

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroenergetiky

**Napájení PZZ z fotovoltaických panelů**  
Photovoltaic Panels Power Supply for the Crossing Safety Devices

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroenergetiky

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jan Fulneček**  
Studijní program: N2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika  
Téma: **Napájení PZZ z fotovoltaických panelů**  
**Photovoltaic Panels Power Supply for the Crossing Safety Devices**

Zásady pro vypracování:

1. Výkonová bilance PZZ a možnosti napájení fotovoltaickými panely.
2. Vyhodnocení zkušebního provozu PZZ-RE Humpolec.
3. Návrh napájení PZZ-JLC fotovoltaickými panely.

Seznam doporučené odborné literatury:

GRIGSBY, L. L.: Electric Power Generation, Transmission, and Distribution. Third edition. CRC Press, 2012. ISBN 978-1-4398-5628-4


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Dr. Ing. Věslav Mach**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014



  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
vedoucí katedry

  
\_\_\_\_\_  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 7.5.2014

Rád bych poděkoval panu Věslavu Machovi a Přemyslu Šolcovi za cenné rady, které mi poskytli.

## **Abstrakt:**

Tato práce se zabývá problematikou napájení přejezdových zabezpečovacích zařízení fotovoltaickými panely. Za tímto účelem byla vypočtena spotřeba nejběžnějších přejezdových zabezpečovacích zařízení na našem území a vyhodnoceny možnosti jejich napájení. Rovněž byla zpracována data z dlouhodobého měření na zkušebním přejezdu, napájeném fotovoltaickými panely. Na základě tohoto měření byl navržen zdroj pro přejezdové zabezpečovací zařízení typu JLC z produkce firmy AŽD Praha.

## **Abstract:**

This thesis deals with the problems of power supplies for the crossing safety devices, provided by photovoltaic panels. For this purpose, the consumption of the most common crossing safety devices in the Czech Republic was calculated. The data from long-term measurement of the test crossing, fed by photovoltaic panels, was also processed. Based on this measurement, a power source for crossing safety device type JLC (production of AŽD Praha company) was designed.

## **Klíčová slova:**

přejezdové zabezpečovací zařízení, fotovoltaický panel, odstranění sněhu, CIGS, ochrana před krádeží

## **Key words:**

Crossing Safety Device, Photovoltaic Panel, Snow Downfall Elimination, CIGS, Protection against Theft

## POUŽITÉ SYMBOLY A ZKRATKY

---

$C$	kapacita akumulátoru (A·h)
$W$	spotřeba (kWh)
$E_z$	intenzita záření (kW·m <sup>-2</sup> )
$E_\beta$	intenzita záření v rovině úhlu $\beta$ (kW·m <sup>-2</sup> )
$H$	katalogová hodnota vybíjecího proudu (A)
$I$	proud (A)
$I_k$	proud FV panelů nakrátko (A)
$I_s$	proud FV panelu (A)
$P$	příkon (W)
$\Delta P_{rk}$	ztráty na kabelech a regulátoru (Wh)
$P_p$	pohotovostní příkon (W)
$P_v$	příkon během výstrahy (W)
$P_{wp}$	špičkový výkon (W)
$P_{\dot{z}}$	příkon žárovky (W)
$Q_a$	akumulované teplo (J)
$Q_d$	úhrnná energie difúzního záření (kWh·m <sup>-2</sup> )
$Q_o$	spotřeba tepla při ohřevu (J)
$Q_p$	teplo předané do okolí (J)
$Q_s$	úhrnná sluneční energie (kWh·m <sup>-2</sup> )
$Q_{Steor}$	teoretická úhrnná sluneční energie (kWh·m <sup>-2</sup> )
$R_t$	tepelný odpor ( $\Omega$ )
$T_{ko}$	poměrná doba zashuntování kolejového bovodu
$U$	napětí (V)
$U_{bat}$	napětí baterie (V)
$U_s$	napětí FV panelu (V)
$U_z$	napětí FV panelu při ohřevu (V)
$U_{\dot{z}}$	napětí žárovky (V)
$W_{se}$	specifický energetický výnos (Wh·měsíc <sup>-1</sup> ·Wp <sup>-1</sup> )

$i$	číslo vzorku
$i_s$	okamžitý proud FV panelu (A)
$k_i$	koeficient instalovaného výkonu (%)
$n$	počet souprav
$n_{ASE}$	počet jednotek ASE
$n_{ko}$	počet kolejových obvodů 75 Hz
$\Delta p_{rk}$	okamžité ztráty na kabelech a regulátoru (W)
$q$	hustota tepelného toku ( $W \cdot m^2$ )
$s$	plocha FV panelů ( $m^2$ )
$t$	čas (h)
$t_z$	doba zvedání břevna (s)

$\alpha$	součinitel přestupu tepla ( $W \cdot m^2 \cdot K^{-1}$ )
$\beta$	úhel dopadu paprsků ( $^\circ$ )
$\eta$	účinnost řetězce regulátor – baterie (-)
$\eta_c$	celková účinnost (%)
$\eta_p$	účinnost FV panelu (%)
$\vartheta$	teplota ( $^\circ C$ )
$\lambda$	součinitel tepelné vodivosti ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )
$\tau$	poměrná doba slunečního svitu (-)
$\tau_{skut}$	skutečná doba svitu (h)
$\tau_{teor}$	teoretická doba svitu (h)
$\tau_v$	doba výstrahy (min)

ASE	anulační soubor elektronický
FV	fotovoltaický
JOP	jednotné obslužné pracoviště
PVGIS	photovoltaic geographical information system
PZZ	přejezdové zabezpečovací zařízení
SZZ	staniční zabezpečovací zařízení

# OBSAH

---

Úvod.....	1
1 Výkonová bilance PZZ a možnosti jejich napájení FV panely.....	2
1.1 Řídicí jednotky PZZ .....	2
1.2 Periferie PZZ.....	4
1.3 Typy FV panelů.....	7
1.4 Obecné dimenzování výkonu FV panelů .....	8
1.4.1 Vliv sklonu a orientace na výkon panelů.....	8
1.4.2 Určení úhrnné sluneční energie .....	9
1.4.3 Databáze fotovoltaických systémů (PVGIS).....	9
1.4.4 Dimenzování aplikace pro ostrovní režim .....	10
1.5 Přibližné určení potřebného výkonu FV panelů pro stávající PZZ.....	11
1.5.1 Určení spotřeby vybraných částí PZZ.....	12
1.5.2 Potřebný instalovaný výkon FV panelů.....	14
2 Vyhodnocení zkušebního provozu PZZ-RE Humpolec .....	15
2.1 Dlouhodobé měření.....	17
2.2 Srovnání naměřených a projektovaných hodnot.....	20
2.3 Zhodnocení .....	21
3 Návrh napájení PZZ-JLC FV panely .....	22
3.1 Určení spotřeby PZZ JLC .....	25
3.2 Potřebný výkon zdrojů.....	26
3.3 Dimenzování výkonu FV panelů.....	27
3.4 Dimenzování baterií.....	27
3.5 Odstranění sněhu.....	29
3.6 Ochrana před odcizením panelů.....	34
3.7 Vlastní provedení zdrojů .....	35
Závěr .....	41
Použitá literatura .....	42
Seznam obrázků .....	43
Seznam tabulek.....	44

## ÚVOD

---

Přejezdové zabezpečovací zařízení slouží k zabezpečení úrovněho křížení pozemní komunikace s železniční tratí. Jedná se tedy o soubor technických zařízení, které zajišťují bezpečnost silničního i železničního provozu. Úkolem PZZ je varovat účastníky silničního provozu před blížícím se železničním vozidlem. Podle druhu výstrahy pak tato zařízení dělíme na mechanická a světelná (ta bývají často doplněna o další prvky – tzv. doplňková výstraha, nebo také kombinovaná PZZ). Dle umístění je lze dále dělit na staniční (jsou ovládána staničním zabezpečovačem) nebo traťová.

Každé PZZ se v závislosti na svém provedení, umístění a funkci může skládat z těchto částí:

- **Výstražník**  
Obstarává světelnou a také zvukovou signalizaci, která informuje účastníky silničního provozu o blížícím se železničním vozidle. Pokud není výstražník doplněn mechanickou zábranou, trvá zvuková signalizace po celou dobu výstrahy. V případě automatického ovládní PZZ je výstražník doplněn o tzv. pozitivní signalizaci (bílé přerušované světlo), které signalizuje neobsazenost daného úseku tratě.
- **Přejezdník**  
Jedná se o stožárové návěstidlo u tratě, které světelnou signalizací informuje strojvedoucího o stavu PZZ. V případě činnosti PZZ (výstraha) svítí bílé světlo. Pokud je PZZ v nouzovém stavu světlo přerušovaně bliká. V případě poruchového stavu PZZ světlo nesvítí.
- **Závora**  
Mechanická zábrana, která je při aktivaci PZZ spuštěna do průjezdného prostoru.
- **Prostředky detekce železničního vozidla**  
Slouží ke zjištění přítomnosti železničního vozidla na daném úseku tratě, čímž uvedou do chodu činnost PZZ. V současnosti se využívá celá řada způsobů detekce, jež se dále dělí na liniovou ("klasické" kolejové obvody) a bodovou detekci (nejčastěji počítač náprav). Ovládní může být také řízeno pomocí staničního zabezpečovacího zařízení (SZZ).
- **Řídicí systém**  
V moderních PZZ se z důvodu bezpečnosti vstupní informace zpracovávají dvěma nezávislými programovými bloky (v přímém a inverzním tvaru). Řídicí systém je tvořen pomocí relé, polovodičů, případně kombinací obojího. Bývá umístěn v reléovém domku či reléové skříni, případně ve stavědlové ústředně.
- **Napájecí zdroj**  
Napájecí zdroj se skládá z jištění, nabíječe a akumulátorových baterií. Tyto baterie mohou být umístěny v tzv. bateriové studně. Volba nabíječe určuje maximální příkon zařízení. Kapacita baterie je stanovena normou ČSN 34 2650 ed.2 na dobu 8 hodin napájení PZZ v případě výpadku napájení z veřejné sítě.

Cílem této diplomové práce je vyhodnotit možnosti napájení PZZ fotovoltaickými panely a vytvořit návrh pro zdroj PZZ typu JLC z produkce firmy AŽD Praha. Napájení solární energií se může uplatnit zejména v lokalitách, kde není k dispozici trakční napájení ani distribuční přípojka nízkého napětí. V takovém případě je totiž nutné vést napájecí kabely na velké vzdálenosti, což je nákladné (kabelové trasy jsou navíc častým terčem zlodějů).



# 1 VÝKONNOVÁ BILANCE PZZ A MOŽNOSTI JEJICH NAPÁJENÍ FV PANELY

Výkonová bilance PZZ závisí na jeho konkrétní konfiguraci. V případě ostrovního režimu je proto nutné volit konfiguraci co nejlépe. Pro tyto účely se nejvíce hodí výstražníky a přejezdny, osazené LED a přejezdy, u kterých není nutná závora. Velkou roli hraje také okolní vegetace.

## 1.1 ŘÍDICÍ JEDNOTKY PZZ

První elektricky ovládané PZZ měly řídicí jednotky realizované výhradně za pomoci relé. Postupem času docházelo k náhradě některých mechanických prvků prvky elektronickými (zejména časovače – např. typ RE). Řídicí jednotky moderních PZZ jsou realizovány výhradně elektronicky (např. typ JLC), na území ČR však nejsou časté.

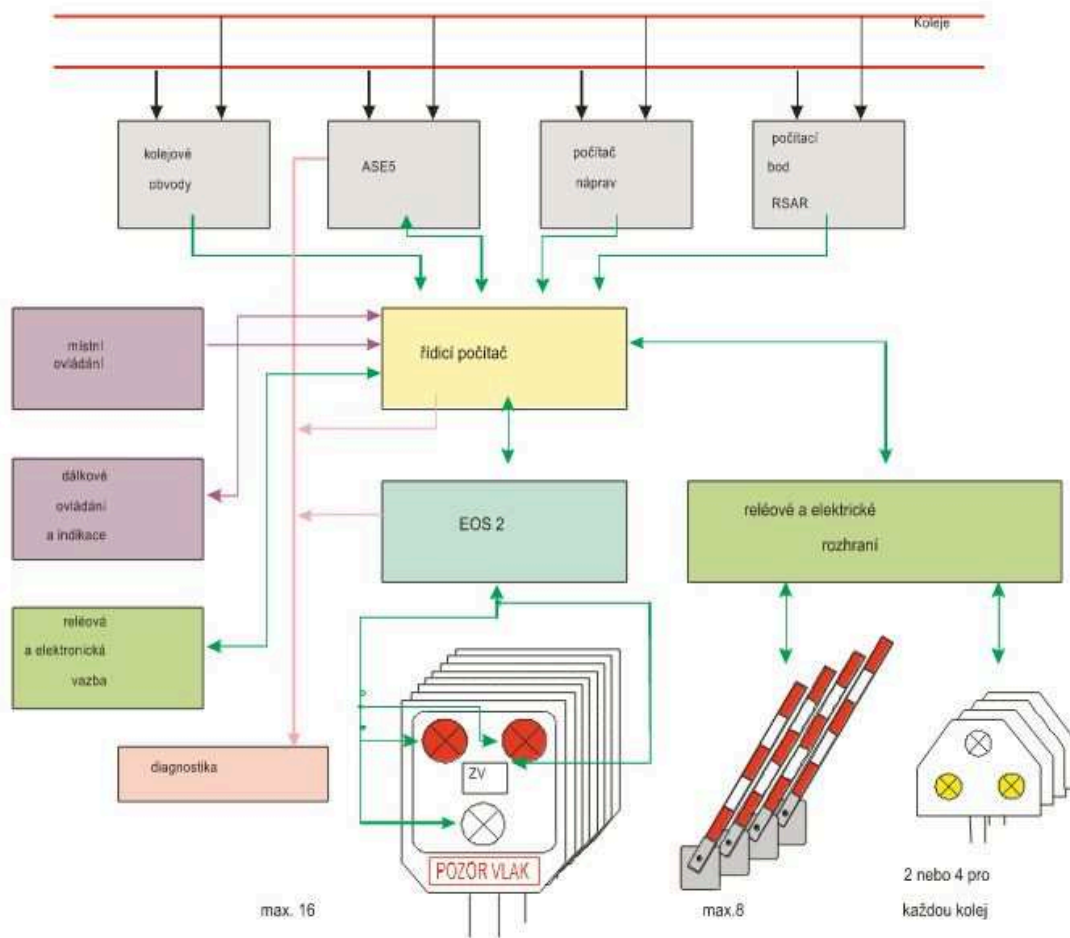
V současnosti se v nabídce firmy vyskytuje hned několik PZZ, ze kterých jsem vybral několik v ČR nejběžnějších. V následujícím textu bylo čerpáno z (1).

### PZZ-EPA:

Jedná se o elektronické PZZ určené pro jedno a dvojkolejně tratě, umožňující přenos informací do nadřazeného systému. Tento PZZ dokáže ovládat až 8 závor a 16 výstražníků. Je vybaven systémem EOS2, jenž umožňuje elektronické ovládání a dohled nad světly výstražníků. Rovněž je zde možnost dálkového ovládání v případě poruchy detekce železničního vozidla. Zapojení jednotlivých prvků vyobrazuje následující blokové schéma.

TABULKA 1: VYBRANÉ PARAMETRY PZZ-EPA

Jmenovité napájecí napětí	230 V/50 Hz	
Rozsah napájecího napětí	195,5 – 253 V	
Provozní příkon (bez vnějších prvků a dobíječe)	150 W	
Řídicí počítač a pomocné prvky	Jmenovité napájecí napětí	24 V DC
	Rozsah napájecího napětí	18 – 36 V
	Příkon (maximální sestava)	50 W
EOS2	Jmenovité napájecí napětí	24 V DC
	Rozsah napájecího napětí	14 – 36 V
	Příkon řídicí části	20 W
	Max. příkon žárovek jednoho výstražníku	30 W



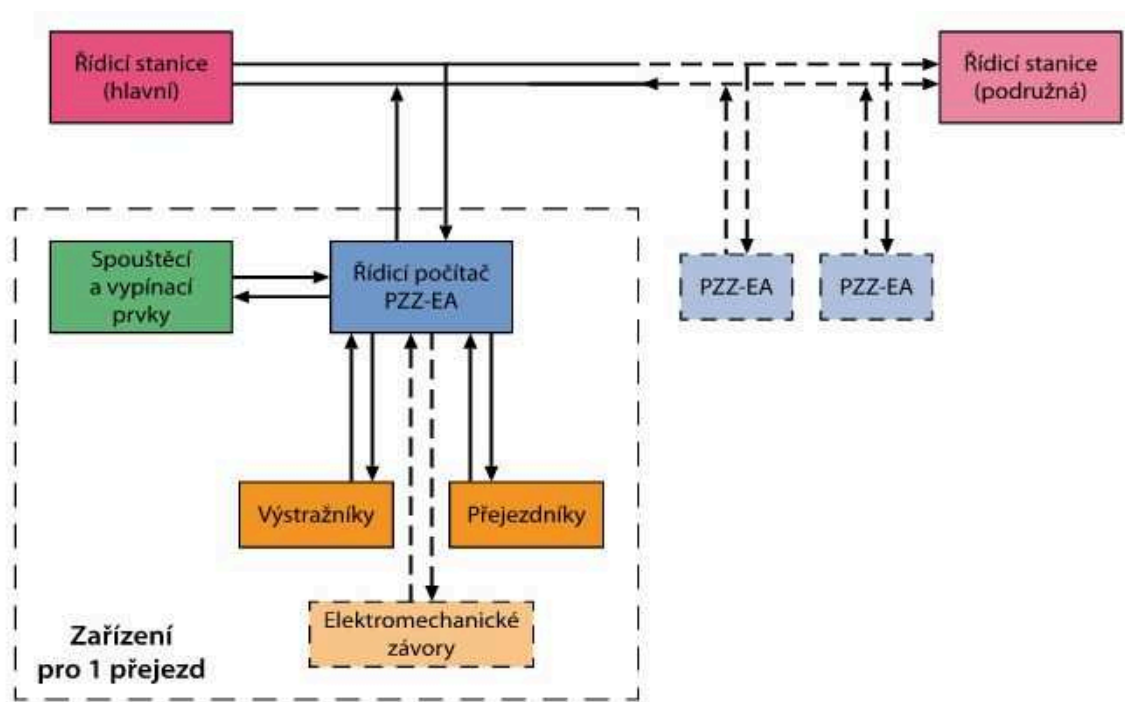
OBRÁZEK 1: BLOKOVÉ SCHÉMA PZZ-EPA

**PZZ-EA :**

Tento typ může být ovládán liniovými nebo bodovými prvky, případně staničním zabezpečovacím zařízením. Samotný zabezpečovač je vybaven také záznamovým zařízením, uchovávajícím provozní stavy. Pomocí řídicí stanice je lze ovládat z jednotného obslužného pracoviště (JOP).

TABULKA 2: VYBRANÉ PARAMETRY PZZ-EA

Jmenovité napájecí napětí	230 V/50 Hz	
Rozsah napájecího napětí	207 – 253 V	
Provozní příkon (bez vnějších prvků a dobíječe)	150 W	
Napájecí napětí ovládací elektroniky	21,6 – 30 V	
Maximální počet připojitelných výstražníků	S pozitivním signálem, bez dohledu akustické signalizace	8
	Bez pozitivního signálu, bez dohledu akustické signalizace	12
	S pozitivním signálem, s dohledem akustické signalizace	6
	Bez pozitivního signálu, s dohledem akustické signalizace	8
Maximální počet závorových pohonů	8	
Maximální počet přejezdníků (včetně opakovacích)	4	



OBRÁZEK 2: BLOKOVÉ SCHÉMA PZZ-EA

### PZZ-RE:

Stejně jako typ EA je ovládací automatika tohoto PZZ tvořena kombinací relé (logické funkce) a elektronických prvků (časovače, napájení žárovek). Je možné jej připojit k libovolnému SZZ, případně může být ovládán automaticky liniovými či bodovými prvky.

TABULKA 3: VYBRANÉ PARAMETRY PZZ-RE

Jmenovité napájecí napětí	3 x 400/230 V ± 10%, 50 Hz 230 V ± 10%, 50 Hz
Provozní příkon (bez vnějších prvků a dobíječe)	<40 W
Napájecí napětí ovládací elektroniky a relé	19,2 – 36 V DC
Maximální počet připojitelných výstražníků	12
Maximální počet závorových pohonů	Bez omezení
Maximální počet přejezdňíků	Bez omezení

## 1.2 PERIFERIE PZZ

Typ a počet periférií je závislý na typu přejezdu a jeho umístění. Každý přejezd je vybaven výstražníky, ostatní periférie pak závisí na jeho konfiguraci. Mohou to být přejezdňíky, závory, liniové obvody, čidla a další.

### Výstražník AŽD 97-PV:

Slouží k akustické a světelné výstraze. Je osazen dvouvláknovými žárovkami (při přerušení jednoho vlákna je napájení automaticky přepnuto na vlákno druhé systémem EOS). Akustickou výstrahu tvoří elektronický zvonec (je umístěn ze zadní strany rámu mezi světly). Je možné jej doplnit o tzv. pozitivní signalizaci.

TABULKA 4: VYBRANÉ PARAMETRY VÝSTRAŽNÍKU AŽD 97-PV

Napájecí napětí žárovek	12 V
Napájecí napětí LED	9 – 24 V
Napájecí napětí akustické výstrahy	24 V
Příkon jedné žárovky	20 W



OBRÁZEK 3: VÝSTRAŽNÍK 97-PV

### Závora AŽD 99:

Tvoří mechanickou výstrahu přejezdového zabezpečovacího zařízení. Ve vztyčené poloze je břevno drženo pomocí elektromagnetu, po uvedení v činnost se vlastní vahou sklopí do vodorovné polohy (v té není nijak blokována). Pohon obstarává stejnosměrný motor typu SM2003M, který zároveň slouží jako brzda při sklápění břevna. Celistvost břevna lze kontrolovat pomocí proudové smyčky.

TABULKA 5: VYBRANÉ PARAMETRY ZÁVORY AŽD 99

Jmenovité napětí	28,8 V
Ustálený proud	8,5 A
Záběrový proud	20 A
Výkon elektromotoru	135 W
Doba zvedání břevna	10 s

### Přejezdník ATE:

V současnosti ještě není ve firmě AŽD dokončen vývoj vlastního přejezdníku. Využívají se proto přejezdníky firmy ATE s.r.o. Je vybaven bílým signalizačním světlem, žlutá jsou nahrazeny odrazkami. Vyrábí se v několika verzích, které se odlišují použitými odrazkami a použitou žárovkou (v závislosti na maximální rychlosti na trati).

Pro trati o rychlosti do 80 km/h je osazen žárovkou 12 V/5 W. Přejezdník je v tomto případě napájen stejnosměrným napětím 28,8V. Napětí na žárovce se nastaví přesně pomocí měnitelného odporu 14  $\Omega$  / 1 A.

Pro tratě s vyšší rychlostí je osazena halogenová žárovka 12V/20 W. Přejezdník je napájen střídavým napětím 230V, napětí pro napájení žárovky se získává z transformátoru, umístěním v samotném přejezdníku.

TABULKA 6: PARAMETRY PŘEJEZDNÍKU

Napájecí napětí		28,8 V
Použitá žárovka	do 80 km/h	12 V/5 W
	nad 80 km/h	12 V/20 W



OBRÁZEK 4: PŘEJEZDNÍK ATE

### 1.3 TYPY FV PANELŮ

V roce 1839 popsal Becquerel jako první fotogalvanický jev. Tehdy se zrodila myšlenka přímé přeměny slunečního záření na elektrickou energii. První použitelné fotovoltaické články však byly vyrobeny až o více než sto let později (1954) a své uplatnění nacházely zejména ve vesmíru. Jako materiál se používal výhradně krystalický křemík, později se začaly využívat i materiály jiné. Základní informace a rozdělení panelů podle použité technologie je převzato z (2).

- **Monokrystalický křemík**

FV článek je tvořen monokrystalem křemíku (vodivost P) o tloušťce řádově stovek  $\mu\text{m}$ . Ta se dopuje nejčastěji fosforem (vodivost N, způsob je různý podle použité technologie). Celek je zaleštěn a jednotlivé články jsou mezi sebou propojeny kontakty. Byť se jedná o historicky nejstarší materiál, stále nachází své uplatnění i v dnešní době – monokrystalické FV panely totiž dosahují vysoké účinnosti (až 20 %). Výroba monokrystalu je ovšem časově i energeticky náročná.

- **Polykrystalický křemík**

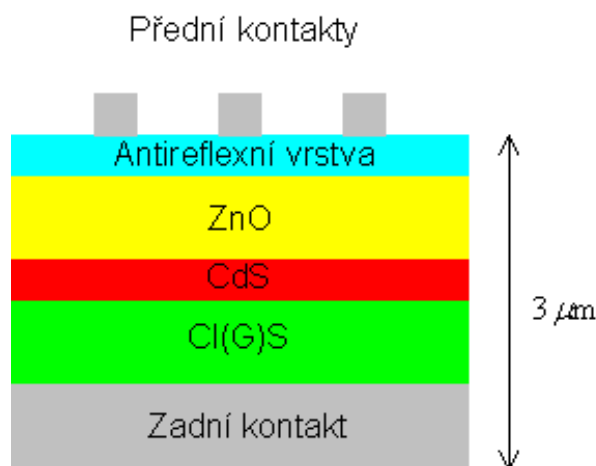
Ingot materiálu není tvořen jediným monokrystalem, ale mnoha malými krystaly. Toho lze docílit specifickými teplotními podmínkami při chlazení taveniny. Výroba tohoto „mnohokrystalu“ je levnější, účinnost materiálu většinou nepřesahuje 15%.

- **Amorfní křemík**

FV články jsou vyráběny jako tenkovrstvé. Na nosnou vrstvu je napařena tenká vrstva amorfního křemíku, která se dále dopuje. Oproti jiným křemíkovým technologiím je zde nejmenší spotřeba materiálu. Článek má také dobrou účinnost při difúzním ozáření a je možné jej vyrobit ohebný. Účinnost se pohybuje mezi 8-10 % podle výrobní technologie.

- **CIGS**

Tento polovodič je tvořen mědí, indiem, galiem a selenem. Pokud neobsahuje galium, hovoříme o technologii CIS (ta je levnější než plnohodnotný CIGS). Jedná se o tenkovrstvý materiál, je možné nanést na flexibilní podložku (nejčastěji je však jako podložka využito sklo). Mezi polovodičem a podložkou je vrstva molybdenu, která slouží jako zadní kontakt článku a odrazná plocha (lze tak téměř eliminovat letované spoje). Panely mají vysokou účinnost i při difúzním ozáření a oproti křemíkovým technologiím mají rovněž příznivější teplotní koeficienty. Vývoj v této oblasti jde neustále kupředu, současné panely dosahují účinnosti až 12 %.



OBRÁZEK 5: PRŮŘEZ PANELEM CIGS

- **CdTe**  
Tenkovrstvý článek, jehož teoretická účinnost může být až 25 %, v reálných aplikacích se pohybuje mezi 11 a 17 %. Velkou výhodou je předpokládaná nízká cena těchto článků. Jelikož se ale jedná o relativně novou technologii, není zatím příliš mnoho zkušeností z provozu. V současnosti se zkoumá také degradace materiálu a její vliv na životnost článku.
- **GaAs**  
V minulosti byly tyto FV články používány zejména do koncentrátorů (kvůli vysoké ceně GaAs). V současnosti jsou však ve vývoji i velkoplošné panely. Jako substrát slouží nejčastěji germanium. Na něj je nanášena vrstva GaAs (vodivost N) a na ní dále vytvořen PN přechod. Tyto články při měření dosahují účinnosti až 34 %.

Pro napájení PZZ-JLC budou použity panely technologie CIS, jelikož jsou s nimi dobré zkušenosti ze zkušebního provozu PZZ Humpolec.

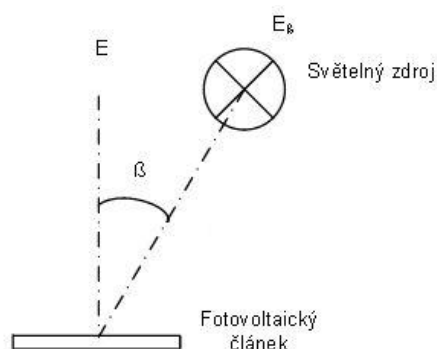
## 1.4 OBECNÉ DIMENZOVÁNÍ VÝKONU FV PANELŮ

Sluneční záření, které dopadá na povrch Země, se skládá z přímého a rozptýleného (difúzního) záření. Směsice těchto dvou záření se nazývá globální záření (je-li uvažován dopad na vodorovnou plochu). Tato hodnota je neustále měřena pomocí sítě meteorologických stanic a družic a ze sesbíraných dat jsou následně tvořeny sluneční mapy a matematické modely. Zejména vlivem oblačnosti však vznikají mezi jednotlivými měřeními roky velké odchylky. Vzhledem k použití různých vstupních dat se od sebe odlišují také jednotlivé modely mezi sebou.

### 1.4.1 VLIV SKLONU A ORIENTACE NA VÝKON PANELŮ

Výkon panelu je závislý na úhlu, pod kterým na jeho povrch dopadají paprsky. Nejvyššího výkonu panely dosáhnou, dopadají-li paprsky na jeho povrch kolmo. Intenzita záření totiž klesá s kosinem rostoucího úhlu. Pokud bude uvažována konstantní vzdálenost mezi světelným zdrojem a FV panelem, lze tuto závislost popsat vztahem:

$$E_{z\beta} = E_z \cdot \cos \beta$$



OBRÁZEK 6: VLIV ÚHLU DOPADAJÍCÍCH PAPRSKŮ NA VÝKON PANELU

Je tedy zřejmé, že na výkon fotovoltaických panelů má velký vliv jejich orientace a sklon. To lze eliminovat použitím tzv. trackeru, který natáčí panely tak, aby na jejich povrch dopadaly paprsky vždy kolmo. Experimentálními měřeními (3) bylo zjištěno, že pro území ČR je nejvýhodnější sklon panelů 35° a orientace směrem na jih, případně na jihozápad. Pro optimální provoz v zimním období je vhodný úhel vyšší – cca 60°.

## 1.4.2 URČENÍ ÚHRNNÉ SLUNEČNÍ ENERGIE

Úhrnnou sluneční energií se rozumí množství energie, které dopadne za určitý čas na určitou plochu (nejčastěji je uvažována doba jednoho dne a plocha jednoho metru čtverečního). K jejímu výpočtu je zapotřebí znát umístění panelů, jejich sklon a orientaci a v neposlední řadě také povětrnostní podmínky, které se v dané lokalitě vyskytují.

$$Q_s = \tau \cdot Q_{s\text{teor}} + (1 - \tau) \cdot Q_d \quad (1.1)$$

$$\tau = \frac{\tau_{\text{skut}}}{\tau_{\text{teor}}}$$

Hodnota  $Q_s$  představuje úhrnnou sluneční energii ( $\text{kWh/m}^2$ ),  $\tau$  poměrnou dobu slunečního svitu (jedná se o poměr doby skutečné a teoretické),  $Q_{s\text{teor}}$  představuje skutečnou teoretickou úhrnnou sluneční energii (zde je zahrnut vliv místních podmínek i orientace panelů vzhledem ke Slunci).  $Q_d$  je úhrnná sluneční energie dopadajícího difúzního záření.

## 1.4.3 DATABÁZE FOTOVOLTAICKÝCH SYSTÉMŮ (PVGIS)

PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System) je matematický model vyvinutý přímo pro použití fotovoltaických aplikací. Umožňuje provádět výpočty vyrobené energie v jednotlivých měsících i dnech pro kterékoli místo v Evropě a Africe. Je k dispozici zdarma v podobě online aplikace.

The screenshot displays the PVGIS web application interface. At the top, there are logos for JRC and CM SAF, and the title 'Photovoltaic Geographical Information System - Interactive Maps'. Below the logos is a navigation menu and a search bar. The main area features a map of Europe with a color-coded solar radiation scale. The right-hand panel contains configuration options for PV estimation, including radiation database, PV technology (Crystalline silicon), installed peak power (1 kWp), estimated system losses (14%), and mounting options (Free-standing, Slope 35°, Azimuth 0°). Tracking options and output options (Web page, Text file, PDF) are also visible. A 'Calculate' button is at the bottom of the configuration panel.

OBRÁZEK 7: PROSTŘEDÍ PVGIS



Umožňuje velmi podrobné zadání pro každou konkrétní aplikaci, včetně orientace panelů, nastavení případného trackeru, profilu horizontu atd. Dokáže také určit podíl přímého a difúzního záření, což usnadňuje výběr panelu. V současnosti lze v tomto modelu využít vstupní hodnoty z několika databází. Oblast Evropy obsahují dvě (4):

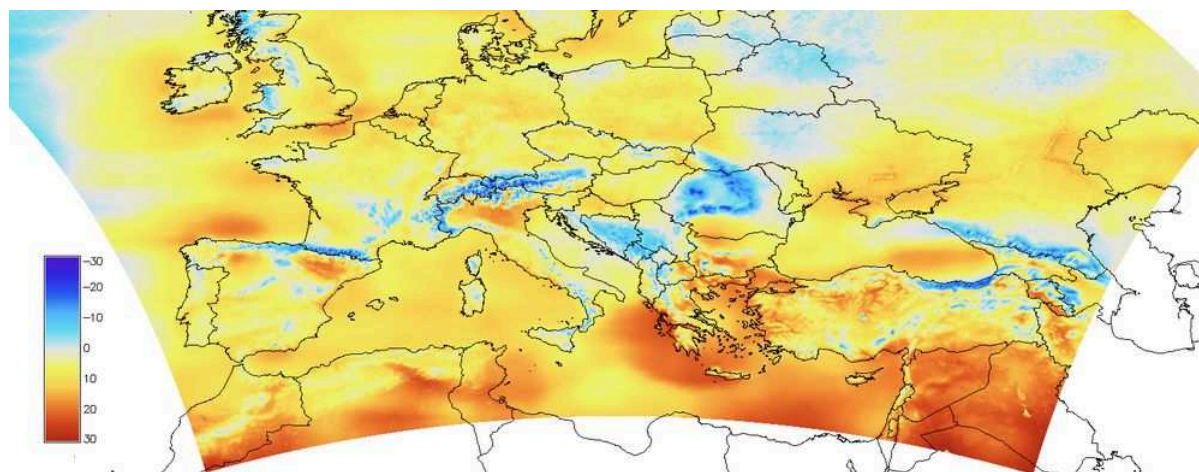
- **PVGIS Europe**

Tato databáze je tvořena daty z pozemních měření napříč Evropou. Jedná se o zprůměrované hodnoty mezi léty 1981 – 1990. Nevýhodou pozemních měření je možná chyba vzniklá v důsledku ovlivnění měřících čidel (prach, zastínění stromy a budovami, špatná údržba atd.). Potřebné hodnoty mimo oblasti měřících stanic jsou dopočteny (zde může být zanesena další chyba vlivem změny nadmořské výšky). Obecně lze říci, že v praxi budou výsledné hodnoty nepatrně lepší než vypočtené.

- **CM – SAF PVGIS**

Na rozdíl od předchozí je tato databáze tvořena daty, získanými pomocí satelitních měření (a to v letech 1998 – 2005 a 2006 – 2011). Nevýhodou těchto měření je relativně velké rozlišení (to je závislé na přístrojovém vybavení satelitu). Dalším problémem je souvislá sněhová pokrývka, která může za určitých situací měření zkreslit.

Obě databáze byly vzájemně porovnány, na následující mapě jsou viditelné procentuální rozdíly. Červeně jsou označena místa, kdy byly pomocí CM-SAF PVGIS zjištěny hodnoty vyšší než v PVGIS Europe, modře místa s hodnotami nižšími.



OBRÁZEK 8: PROCENTUÁLNÍ ROZDÍLY MEZI HODNOTAMI PVGIS EUROPE A CM-SAF PVGIS

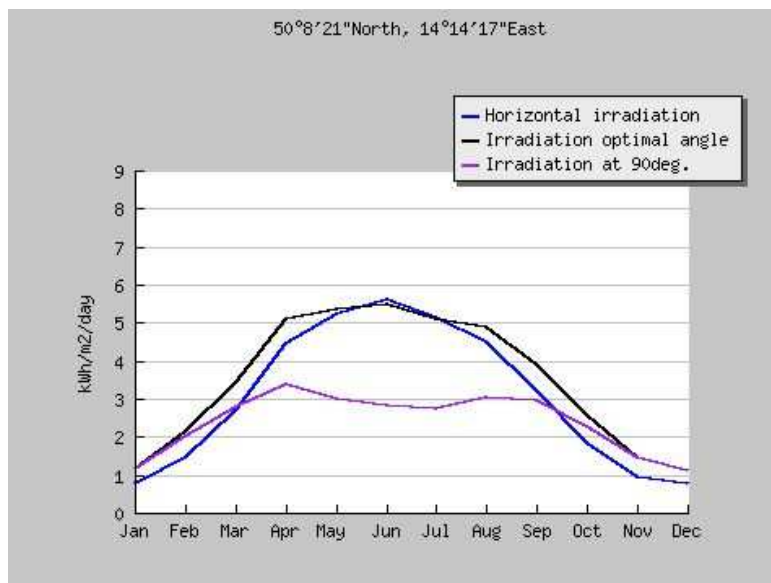
Na většině území je rozdíl menší než 5%, přičemž hodnoty CM-SAF jsou zpravidla vyšší. Vzhledem k tomu, že reálné aplikace dosahují nepatrně lepších výsledků, než aplikace modelované za použití PVGIS Europe, je databáze CM-SAF považována za přesnější.

---

#### 1.4.4 DIMENZOVÁNÍ APLIKACE PRO OSTROVNÍ REŽIM

---

V zeměpisných šířkách ČR se vyskytují velké rozdíly v úhrnné dopadající sluneční energii mezi letním a zimním obdobím. Dle PVGIS je u "nepohyblivé" instalace (tzn. sklon i orientace FV panelů jsou neměnné) úhrnná sluneční energie v zimě zhruba pětina oproti letním měsícům (zde samozřejmě záleží také na dalších faktorech). Při návrhu ostrovního systému se tak musí vždy vycházet z nejhorší možné varianty (tj. prosinec), aby byl zajištěn dostatečný přísun energie v průběhu celého roku. Pokud tedy bude napájení dostatečně dimenzováno pro měsíc prosinec, bude vyhovovat i po zbytek roku.



OBRÁZEK 9: MNOŽSTVÍ DOPADAJÍCÍ SLUNEČNÍ ENERGIE V PRŮBĚHU ROKU

Pro určení potřebného výkonu FV panelů je zapotřebí znát množství úhrnné dopadající sluneční energie v dané lokalitě, spotřebu napájeného zařízení a účinnost řetězce regulátor – baterie  $\eta$ . Pro potřeby ostrovního režimu bude kvůli jednoduchosti uvažován pouze prosinec, (spotřeba zabezpečovacího zařízení je nezávislá na ročním období).

Pro provedení výpočtu je třeba určit specifický energetický výnos zvoleného panelu  $W_{se}$ . Ve své podstatě se jedná o energii, kterou by dodal panel o výkonu 1 Wp na daném místě při dané orientaci (v tomto případě v měsíci prosinec). To lze jednoduše realizovat pomocí PVGIS.

$$P_{wp} = \frac{W_m}{W_{se} \cdot \eta} \quad (1.2)$$

## 1.5 PŘIBLIŽNÉ URČENÍ POTŘEBNÉHO VÝKONU FV PANELŮ PRO STÁVAJÍCÍ PZZ

Spotřeba PZZ je závislá na jeho vlastním provedení a také na počtu periférií. Z tohoto hlediska jsou jednoznačně nejvýhodnější zabezpečovače, realizované výhradně polovodičovou logikou. Na našem území ovšem nejsou příliš časté. Další komplikací mohou být některé prostředky detekce kolejových vozidel (např. kolejové obvody, jejichž spotřeba je značná).

Výpočet komplikuje fakt, že příkon PZZ jako celku je závislý na jeho stavu. Celková spotřeba energie se tedy skládá ze dvou částí – z energie, spotřebované při výstraze (příkon  $P_v$ ) a energie, spotřebované v pohotovostním stavu (příkon  $P_p$ ). Zatímco samotné řídicí jádro má rozdíl v příkonu minimální, u některých periférií se podstatně mění.

Pro alespoň hrubou představu o reálnosti napájení současných PZZ fotovoltaickými panely postačuje přibližný výpočet potřebného výkonu pro napájení jejich jednotlivých částí. Hodnoty příkonů jsem převzal z technických specifikací, případně jsem je vypočítal na základě obvodového zapojení.

### 1.5.1 URČENÍ SPOTŘEBY VYBRANÝCH ČÁSTÍ PZZ

V tomto případě je určena spotřeba elektrické energie dané části PZZ (pro jednu kolej) za dobu jednoho měsíce na základě katalogových hodnot příkonu (tzn. bez uvažování ztrát na kabelech a napáječích). Výpočet uvažuje dobu výstrahy  $\tau_v = 6$  minut a  $n = 10$  projetých souprav denně, délku měsíce 31 dní, tj.  $t = 744$  hodin. Není uvažován chod dobíječe.

#### Řídicí jednotka PZZ – EPA, EA:

Obě jednotky mají dle dokumentace shodný příkon 150 W bez vnějších prvků. Spotřeba energie za měsíc prosinec tak bude

$$P_p = P_v \quad W_{epa} = W_{ea} = \frac{P_p \cdot t}{1000} = \frac{150 \cdot 744}{1000} = 112 \text{ kWh} \quad (1.3)$$

#### Řídicí jednotka PZZ – RE:

Provozní příkon je dle dokumentace 40W.

$$P_p = P_v \quad W_{re} = \frac{P_p \cdot t}{1000} = \frac{40 \cdot 744}{1000} = 30 \text{ kWh} \quad (1.4)$$

#### Výstražník 97-PV:

Pokud zanedbáme příkon akustické výstrahy, je provozní příkon tvořen pouze spotřebou žárovek a ztrátami na regulačních odporech. Při výpočtu jsem uvažoval použití pozitivní signalizace. Jelikož žárovky blikají se stejnou střídou, lze střední příkon určit jako polovinu příkonu žárovky.

$$W_{97} = \frac{U \cdot \frac{P_{\dot{z}}}{U_{\dot{z}}} \cdot \left( 372 - \frac{93}{2} \cdot \tau_v \cdot n \right)}{1000} = \frac{24 \cdot \frac{20}{12} \cdot \left( 372 - \frac{93}{2} \cdot \frac{1}{10} \cdot 10 \right)}{1000} = 13 \text{ kWh} \quad (1.5)$$

#### Přejezdník ATE:

V tomto případě jsem uvažoval osazení přejezdníku žárovkou 12 V/5 W a relé typu NMŠ1. Pokud není přejezd uzavřen, je přejezdník odpojen a jeho příkon je nulový. Regulační odpor, světelné relé i žárovka jsou zapojeny v sérii. Pro výpočet příkonu je tak třeba určit proud, který danými prvky prochází. Ten lze vypočítat z parametrů žárovky.

$$W_{\text{ate}} = \frac{U \cdot I \cdot t}{1000} = \frac{U \cdot \frac{P_{\dot{z}}}{U_{\dot{z}}} \cdot \tau_v \cdot n \cdot 31}{1000} = \frac{28,8 \cdot \frac{5}{12} \cdot \frac{1}{10} \cdot 10 \cdot 31}{1000} = 0,4 \text{ kWh} \quad (1.6)$$

Závora:

Zde uvažuji pouze chod samotného elektromotoru, který se používá pro zvedání břevna. Břevno je motorem pouze zvedáno, doba zvedání břevna je  $t_z = 10$  s. Příkon motoru po tuto dobu samozřejmě není konstantní, to ale bylo ve výpočtu zanedbáno.

$$W_{\text{zz}} = \frac{n \cdot U \cdot I_{\text{em}} \cdot t_z \cdot 31}{1000} = \frac{10 \cdot 28,8 \cdot 8,5 \cdot \frac{1}{360} \cdot 31}{1000} = 0,3 \text{ kWh} \quad (1.7)$$

Příkon elektromagnetu, který udržuje břevno ve vertikální poloze, byl zanedbán.

Kolejové obvody:

Slouží k detekci železničního vozidla. Pro každou kolej je zapotřebí dvou kolejových obvodů. Tyto obvody detekují přítomnost železničního vozidla na základě změny elektrického odporu mezi kolejnicemi. Náprava podvozku obě kolejnice vodivě spojí a vytvoří tak bočník (shunt) na zdroji kolejového obvodu. Konstanta  $T_{\text{ko}}$  představuje poměrnou dobu zashuntování obvodu (což je také poměrná doba obsazení úseku).

$$W_{\text{ko}} = \frac{n_{\text{ko}} \cdot P_{\text{ko}} \cdot t}{1000 \cdot T_{\text{ko}}} = \frac{2 \cdot 60 \cdot 744}{1000 \cdot 0,6} = 148,8 \text{ kWh} \quad (1.8)$$

Anulační soubor elektronický:

Další z detekčních prvků PZZ. Na každou kolej připadá jedna jednotka ASE.

$$P_{\text{ase}} = \frac{n_{\text{ase}} \cdot U \cdot I_{\text{ase}} \cdot t}{1000} = \frac{1 \cdot 24 \cdot 1,25 \cdot 744}{1000} = 22,3 \text{ kWh} \quad (1.9)$$

### 1.5.2 POTŘEBNÝ INSTALOVANÝ VÝKON FV PANELŮ

Pro přibližný výpočet potřebné plochy jsem uvažoval účinnost zařízení  $\eta=80\%$  a specifický energetický výnos panelu  $W_{se}=30\text{ kWh/měsíc}\cdot\text{kWp}$ . Orientace je jižní, sklon  $60^\circ$ . Použity by byly panely technologie CIS.

TABULKA 7: TABULKA POTŘEBNÝCH INSTALOVANÝCH VÝKONŮ

Zařízení	Počet ks	Měsíční spotřeba (kWh)	Potřebný výkon (kWp)
PZZ-EPA	1	112	4,7
PZZ-RE	1	30	1,3
97-PV	2	13	0,6
Přejezdník ATE	2	0,8	0,1
Závora	2	0,6	0,1
Kolejové obvody	2	148,8	6,2
ASE	1	22,3	0,9

U technologie CIS odpovídá jeden instalovaný kWp ploše cca  $9\text{ m}^2$ .

Z tabulky je jasné, že napájení většiny současných PZZ pouze energií z fotovoltaického systému by bylo velice nákladné. Pokud by byl vznesen požadavek na takovýto druh napájení, byla by nutná celková změna současných zabezpečovacích technologií na trati (zejména eliminace kolejových obvodů). Napájení FV systémem tak bude mít smysl pouze u nových projektů či rozsáhlých rekonstrukcí.

## 2 VYHODNOCENÍ ZKUŠEBNÍHO PROVOZU PZZ-RE HUMPOLEC

V současnosti je ve zkušebním provozu PZZ firmy AŽD napájené fotovoltaickými panely. Jedná se o typ PZZ-RE a zařízení je umístěno poblíž Humpolce na jednokolejné trati Havlíčkův Brod – Humpolec. Přejezdový zabezpečovač je vybaven dvěma přejezdnicí a výstražnicí (s LED), bez mechanické zábrany (závory). Fotovoltaické napájení je připojeno ke stávajícímu zdroji, PZZ tak může být napájeno i z distribuční sítě. V běžném provozu je spotřeba kryta z panelů, v případě déletrvajícího nepříznivého počasí je spotřeba kryta ze sítě. V případě neoprávněné manipulace s panely vyše blok diagnostiky výstrahu prostřednictvím mobilní sítě GSM.



OBRÁZEK 10: PZZ U HUMPOLCE (5)

Nad střechou reléového domku je umístěna konstrukce s panely. Celkem je zde osazeno 15 ks panelů CIS WSG0036E075 (technologie měď – indium – selen) z produkce firmy Würth Solar GmbH & KG o celkové ploše 10,9 m<sup>2</sup>.

TABULKA 8: PARAMETRY FOTOVOLTAICKÝCH PANELŮ CIS (5)

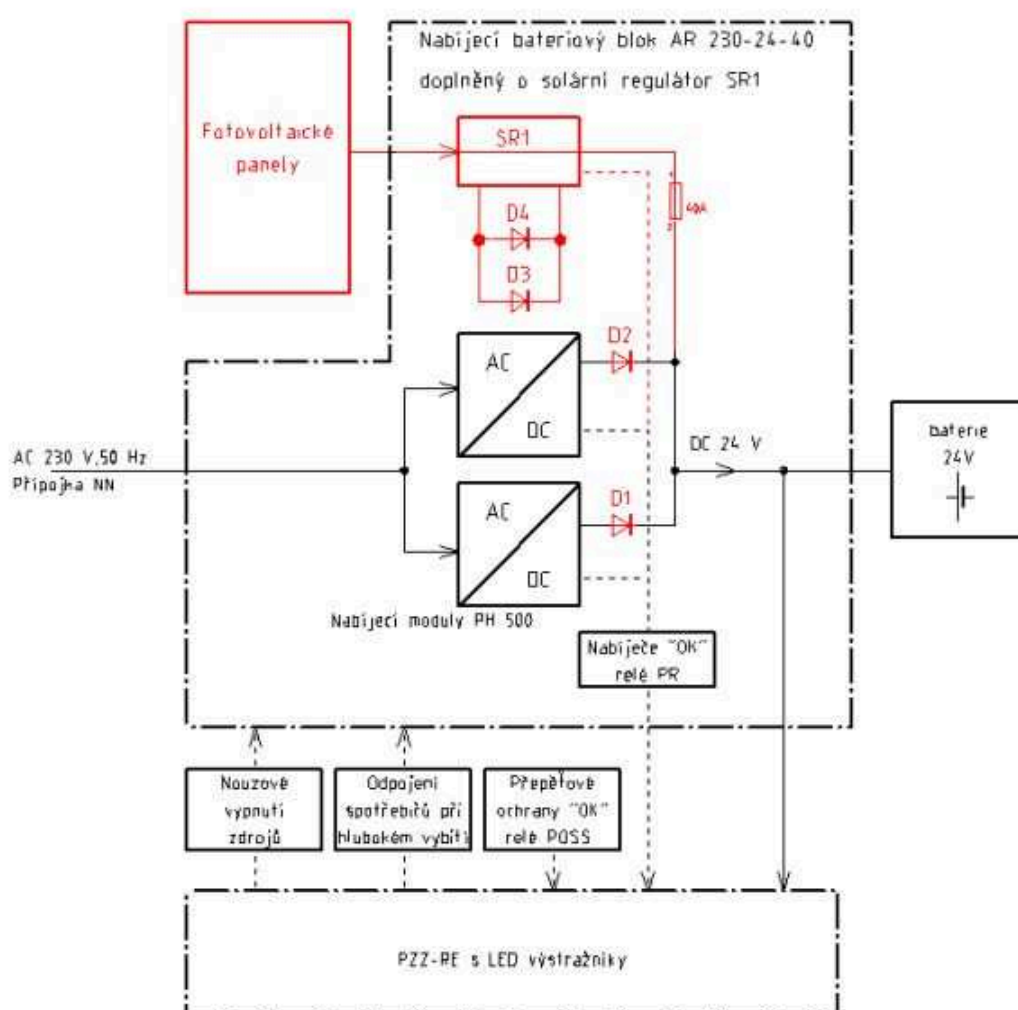
Typ článku	CIS Family Thin-Film
Výkon panelu	75 W <sub>p</sub>
Napětí naprázdno	43,1 V
Proud nakrátko	2,4 A
Napětí při max. výkonu	34 V
Proud při max. výkonu	2,2 A
Účinnost	10,3 %
Teplotní koeficient napětí naprázdno	-0,29 %/K
Teplotní koeficient proudu nakrátko	0,05 %/K

Baterie akumulátorů 300 Ah, 24 V (Sonnenschein A602) (6) je umístěna v bateriové studně. Jedná se o gelové bezúdržbové baterie s dlouhou životností (výrobce uvádí hodnotu 15 let při provozu za teploty 20°C). Vzhledem k nízké úrovni samovybíjení jsou vhodné pro aplikace napájené fotovoltaickými panely. Bateriová studna zajišťuje pokud možno optimální teplotu baterií bez energetických nároků na klimatizaci bateriového prostoru. Teplota má značný vliv na životnost a také na parametry akumulátoru.

TABULKA 9: PARAMETRY POUŽITÉ BATERIE

Typ	Sonnenschein A602
Jmenovité napětí / Kapacita	24 V/300 A·h
Rozsah pracovních teplot	-20 až 40 °C
Vnitřní odpor	0,1 mΩ
Zkratový proud	16 100 A

Systém napájení je řízen podle napětí baterie. V rozsahu 27,6 – 23,2 V je nabíjení zajištěno solárním regulátorem SR 1. Při poklesu napětí pod hodnotu 23,2 V je k baterii připojen síťový dobíječ. Poklesne – li i přesto napětí na hodnotu 22,8 V, je indikován nouzový stav. Od napětí 22 V a níže je indikován stav poruchový. I v případě poruchového stavu je baterie stále schopna dodávat dostatek energie pro provoz PZZ, a to až do hlubokého vybití.



OBRÁZEK 11: BLOKOVÉ SCHÉMA PZZ-RE (7)

PZZ Humpolec je osazen měřicí aparaturou, která kontinuálně měří vybrané veličiny a ukládá průměrné hodnoty na intervalu 5 minut. Měřena je intenzita osvětlení v rovině FV panelů (tzn. sklon 60°), napětí baterie, napětí a proud FV panelů a proud síťového dobíječe.

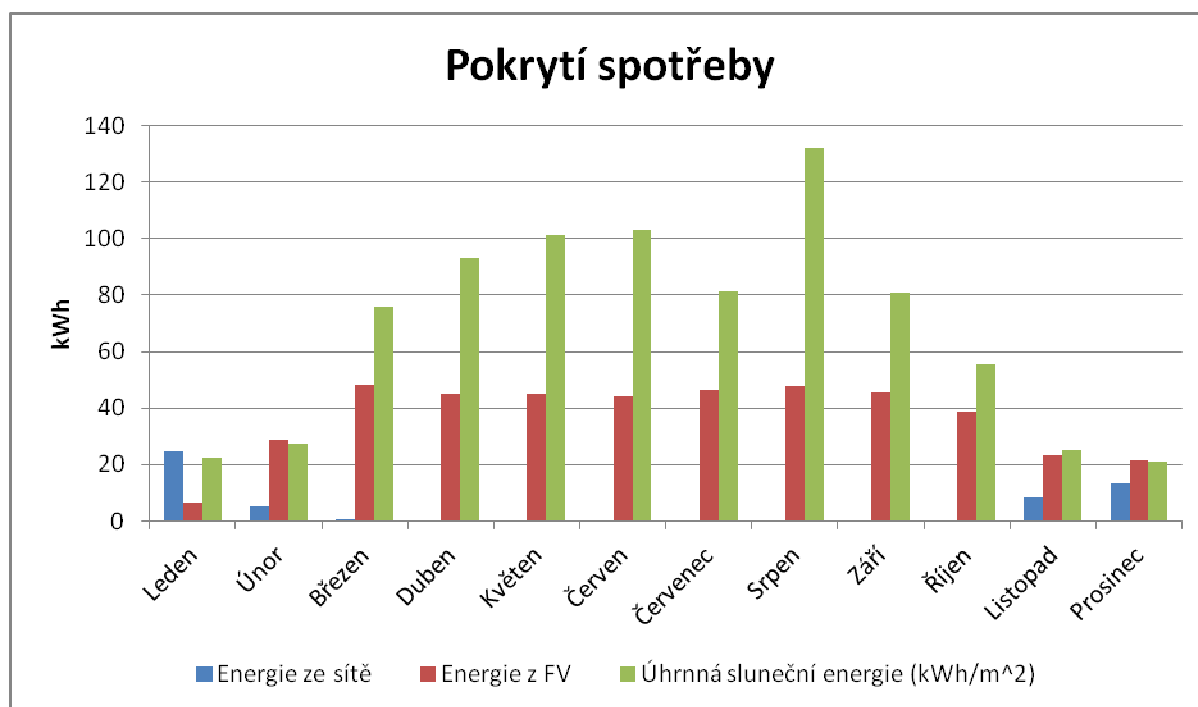
## 2.1 DLOUHODOBÉ MĚŘENÍ

Pro určení skutečných parametrů a výkonových bilancí byla data měřena po dobu jednoho roku, a to v rozmezí 19.7.2012 a 19.7.2013. Veškeré ztráty v bateriích jsem zanedbal. Jejich vnitřní odpor je malý (0,8 mΩ) a dle výrobce jsou ztráty samovybíjením velmi nízké. Zanedbána byla i vlastní spotřeba regulátoru.

Fotovoltaika byla schopna pokrýt spotřebu téměř z 90 % a dokázala udržet systém v ostrovním režimu po sedm měsíců. V měsících listopad až březen docházelo k dobíjení ze sítě – instalovaný výkon tedy není pro ostrovní provoz dostatečný.

TABULKA 10: TABULKA POKRYTÍ SPOTŘEBY

	Energie z FV (kWh)	Energie ze sítě (kWh)
leden	6,4	24,8
únor	28,8	5,1
březen	48,4	0,3
duben	45,2	0
květen	45,2	0
červen	44,1	0
červenec	46,3	0
srpen	47,7	0
září	45,6	0
říjen	38,5	0
listopad	23,5	8,2
prosinec	21,6	13,1



OBRÁZEK 12: POKRYTÍ SPOTŘEBY V PRŮBĚHU ROKU A ÚHRNNÁ ENERGIE



Z grafu je patrné, že v měsíci lednu docházelo k zapadání panelu sněhem, který celý systém prakticky vyřadil z provozu (v měsíci prosinec byly světelné podmínky obdobné, ale produkce mnohem vyšší). Naopak v letních měsících produkce s rostoucím úhrnným zářením nestoupá, jelikož již nebylo kam energii ukládat.

Jelikož bylo měřeno napětí baterie i fotovoltaických článků, je možné vypočítat ztráty vzniklé úbytkem napětí na regulátoru a vodičích.

$$\Delta P_{rk} = \int_0^T \Delta p_{rk}(t) \cdot dt = \frac{\sum_{i=1}^{105121} \Delta p_{rki}}{12} = \frac{\sum_{i=1}^{105121} ((U_{si} - U_{bati}) \cdot I_{si})}{12} \quad (2.1)$$

Dělení konstantou 12 umožňuje přepočítání na kWh (vzorkovací perioda je 5 minut, což je 1/12 hodiny).

TABULKA 11: ROČNÍ BILANCE

Úhrnná sluneční energie celkem (kWh/m <sup>2</sup> )	819
Vyrobena FV (kWh)	450
Dodaná energie FV (kWh)	441
Dodaná energie síť (kWh)	52
Ztráty dioda + kabel (kWh)	9
Spotřeba celkem (kWh)	493

Výrobce udává účinnost FV panelu 10,3%. Hodnota účinnosti je však silně závislá na konkrétním pracovním bodu (principiálně se jedná o problematiku impedančního přizpůsobení). Této účinnosti tak lze dosáhnout pouze v tzv. „maximum power point“ (MPP - bod maximálního výkonu, kdy je vnitřní odpor panelu roven odporu zátěže). Moderní regulátory dokážou díky měničům převádět impedanci zátěže tak, aby byl panel vždy zatěžován v bodě MPP (MPP tracking). Regulátor SR-1 však MPP trackingem vybaven není, pouze připojuje baterii k panelu přes ochrannou diodu. Pracovní bod tak závisí na intenzitě záření a stavu nabití baterie, což se negativně projevuje na účinnosti. Účinnost panelů za jednotlivá období jsem určil jako aritmetický průměr z okamžitých hodnot.

$$\eta_p = \frac{1}{i} \cdot \sum_{i=1}^{105121} \frac{U_{si} \cdot I_{si}}{E_{\beta i} \cdot s} \cdot 100 \quad (2.2)$$

Tento vztah je samozřejmě aplikován pouze na vzorky, které byly snímány v době dobíjení baterie FV panely.

Z naměřených dat je patrné, že v zimě docházelo k zapadání měřicího čidla intenzity záření sněhem. Někdy také docházelo ke zjevnému zastínění čidla (časté při západech slunce). Na to má vliv i okolní vegetace. Na satelitním snímku jsou patrné stíny okolních stromů.



OBRÁZEK 13: SATELITNÍ SNÍMEK PZZ HUMPOLEC (8)

Při výpočtech tak občas vychází nesmyslné hodnoty (účinnost v řádově stovkách procent). Proto jsem z výpočtu průměrné účinnosti odstranil všechny vzorky, u kterých vycházela účinnost vyšší než v katalogu uvedených 10,3 %.

Účinnost přenosu energie regulátorem a kabely lze velice snadno určit z poměru napětí na baterii a panelech (jejich proud je totiž shodný). I zde se samozřejmě musí brát v úvahu pouze ty vzorky, u kterých docházelo k dobíjení baterií.

$$\eta = \frac{1}{i} \cdot \sum_{i=1}^{105121} \frac{U_{\text{bati}}}{U_{\text{si}}} \cdot 100 \quad (2.3)$$

Celkovou účinnost pak lze vypočítat jejich prostým součinem.

$$\eta_c = \eta \cdot \eta_p \cdot 1 \cdot 10^{-2} \quad (2.4)$$

TABULKA 12: TABULKA ÚČINNOSTÍ

	Účinnost panelu (%)	Účinnost diody a kabelů (%)	Účinnost celková (%)
leden	5,6	97,3	5,4
únor	9,5	97,8	9,3
březen	4,8	98,2	4,8
duben	4,3	98,4	4,2
květen	5,1	98,6	5
červen	5	98,6	4,9
červenec	6,1	98,7	6
srpen	4,4	95,9	4,3
září	5,7	98,5	5,6
říjen	6,3	98,8	6,2
listopad	7,9	97,9	7,7
prosinec	9,4	97,9	9,2
Průměr	6,2	98	<b>6,1</b>

Koeficient využití instalovaného výkonu

$$k_i = \frac{\sum_{i=1}^{105121} U_{si} \cdot I_{si}}{P_{wp} \cdot 7860} \cdot 100 = \underline{\underline{4,6\%}} \quad (2.5)$$

Specifický energetický výnos panelu (pouze měsíc prosinec)

$$W_{se \text{ prosinec}} = \frac{W_{s \text{ prosinec}}}{P_{wp}} = \frac{21,6}{1,125} = \underline{\underline{19,2 \text{ kWh/m} \cdot \text{kWp}}} \quad (2.6)$$

## 2.2 SROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH A PROJEKTOVANÝCH HODNOT

Naměřené hodnoty úhrnné sluneční energie vybízejí ke srovnání s databází PVGIS. Toto srovnání ovšem nebude zcela přesné, jelikož nemám zaměřenu okolní vegetaci. Nemohu ji tak zadat do profilu horizontu, se kterým jinak PVGIS dokáže pracovat, takže výsledné hodnoty budou nižší.

Srovnání naměřené celkové úhrnné sluneční energie se dvěma databázemi systému PVGIS ukazuje následující tabulka. Hodnoty jsou platné pro úhel  $\beta=60^\circ$ .

TABULKA 13: SROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT S PVGIS

	PVGIS SAF (kWh/m <sup>2</sup> /měsíc)	PVGIS Classic (kWh/m <sup>2</sup> /měsíc)	Změřené hodnoty (kWh/m <sup>2</sup> /měsíc)
leden	36	39,9	22,2
únor	58,2	59,4	27,6
březen	104,2	96,1	75,7
duben	141,3	114,9	93
květen	137,3	131,4	101,5
červen	133,2	119,7	102,9
červenec	135,5	135,5	81,5
srpen	135,8	130,2	132
září	109,2	89,1	81
říjen	44,3	39,7	55,3
listopad	34,8	38,4	25
prosinec	36	28,1	20,9
Suma (kWh/m <sup>2</sup> /rok)	1107	1022	819

Hodnoty účinností jsou také odlišné od projektovaných. V původním návrhu je uvažována jmenovitá účinnost panelu, které ale nebylo dosaženo, jak vyplývá z naměřených hodnot. Ztráty v regulátoru byly naopak nižší než očekávané.

TABULKA 14: SROVNÁNÍ PROJEKTOVANÉ A SKUTEČNÉ ÚČINNOSTI

	Účinnost panelu $\eta_p$ (%)	Účinnost regulátoru $\eta$ (%)	Celková účinnost $\eta_c$ (%)	$W_{se}$ (kWh/m <sup>2</sup> ·kWp)
Projektováno	10,3	80	8,2	46,5
Změřeno	6,2	98	6,1	19,2

Spotřeba PZZ a jeho periferií se odvíjí od hustoty železniční dopravy. Projektovaná hodnota je 1,4 kWh/den, tato hodnota odpovídá i výsledkům měření.

### 2.3 ZHODNOCENÍ

Pokud bychom uvažovali stávající konfiguraci a světelné podmínky, bylo by zapotřebí instalovaný výkon zvýšit na cca 4,5 kWp pro zajištění ostrovního provozu v zimním období. Takovýto systém by byl jak finančně, tak prostorově náročný. Použití trackeru není podle mne vhodné, jelikož by to vedlo ke snížení spolehlivosti.

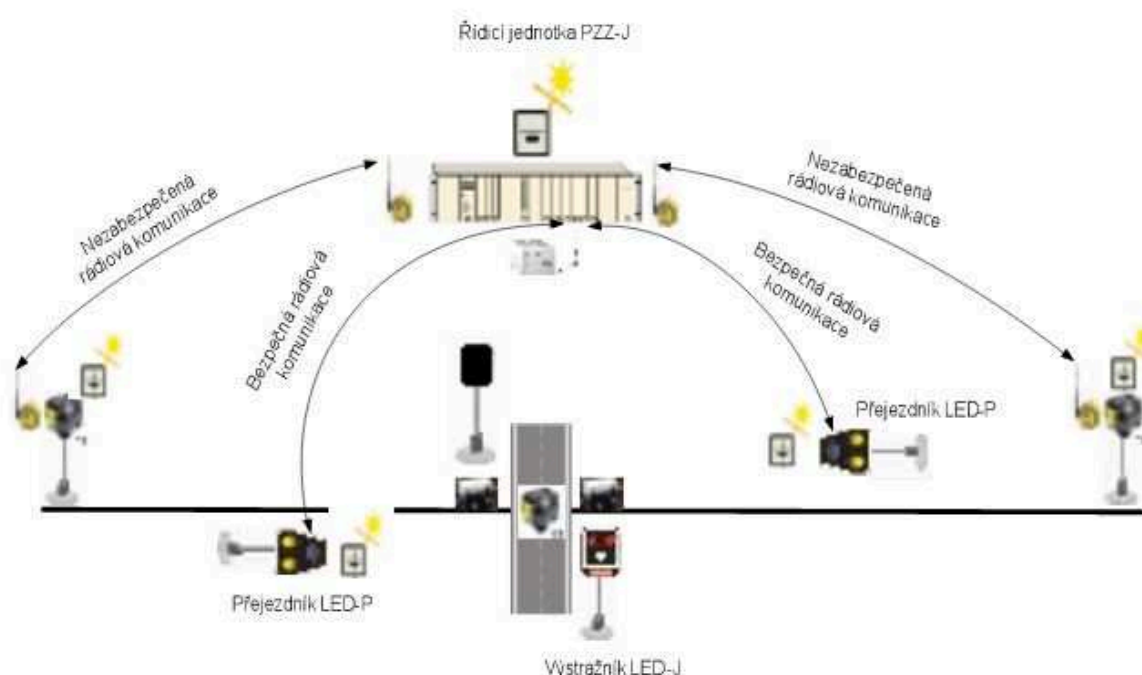
Určitého zlepšení by se dalo docílit použitím měniče s MPP trackingem, který by mohl zvýšit průměrnou účinnost systému o několik jednotek procent. Rovněž částečným ořezáním okolní vegetace by se mohl výnos zvýšit. Další možností je eliminovat sněhovou pokrývku na panelech, která má na produkci podstatný význam. Dle mého názoru by však ani aplikace všech těchto opatření nezajistila dostatečný výnos pro celoroční ostrovní provoz bez navýšení instalovaného výkonu.

Pro zvýšení přesnosti měření by bylo vhodné přemístit čidlo měření intenzity záření na místo, kde nebude docházet k jeho zastínění.

### 3 NÁVRH NAPÁJENÍ PZZ-JLC FV PANELY

Typ JLC je plně elektronické PZZ bez mechanické zábrany pro použití na jednokolejných tratích do rychlosti 80 km/h (v podstatě se jedná o typ PZZ-J v tzv. „low cost“ variantě). Světelná výstraha přejezdníků a výstražníků je realizována pomocí LED. Veškeré periferie jsou konstruovány tak, že samostatně vykonávají potřebné logické funkce a komunikují bezdrátově s řídicí jednotkou. Jako zapínací a vypínací prvky slouží kolové a radarové senzory. Tento zabezpečovač je na rozdíl od typu PZZ-RE bez reléové logiky a jeho periferie byly navrženy s důrazem na co nejnižší spotřebu. Veškeré žárovky byly nahrazeny LED, čímž klesla spotřeba světelných zdrojů a také odpadla ztrátová regulace rezistory.

Napájení bude zajištěno fotovoltaickými panely. Aby se minimalizovaly výkopové práce při stavbě (zde je velkou výhodou bezdrátová komunikace s periferiemi), budou FV panely a baterie soustředěny na několika místech.



OBRÁZEK 14: KOMUNIKACE MEZI PERIFERIEMI PZZ-JLC (1)

TABULKA 15: VYBRANÉ PARAMETRY PZZ-JLC

Jmenovité napájecí napětí	24 V DC
Rozsah napájecího napětí	18 – 36 V
Provozní příkon	43/57 W
Příkon samotného jádra PZZ-J	5 W

Veškeré části PZZ budou napájeny z pěti zdrojů. Každý ze zdrojů bude mít své vlastní FV panely a baterie. První zdroj bude zajišťovat napájení řídicí jednotky, výstražníků a vypínací prvky. Další dva zdroje budou sloužit k napájení přejezdníků. Zbýlé dva pak budou napájet spínací prvky chráněného úseku. Nebude tedy nutné napájet periferie dlouhými kabelovými vedeními, na kterých vznikají ztráty.

Při výpočtu je uvažována doba výstrahy  $\tau_v = 6$  minut a počet souprav  $n = 10$ . Vypočtená spotřeba je za období jednoho měsíce.

### Čidlo počítače náprav RSR180:

Jedná se o bodový prvek detekce železničního vozidla, který je u typu JLC využit jako vypínací i spínací prvek. Zjednodušeně ji můžeme chápat jako cívku, která je trvale připojena ke zdroji konstantního proudu a je umístěna v těsné blízkosti kolejnice. Na opačné straně kolejnice je umístěn přijímač. Průjezdem kola dojde k deformaci magnetického pole v okolí cívky, což se projeví změnou fáze napětí, indukovaného v přijímači. Tyto změny jsou poté vyhodnoceny řídicí jednotkou IMC.

Na každou kolej je zapotřebí minimálně dvou čidel náprav, a to na začátku a na konci chráněného úseku. Impulsy ze začátku chráněného úseku inkrementují čítač v IMC, impulsy z konce úseku čítač dekrementují. Je-li hodnota čítače nulová, je chráněný úsek vyhodnocen jako volný.

TABULKA 16: VÝKONOVÁ BILANCE POČÍTAČE NÁPRAV

Proud RSR180	59 mA
Příkon IMC (pro napájení 24 V)	5,5 W



OBRÁZEK 15: ČIDLO POČÍTAČE NÁPRAV

### Radarový senzor QT50R:

Řadí se mezi bodové prvky detekce, u typu JLC slouží jako spínací i vypínací prvky. Senzor je složen z vysílací a přijímací antény. Vyslaný impuls se odrazí od překážky a je zachycen přijímací anténou, z doby zpoždění signálu je pak určena vzdálenost. Maximální dosah je 15 m, většinou se používá současně s dalšími prvky detekce (v tomto případě s počítačem náprav).

TABULKA 17: PARAMETRY QT50R

Napájecí napětí	12-30 V DC
Max. proud	100 mA



OBRÁZEK 16: RADAROVÉ ČIDLO QT50R

#### Přejezdník AŽD LED-P:

Tento převodník je v současnosti ve vývoji a bude sloužit jako náhrada za přejezdníky firmy ATE. Místo žárovky je osazen LED, obsahuje navíc i vlastní řídicí logiku. Z řídicí jednotky tak dostává pouze signály o zahájení a ukončení výstrahy, případně signalizuje poruchu.

TABULKA 18: VYBRANÉ PARAMETRY PŘEJEZDNÍKU LED-P

Příkon při výstraze	10 W
Příkon mimo výstrahu	3 W

#### Výstražník LED-J:

Tento výstražník je na rozdíl od typu AŽD 97 osazen LED místo žárovek. Pole LED je rozděleno na tři části, přičemž i při selhání dvou z nich je stále zajištěna světelná výstraha o předepsaném světelném toku. I tento typ lze osadit pozitivní signalizací. Stejně jako přejezdník obsahuje i výstražník vlastní řídicí logiku. Z řídicí jednotky PZZ tak dostane pouze signál o zahájení/ukončení výstrahy, zbylé logické operace provádí samostatně.

TABULKA 19: VYBRANÉ PARAMETRY VÝSTRAŽNÍKU LED-J

Příkon při výstraze	18,5 W
Příkon mimo výstrahu	11 W

#### Bezdrátový systém DX70:

Systém DX70 bude sloužit k nezabezpečené komunikaci mezi zapínacími body chráněného úseku a řídicí jednotkou PZZ. Systém pracuje na frekvenci 900 MHz nebo 2,4 GHz. Celkově budou součástí PZZ čtyři jednotky DX70 .

TABULKA 20: VYBRANÉ PARAMETRY DX70

Napájecí napětí	10 – 30 V DC
Maximální proud	60 mA

### Bezdrátový systém XBee

Tyto moduly budou použity k zabezpečené komunikaci mezi přejezdníky a řídicí jednotkou. Celkem bude PZZ obsahovat tři tyto moduly (jeden v každém výstražníku a jeden v ovládací logice PZZ). Příkon jednoho kusu je 3W.

## 3.1 URČENÍ SPOTŘEBY PZZ JLC

---

### Řídicí jádro:

$$W_{pzz-j} = \frac{P_{pzz-j} \cdot t}{1000} = \frac{5 \cdot 774}{1000} = 3,9 \text{ kWh} \quad (3.1)$$

### Počítač náprav:

$$W_{pn} = \frac{U \cdot I_{rst} \cdot t}{1000} = \frac{24 \cdot 0,059 \cdot 744}{1000} = 1,1 \text{ kWh} \quad (3.2)$$

$$W_{imc} = \frac{P_{imc} \cdot t}{1000} = \frac{5,5 \cdot 744}{1000} = 4,1 \text{ kWh} \quad (3.3)$$

### Radarový senzor:

$$W_r = \frac{U \cdot I_r \cdot t}{1000} = \frac{24 \cdot 0,1 \cdot 744}{1000} = 1,8 \text{ kWh} \quad (3.4)$$

Zběžným výpočtem se tedy zdá, že je radar energeticky náročnější než počítač náprav. Je ovšem třeba vzít v potaz, že ke každým dvěma čidlům náleží jedna jednotka IMC.

### Přejezdník LED-P:

$$W_{led-p} = \frac{744 \cdot P_{pled-p} + 31 \cdot n \cdot \tau_v (P_{vled-p} - P_{pled-p})}{1000} = \frac{744 \cdot 3 + 31 \cdot 10 \cdot \frac{1}{10} \cdot (10 - 3)}{1000} = 2,5 \text{ kWh} \quad (3.5)$$



### Výstražník LED-J:

$$W_{led-j} = \frac{744 \cdot P_{pled-j} + 31 \cdot n \cdot \tau_v (P_{vled-j} - P_{pled-j})}{1000} = \frac{744 \cdot 11 + 31 \cdot 10 \cdot \frac{1}{10} \cdot (18,5 - 11)}{1000} = 8,5 \text{ kWh} \quad (3.6)$$

### DX70:

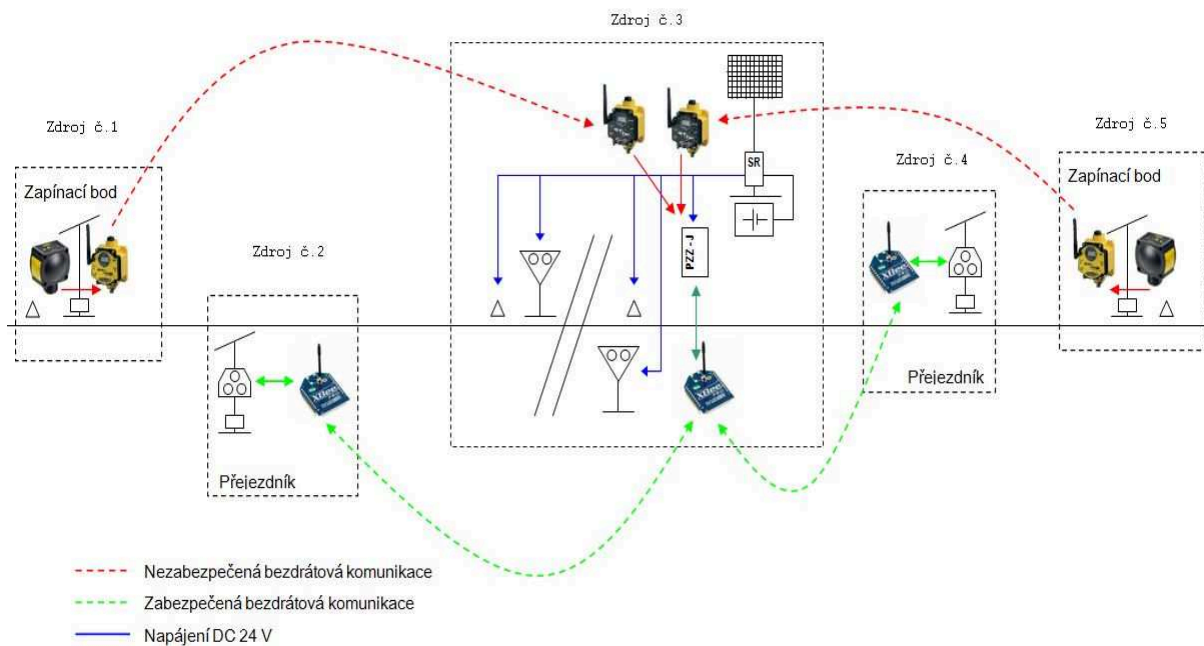
$$W_{dx} = \frac{U \cdot I_{dx} \cdot t}{1000} = \frac{24 \cdot 0,06 \cdot 744}{1000} = 1,1 \text{ kWh} \quad (3.7)$$

### XBEE:

$$W_{xbee} = \frac{P_{xbee} \cdot t}{1000} = \frac{3 \cdot 774}{1000} = 2,4 \text{ kWh} \quad (3.8)$$

## 3.2 POTŘEBNÝ VÝKON ZDROJŮ

Jednotlivé části budou napájeny celkem z pěti zdrojů. Přiřazení jednotlivých zdrojů k periferiím naznačuje následující obrázek.



OBRÁZEK 17: ROZMÍSTĚNÍ PERIFERÍ A JEJICH NAPÁJENÍ (AUTOR: PŘEMYSL ŠOLC)

Jak je z obrázku patrné, zdroje č. 1 a 5 jsou identické. Totéž platí o zdrojích č. 2 a 4.

TABULKA 21: POTŘEBNÝ VÝKON ZDROJŮ

Číslo zdroje	Napájené zařízení	Počet	Potřebná energie (kWh/měsíc)	Celková spotřeba ze zdroje $W_m$ (kWh/měsíc)
Zdroj č. 1 a 5	QT 50R	1	1,8	4
	RSR180	1	1,1	
	DX70	1	1,1	
Zdroj č. 2 a 4	LED P	1	2,5	4,9
	XBEE	1	2,4	
Zdroj č. 3	PZZ-J	1	3,9	37,6
	LED-J	2	17	
	DX70	2	2,2	
	XBEE	1	2,4	
	RSR180	2	2,2	
	IMC	2	8,1	
	QT 50R	1	1,8	
Celková měsíční spotřeba			55,4 kWh/měsíc	

### 3.3 DIMENZOVÁNÍ VÝKONU FV PANELŮ

Pro dimenzování potřebných výkonů FV panelů jsem využil naměřená data ze zkušebního přejezdu PZZ Humpolec. To není úplně korektní (oba PZZ mají rozdílnou spotřebu), nicméně lze předpokládat, že hodnoty budou podobné. Návrh tedy uvažuje hypotetickou náhradu zkušebního přejezdu za typ PZZ-JLC a je uvažována stejná průměrná účinnost i stejná úhrnná sluneční energie. Tedy  $W_{se}=19,2$  kWh/měsíc·kWp a  $\eta=98$  %.

$$P_{wp} = \frac{W_m}{W_{se} \cdot \frac{\eta}{100}} \quad (3.9)$$

TABULKA 22: TABULKA INSTALOVANÝCH VÝKONŮ JEDNOTLIVÝCH ZDROJŮ

Číslo zdroje	Potřebný výkon (kWp)
1, 5	0,213
2, 4	0,26
3	1,99

Uvedené výkony však budou dostačující pouze v případě, kdy nebude docházet k zapadání panelů sněhem!

### 3.4 DIMENZOVÁNÍ BATERIÍ

Jelikož výkon panelů kolísá se změnou času, je pro zajištění rovnoměrného napájení zapotřebí akumulátorů. I zde je nutné uvažovat nejhorší možnou variantu, kterou je v zimě bezesporu snůh. Ten může panely zcela vyřadit z provozu a je proto zapotřebí akumulátory dimenzovat pro autonomní

provoz po dobu několika dnů. V tomto případě je požadována možnost autonomního provozu z akumulátoru po dobu tří dnů, tj.  $t_{\text{vyb}} = 72$  hodin.

Existuje několik možných způsobů, jak lze vypočítat potřebnou kapacitu. Jako nejsnadnější se jeví prostý přepočítání potřebné energie na ampérhodiny. Kapacita akumulátoru, udaná v katalogu, však platí pro vybití konstantním proudem po dobu deseti hodin a pro jiný proud se liší (v závislosti na vnitřním odporu akumulátoru). Proto tento postup není zcela přesný.

Tento jev popisuje tzv. Peukertův zákon, který udává skutečnou dobu vybití.

$$t_{\text{vyb}} = H \cdot \left( \frac{C}{I_{\text{vyb}} \cdot H} \right)^k \quad (3.10)$$

Po osamostatnění lze z tohoto vztahu potřebnou kapacitu určit jako

$$C = I_{\text{vyb}} \cdot \sqrt[k]{t_{\text{vyb}}} \cdot H^{k \cdot (k-1)} \quad (3.11)$$

Konstanta  $k$  je závislá na použitém typu akumulátoru. Pro olovené se pohybuje v rozmezí 1,1 a 1,2, při výpočtu jsem dosazoval hodnotu 1,15. Za hodnotu vybíjecího proudu jsem dosadil efektivní hodnotu proudů skutečných, které jsou různé v závislosti na stavu přejezdu.

$$I_{\text{vyb}} = \sqrt{\frac{\int_0^T i^2(t) \cdot dt}{T}} = \sqrt{\frac{I_v^2 \cdot \tau_v \cdot n + I_p^2 \cdot (1440 - \tau_v \cdot n)}{1440}} \quad (3.12)$$

Takto vypočtenou kapacitu jsem navýšil o 50%. Tím se prodlouží životnost akumulátoru (předejde se stavům hlubokého vybití) a zároveň vznikne rezerva pro pokles kapacity vlivem stárnutí článků.

TABULKA 23: POTŘEBNÉ KAPACITY AKUMULÁTORŮ JEDNOTLIVÝCH ZDROJŮ

Číslo zdroje	$I_v$ (A)	$I_p$ (A)	$I_{\text{vyb}}$ (A)	$C$ (A·h)
1, 5	0,2	0,2	0,2	19
2, 4	2,5	0,3	0,6	55
3	2,4	1,8	1,8	166

Z tabulky je patrné, že vypočtený vybíjecí proud se od skutečného proudu (v pohotovostním stavu, který je podstatně převažující) odlišuje pouze u zdrojů č. 2 a 4.

Použity budou akumulátory firmy SBS řady Powersafe (9), a to pro jejich široký rozsah pracovních teplot. Jedná se o olovené akumulátory v provedení AGM s kovovým pláštěm, které mají malé ztráty samovybitím. V akumulátorech probíhá během nabíjení rekombinační proces, při kterém se vzniklý vodík slučuje s kyslíkem zpátky na vodu. Není tak zapotřebí doplňovat elektrolyt a akumulátor navíc „neplynuje“, takže jej lze umístit i do nevětraných prostor (což ovšem může být v rozporu s normami). Tyto akumulátory jsou určeny pro provoz při konstantním dobíjecím napětí, které ovšem nelze při

provozu zaručit – napětí bude závislé na pracovním bodě FV panelu. Tento fakt bude mít negativní vliv na životnost (dobíjení proudovým zdrojem je dle výrobce možné, ale nedoporučuje jej).

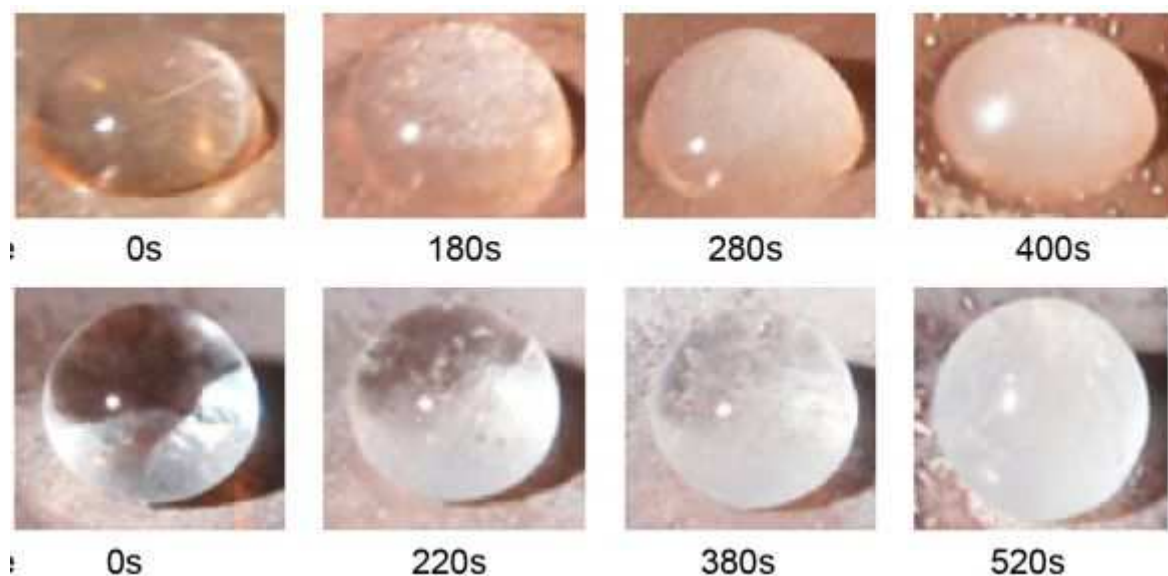
TABULKA 24: PARAMETRY AKUMULÁTORŮ SBS

	J30	J70
Jmenovité napětí / kapacita	12 V/26 A·h	12 V/64 A·h
Rozsah pracovních teplot	-40 až 80 °C	
Vnitřní odpor	7 mΩ	3,5 mΩ
Zkratový proud	1766 A	3500 A

### 3.5 ODSTRANĚNÍ SNĚHU

V zimním období nebude možné odstraňovat sněhovou pokrývku z panelů ručně. Pro požadavek plně autonomního systému tak musí být zdroje zkonstruovány tak, aby jejich výkon omezoval sníh co nejméně. Plánovaný sklon panelů je 60°, zkušební provoz v Humpolci však ukázal, že i při tomto úhlu se na panelech drží sníh.

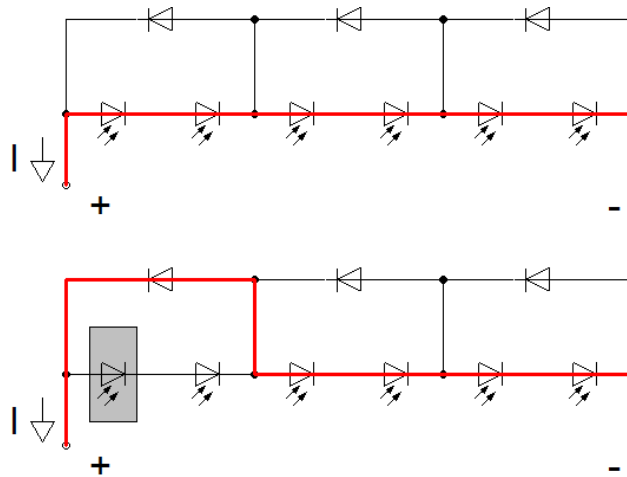
Výzkum se v této oblasti soustředí zejména na vývoj nových krycích materiálů. V souvislosti s pokusy s tzv. samočisticími povrchy byl objeven pro tuto oblast zajímavý jev – „ledofobie“ (v originále icephobicity). Na testovaný povrch byl v tomto případě nanesen nanomateriál na bázi fluoru a uhlíku (10), který však zatím není komerčně dostupný.



OBRÁZEK 18: SROVNÁNÍ BĚŽNÉHO A "LEDOFÓBNÍHO" POVRCHU (10)

V literatuře (10) se uvádí, že v určitých specifických aplikacích může být výhodný elektrický ohřev panelu. Ten je realizován nejčastěji pomocí topných kabelů. Při studování dané problematiky mne napadlo využít jako topné elementy přemostovací diody uvnitř panelu.

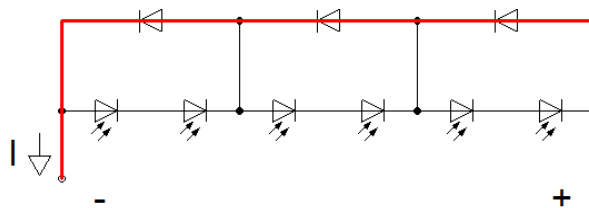
Každý FV panel je tvořen sériově zapojenými články pro dosažení potřebného napětí. Dojde – li ovšem k zastínění jednoho z článků v sérii, je celá větev vyřazena z provozu. Proto je vždy několik článků přemostěno diodou, přes kterou prochází proud při zastínění některého z článků.



OBRÁZEK 19: ZMĚNA TOKU PROUDU PŘI ČÁSTEČNÉM ZASTÍNĚNÍ

Za předpokladu rovnoměrného rozdělení proudu mezi paralelní větve přemost'ovacích diod tak musí být schopny přenést celý proud nakrátko panelu. Tyto diody jsou nejčastěji v provedení Schotky (z důvodu co nejnižšího úbytku napětí v propustném směru), úbytek napětí v propustném směru se pohybuje kolem 0,3 V.

V případě ohřevu panelu by byl panel připojen na proudový zdroj (ten by dodával proud o velikosti proudu nakrátko panelu) s obrácenou polaritou. Možný výkon by závisel na počtu přemost'ovacích diod.



OBRÁZEK 20: TOK PROUDU PANELEM PŘI OHŘEVU (OBRÁCENÁ POLARITA)

V tomto režimu by stačilo ohřát krycí sklo FV panelu na teplotu nad 0°C. Tím by se vytvořila vrstva vody, po které sníh sjede vlastní vahou. Otázkou zůstává, jaká by byla energetická náročnost takového ohřevu při různých povětrnostních podmínkách. Vzhledem k tomu, že z panelu je teplo odváděno prouděním, není přesný výpočet možný. Součinitel přestupu tepla prouděním je totiž závislý na mnoha faktorech a tak je nejčastěji určován až na základě laboratorních měření. Spotřebu také ovlivní mocnost vrstvy sněhu a jeho vlhkost.

U tenkovrstvého panelu CIS tvoří největší masu hmoty podkladové a krycí sklo. V tomto teoretickém výpočtu tak uvažuji pouze tyto dvě vrstvy, ostatní jsou zanedbány. Rovněž jsem zanedbal bodový charakter zdrojů tepla (přemost'ovací diody) a přestup tepla na hranách FV panelu.

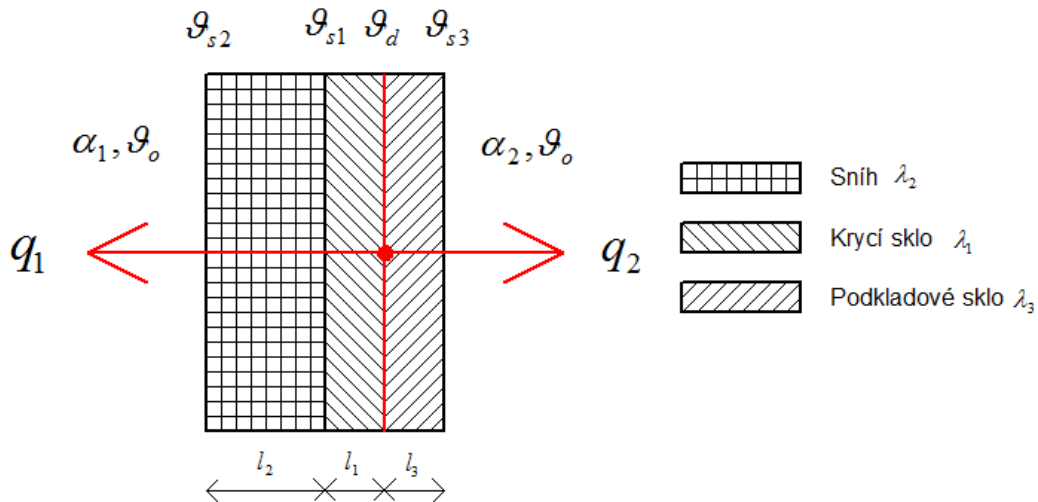
Pro výpočet je třeba určit hustotu tepelného toku panelu:

$$q = \frac{U_z \cdot I_k}{S} \quad (3.13)$$

Tento tepelný tok se bude šířit oběma směry (tzn. do krycího i podkladového skla) dále do prostoru.

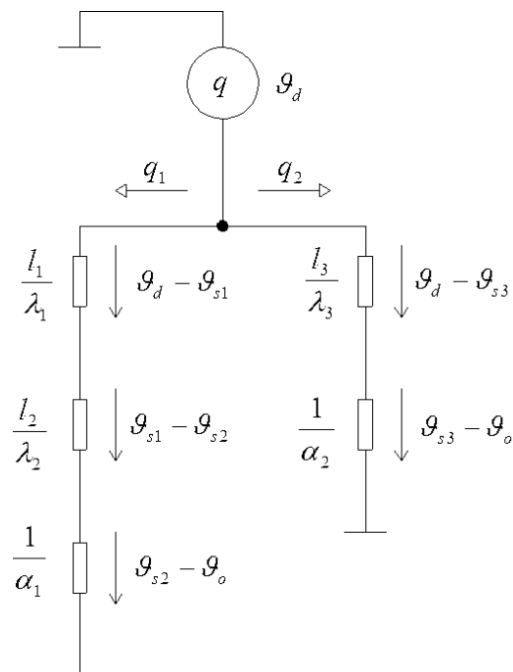
$$q = q_1 + q_2 \quad (3.14)$$

Pro účel ohřevu je však využitelná pouze část, která přestupuje do krycího skla, v tomto případě  $q_1$ . Prostou úvahou se tak jeví, že by pro tyto účely bylo vhodné tepelně zaizolovat zadní stranu panelu. Tato izolace však na druhou stranu způsobí zvýšení teploty při běžném provozu a tím snížení účinnosti.



OBRÁZEK 21: PROSTUP TEPLA PANELEM

Při řešení lze s výhodou využít analogie mezi teplotním a elektrickým polem (11). Za předpokladu  $q \approx I$  a  $\vartheta \approx U$  lze celou situaci popsat pomocí Kirchhoffových zákonů. Zdroj tepla je v tomto případě modelován proudovým zdrojem.



OBRÁZEK 22: NÁHRADNÍ SCHÉMA PROSTUPU TEPLA (USTÁLENÝ STAV)

$$q_1 = \frac{\vartheta_d - \vartheta_{s2}}{\frac{l_1}{\lambda_1} + \frac{l_2}{\lambda_2}} + \alpha_1 \cdot (\vartheta_{s2} - \vartheta_o) \quad (3.15)$$

$$q_2 = \frac{\lambda_3}{l_3} \cdot (\vartheta_d - \vartheta_{s3}) + \alpha_2 \cdot (\vartheta_{s3} - \vartheta_o)$$

Pro vyřešení je třeba vyjádřit teploty na rozhraní jednotlivých vrstev. Jelikož je známa pouze teplota okolí, musí být ostatní teploty vyjádřeny s její pomocí.

$$\vartheta_{s2} = \frac{q_1}{\alpha_1} + \vartheta_o$$

$$\vartheta_{s1} = q_1 \cdot \left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{l_2}{\lambda_2} \right) + \vartheta_o$$

(3.16)

$$\vartheta_{s3} = \frac{q_2}{\alpha_2} + \vartheta_o$$

$$\vartheta_d = q_2 \cdot \left( \frac{1}{\alpha_2} + \frac{l_3}{\lambda_3} \right) + \vartheta_o$$

Aby byla rovnice řešitelná, je nutné určit jednotlivé části tepelného toku  $q$ . Tento tok se rozdělí nepřímo úměrně vzhledem k tepelným odporům ve směrech šíření.

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{R_{T2}}{R_{T1}}$$

$$q = q_1 + q_2$$

$$q_2 = \frac{q}{1 + \frac{R_{T2}}{R_{T1}}}$$

(3.17)

$$q_1 = \frac{q \cdot \frac{R_{T2}}{R_{T1}}}{1 + \frac{R_{T2}}{R_{T1}}}$$

Tepelné odpory v jednotlivých směrech šíření

$$R_{T1} = \frac{l_1}{\lambda_1} + \frac{l_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_1}$$

$$R_{T2} = \frac{l_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_2}$$
(3.18)

Po dosažení a úpravě předchozích rovnic lze určit minimální teplotu okolí, při které bude ohřev ještě účinný (tedy  $\vartheta_{s1} > 0^\circ\text{C}$ )

$$\vartheta_o = - \frac{\frac{U_z \cdot I_k}{S} \cdot \left( \frac{l_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_1} \right) \cdot \left( \frac{l_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_2} \right)}{\frac{l_1}{\lambda_1} + \frac{l_2}{\lambda_2} + \frac{l_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}}$$
(3.19)

Jak jsem uvedl výše, určení součinitelů přestupu tepla je velmi komplikované. Existují sice tabulky a grafy, ze kterých lze tyto hodnoty odečíst pro různá prostředí a povrchy, nicméně téměř vždy jsou uváděny hodnoty pouze pro plochy vodorovné nebo svislé. Bude tak nutné laboratorním měřením určit jejich rozsah a pak počítat s největší hodnotou (tj. nejhorší případ, kdy je odváděno nejvíce tepla do okolí). Při takovémto měření lze součinitele určit za pomoci povrchových teplot ( $\vartheta_{s2}, \vartheta_{s3}$ ).

$$\alpha_1 = \frac{U_z \cdot I_k}{S \cdot (\vartheta_{s2} - \vartheta_o)}$$

$$\alpha_2 = \frac{U_z \cdot I_k}{S \cdot (\vartheta_{s3} - \vartheta_o)}$$
(3.20)

Určení povrchové teploty (zejména zadní části panelu) nemusí být snadné - je téměř jisté, že povrch nebude ohříván rovnoměrně. V takovém případě bude nutné měřit teplotu na více bodech současně a určit pak její průměrnou hodnotu (nebo případně použít termokameru a teplotu určit vhodným algoritmem).

Nejdůležitější vlastností takového systému bude spotřeba energie pro ohřev ( $Q_o$ ). Při zahájení ohřevu je energie postupně akumulována ve hmotě panelu a zvyšuje jeho teplotu ( $Q_a$ ). Současně dochází také k přestupu části tepla do okolí ( $Q_p$ ). V tomto případě ovšem teplota neporooste exponenciálně, ale lineárně (zdroj dodává konstantní  $q$  - jedná se tedy o analogii s nabíjením kondenzátoru proudovým zdrojem). Spotřebovaná energie se tak bude skládat ze dvou částí.

$$Q_o = Q_a + Q_p$$
(3.21)

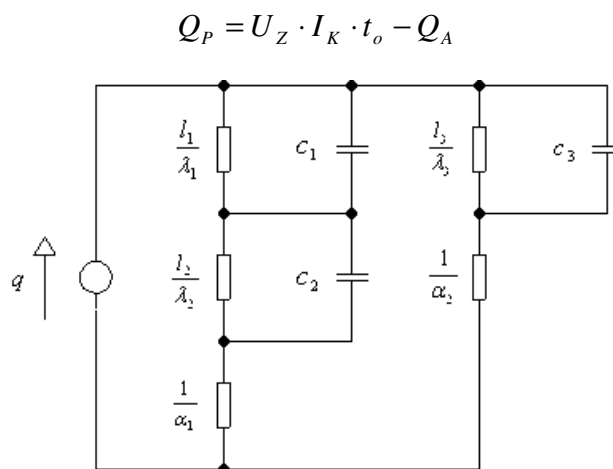


Důležitá je z tohoto hlediska ta část tepla, přestupující do okolí. Naproti tomu energie, akumulovaná v tělese panelu během ohřevu, je nevyužita a představuje ztráty. Bylo by proto vhodné používat na konstrukci panelů materiály s co nejmenší tepelnou kapacitou. Pokud budeme uvažovat, že ohříváný panel má teplotu okolí, lze akumulovanou energii vypočítat jako:

$$Q_a = \frac{1}{S} \cdot \left( m_1 \cdot c_1 \cdot \left( \frac{q_1 \cdot l_1}{\lambda_1} - \vartheta_o \right) + m_2 \cdot c_2 \cdot \left( \frac{q_1 \cdot l_2}{\lambda_2} - \vartheta_o \right) + m_3 \cdot c_3 \cdot \left( \frac{q_2 \cdot l_3}{\lambda_3} - \vartheta_o \right) \right) \quad (3.22)$$

V reálné aplikaci bude mít panel teplotu nejspíše vyšší a množství akumulované energie tak poklesne.

K určení složky  $Q_p$  je nutno znát dobu ohřevu  $t_o$ . Doba ohřevu bude záviset na velikosti časové konstanty systému.



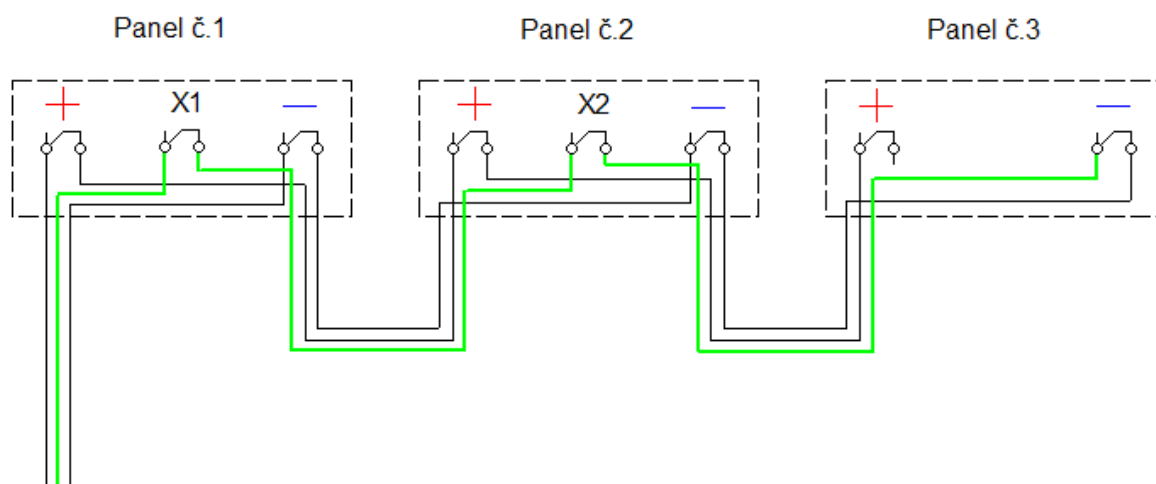
OBRÁZEK 23: TEPELNÝ MODEL PANELU

Jak je patrné z tepelného modelu, z hlediska odezvy na jednotkový skok se jedná o systém třetího řádu. Jeho analytické řešení je dosti komplikované a v tomto případě bude nejjednodušší dobu ohřevu laboratorně změřit.

### 3.6 OCHRANA PŘED ODCIZENÍM PANELŮ

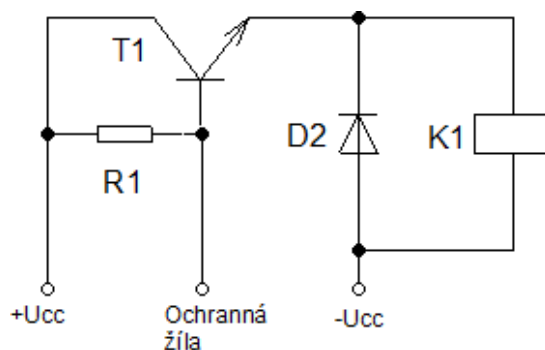
Na zkušebním přejezdu v Humpolci jsou panely instalovány ve speciálním rámu, bránícím jejich demontáži. Rám je vybaven spínačem, který vyše výstrahu skrze GSM bránu v případě pokusu o jeho rozebrání. Další možností je ochrana pomocí proudových smyček. Ta nevyžaduje žádný speciální rám a na rozdíl od předchozího řešení chrání také propojovací kabely mezi panely.

Základním předpokladem je v tomto případě instalační krabice na FV panelu, která musí umožňovat doplnění o další svorkovnici, a použití trojžilového kabelu. Dvě žíly v každém kabelu slouží jako silové, zbylá je ochranná. Ochranné žíly jsou propojeny do série a jejich celistvost je průběžně vyhodnocována elektronickým obvodem. Ochranná žíla v krajním panelu je připojena k záporné svorce FV panelu (kladný pól panelu je totiž odpojován regulátorem). Na následujícím obrázku je znázorněno provedení ochranné smyčky pro tři paralelně zapojené panely.



OBRÁZEK 24: ZAPOJENÍ OCHRANNÉ ŽÍLY V KRABICÍCH PANELŮ

Svorky X1 a X2 jsou ochranné, ochranná žíla je vyznačena zeleně. Samotný panel ani kabely nelze demontovat bez přerušení ochranné žíly (tedy za předpokladu, že každý kabel má v krabici svou vlastní průchodku). Ochranná svorka by měla být ideálně instalována tak, aby znemožňovala demontáž krabice z panelu (např. může být umístěna nad hlavou šroubu, kterým je krabice připevňena k panelu). Ochrannou smyčku lze samozřejmě realizovat i jinak podle způsobu propojení panelů.



OBRÁZEK 25: MOŽNÝ PRINCIP VYHODNOCOVAČÍHO OBVODU

Ochranný kabel udržuje bázi tranzistoru na nulovém potenciálu. Při jeho přerušení dojde k sepnutí tranzistoru a proud tak začne protékat ovládací cívkou relé. Pokud by byl obvod doplněn o zpožďovací člen a blokování, bylo by možné takto chránit i dvířka rozváděčů jednotlivých zdrojů. Relé by svým sepnutím aktivovalo GSM bránu, případně sirénu.

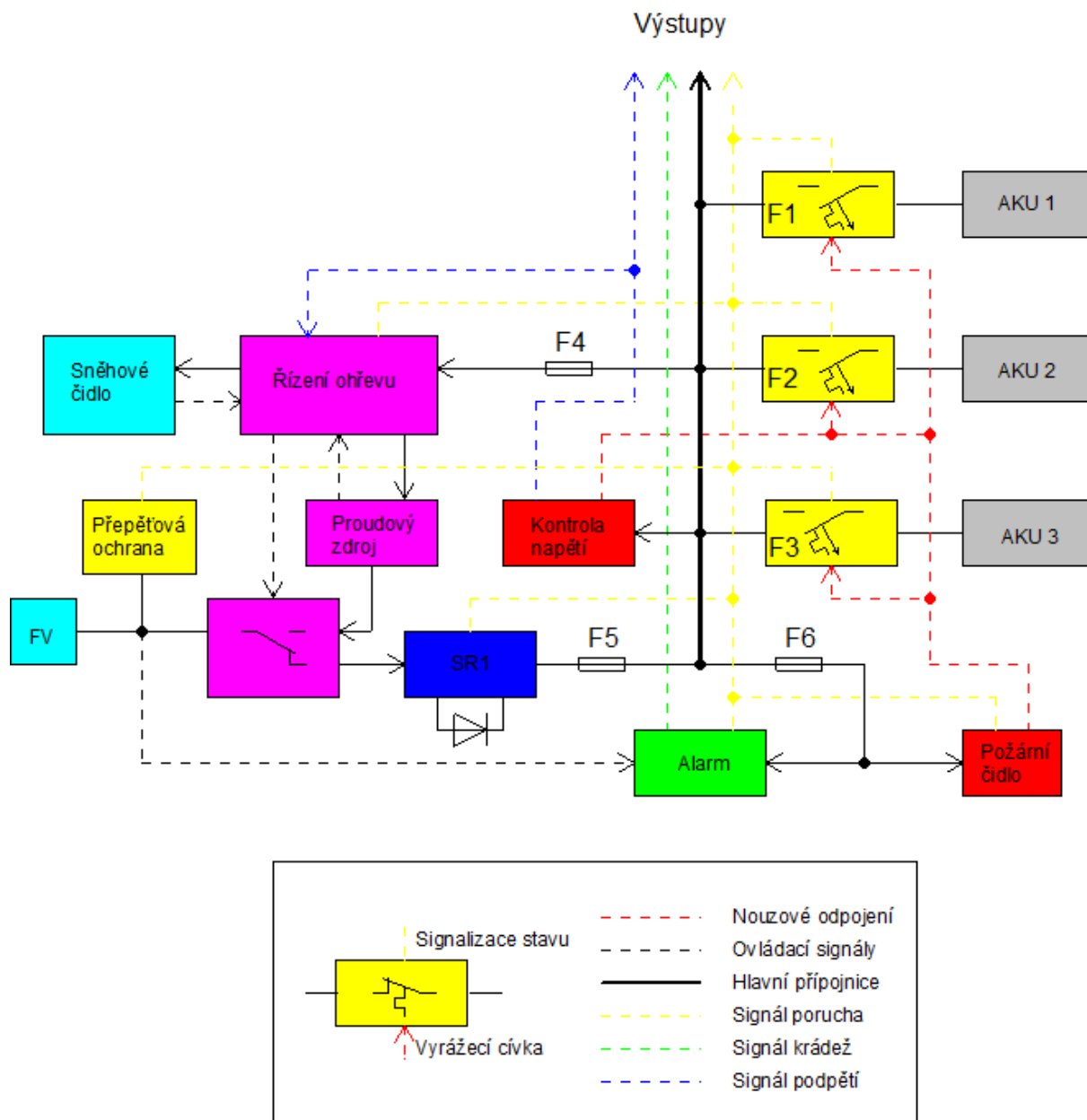
### 3.7 VLASTNÍ PROVEDENÍ ZDROJŮ

Pro co nejsnadnější údržbu je vhodné, aby byly jednotlivé zdroje sestaveny z pokud možno identických dílů. Jak zdroj energie budou použity FV panely CIS WSG0036E075 (identické s PZZ Humpolec), pro jejich poměrně malý výkon jich však bude potřeba značné množství. Panely vyšších výkonů již mají vyšší výstupní napětí, což by ve spojení s regulátorem SR1 vedlo k poklesu celkové účinnosti.

TABULKA 25: PROVEDENÍ ZDROJŮ

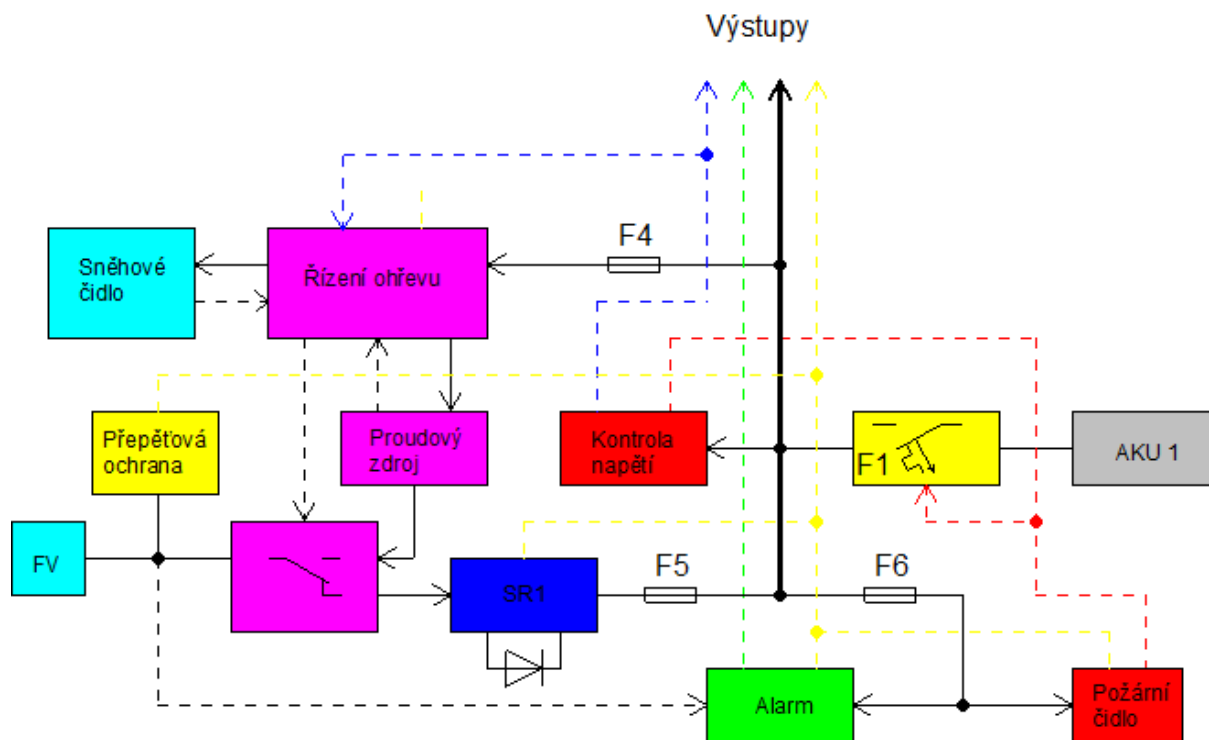
Číslo zdroje	FV panely	Akumulátor
1, 5	3 x 75 Wp	2 x 12V/26 A·h
2, 4	4 x 75 Wp	2 x 12V/64 A·h
3	26 x 75 Wp	6 x 12V/64 A·h

Akumulátory Powersafe jsou vyráběny pouze se jmenovitým napětím 12 V, proto bude zapotřebí vždy zapojení dvou kusů do série. U zdroje č. 3 budou zapojeny paralelně tři sériové skupiny. Výhoda tří paralelních skupin v napájení řídicího jádra spočívá v tom, že při poruše jednoho z akumulátorů může být spotřeba krátkodobě pokryta ostatními. Tím je zvýšena spolehlivost.



OBRÁZEK 26: BLOKOVÉ SCHÉMA MOŽNÉHO PROVEDENÍ ZDROJE Č.3

Blokové schéma vyobrazuje provedení zdroje č. 3. Zbylé zdroje budou identické, ale budou obsahovat pouze jednu sadu akumulátorů (rovněž signalizace vybavení jističe akumulátoru bude zbytečná, jelikož při jeho odpojení dojde k výpadku napětí na hlavní sběrnici).



OBRÁZEK 27: BLOKOVÉ SCHÉMA MOŽNÉHO PROVEDENÍ OSTATNÍCH ZDROJŮ

Bloky ohřevu jsou znázorněny fialovou barvou. Řídící jednotka ohřevu vyhodnocuje přítomnost sněhové pokrývky na základě čidla a uvádí tak v chod proudový zdroj. O jeho připojení k panelu (s přehozenou polaritou) se stará přepínač. Napětí na panelu v tomto režimu bude teplotně závislé, jeho hodnotu lze proto porovnávat s referencí a zamezit tak případnému přehřátí panelu a jeho zničení. Pokud tedy napětí na svorkách panelu překročí přípustnou mez (což signalizuje přehřátí/přetížení přemostovacích diod), dojde k aktivaci signálu porucha. Takto lze samozřejmě signalizovat i jakoukoliv jinou poruchu ohřevu. Pokud je signalizován stav podpětí, je ohřev blokován.

Vybavení nadproudových ochran je detekováno pomocnými kontakty (signál porucha). Po odpojení obou akumulátorů dojde také k samočinnému odpojení FV panelů regulátorem. Porucha regulátoru je signalizována jako stav porucha.

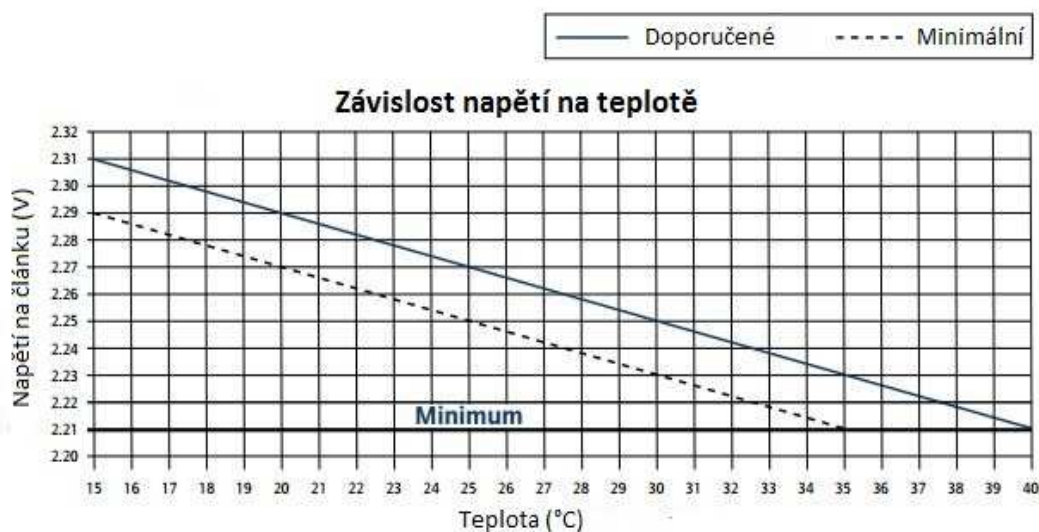
Hodnotu napětí lze kontrolovat např. soustavou napěťových relé. V případě nízkého napětí akumulátorů signalizují stav podpětí. Pokud dojde k hlubokému vybití nebo přepětí, odpojí pomocí vyrážecích cívek akumulátory od zátěže – celkem tedy bude zapotřebí tří komparačních úrovní. Hlavním cílem je zamezit poškození akumulátorů, u kterých může vlivem hlubokého vybití dojít k vnitřnímu zkratu (9). Na trhu je k dostání celá řada výrobků, v tomto případě postačuje dvojice napěťových relé HRN-34 (výrobce OEZ). Jedno bude sloužit k nouzovému odpojení při přepětí či hlubokém vybití, druhé bude signalizovat stav podpětí.

Signál krádež je aktivován při přerušení ochranné proudové smyčky kabelů FV systému, kouř lze detekovat optickým čidlem.

#### Nastavení komparační úrovně regulátoru a kontrola napětí:

Parametry baterií jsou teplotně závislé. Jelikož zdroje nebudou vybaveny řízenou ventilací, bude se teplota baterií měnit s ročním obdobím a proudem. Pokud jsou úrovně nastaveny podle katalogu (tyto hodnoty jsou většinou určeny pro teplotu 25°C), nelze v zimě plně využít kapacitu akumulátoru, jelikož je nastavené svorkové napětí nedostačující pro plné nabití. Naopak v létě dochází k přebíjení

akumulátorů, což má negativní vliv na jejich životnost. Regulátor SR1 umožňuje připojení jednotky teplotní kompenzace, která tento jev eliminuje.



OBRÁZEK 28: TEPLITNÍ ZÁVISLOST NAPĚTÍ ČLÁNKU

Referenční napětí bloků kontroly napětí teplotně kompenzované není. To ovšem nepředstavuje vážný problém, jelikož by se v běžném provozu nemělo uplatnit a k jeho aktivaci bude docházet pouze při poruše. Nouzové odpojení by mělo nastat až po určitém časovém zpoždění, aby systém nereagoval chybně např. na zkratů či další přechodné jevy.

TABULKA 26: REFERENČNÍ ÚROVNĚ

Stav	Napětí (V)	Odezva
Přepětí	30	Nouzové odpojení
Ukončení nabíjení	28,8	
Podpětí	22,8	Signál podpětí
Hluboké vybití	19,2	Nouzové odpojení

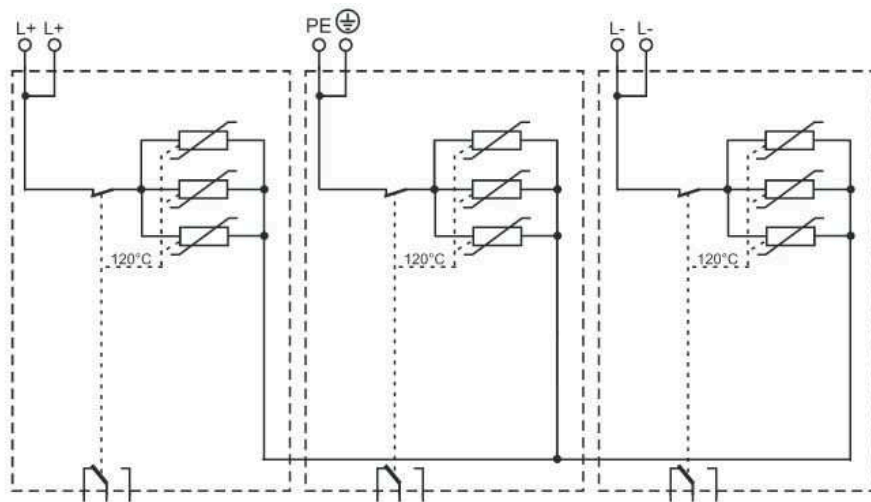
### Přepětíová ochrana:

Pro správné dimenzování je zapotřebí znát parametry zdrojů, a to zejména zkratové proudy. Ochrana je umístěna mezi FV panely a zpětnou diodu, při běžném provozu je zkratový proud roven proudu panelů nakrátko. Při ohřevu je však baterie k panelu připojena přímo – možný zkratový proud tak ovlivňuje proud akumulátorů nakrátko, ale pouze po omezenou dobu (dokud nevybaví nadproudová ochrana ohřevu).

TABULKA 27: TABULKA ZKRATOVÝCH PROUDŮ (BEZ VLIVU KABELŮ)

Číslo zdroje	Trvalý $I_k$ (A)	Krátkodobý $I_k$ (kA)
1, 5	7	1,8
2, 4	10	3,5
3	62	10,6

Použita bude varistorová přepětíová ochrana firmy Hakel (typ SPC PV 200), která je určena pro systémy o napětí do 200 V. Ochrana se skládá ze tří paralelních skupin varistorů, které jsou zapojeny do hvězdy. Jeden konec hvězdy je uzemněn, zbylé dva jsou připojeny k terminálům FV panelu.



OBRÁZEK 29: VNITŘNÍ SCHÉMA ZAPOJENÍ PŘEPĚŤOVÉ OCHRANY HAKEL

V případě přehřátí varistorů dojde k jejich samočinnému odpojení. To je signalizováno mechanickým terčíkem a také pomocnými kontakty. Přehřátí je tak možno detekovat elektricky.

#### Nadproudové ochrany:

Největší proudy protékají akumulátorem při nabíjení. U všech zdrojů bude maximální nabíjecí proud roven proudu panelů nakrátko. Zkratový proud jsem určil jako součet zkratových proudů baterií a proudů panelů nakrátko.

TABULKA 28: JIŠTĚNÍ ZDROJŮ

Číslo zdroje	Nabíjecí proud (A)	Zkratový proud (kA)	F1, F2, F3	F4	F5
1, 5	7	1,8	10 (C)	10 (gG)	8 (gG)
2, 4	10	3,5	13 (C)	13 (gG)	10 (gG)
3	62	10,6	63 (C)	63 (gG)	63 (gG)

Potřebné jističe jsem vybral z katalogu firmy OEZ. U zdroje č. 3 vyhovuje produktová řada LPN-DC, u které je uvedena zkratová odolnost 10 kA (skutečný zkratový proud bude nižší vlivem impedance kabelů). U ostatních zdrojů bude postačovat řada LPE-DO, která má zkratovou odolnost 6 kA. Velkou výhodou těchto produktů je široký výběr příslušenství, se kterým lze jističe mechanicky propojit.

K signalizaci stavu jističe lze využít modul pomocných spínačů PS-LP, jako vyrážecí cívka poslouží modul napěťové spouště SV-LP. Tyto dva moduly se pomocí mechanické spojky propojí s jističem a vytvoří tak jeden celek. Napěťová spoušť SV-LP pracuje již od napětí 12 V a bude proto fungovat i při hlubokém vybití akumulátorů. Potřebnou prodlevu nouzového vypnutí zajistí časové relé MCR řady Minia (doba prodlevy se určí z vypínacích charakteristik přístrojů, je ovšem třeba vzít v potaz i vliv kabelů). Hodnoty jističů jsou navrženy bez ohledu na poruchové impedanční smyčky, při konkrétním návrhu tak bude nutné provést kontrolu hodnot!

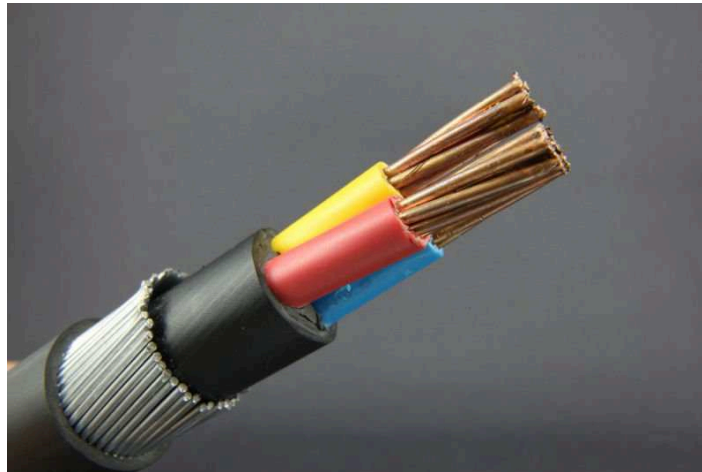
Solární regulátor umožňuje signalizaci poruchy a je proto jištěn pouze pojistkou (signalizace stavu ochrany zde není nutná). Selektivity jištění je docíleno použitím rozdílných charakteristik přístrojů.

#### Kabely:

V současnosti je na trhu k dispozici celá řada výrobků, určených speciálně pro použití v FV aplikacích. Téměř vždy se však jedná o jednožilové kabely (které jsou nevhodné pro ochranu smyčku

alarmu) s nevalnou mechanickou pevností. Vysokou odolnost vůči UV záření u těchto kabelů zajišťuje použitá izolace z materiálu XLPE.

Ze stejného materiálu je však vyrobena i izolace některých „konvenčních“ kabelů pro venkovní použití, např. N2XRY. Tento kabel je navíc pod vnější izolací vybaven ocelovým pláštěm, který podstatně zvyšuje jeho pevnost a tím ztíží práci případným vandalům. Je k dostání i v třížilové verzi a v široké škále průřezů. Průřez kabelu bude závislý na jeho délce, kterou však nelze předem odhadnout, jelikož se bude lišit podle lokality (různé umístění panelů).



OBRÁZEK 30: KABEL N2XRY (12)

#### Sněhové a meteo čidlo:

Toto čidlo bude sloužit k detekci sněhu na panelu a také k měření teploty a intenzity slunečního záření. Na základě těchto hodnot pak bude řídicí jednotka ohřev spouštět vytápění panelu. Při příliš nízkých teplotách (kdy systém nebude schopen panel ohřát nad bod mrazu) a také v noci bude ohřev blokován, aby nedocházelo ke zbytečnému vybíjení akumulátorů.

Jelikož se panely během provozu zahřívají, je třeba sněh detekovat přímo na jejich povrchu. Detekce na jiné ploše by způsobovala chybné vyhodnocení. Zde lze s výhodou využít ultrazvukového měření vzdálenosti. Před čelní plochou panelu by byl umístěn ultrazvukový vysílač s přijímačem. Vyslaný impuls se odrazí od povrchu panelu zpět k přijímači. Na základě prodlevy mezi vysláním a přijetím signálu lze stanovit vzdálenost (pokud bude na panelu sníh, vzdálenost mezi panelem a přijímačem zdánlivě poklesne). Je však třeba zajistit, aby bylo spojení čidla s panely tuhé a nedocházelo tak k jeho rozkmitání větrem. Rovněž rychlost vlny je závislá na teplotě a tak bude možná nutné tento vliv kompenzovat (to bude záviset na požadované přesnosti měření a vzdálenosti mezi čidlem a panelem).

## ZÁVĚR

---

Přestavba současných PZZ pro napájení FV panely nemá smysl. Jejich spotřeba je značná a i v případě výměny je jednodušší napájet je z přípojky nízkého napětí, která je u každého zařízení vybudována. Dle dat SŽDC je však k letošnímu roku na území ČR 4734 přejezdů, vybavených pouze výstražným křížem bez jakéhokoliv PZZ (tzv. nechráněné přejezdy). Bohužel se mi nepodařilo zjistit, kolik z nich je umístěno na jednokolejných neelektrifikovaných tratích do 80 km/h, lze ovšem předpokládat, že to bude většina. Pokud by byl v budoucnu vznesen požadavek na zabezpečení těchto přejezdů, bude typ JLC jistě zajímavou alternativou v portfoliu firmy AŽD. Další možností by byl export např. do zemí jižní Evropy, kde by jeho provoz vycházel ještě výhodněji vzhledem k vyšším hodnotám úhrnného záření a absenci sněhu.

Pro provoz v rámci republiky není možné vytvořit "universální zdroj" a při návrhu tak bude vždy potřeba brát v potaz místní podmínky, které se podstatně liší v závislosti na lokalitě. Až na základě znalosti světelných podmínek lze určit optimální orientaci, počet a umístění panelů. To bohužel celou realizaci komplikuje. Dalším problémem je sněhová pokrývka, jejíž přítomnost by potřebný instalovaný výkon zněkolikanásobila. Má – li být zařízení provozováno na území ČR autonomně, je nutné vyřešit problém s odstraněním sněhu. Bylo by také vhodné zahájit vývoj nového solárního regulátoru, který by umožňoval využití MPPT. Tak by se zvýšila účinnost celého systému a také by bylo možno používat i FV panely s vyšším jmenovitým napětím (a tím i výkonem), což přinese úsporu na kabeláži (budou postačovat menší průřezy a nižší počet propojek mezi panely). Jako zdroj hodnot intenzit záření lze použít PVGIS, je však nutno zaměřit profil horizontu, který má na výnos FV systému podstatný vliv. Nevýhodou PVGIS je možnost zobrazení pouze průměrných hodnot – pro návrh ostrovního systému by bylo vhodnější vycházet z hodnot minimálních, to však databáze neumožňuje.

Vyjma zpracování hodnot dlouhodobého měření a samotného návrhu zdrojů jsem v práci také teoreticky nastínil problematiku elektrického ohřevu FV panelů a jejich ochrany před krádeží.



## POUŽITÁ LITERATURA

---

1. **AŽD Praha a.s.** Systémy pro kolejovou dopravu. *www.azd.cz*. [Online] [Cited: 10 10, 2013.] <http://www.azd.cz/produkty/systemy-pro-kolejovou-dopravu-1/>.
2. **Grigsby, Leonard L.** *Electric power generation, transmission, and distribution*. Boca Raton : CRC Press, 2012. ISBN: 978-1\_4398-5628-4.
3. **Srdečný, Karel.** *Fotovoltaika v budovách*. Praha : EkoWATT, 2009. ISBN: 978-80-87333-04-4.
4. Photovoltaic Geographical Information System. *Joint Research Centre*. [Online] [Cited: 10 5, 2013.] <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>.
5. **Šolc, Přemysl.** První přejezd s fotovoltaickými panely u Humpolce. *Reportér AŽD Praha*. 3/2012.
6. Sonnenschein dryfit. *www.sonnenschein.org*. [Online] [Cited: 10 20, 2013.] <http://www.sonnenschein.org/A600.htm>.
7. **Šolc, Přemysl.** Fotovoltaický systém napájení PZZ. *Systémový návrh a koncepce bezpečnosti*. s.l. : AŽD Praha a.s., 2012.
8. *mapy.cz*. [Online] [Cited: 2 27, 2014.] <http://www.mapy.cz>.
9. **PowerSafe.** *contrails*. [Online] únor 2003. [Cited: 3 26, 2014.] [http://contrails.free.fr/temp/EN\\_SBS\\_PG\\_001\\_0203.pdf](http://contrails.free.fr/temp/EN_SBS_PG_001_0203.pdf).
10. **Jelle, Bjor Petter.** The challenge of removing snow downfall on photovoltaic solar cell. *Energy and Buildings*. 2013.
11. **Zdeněk Hradílek, Vladimír Král, Ilona Lázníčková.** *Elektrotepelná technika*. Praha : ČVUT, 2011. ISBN: 978-80-01-04938-9.
12. [http://i00.i.aliimg.com/photo/605753836/N2XRY\\_CU\\_XLPE\\_SWA\\_PVC\\_BS\\_5467\\_3\\_Core.jpg](http://i00.i.aliimg.com/photo/605753836/N2XRY_CU_XLPE_SWA_PVC_BS_5467_3_Core.jpg). [Online] [Cited: 4 1, 2014.]
13. ČSN 37 6605. *Připojování elektrických zařízení celostátních drah na elektrický rozvod*. s.l. : Český normalizační institut, 1987.
14. Předpis pro provoz zařízení energetického napájení zabezpečovacích zařízení. *ČD E8*. 2002.

## SEZNAM OBRÁZKŮ

---

Obrázek 1: Blokové schéma PZZ-EPA.....	3
Obrázek 2: Blokové schéma PZZ-EA .....	4
Obrázek 3: Výstražník 97-PV .....	5
Obrázek 4: Přejezdník ATE .....	6
Obrázek 5: Průřez panelem CIGS.....	7
Obrázek 6: Vliv úhlu dopadajících paprsků na výkon panelu.....	8
Obrázek 7: Prostředí PVGIS .....	9
Obrázek 8: Procentuální rozdíly mezi hodnotami PVGIS Europe a CM-SAF PVGIS.....	10
Obrázek 9: Množství dopadající sluneční energie v průběhu roku .....	11
Obrázek 10: PZZ u Humpolce (5) .....	15
Obrázek 11: Blokové schéma PZZ-RE (7) .....	16
Obrázek 12: Pokrytí spotřeby v průběhu roku a úhrnná energie.....	17
Obrázek 13: Satelitní snímek PZZ Humpolec (8).....	19
Obrázek 14: Komunikace mezi periferiemi PZZ-JLC (1).....	22
Obrázek 15: Čidlo počítače náprav .....	23
Obrázek 16: Radarové čidlo QT50R .....	24
Obrázek 17: Rozmístění periferií a jejich napájení (Autor: Přemysl Šolc).....	26
Obrázek 18: Srovnání běžného a "ledofóbního" povrchu (10) .....	29
Obrázek 19: Změna toku proudu při částečném zastínění .....	30
Obrázek 20: Tok proudu panelem při ohřevu (obrácená polarita) .....	30
Obrázek 21: Prostup tepla panelem.....	31
Obrázek 22: Náhradní schéma prostupu tepla (ustálený stav) .....	31
Obrázek 23: Tepelný model panelu.....	34
Obrázek 24: Zapojení ochranné žíly v krabicích panelů.....	35
Obrázek 25: Možný princip vyhodnocovacího obvodu .....	35
Obrázek 26: Blokové schéma možného provedení zdroje č.3.....	36
Obrázek 27: Blokové schéma možného provedení ostatních zdrojů .....	37
Obrázek 28: Teplotní závislost napětí článku .....	38
Obrázek 29: Vnitřní schéma zapojení přepěťové ochrany Hakel .....	39
Obrázek 30: Kabel N2XRY (12) .....	40

## SEZNAM TABULEK

---

Tabulka 1: Vybrané parametry PZZ-EPA .....	2
Tabulka 2: Vybrané parametry PZZ-EA .....	3
Tabulka 3: Vybrané parametry PZZ-RE .....	4
Tabulka 4: Vybrané parametry výstražníku AŽD 97-PV .....	5
Tabulka 5: Vybrané parametry závory AŽD 99 .....	5
Tabulka 6: Parametry přejezdíku .....	6
Tabulka 7: Tabulka potřebných instalovaných výkonů .....	14
Tabulka 8: Parametry fotovoltaických panelů CIS (5) .....	15
Tabulka 9: Parametry použité baterie .....	16
Tabulka 10: Tabulka pokrytí spotřeby .....	17
Tabulka 11: Roční bilance .....	18
Tabulka 12: Tabulka účinností .....	20
Tabulka 13: Srovnání naměřených hodnot s PVGIS .....	21
Tabulka 14: Srovnání projektované a skutečné účinnosti .....	21
Tabulka 15: Vybrané parametry PZZ-JLC .....	22
Tabulka 16: Výkonová bilance počítače náprav .....	23
Tabulka 17: Parametry QT50R .....	23
Tabulka 18: Vybrané parametry přejezdíku LED-P .....	24
Tabulka 19: Vybrané parametry Výstražníku LED-J .....	24
Tabulka 20: Vybrané parametry DX70 .....	24
Tabulka 21: Potřebný výkon zdrojů .....	27
Tabulka 22: Tabulka instalovaných výkonů jednotlivých zdrojů .....	27
Tabulka 23: Potřebné kapacity akumulátorů jednotlivých zdrojů .....	28
Tabulka 24: Parametry akumulátorů SBS .....	29
Tabulka 26: Provedení zdrojů .....	35
Tabulka 27: Referenční úrovně .....	38
Tabulka 28: Tabulka zkratových proudů (bez vlivu kabelů) .....	38
Tabulka 29: Jištění zdrojů .....	39