízdy, její hodnota pomalu klesá. Jednotlivé propady jsou způsobené tím, že

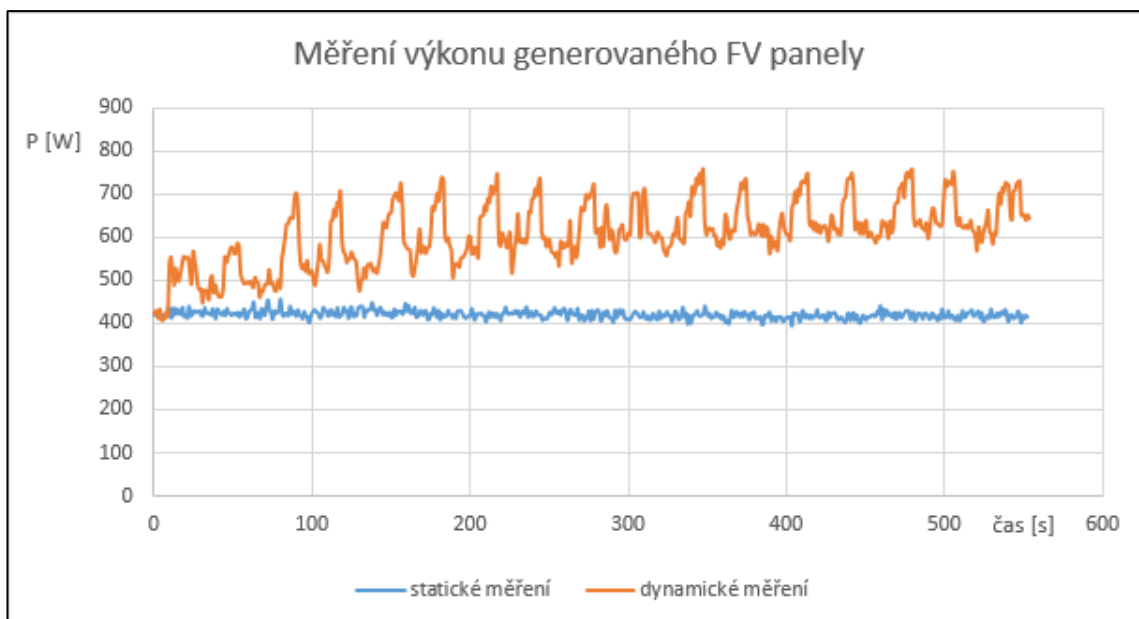
bylo náročné najít úsek bez stínu, proto jsme jezdili na poměrně krátkém úseku sem a tam, jde tedy o zastavení a následný rozjezd.



Obr. 7-2 Grafy měření teploty ve statickém nebo dynamickém stavu

Průměrná hodnota teploty panelů při statickém měření činí 34 °C, při dynamickém měření je to přibližně 29 °C. Dynamické měření probíhalo při rychlosti 20 km/h, dá se předpokládat, že s vyšší rychlostí by teplota panelů klesala nepřímo úměrně. Z grafů je vidět, že by bylo vhodné provést toto měření během delších časových intervalů.

Rozdíl teplot činí 5 °C, podle teplotního koeficientu, který činí 0,29 %/°C by měl výkon klesnout přibližně o 1,5 %. To si můžeme ověřit, protože během měření jsme zaznamenávali i hodnoty výkonu generované panely.

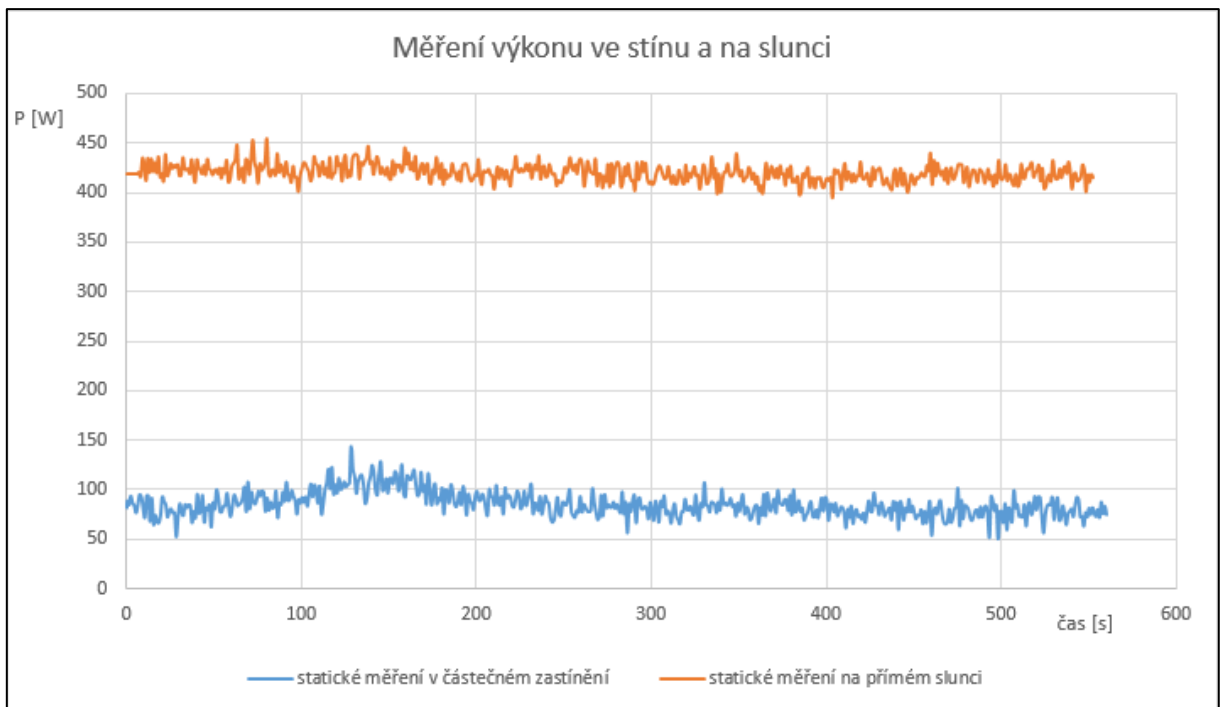


Obr. 7-3 Hodnoty výkonu během statického a dynamického měření

Už na první pohled je patrné, že rozdíl hodnot rozhodně není o 1,5 %. Průměrná hodnota výkonu během dynamického měření činí přibližně 605 W, ale během statického měření tato hodnota klesla na přibližně 420 W. To je pokles skoro o 30 %, i když teoreticky by měla klesnout o 1,5 %. Rozdíl intenzit záření během měření byl pouze  $40 \text{ W/m}^2$ , takže se ukazuje že teplota má daleko větší vliv, než výrobce udává.

Při rozjezdu napětí na baterii klesá, naopak při brždění napětí vzroste. Jelikož bylo dynamické měření prováděno na poměrně krátkém úseku a neustále jsme se rozjížděli a zastavovali předpokládám, že zvlnění výstupního výkonu je způsobeno právě kvůli tomuto faktu.

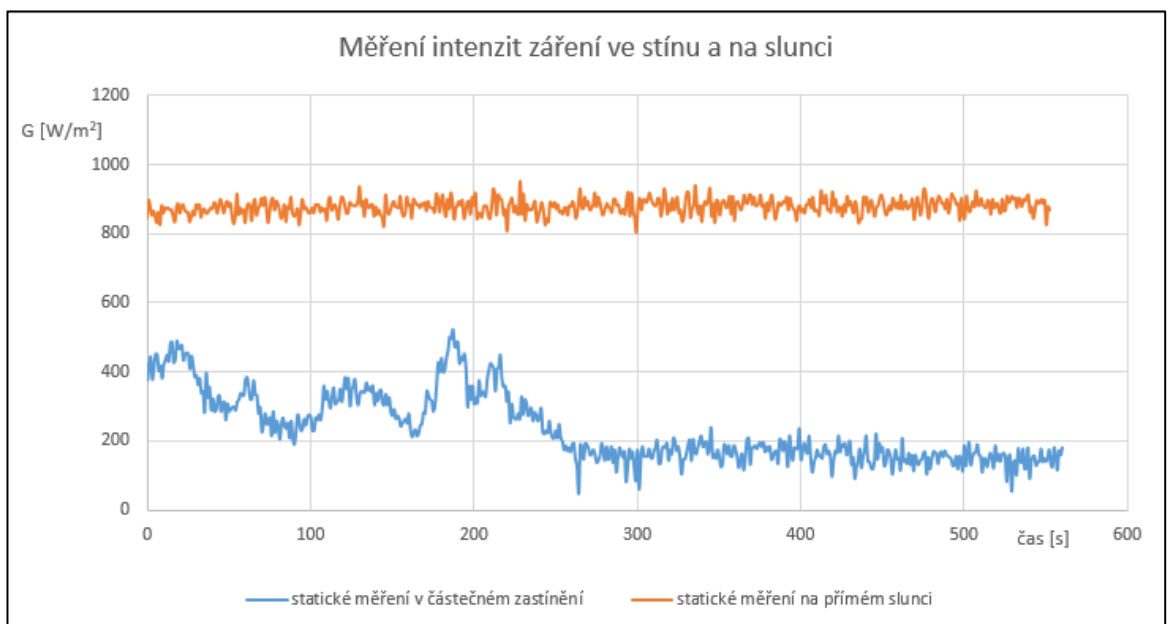
V dalším měření jsme na 10 minut zastavili v částečně zastíněném místě (větve stromů) a měřili jsme hodnoty výkonu a dopadajícího záření v porovnání s hodnotami při měření na slunci.



Obr. 7-4 Hodnoty výkonu na přímém slunci a v částečném zastínění

Průměrná hodnota výkonu generovaného FV panelu na přímém slunci byla 420 W, při částečném zastínění panelů klesla hodnota na 85 W, což je pokles přibližně o 80 %.

Jelikož je na experimentálním vozidle umístěn pyranometr, během měření jsme zaznamenávali také hodnoty intenzity dopadajícího záření. Průměrná hodnota intenzity záření na přímém slunci byla  $880 \text{ W/m}^2$ , v částečném zastínění pak  $237 \text{ W/m}^2$ .

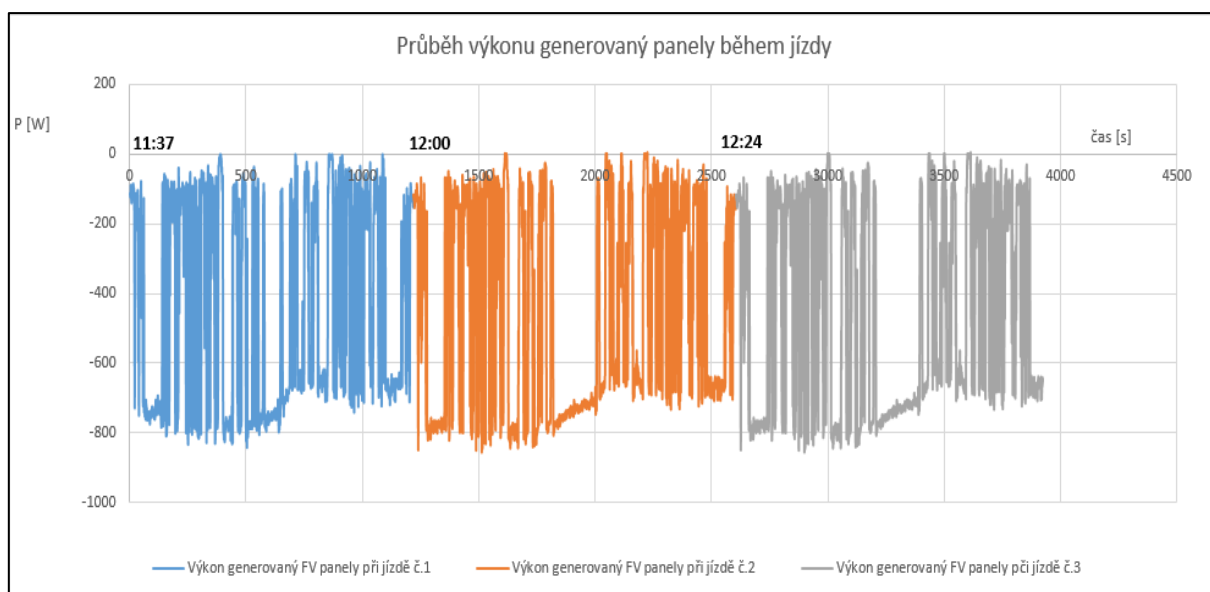


Obr. 7-5 Hodnoty intenzity záření na přímém slunci a v částečném zastínění

Z grafů je vidět, že stín má zásadní vliv na výrobu energie z panelů. Je poměrně složité určit, jak velká plocha panelů byla zastíněná, aby se dalo s jistotou určit, jak velký vliv zastínění má. Nicméně zkusil jsem zastínit jeden sloupec článků (šestina plochy) panelu a výkon klesl téměř na polovinu. Dá se předpokládat, že při polovičním a větším zastínění bude hodnota generovaného výkonu velice malá, téměř nulová.

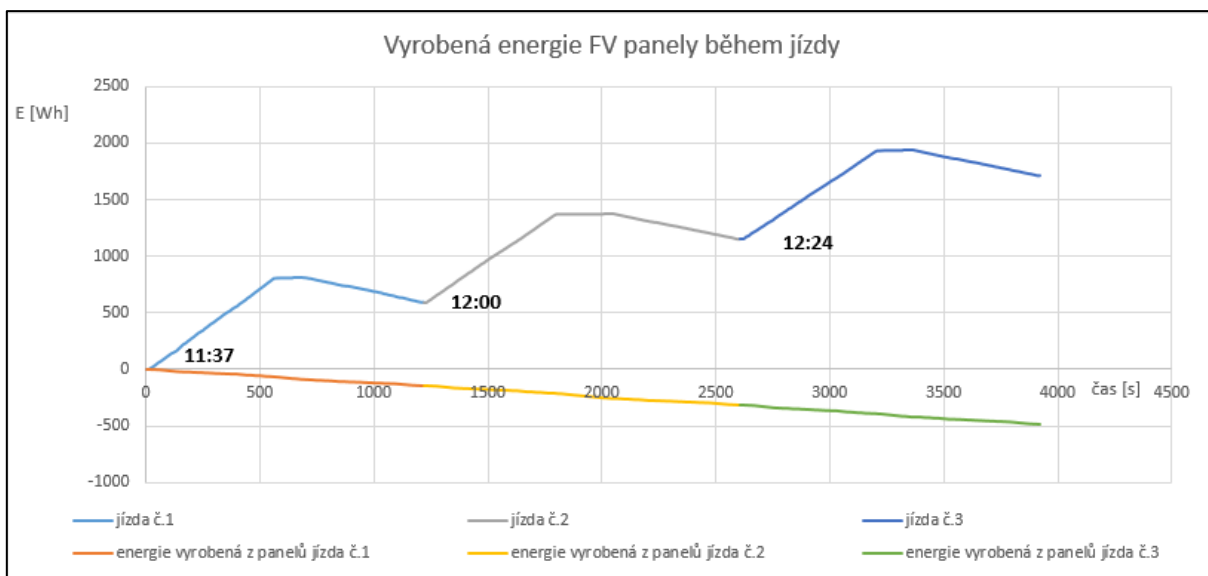
Při posledním měření jsme měřili kolik energie panel vyrobí z důvodu porovnání s teoretickými hodnotami určenými v předchozí kapitole. Měření jsme provedli třikrát a to na trase Mladějov na Moravě – Veksl a zpět.

Z hodnot intenzit záření a generovaného výkonu se dá přibližně odhadnout profil tratě. Tam, kde výkon neklesá k nule, je trať nezastíněná. Kde hodnoty kmitají, ale neklesnou k nule, bude trať jen minimálně zastíněná a tam, kde hodnoty klesají k nule půjde o velké zastínění.



Obr.7-6 Hodnoty výkonu generového FV panely během jízdy

Na slunci dosahují hodnoty výkonu přibližně 750 až 800 W, průměrná hodnota generovaného výkonu během všech jízd je přibližně 440 W. To znamená, že jeden panel generoval 110 W. Kdybychom použili všech 84 panelů, jak o tom uvažuji v teoretické části, generovaný výkon by byl 9,24 kW. Teplota panelů na konci měření byla 21,5 °C, čímž jsme v podstatě eliminovali vliv teploty panelů na generování výkonu.



Obr. 7-7 Vyrobená energie FV panely během jízdy

V grafu uvádím i celkovou spotřebu experimentálního vozidla. Jelikož jsme jeli konstantní rychlostí 20 km/h, spotřeba roste lineárně až do stanice Veksl. Zde jsme chvíli stáli (téměř vodorovná čára odebrané energie) a poté jsme jeli zpět do Mladějova. Trasa je z kopce, proto energie klesá – rekuperujeme a takto třikrát. Celková spotřeba jedné jízdy je přibližně 570 Wh, všech jízd potom 1709 Wh. Během jízdy panely přibližně vyrobily 160 Wh, celkem tedy 480 Wh.

Měření jsme prováděli od 11:37 do 12:46, tedy v době, kdy je intenzita slunce nejvyšší. Průměrná hodnota intenzity záření stoupla během měření na 900 W/m<sup>2</sup>. Sluneční paprsky dopadají na panely pod úhlem 60°, čili je nutné hodnotu intenzity vynásobit cosinem úhlu, kdy od 90° odečteme zmíněných 60°. Dostaneme hodnotu 780 W/m<sup>2</sup> - tento údaj je nutný vynásobit účinností panelů (19 %), plochou FV článků a koeficientem zastínění. Z důvodu možnosti porovnání výsledků použiji velikost plochy jako v teoretických výpočtech - tedy 105,9 m<sup>2</sup>. Hodnota výkonu je přibližně 7,8 kW bez vlivu teploty. Praktická hodnota je 9,24 kW. Z toho plyne, že jsem byl v teoretické části až příliš skeptický, koeficient zastínění by bylo nutné změnit. Na druhou stranu je tu i fakt, že uvedené měření bylo pouze za jízdy, nikoliv s pauzami na stání. Dále se během jízdy neprojevil vliv teploty. Řešením by bylo provést další měření na proměnlivých tratích a určitě zvýšit vliv teploty na generovaný výkon a trochu snížit vliv zastínění.



## ZÁVĚR

V první kapitole popisují uvažovanou jednotku, na kterou by panely měly být umístěny. Jde o dvouvozovou jednotku s hybridním pohonem typu trolej – akumulátor.

Poté popisují vlastnosti a zem dopadající sluneční energie, zde má z hlediska generované energie panelů největší vliv úhel dopadu a intenzita slunečního záření na osluněnou plochu. Ideální stav je dopad paprsků kolmo na články. Panely však musí být z důvodu omezujícího profilu vlaku umístěny vodorovně na střeše jednotky a vzhledem k lokaci České republiky je zaručení kolmosti dopadu nemožné. Na základě dlouhodobých měření vznikají mapy intenzity záření, ta pro ČR je zobrazena na obrázku číslo 2-19, nejefektivnější je tedy provozovat jednotku na jižní Moravě. Dalším problémem je proměnlivost intenzity záření během dne, měsíce a roku. Nejvyšších hodnot dosahuje v měsících květen, červen, červenec a srpen přibližně ve dvanáct hodin.

Třetí kapitola se zabývá jednotlivými typy fotovoltaických panelů a jejich parametry. Největší vliv na činnost panelů má jejich teplota, kdy s jejím růstem klesá produkovaná energie. Je poměrně složité určit, který typ panelu je nejvhodnější. Váhal jsem mezi monokrystalickými panely, kvůli jejich vysoké účinnosti, avšak s velkými pořizovacími náklady nebo amorfními panely z důvodu nízké ceny a hlavně díky jejich schopnosti vyrábět energii i při zatažené obloze. Proto jsem se rozhodl, že následující výpočty provedu pro oba typy a kombinaci obou. V závěru kapitoly porovnávám technické údaje aktuálně dostupných panelů s údaji pět let starými. Během těchto pěti let došlo k mírnému zlepšení, např. účinnosti jednotlivých technologií se v průměru zvedly o 3 %.

V další kapitole už znázorňuji průběhy trakční a vedlejší spotřeby jednotky na konkrétních tratích. Celkem jde o tři tratě, dvě na Plzeňsku a jednu na Brněnsku.

Následně už zmiňuji konkrétní dva typy FV panelů, s kterými budou provedeny teoretické výpočty. Nakonec jsem místo monokrystalického panelu zvolil hybridní panel, z důvodu toho, že je vlastněn univerzitou a budou na něm provedeny závěrečná měření. Na střechu se vejde 90 amorfních a 84 hybridních panelů. Na každém voze je polovina zmíněného počtu panelů připojena přes DC/DC měnič na trakční baterii. Ještě se zmiňuji o problematice zastínění části panelů a jejím vlivu na činnost panelů.

Z teoretických výpočtů vyplývá, kolik energie by jednotlivá zapojení vyrobila. Nejvíce energie vyrobí panely hybridní, ovšem jejich finanční návratnost je při ceně 2,60 Kč za kWh

19 let a 5 měsíců, na Plzeňsku a 17 let a 3 měsíce na Brněnsku. Amorfni panely mají návratnost za 13 let a jeden měsíc na Plzeňsku a 11 let a 5 měsíců na Brněnsku. Kombinace obou technologií má návratnost za 16 let a 8 měsíců na Plzeňsku a 14 let a 9 měsíců na Brněnsku. Z toho plyne, že v našich podmínkách bude vhodné zvolit panely amorfni. Jen pro představu: na trase Plzeň - Tachov by za jasného červnového dne amorfni panely pokryly 10 % vedlejších spotřeb všech šesti jízd za den, během jasných zářiových dní by to bylo přibližně 5 % a při jasných prosincových dní by to bylo pouhé jedno procento. Během polojasných dnů by tyto hodnoty klesly ještě na polovinu a při zatažených dnech jsme na hranici jednoho procenta během červnových dnů, během zimy je to přibližně 0,1 %. Na Brněnsku je situace o něco málo lepší, např. během jasných červnových dní by amorfni panely pokryly necelých 14 % vedlejších spotřeb.

Bohužel jsme měřili jen na hybridních panelech, amorfni ještě nejsou nainstalovány a připraveny k měření, nicméně naměřené hodnoty pro získání ucelenějšího pohledu na věc stačí. Ukázalo se, že vliv teploty panelů je daleko větší než výrobci udávají. Naopak při vlivu zastínění jsem byl až příliš skeptický a hodnota koeficientu zastínění by se mohla zvednout. Nicméně naměřené hodnoty se zas tolik neliší od těch teoreticky určených. Do budoucna by to chtělo zvětšit vliv teploty panelů na generovaný výkon a trochu snížit vliv zastínění. Dále by bylo vhodné provést další měření, která by více odpovídala reálně jízdě uvažované jednotky, tedy chvíli jet chvíli stát a ideálně na několika tratích, aby se přesněji projevil vliv teploty panelů.

Otázkou je, má-li vůbec smysl panely na jednotku dávat, když na první pohled vyrobí relativně málo energie. Dle mého názoru ano, protože v současné době je vzestupný trend výroby „zelené“ energie. Navíc střecha vlaku je nevyužitá plocha a při vstupních nákladech na jednotku si myslím, že cena za amorfni panely není tak zásadní. Časem se investice vrátí a panely budou moc dál vyrábět energii.

## SEZNAMY

### Seznam použité literatury

- [1] How does PV Cells Work. GUNAM [online]. 2016 [cit. 2016-12-04]. Dostupné z: <http://gunam.metu.edu.tr/old/index.php/solar-technology/pv-working-principles>
- [2] Polovodiče. SPŠE MOHELNICE [online]. [cit. 2016-12-04]. Dostupné z: <http://www.spsemoh.cz/vyuka/zel/pn.htm>
- [3] Elektrické vlastnosti pevných látek. Encyklopedie fyziky [online]. Praha [cit. 2016-12-04]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/773-elektricke-vlastnosti-pevnych-latek>
- [4] Solar Power: Technology and Economics. The Electropaedia Battery Knowledge Base [online]. [cit. 2016-12-04]. Dostupné z: [http://www.mpoweruk.com/solar\\_power.htm](http://www.mpoweruk.com/solar_power.htm)
- [5] Solar Cell Efficiency. PVEDUCATION [online]. [cit. 2016-12-11]. Dostupné z: <http://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-efficiency>
- [6] Solar panel. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-12-11]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_panel](https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_panel)
- [7] Nejpoužívanější pojmy ve fotovoltaice. Tzbinfo [online]. [cit. 2016-12-11]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/11772-nejpouzivanejsi-pojmy-ve-fotovoltaice>
- [8] ZPŮSOBY VYUŽITÍ SLUNCE A SLUNEČNÍHO ZÁŘENÍ [online]. Technická univerzita Ostrava, , 1-15 [cit. 2016-12-11]. Dostupné z: [http://rccv.vsb.cz/Island/docs/Zpusoby\\_vyuziti\\_slunecni\\_energie.pdf](http://rccv.vsb.cz/Island/docs/Zpusoby_vyuziti_slunecni_energie.pdf)
- [9] Solar Cells: Solar Cell Model & What Affects Solar Cell Performance & Efficiency [online]. [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <http://solarlove.org/solar-cell-model-and-its-characteristics/>
- [10] Solární (fotovoltaické) články. Skupina ČEZ [online]. [cit. 2016-12-18]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k32.htm>
- [11] Jak články zapojit? *Filutova dílna: Elektronika, vychytávky a další věci* [online]. [cit. 2016-12-18]. Dostupné z: <http://www.filutovadilna.cz/panely/jak-clanky-zapojit>
- [12] Solar Cell I-V Characteristic. *Alternative energy tutorials* [online]. [cit. 2016-12-18]. Dostupné z: <http://www.alternative-energy-tutorials.com/energy-articles/solar-cell-i-v-characteristic.html>
- [13] SOLÁRNÍ PANELE. *RD solar* [online]. [cit. 2016-12-18]. Dostupné z: <http://www.rdsolar.cz/sluzby/solarni-panely/>

- [14] CHOCHOLÁČ, Jan. *VYUŽITÍ BYPASSOVÝCH DIOD VE FOTOVOLTAICKÝCH PANELECH*. Brno, 2011. Diplomová práce. VUT Brno. Vedoucí práce Petr Křivík.
- [15] Types of Crystalline silicon cells. *Tindo solar* [online]. [cit. 2016-12-26]. Dostupné z: <http://www.tindosolar.com.au/learn-more/poly-vs-mono-crystalline/>
- [16] Monocrystalline silicon. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-12-26]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Monocrystalline\\_silicon](https://en.wikipedia.org/wiki/Monocrystalline_silicon)
- [17] Polycrystalline silicon. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-12-26]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Polycrystalline\\_silicon](https://en.wikipedia.org/wiki/Polycrystalline_silicon)
- [18] Thin-film solar cell. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-12-26]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Thin-film\\_solar\\_cell](https://en.wikipedia.org/wiki/Thin-film_solar_cell)
- [19] Sanyo HIT Solar Panels: high efficiency panels from an industry pioneer. *Solar choice* [online]. [cit. 2016-12-26]. Dostupné z: <http://www.solarchoice.net.au/blog/solar-panels-sanyo-hit-solar-panels-high-efficiency-panels-from-an-industry-pioneer/>
- [20] Concentrated Solar Photovoltaics. *Department of Physics Stanford University, Stanford, CA 94305* [online]. Stanford University, 2010 [cit. 2016-12-27]. Dostupné z: <http://large.stanford.edu/courses/2010/ph240/weisse2/>
- [21] Multi-junction solar cell. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-12-27]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Multi-junction\\_solar\\_cell](https://en.wikipedia.org/wiki/Multi-junction_solar_cell)
- [22] List of types of solar cells. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-12-27]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_types\\_of\\_solar\\_cells](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_types_of_solar_cells)
- [23] TICHÝ, Jaroslav. *Využití fotovoltaických článků k přímému napájení železničních vozidel*. Pardubice, 2011. Diplomová práce. Vedoucí práce Radovan Doleček.
- [24] VRTEK, Mojmir. *Sluneční energie*. Ostrava, 2012. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [25] *Sluneční energie*. Praha, 2016. ČVUT.
- [26] NOVÁK, Jaroslav. *Interní zpráva katedry KEEZ UPA: Motivace využití hybridních a akumulátorových pohonů v drážních vozidlech*. 2016.
- [27] MLYNAŘÍK, Ladislav. *Elektrická trakce I*. Pardubice, 2011. Studijní opora. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě.
- [28] MLYNAŘÍK, Ladislav. *Analýza dimenzování trakčního transformátoru dvouzdrojového vozidla: Elektrické části pohonů, hybridní pohony a rekuperace*. Plzeň, 2016.

- [29] DAŠEK, Petr. *VYUŽITÍ FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ K NEPŘÍMÉMU NAPÁJENÍ ŽELEZNIČNÍHO VOZIDLA*. Pardubice, 2011.
- [30] PAVELKA, Jiří, Zdeněk ČEŘOVSKÝ a Jiří LETTL. *Výkonová elektronika*. Vyd. 3., přeprac. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03626-6.
- [31] ROTACE ZEMĚ KOLEM OSY. *ZEMĚPISNÝ WEB DANIELA SVOBODY* [online]. Ostrava, 2007 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: [http://ostrava-educanet.cz/svoboda/vyuka/kvinta/pohyby\\_zeme.htm](http://ostrava-educanet.cz/svoboda/vyuka/kvinta/pohyby_zeme.htm)
- [32] Klimatické podmínky v ČR. *SolVent* [online]. 2015 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <https://www.sol-vent.cz/klimaticke-podminky-v-cr/>
- [33] Fotovoltaika v podmínkách České republiky. *Isofenenergy* [online]. [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <http://www.isofenenergy.cz/Slunceni-zareni-v-CR.aspx>
- [34] Meteorologické záznamy - rok 2016. *Meteorologická stanice Brno-Židenice* [online]. Brno, 2016 [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <http://www.meteo.jankovic.cz/zaznamy/rok-2016/>
- [35] V kolik se rozednívá a stmívá? *METEGRAM* [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.meteogram.cz/vychod-zapad-slunce/>
- [36] Měsíční klimatické charakteristiky 2016. *Počasi-VOLARY* [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://pocasi-volary.cz/velhartice/mkch.php?year=2016>
- [37] Klimatologické poměry. *Ministerstvo životního prostředí* [online]. 2015 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: [http://zlinsky.dppcr.cz/web\\_586013/toc416773323.htm](http://zlinsky.dppcr.cz/web_586013/toc416773323.htm)
- [38] Solar Cells. *PVRESOURCES* [online]. 2015 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.pvresources.com/en/solarcells/solarcells.php>

## Seznam tabulek

Tab. 1-1 Parametry elektrické trakční jednotky [26] .....	16
Tab. 2-1 Běžné součinitele zákalu atmosféry v průběhu roku [24] .....	30
Tab. 2-2 Charakteristické dny v měsíci [24].....	33
Tab. 3-1 Porovnání parametrů vybraných fotovoltaických panelů v roce 2011 na základě zkoušek při STC (tabulka zpracována na základě údajů společností Sunpower, Yingli Solar, Emcore, Sanyo a First Solar) [23].....	54
Tab. 3-2 Porovnání parametrů vybraných aktuálních fotovoltaických panelů na základě zkoušek při STC (tabulka zpracována na základě údajů společností Sunpower, Phono Solar, AZURSPACE, Panasonic a First Solar).....	55
Tab. 4-1 Orientační hodnoty součinitele rotujících hmot [27] .....	65
Tab. 5-1 Parametry amorfních FV panelů vlastníci univerzitou.....	70
Tab. 5-2 Parametry hybridních FV panelů vlastníci univerzitou.....	71
Tab. 6-1 Hodnoty energií vyrobených FV panely za jasných dnů na Plzeňsku .....	83
Tab. 6-2 Hodnoty energií vyrobených FV panely během polojasných dnů .....	84
Tab. 6-3 Hodnoty energií vyrobených FV panely během polojasných dnů .....	85
Tab. 6-4 Hodnoty energií vyrobených FV panely za jasných dnů na Plzeňsku .....	86
Tab. 6-5 Hodnoty energií vyrobených FV panely během polojasných dnů na Plzeňsku .....	87
Tab. 6-6 Hodnoty energií vyrobených FV panely během zatažených dnů na Plzeňsku .....	88
Tab. 6-7 Hodnoty energií vyrobených FV panely během jasných dnů na Brněnsku .....	91
Tab. 6-8 Hodnoty energií vyrobených FV panely během polojasných dnů na Brněnsku.....	92
Tab. 6-9 Hodnoty energií vyrobených FV panely během zatažených dnů na Brněnsku .....	93
Tab. 6-10 Průměrné měsíční doby slunečního svitu v ČR .....	94
Tab. 6-11 Měsíční hodnoty vyrobené energie FV panely na Plzeňsku.....	95
Tab. 6-12 Měsíční hodnoty vyrobené energie FV panely na Brněnsku .....	97
Tab. 6-13 Porovnání hodnot vyrobené energie a jejich návratnosti.....	98

## Seznam obrázků

Obr. 1-1. Struktura hybridního pohonu s elektrickými zásobníky energie u vozidla závislé, resp. polozávislé trakce [26] .....	12
Obr. 1-2. Struktura hybridního pohonu s elektrickými zásobníky energie u vozidla nezávislé trakce [26].....	12
Obr. 1-3. Příklad struktury hybridního pohonu s elektrickými zásobníky energie a alternativním zdrojem – palivovým článkem, [26] .....	13
Obr. 1-4 Navržená a analyzovaná struktura elektrické výzbroje pro jednotku pro regionální osobní dopravu s kombinovaným napájením z troleje a z akumulátoru [26].....	14
Obr. 1-5 Přibližná koncepce elektrické dvouzdrojové jednotky.....	15
Obr. 2-1 Elektromagnetické spektrum se zvýrazněním viditelné oblasti [24] .....	17
Obr. 2-2 Intenzita spektrálního vyzařování černého tělesa při různých absolutních teplotách [24] .....	19
Obr. 2-3 Znárodnění intenzity spektrálního vyzařování černého tělesa blízkého Slunci (6000 K) [24] .....	21
Obr. 2-4 Znárodnění kulových ploch pro energetickou bilanci vyzařování slunečního záření do okolního prostoru [24].....	21
Obr. 2-5 Eliptický pohyb Země okolo Slunce [24].....	23
Obr. 2-6 Relativní změna solární konstanty v průběhu roku [24] .....	23
Obr. 2-7 Naznačení změn tloušťky atmosféry, kterou musí projít sluneční záření před dopadem na zemský povrch [24] .....	24
Obr. 2-8 Výška Slunce nad obzorem a zenitový úhel [24].....	26
Obr. 2-9 Označení referenčních spekter pro různé pozice Slunce na obloze zadané zenitovým úhlem [24].....	26
Obr. 2-10 Spektrum AM0, AM1.5 a černého tělesa 5780 K [24].....	27
Obr. 2-11 Vstup slunečního záření do atmosféry [24] .....	28
Obr. 2-12 Znárodnění jednotlivých typů záření [25].....	29
Obr. 2-13 Úhel dopadu slunečních paprsků na obecně položenou plochu [24] .....	30
Obr. 2-14 Příklad průběhu intenzity během bezoblačného dne [24] .....	31
Obr. 2-15 Příklad skutečných průběhů celkové intenzity záření [24].....	32
Obr. 2-16 Ukázka proměnlivosti celkové intenzity záření v průběhu dne [24].....	32
Obr. 2-17 Porovnání průběhu teoretické intenzity a skutečně naměřeného průběhu [24] .....	34

Obr. 2-18 Průběh ročního globálního záření a doby slunečního svitu pro Hradec Králové za období 1951 – 2004 [24] .....	34
Obr. 2-19 Roční sumy globálního záření v ČR [24] .....	35
Obr. 2-20 Roční sumy globálního záření pro Evropu [24].....	35
Obr. 3-1 struktura krystalu křemíku [1] .....	37
Obr. 3-2 Struktura polovodiče typu P [1] .....	38
Obr. 3-3 Struktura polovodiče typu N [1] .....	38
Obr. 3-4 Struktura polovodiče [2].....	38
Obr. 3-5 Princip fotovoltaického článku [1].....	39
Obr. 3-6 Pásový model polovodiče [3].....	39
Obr. 3-7 Spektrum světelného záření [4].....	40
Obr. 3-8 ukázka spekter záření AM1.5 a AM0 [8] .....	41
Obr. 3-9 VA charakteristika solárního článku [7].....	42
Obr. 3-10 Výkonová charakteristika fotovoltaického článku [38] .....	44
Obr. 3-11 Grafické znázornění činitele plnění FF [5].....	45
Obr. 3-12 Spojování fotovoltaických článků [10].....	46
Obr. 3-13 Sériové spojení článků [11] .....	47
Obr. 3-14 Paralelní spojení článků [11] .....	47
Obr. 3-15 VA charakteristika paralelně a sériově zapojených článků [12].....	48
Obr. 3-16 Struktura fotovoltaického panelu [13].....	49
Obr. 3-17 Křemíkový ingot [16].....	50
Obr. 3-18 Monokrystalický křemíkový článek [15].....	50
Obr. 3-19 Polykrystalický křemíkový článek [15].....	51
Obr. 3-20 Tenkovrstvý solární panel [18] .....	52
Obr. 3-21 Struktura HIT článku [19].....	52
Obr. 3-22 Principiální struktura třívrstvého článku [20].....	53
Obr. 3-23 Grafické porovnání parametrů vybraných FV panelů z roku 2011.....	56
Obr. 3-24 Grafické porovnání parametrů vybraných FV panelů roku 2016 .....	57
Obr. 4-1 Vznik valivého odporu [27].....	59
Obr. 4-2 Podstata vzniku odporu z tření v ložiskách [27] .....	60
Obr. 4-3 Příklady vlivu tvaru skříně na hodnotu součinitele tvaru čela [27] .....	62
Obr. 4-4 Měrný odpor ze stoupání [27].....	63
Obr. 4-5 Grafické znázornění jízdních režimů .....	65
Obr. 4-6 Trakční spotřeba na trati Plzeň - Tachov.....	66



Obr. 4-7 Graf porovnání spotřeb na trati Plzeň - Tachov .....	67
Obr. 4-8 Trakční spotřeba na trati Plzeň - Bezručice .....	67
Obr. 4-9 Graf porovnání spotřeb na trati Plzeň - Bezručice .....	68
Obr. 4-10 Trakční spotřeba na trati Brno - Třebíč .....	68
Obr. 4-11 Graf porovnání spotřeb na trati Brno – Třebíč.....	69
Obr. 5.1 Přibližné znázornění rozmístění amorfních panelů na střeše jednotky .....	71
Obr. 5-2 VA charakteristika při celém ozáření panelu a při velkém zakrytí panelu [29] .....	72
Obr. 5-3 Obvodové zapojení amorfních panelů.....	73
Obr. 5-4 Přibližná struktura elektrické výzbroje s přidanými FV panely .....	73
Obr. 5-5 Principiální schéma zvyšujícího DC/DC měniče .....	74
Obr. 5-6 Přibližné znázornění rozmístění hybridních panelů na střeše jednotky .....	75
Obr. 5-7 Obvodové zapojení hybridních panelů.....	75
Obr. 6-1 Pohyb slunce v našich podmínkách [31] .....	77
Obr. 6-2 Vliv orientace a sklonu FV panelů na jejich výkon [32].....	77
Obr. 6-3 Orientační hodnoty intenzit záření na Brněnsku a Plzeňsku .....	79
Obr. 6-4 Úhel dopadu slunečního záření na osluněnou plochu .....	80
Obr. 6-5 Teoretický výkon generovaný FV panely za jasného dne na Plzeňsku .....	80
Obr. 6-6 Teoretický výkon generovaný FV panely za polojasného dne na Plzeňsku.....	81
Obr. 6-7 Teoretický výkon generovaný FV panely za zataženého dne na Plzeňsku .....	81
Obr. 6-8 Princip obdélníkové integrační metody.....	82
Obr. 6-9 Vyrobená energie FV panely za během dne na Plzeňsku.....	83
Obr. 6-10 Vyrobená energie FV panely během polojasného dne na Plzeňsku.....	84
Obr. 6-11 Vyrobená energie FV panely během zataženého dne na Plzeňsku .....	85
Obr. 6-12 Vyrobená energie FV panely během jasného dne na Plzeňsku .....	86
Obr. 6-13 Vyrobená energie FV panely během polojasného dne na Plzeňsku.....	87
Obr. 6-14 Vyrobená energie FV panely během zataženého dne na Plzeňsku .....	88
Obr. 6-15 Teoretický výkon generovaný FV panely během jasného dne na Brněnsku .....	89
Obr. 6-16 Teoretický výkon generovaný FV panely během polojasného dne na Brněnsku ....	89
Obr. 6-17 Teoretický výkon generovaný FV panely během zataženého dne na Brněnsku .....	90
Obr. 6-18 Vyrobená energie FV panely během jasného dne na Brněnsku .....	91
Obr. 6-19 Vyrobená energie FV panely během polojasného dne na Brněnsku.....	92
Obr. 6-20 Vyrobená energie FV panely během zataženého dne na Brněnsku .....	93
Obr. 6-21 Měsíční sumy vyrobené energie FV panely na Plzeňsku .....	94

Obr. 6-22 Měsíční sumy vyrobené energie FV panely na Plzeňsku bez faktorů ovlivňující jejich činnost.....	95
Obr. 6-23 Měsíční sumy vyrobené energie FV panely na Brněnsku .....	96
Obr. 6-24 Měsíční sumy vyrobené energie FV panely na Brněnsku bez faktorů ovlivňující jejich činnost.....	97
Obr. 7-1 Experimentální vozidlo na kterém probíhalo měření .....	99
Obr. 7-2 Grafy měření teploty ve statickém nebo dynamickém stavu .....	100
Obr. 7-3 Hodnoty výkonu během statického a dynamického měření .....	101
Obr. 7-4 Hodnoty výkonu na přímém slunci a v částečném zastínění .....	102
Obr. 7-5 Hodnoty intenzity záření na přímém slunci a v částečném zastínění.....	102
Obr. 7-6 Hodnoty výkonu generového FV panely během jízd.....	103
Obr. 7-7 Vyrobená energie FV panely během jízd .....	104

## Seznam zkratk

FF	- fill factor (činitel plnění)
VA	- voltampérová
FV	- fotovoltaický
MPP	- Maximum Power Point (bod maximálního výkonu)
AM	- air mass (optická tloušťka)
DC	- direct current (stejnoseměrný proud)
AC	- alternating current (střídavý proud)
ČR	- Česká republika
ČHMÚ	- Český hydrometeorologický ústav
NOCT	- Nominal Operating Cell Temperature (teplota článků za nominálních provozních podmínek)

## Seznam symbolů

V	- volt
E	- energie
eV	- elektron volt
m	- metr
P [W]	- výkon
E [Wm <sup>-2</sup> ]	- intenzita záření
S [m <sup>2</sup> ]	- plocha
I <sub>SC</sub> [A]	- maximální proud panelu
I <sub>MPP</sub> [A]	- proud při jmenovitém výkonu panelu
U <sub>OC</sub> [V]	- napětí na fotovoltaickém panelu bez připojené zátěže
U <sub>MPP</sub> [V]	- napětí při jmenovitém výkonu panelu
°C	- stupeň Celsiův
%/°C	- pokles teploty při změně o jedno procento
%/mA	- pokles proudu při změně o jedno procento
W	- watt
%	- procento
K	- kelvin
kg	- kilogram
G <sub>SC</sub>	- sluneční konstanta
W/m <sup>2</sup>	- watt na metr čtvereční
r <sub>AU</sub>	- střední vzdálenost Země od slunce
W <sub>b</sub>	- vyzařovaný výkon
σ	- Stefan-Boltzmanova konstanta
λ	- vlnová délka záření
T	- absolutní teplota
h	- Plankova konstanta
c	- rychlost světla
G <sub>T</sub>	- celkové záření
G <sub>B</sub>	- přímé záření
G <sub>D</sub>	- difúzní záření
G <sub>R</sub>	- odražené záření
E <sub>S</sub>	- denní množství energie
t	- tuna
km/h	- kilometr za hodinu
kWh	- kilowatthodiny
Hz	- hertz

## Seznam příloh

Příloha č.1 Porovnání účinností různých technologií solárních panelů [6 .....	116
---	-----

# PŘÍLOHY

Príloha č.1 Porovnání účinností různých technologií solárních panelů [6]

