

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**



**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**2023**

**ONDŘEJ  
KOCHAŇ**

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektroenergetiky



Diplomová práce

Srovnání konceptu střešní fotovoltaické elektrárny s řetězovými  
měniči a konceptu elektrárny s optimizéry

Comparison of concept rooftop photovoltaic power plant with  
string inverter and concept power plant with optimizers

Autor: Bc. Ondřej Kochaň

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Finsterle, Ph.D.

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Praha 2023

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kochaň** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **465996**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Specializace: **Elektroenergetika**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Srovnání konceptu střešní fotovoltaické elektrárny s řetězovými měniči a konceptu elektrárny s optimizéry**

Název diplomové práce anglicky:

**Comparison of concept rooftop photovoltaic power plant with string inverter and concept power plant with optimizers**

Pokyny pro vypracování:

1. Popište jednotlivé komponenty fotovoltaické elektrárny a princip konverze záření na elektrickou energii
2. Ukažte jakým způsobem lze přistupovat k návrhu elektrárny z hlediska umístění v prostředí (klimatické a geologické podmínky a vliv orientace panelu na okamžitý výkon panelu)
3. Sepište legislativní a noremní podmínky týkající se návrhu fotovoltaických elektráren (elektrické, požární a stavební)
4. Ukažte jaké dokumenty je potřeba zpracovat a k čemu jsou důležité, aby elektrárnu bylo možné realizovat a uvést do provozu
5. Porovnejte dva návrhy pro stejný instalovaný výkon na stejné střeše
6. Ekonomicky i technicky zhodnoťte oba typy elektráren a ukažte jejich výhody a nevýhody použití

Seznam doporučené literatury:

- [1] LUQUE, A., HEGEDUS, S., 2003. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. B.m.: John Wiley & Sons, Ltd.
- [2] Přednášky předmětu: Aplikace solárních systémů B1M13ASS
- [3] Technické normy ČSN 34, 35, 36, 37, 38 a 73
- [4] SHARMA, P., Designing and Installation of Rooftop Photovoltaic Power Plant A Guide book for roof-top Solar Photovoltaic System Designing and Installation. ISBN 9783659617560.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Tomáš Finsterle, Ph.D. katedra elektrotechnologie FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **15.02.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: \_\_\_\_\_

Platnost zadání diplomové práce: **22.09.2024**

Ing. Tomáš Finsterle, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Zdeněk Müller, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne .....

.....

Podpis autora práce

## **Poděkování**

Děkuji mému vedoucímu diplomové práce za jeho pohotové řešení realizace fotovoltaické elektrárny na střeše hal fakulty elektrotechnické.

ČVUT katedře elektrotechnologie za umožnění měření na technologii Solar Edge.

Dále děkuji mému zaměstnavateli Greenbuddies s.r.o. za poskytnuté vědomosti a možnost navrhovat prestižní projekty, které mám uvedené v přílohách 1 až 4.

Děkuji matce za podporu při kontrole gramatiky.

## **Abstrakt**

Práce je vytvořena za účelem vysvětlit, jak se projektuje fotovoltaická elektrárna a zhodnotit vliv optimizérů na výrobu výkonu po celou dobu života elektrárny. Optimizéry jsou současně hojně diskutované téma jejich většího využití v praxi. V České republice není doposud používání optimizérů zakotveno podobně jako tomu je již v sousedním Německu.

Měření bylo provedeno mezi měsíci únorem až začátek května. V průběhu měření se zakrývaly jednotlivé plochy panelů tak, aby bylo možné simulovat degradaci v průběhu let pro pět zvolených bodů dle degrační křivky. Průměry jednotlivých naměřených dat se pak přepočely na charakteristický den pro celý rok a z něj se stanovila přibližná roční výroba. Byly stanoveny hodnoty varianty s optimizéry, bez optimizérů. U varianty s optimizéry pak byla stanovena korekce pro respektování nerovnoměrné degradace.

Pro tyto dvě varianty následně byla provedena ekonomická analýza na střeše elektrárny Kongresového centra Prahy o výkonu 936 kWp.

Výsledkem pak bylo zhodnocení ze všech úhlů pohledu na optimizér a určení, zda je vůbec investice do optimizérů výhodná, případně zda jejich používání nepřináší s sebou spíše více rizik.

## **Klíčová slova**

optimizér, fotovoltaická elektrárna, projektování fotovoltaické elektrárny, střídač, elektrárna s optimizéry, střešní fotovoltaická elektrárna

## **Abstract**

The thesis is designed to explain how a PV plant is designed and to evaluate the effect of optimizers on power generation over the lifetime of the plant. At the same time, optimizers are a widely discussed topic for their increased use in practice. In the Czech Republic, the use of optimizers is not yet embedded as it is already in neighbouring Germany.

The measurements were carried out between the months of February and the beginning of May. During the measurements, individual panel areas were covered so that degradation over the years could be simulated for five selected points according to the degradation curve. The averages of the individual measurements were converted to a characteristic day for the whole year and from this the approximate annual production was determined. The values of the variant with optimizers, without optimizers were determined. For the variant with optimizers, a correction was then determined to account for uneven degradation.

An economic analysis was then carried out for these two variants on the roof of the 936 kWp Prague Congress Centre power plant.

As a result, the optimiser was evaluated from all angles and it was determined whether the investment in optimisers is profitable at all or whether their use does not entail more risks.

## **Keywords**

optimizer, photovoltaic power plant, photovoltaic design, inverter, power plant with optimizers, rooftop photovoltaic power plant

# Seznam použitých zkratek

Zkratka	Popis
AC	střídavý signál
AS	architektonická studie
AXY	distribuční skříň sběru dat
Broof(t3)	skladba střech s požární odolností
Cu	označení prvku měď
ČEZ	dodavatel energií
ČSN	česká státní norma
DC	stejnoseměrný signál
DC/DC	měníč signálu, optimalizér
DSP	dokumentace pro společné rozhodnutí
DPS	dokumentace pro provedení stavby
DSPS	dokumentace skutečného provedení stavby
EN	evropská norma
ENC	encapsulant foil cell
EPDM	etylen – propylen – dienový kaučuk
EVA	etyl vinil acetát
EZ	energetický zákon
FF	fulfill factor
FV	fotovoltaická výroba
FVE	fotovoltaická elektrárna
GAK	stejnoseměrný box s přepětovými ochranami
GSM	globální systém pro mobilní komunikaci
HSZ ČR	hasičský záchranný sbor České republiky
JPO	jednotky požární ochrany
KCP	kongresové centrum Prahy
LCOE	levelized cost of energy
LID	light induced degradation
LPS	systém ochrany před bleskem
MAP	modifikovaná asfaltované pásy
MPP	místní provozní předpis
MPPT	maximum Power Point Tracking
MSP-FR-EW-C	podpěrová věž zátěžové konstrukce
MSP-FR-EW-PSF	vodící lišta zátěžové konstrukce
MSP-FR-EW-SH	ochranná podložka zátěžové konstrukce
N	část polovodiče s vodivostí typu N
NN	nízké napětí
NPV	čistá současná hodnota
OVC	overvoltage category
P	část polovodiče s vodivostí typu N
PBŘ	požárně bezpečnostní řešení
PCB	printed Circuit Board
PID	potencial induced degradation



PLC	programovatelný logický automat
PN	přechod mezi druhy polovodičů
PV	fotovoltaický modul či článek
PV GIS	photovoltaic Geographical Information System
PVC	polyvinylchlorid
PVC-P	polyvinylchlorid měkčený
PWM	pulzně šířková modulace
QR code	quick Response kód
R(EW)	požární odolnost střechy
RDC	stejnoseměrný box s přepětovými ochranami
REI	požární odolnost střechy
RTU	rozvaděč sběru dat fotovoltaické elektrárny
SIM	subscriber identity module
SPD	surge Protection Device
STOP	označení pro stop tlačítko fotovoltaické elektrárny
UV	odolné proti ultrafialovému záření
V-A	voltampérová charakteristika
VN	vysoké napětí
VVN	velmi vysoké napětí

## Seznam obrázků

Obrázek 1 – přímý a nepřímý zakázaný pás u polovodičů .....	4
Obrázek 2 – vliv šířky zakázaného pásu na generování volných nosičů náboje.....	5
Obrázek 3 – teoretická účinnost různých materiálů pro fotovoltaické články .....	6
Obrázek 4 - srovnání vývoje jednotlivých typů panelů a jejich účinnosti .....	7
Obrázek 5 - ilustrační popis fotovoltaického jevu pro stanovení náhradního schématu .....	8
Obrázek 6 – náhradní schéma fotovoltaického článku .....	10
Obrázek 7 – V-A charakteristika fotovoltaického článku .....	12
Obrázek 8 – V-A charakteristika při různých hodnotách osvětlení.....	13
Obrázek 9 – V-A charakteristika při různých teplotách .....	14
Obrázek 10 – V-A charakteristika a vliv parazitních odporů .....	14
Obrázek 11 – ilustrace PN přechodu z hlediska energií.....	15
Obrázek 12 - příklad vlivu překlenovací diody na celkový výkon modulu při zastínění článku.....	16
Obrázek 13 - dopad slunečního paprsku na antireflexní vrstvu.....	18
Obrázek 14 - dopad slunečního paprsku na texturovaný povrch .....	18
Obrázek 15 - mechanismus degradace .....	20
Obrázek 16 - mechanismus PID degradace.....	21
Obrázek 17 - pokles účinnosti fotovoltaického panelu během času .....	22
Obrázek 18 - příklad instalace střešního háku 1 .....	23

Obrázek 19 - příklad instalace střešního háku 2 .....	24
Obrázek 20 - příklad instalace svorky pro trapézové střechy .....	25
Obrázek 21 - příklad instalace svorky pro střechy se stojatou drážkou .....	26
Obrázek 22 - příklad instalace do PVC střechy .....	26
Obrázek 23 - příklad instalace zátěžového systému na střechu .....	27
Obrázek 24 - příklad uchycení vodičích profilů .....	28
Obrázek 25 - uchycení panelové svorky .....	28
Obrázek 26 - příklad uchycení panelů ke konstrukci a definování pevného sklonu .....	29
Obrázek 27 - technické informace zátěžového systému East-West firmy Schweizer .....	30
Obrázek 28 - diagram topologie centrálního střídače .....	31
Obrázek 29 - diagram topologie stringového střídače .....	31
Obrázek 30 - vícepólové zapojení části střídače .....	32
Obrázek 31 - diagram topologie modulového střídače .....	32
Obrázek 32 - vnitřní topologie střídače, část 1 .....	33
Obrázek 33 - vnitřní topologie střídače, část 2 .....	33
Obrázek 34 - instalace FVE na střeše bez vnějšího systému ochrany před bleskem .....	36
Obrázek 35 - neizolovaný (neoddálený) systém ochrany před bleskem .....	37
Obrázek 36 - hodnoty soustav podle třídy LPS .....	38
Obrázek 37 - umístění přepěťové ochrany optimizérů .....	39
Obrázek 38 - ochrana AC strany pro vzdálenost mezi připojením na síť a střídačem větší než 10 m .....	40
Obrázek 39 - ochrana DC strany pro vzdálenost mezi připojením na síť a střídačem větší než 10 m .....	41
Obrázek 40 - výroba s výkonem do 100 kW, dvoutarifové měření NN s regulací výkonu .....	44
Obrázek 41 - vstupní data pro výpočet výroby fotovoltaické elektrárny na střeše kongresového centra .....	53
Obrázek 42 - polovina výkonu západní orientace fotovoltaické elektrárny KCP .....	54
Obrázek 43 - závislost poměru $\Psi$ na teplotě povrchu vodiče $T_i$ při $I_v$ .....	63
Obrázek 44 - male část konektoru MC 4 od firmy Stäubli .....	64
Obrázek 45 - female část konektoru MC 4 od firmy Stäubli .....	64
Obrázek 46 - příklad zapojení měření DC vodičů při osvětlených panelech .....	67
Obrázek 47 - příklad zapojení měření AC vodičů .....	68
Obrázek 48 - příklad zapojení univerzálního měření $U_{oc}$ a $I_{sc}$ fotovoltaických stringů .....	69
Obrázek 49 - příklad zapojení pro měření vodivého spojení rámu fotovoltaických modulů .....	70
Obrázek 50 - místo realizace střešní fotovoltaické elektrárny .....	71

## Seznam tabulek

Tabulka 1 - typy interakcí s materiálem a jejich důsledek .....	3
Tabulka 2 - ztráty ve fotovoltaickém modulu .....	17
Tabulka 3 - rozdělení podle charakteristického vlivu na výkon panelu .....	19
Tabulka 4 - program měření .....	76
Tabulka 5 - srovnání odhadované roční produkce el. energie pro měřené varianty .....	81
Tabulka 6 - výsledná roční produkce dvou typů elektráren.....	83
Tabulka 7 - základní parametry elektrárny a počáteční investice.....	85
Tabulka 8 - cena a spotřeba elektrické energie .....	86
Tabulka 9 - průměrná roční degradovaná spotřeba obou variant.....	86
Tabulka 10 - časové parametry.....	86
Tabulka 11 - výsledky LCOE pro jednotlivé varianty .....	87

## Seznam grafů

Graf 1 - průběh poklesu výkonu udávaný výrobcem panelů .....	73
Graf 2 - plán degradace panelů FAK450E8D .....	74
Graf 3 - zakrytá plocha panelů v průběhu života elektrárny.....	75
Graf 4 - denní výroba fotovoltaické elektrárny mezi dny 03.02.2023 - 05.03.2023 .....	78
Graf 5 - denní výroba fotovoltaické elektrárny mezi dny 06.03.2023 - 05.04.2023 .....	79
Graf 6 - denní výroba fotovoltaické elektrárny mezi dny 06.04.2023 - 05.05.2023 .....	80
Graf 7 - závislost roční produkce na počtu degradovaných panelů .....	82
Graf 8 - přehled finančních toků v průběhu života elektrárny.....	87
Graf 9 - vliv citlivosti parametru ceny optimizérů na NPV .....	88
Graf 10 - vliv citlivosti parametru příspěvku optimizérů na NPV .....	88
Graf 11 - vliv citlivosti parametru ceny elektrické energie na NPV.....	89
Graf 12 - vliv citlivosti parametru instalovaného DC výkonu na NPV .....	89

## Seznam příloh

Příloha 1a – architektonická studie Okrouhlá u Chebu

Příloha 1b – žádost o připojení fotovoltaické elektrárny Kovohutě Příbram

Příloha 2 – dokumentace pro společné rozhodnutí Kovohtuě Příbram

Příloha 3 – dokumentace pro provedení stavby Kongresové centrum Prahy

Příloha 4 – dokumentace skutečného provedení stavby výrobního závodu Škoda a.s. Mladá Boleslav hala  
U6C

Příloha 5 – výpočet úbytků napětí AC kabelu

Příloha 6 – naměření a zpracovaná data, finanční model

Příloha 7 – datové listy a manuály použitých komponent fotovoltaické elektrárny použité pro měření

## Seznam veličin

$\Phi_{in}(\lambda)$	tok fotonů jež dopadá ze zdroje na materiál
$\Phi_0(\lambda)$	tok fotonů jež pronikne do materiálu
$R(\lambda)$	odrazivost povrchu jež je pro různé vlnové délky jiná
$\Phi(x, \lambda)$	tok fotonů vniklých do určité hloubky od povrchu materiálu
$x_L(\lambda)$	absorpční délka
$n, p$	celková koncentrace elektronů/děr po ozáření
$n_0, p_0$	koncentrace polovodiče při termodynamické rovnováze
$\Delta n, \Delta p$	koncentrace nerovnovážných nosičů náboje vlivem ozáření
$W_g$	energie potřebná k překonání zakázaného pásu
$h$	Planckova konstanta odpovídající $6,626 \cdot 10^{-34} [J \cdot s]$
$c$	rychlost světla odpovídající $299,792 \cdot 10^6 [m \cdot s^{-1}]$
$\lambda$	vlnová délka
$J_{PV}(\lambda)$	celková proudová hustota generovaného proudu
$J_{PVN}(\lambda)$	proudová hustota oblasti polovodiče typu N
$J_{PVP}(\lambda)$	proudová hustota oblasti polovodiče typu P
$J_{OPN}(\lambda)$	proudová hustota oblasti PN přechodu
$D_i$	difuzní koeficient polovodiče typu N či P
$\tau_i$	doba života nerovnovážného nosiče náboje typu N či P

$k$	Boltzmanova konstanta
$T$	absolutní teplota článku
$e$	elementární náboj
$\mu_i$	pohyblivost nosičů náboje polovodiče typu N či P
$J$	celková proudová hustota diody
$J_{01}$	proudová hustota části polovodiče typu N a P
$J_{02}$	proudová hustota společné části v oblasti PN přechodu
$U_j$	napětí na článku mezi horní a spodní částí polovodiče
$\xi_1$ a $\xi_2$	jsou pomocné koeficienty pro modelaci vlastností polovodiče
$n_i$	koncentrace volných nosičů náboje (děr i elektronů)
$D_n$	difuzní koeficient vyjadřující jak rychle dochází k difuzi
$L_n$	difuzní délka částic daná dobou jejich života
$p_{p0}, n_{n0}$	koncentrace děr a elektronů
$d$	šířka PN přechodu
$\tau_{SC}$	doba života nosičů náboje při stavu na krátko
$I_{PV}$	proud generovaný článkem
$I_{D1}$ a $I_{D2}$	proudy náhradních diod
$I_{SH}$	proud paralelním odporem
$I_{01}$ a $I_{02}$	proudy náhradních diod respektující části polovodivého článku
$U$	napětí na svorkách článku
$I$	proud vytvořený připojením spotřebiče na svorky článku
$R_s$	sériový odpor článku
$R_p$	paralelní odpor článku
$FF$	fullfill faktor
$U_{mp}, I_{mp}$	souřadnice bodu maximálního výkonu
$U_{OC}$	napětí na prázdko

$I_{SC}$	proud na krátko
$\eta$	účinnost fotovoltaického článku získaná z V-A charakteristiky
$d_a$	tloušťka vrstvy
$n_1$	počet odrazů uvnitř materiálu
$n_2$	počet paprsků prošlých materiálem
$n_0$	je počet paprsků odražených na hraně materiálu
$\delta_{východ}$	je azimut panelů orientovaných na východ tak
$\delta_{západ}$	azimut panelů orientovaných na východ tak
$\delta_n$	azimut dvojce panelů orientovaných východ/západ
$n_s$	počet střídačů
$S_{si}$	AC výkon zamýšlených střídačů
$n_p$	počet panelů
$\sum_{i=1}^n (n_{pi} \cdot P_{pi})$	součet všech výkonů panelů instalovaných v elektrárně
$\varepsilon$	přetížení střídače, poměr vstupního DC výkonu ku výstupnímu AC výkonu
$\sum S_{tr}$	součet výkonů transformátorů do kterých je výkon z elektrárny vyveden
$\sum I_{s\_max}$	maximální AC proud který je schopen střídač vyvinout
$U_{tr}$	napěťová hladina na které střídač pracuje
$\Delta u_{DC\%}$	DC úbytek napětí v procentech
$\gamma_{vodiče}$	je měrný odpor DC vodiče
$l_{string}$	délka stringu
$\sum U_p$	součet napětí panelů instalovaných ve stringu
$M$	poměrná hmotnost vodiče
$c_p$	měrná tepelná kapacita vodiče
$P_J$	Joulové ztráty vlivem průchodu proudem
$P_S$	výkon dodaný slunečním zářením
$P_M$	ohřev vodiče magnetickým polem

$P_R$	výkon odvedený sáláním
$P_C$	výkon odvedený konvekcí
$R_{DC_{20^{\circ}C}}$	stejnoseměrný odpor při teplotě 20°C
$\alpha_{\Omega}$	součinitel tepelného odporu
$T_{AV}$	teplota povrchu vodiče
$T_{ok}$	teplota okolí
$\sigma$	Stefanova-Boltzmannova konstanta
$\varepsilon$	emisivita tepelného záření
$D$	charakteristický rozměr a lze ho vypočítat jako
$S$	povrch vodiče
$o$	omočený obvod – obvod v řezu, který je vystaven konvekcí
$\alpha_{konv}$	součinitel přestupu tepla konvekcí
$a$	koeficient pohltivosti slunečního záření
$I_{př}$	přímé sluneční záření
$\omega$	úhel mezi osou vodiče a slunečními paprsky
$l_{vod}$	délka AC kabelu
$U_v$	napětí, na kterém je kabel provozován
$L$	indukčnosti kabelu
$R_{isostring}$	odpor naměřeného stringu
$n$	počet modulů v řetězci
$R_{Lx}$	odpor x-tého fázového vodiče
$R_N$	odpor nulového vodiče

# Obsah

<b>1.</b>	<b>Úvod .....</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>Komponenty fotovoltaické elektrárny .....</b>	<b>2</b>
2.1.	Fotovoltaický panel .....	2
2.1.1.	Princip funkce .....	2
2.1.1.1.	Absorpce světla materiálem .....	2
2.1.1.2.	Generování nerovnovážných nosičů náboje .....	3
2.1.1.3.	Vliv šířky zakázaného pásu na konverzi sluneční energie .....	4
2.1.2.	Teoretická účinnost .....	5
2.1.3.	V-A charakteristika fotovoltaického článku .....	8
2.1.3.1.	Náhradní schéma fotovoltaického článku .....	8
2.1.3.2.	Výsledná V-A charakteristika .....	11
2.1.3.3.	Vlivy změn jednotlivých parametrů na V-A charakteristiku .....	13
2.1.4.	Konstrukce .....	15
2.1.4.1.	Vytvoření gradientu elektrického pole pro odvedení elektronů nebo děr .....	15
2.1.4.2.	Konstrukce modulů .....	16
2.1.5.	Ztráty modulu .....	17
2.1.5.1.	Optické ztráty .....	17
2.1.5.2.	Elektrické ztráty .....	18
2.1.6.	Degradace modulu .....	19
2.1.6.1.	Degradace vlivem potenciálu .....	19
2.1.6.2.	Degradace vlivem světla .....	21
2.1.6.3.	Vliv nelineární degradace na ekonomický model .....	22
<b>3.</b>	<b>Konstrukce pro fotovoltaické panely .....</b>	<b>23</b>
3.1.1.	Konstrukce pro šikmé střechy .....	23
3.1.1.1.	Uchycení do taškové, ocelové a břidlicové střechy .....	23
3.1.1.2.	Uchycení do trapézové a vlnité střechy .....	24
3.1.1.3.	Uchycení do střechy se stojatou drážkou .....	25
3.1.1.4.	Uchycení do střechy s bitumenovou, EPDM nebo PVC krytinou .....	26
3.1.2.	Konstrukce pro rovné střechy .....	27
3.1.3.	Upevnění panelu ke konstrukci .....	27
3.1.3.1.	Šikmé střechy .....	27
3.1.3.2.	Rovné střechy .....	28
3.1.4.	Dilatace fotovoltaických konstrukcí .....	29
3.2.	Střídač .....	30
3.2.1.	Centrální střídače .....	30
3.2.2.	Stringové střídače .....	31
3.2.3.	Modulové střídače .....	32



3.2.4.	Princip funkce střídačové části střídače .....	33
<b>4.</b>	<b>Legislativní podmínky instalace FVE.....</b>	<b>35</b>
4.1.1.	Ochrana před bleskem .....	35
4.1.1.1.	Bez vnějšího systému ochrany před bleskem.....	35
4.1.1.2.	S vnějším systémem ochrany před bleskem.....	36
4.1.1.3.	Metody návrhu LPS .....	37
4.1.2.	Přepět'ové ochrany.....	38
4.1.2.1.	Ochrana DC části .....	38
4.1.2.2.	Ochrana optimizérů.....	38
4.1.2.3.	Ochrana AC části .....	39
4.1.2.4.	Průřezy vodičů .....	39
4.1.2.5.	Délka vodičů .....	40
4.2.	Připojovací podmínky pro fotovoltaické elektrárny .....	41
4.2.1.	Základní podmínky.....	41
4.2.2.	Požadavky na instalace FVE do 11 kW .....	42
4.2.3.	Požadavky na instalace FVE od 11 kW do 100 kW .....	42
4.2.4.	Požadavky na instalace FVE nad 100 kW .....	42
4.2.5.	Dodatek o podmínkách pro fotovoltaické elektrárny.....	43
4.2.6.	Rozpadové místo elektrárny .....	43
4.2.7.	Měření v NN části s regulací výkonu výroby .....	43
4.3.	Požadavky na požární bezpečnost FVE.....	44
4.3.1.	Nároky na provedení střešního pláště.....	46
4.3.2.	Definování odstupových vzdáleností od fotovoltaických panelů .....	46
4.3.2.1.	Hašení požáru fotovoltaické elektrárny.....	46
4.3.3.	Návrh vyhlášky z roku 2023.....	47
4.3.3.1.	Požadavky na materiálové provedení.....	47
4.3.3.2.	Požadavky na vypnutí a odpojení.....	47
4.3.4.	ČSN 73 0847 Požární bezpečnost staveb – fotovoltaické systémy.....	47
4.4.	Požadavky na statiku a zátěž FVE .....	48
4.4.1.	Statistický posudek .....	48
<b>5.</b>	<b>Princip návrhu střešní fotovoltaické elektrárny.....</b>	<b>50</b>
5.1.	Architektonická studie (AS) .....	50
5.1.1.	Rozmístění panelů .....	51
5.1.2.	Jednopolové schéma .....	51
5.1.3.	Technická zpráva .....	52
5.1.4.	Přílohy .....	52
5.1.5.	Odhad výroby .....	52
5.1.6.	Žádost o připojení.....	54
5.2.	Dokumentace pro vydání společného povolení (DSP) .....	55

5.2.1.	A – Průvodní zpráva .....	55
5.2.2.	B – Souhrnná technická zpráva.....	55
5.2.3.	C – Výkresy širších vztahů .....	55
5.2.4.	D – Dokumentace objektů .....	56
5.3.	Dokumentace pro provádění stavby (DPS).....	56
5.3.1.	Dimenzování výkonu střídačů .....	56
5.3.2.	Tvorba panelových větví .....	57
5.3.2.1.	Vliv typu střídače na string .....	58
5.3.2.2.	Návrh stringů.....	58
5.3.3.	Návrh optimizérů .....	58
5.3.4.	Výpočet úbytku napětí .....	59
5.3.4.1.	Výpočet úbytku napětí DC vodičů .....	59
5.3.4.2.	Výpočet úbytku napětí AC vodičů .....	59
5.3.5.	Spojení DC kabelů.....	63
5.3.6.	Vyvedení výkonu do distribuční soustavy .....	64
5.3.7.	Tvorba zátěžového plánu .....	64
5.3.8.	Popis ostatních dokumentů .....	65
5.4.	Dokumentace skutečného provedení stavby (DSPS).....	65
5.4.1.	Dokladová část.....	66
5.5.	Místní provozní předpis (MPP) .....	66
5.6.	Uvedení fotovoltaické elektrárny do provozu.....	66
5.6.1.	Měření izolace .....	66
5.6.1.1.	Izolace DC vodičů.....	67
5.6.1.2.	Izolace AC vodičů.....	68
5.6.2.	Měření napětí na prázdko a proudu na krátko.....	68
5.6.3.	Měření zemního spojení kovových částí instalace.....	69
<b>6.</b>	<b>Porovnání klasických stringových měničů s technologií optimizérů (Solar Edge) .....</b>	<b>71</b>
6.1.	Použité komponenty fotovoltaické elektrárny .....	71
6.2.	Metodika měření .....	72
6.3.	Naměřená data .....	77
6.4.	Zpracování měření .....	77
6.5.	Výsledky měření .....	77
<b>7.</b>	<b>Ekonomické zhodnocení obou typů elektráren .....</b>	<b>84</b>
7.1.	Metodika finančního modelu .....	84
7.1.1.	Nulová varianta.....	84
7.2.	Ekonomický model.....	84
7.3.	Vstupní data .....	85
7.4.	Výsledky .....	86
7.5.	LCOE.....	87

7.6.	Citlivostní analýza .....	87
7.7.	Manažerské shrnutí .....	90
<b>8.</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>91</b>
<b>9.</b>	<b>Použitá literatura .....</b>	<b>92</b>

# 1. Úvod

---

Fotovoltaické elektrárny jsou v současnosti velmi aktuální téma. Evropská unie stanovila, že do roku 2030 bude emise skleníkových plynů o 55 % nižší než v roce 1990. Protože 75 % vypuštěných emisí do ovzduší pochází z energetického průmyslu, je transformace tohoto průmyslového odvětví rozhodující. Z tohoto důvodu připravila Evropská unie legislativní půdu pro rozmach instalací fotovoltaických elektráren s cíli pro rok 2030 [1]. V letech 2012 až 2021 instalovaný výkon vzrostl z 102 GW na téměř 850 GW, přičemž největším producentem této obnovitelné elektrické energie je v současnosti asijský kontinent, který během minulého desetiletí instaloval výkon téměř 490 GW. Největším producentem fotovoltaické energie v současnosti je Čína s 306,4 GW instalovaného výkonu [2].

V roce 2022 zasáhl Evropu konflikt, který s největší pravděpodobností urychlí rozvoj obnovitelných zdrojů v Evropě. Je důležité vyřešit energetickou bezpečnost urychlením výstavby obnovitelných zdrojů a snížení závislosti na fosilních palivech dovážených ze zemí mimo Evropu [3].

V současnosti je používána technologie s multikrystalickým křemíkem a to díky masové automatické výrobě a univerzálnosti jednotlivých postupů [4].

Existují dva typy odlišných přístupů k instalaci fotovoltaických elektráren. Prvním typem je instalace s upevněním do země a druhý typ je instalace na střešní plášť domů, hal nebo skladů. Vzhledem k tomu, že většina podniků nemá k dispozici volné nevyužité pozemky, ale většinou disponuje volným prostranstvím na střechách svých budov, budu se zabývat především instalacemi na střechu.

Cílem této diplomové práce je zhodnotit vliv optimizérů na instalace, nastínit legislativní a technické požadavky na realizaci fotovoltaických elektráren, popsat jak se jednotlivé stupně dokumentace zpracovávají či co musí obsahovat a porovnat nejmodernější technologie s těmi, které jsou již hojně používány.

## 2. Komponenty fotovoltaické elektrárny

---

### 2.1. Fotovoltaický panel

Fotovoltaický panel je komplexní a složité zařízení, které využívá veškerých znalostí technických oborů od chemie až po elektrotechniku, pokročilých výrobních zařízení a nejnovější poznatky v oborech fyziky a elektrotechniky.

Fotovoltaický jev byl odhalen již v 19. století A.E. Becquerelem, později H.R. Herzem a popsán až na počátku 20. století A. Einsteinem. Téměř půl století trvalo než byl zkonstruován první fotovoltaický článek a další půl století trvalo než náklady klesly na přijatelnou úroveň a mohly se širokou veřejností aplikovat [5].

#### 2.1.1. Princip funkce

K pochopení funkce fotovoltaického článku je nutné mít znalosti především z oboru polovodičové fyziky, znát a pochopit, jak se světlo šíří v prostředí a jak interaguje s materiálem.

##### 2.1.1.1. Absorpce světla materiálem

V okamžiku, kdy na materiál dopadá světlo o určité vlnové délce nesoucí sebou energii, dojde na povrchu materiálu k interakci. Část kvanta fotonů se odrazí, část pronikne do materiálu, kde s ním interaguje a velmi malá část proletí skrze materiál a neinteraguje s ním [6]. Při zanedbání toku fotonů, které proletí skrze materiál můžeme psát:

$$\Phi_0(\lambda) = \Phi_{in}(\lambda) \cdot (1 - R(\lambda)) \quad (1)$$

kde:  $\Phi_{in}(\lambda)$  je tok fotonů jež dopadá ze zdroje na materiál

$\Phi_0(\lambda)$  je tok fotonů jež pronikne do materiálu

$R(\lambda)$  odrazivost povrchu jež je pro různé vlnové délky jiná

Tyto fotony, které pronikly do materiálu následně interagují s částicemi materiálu. Dochází k útlumu tohoto toku exponenciálně:

$$\Phi(x, \lambda) = \Phi_0(\lambda) \cdot e^{-\alpha(\lambda) \cdot x}, \quad x_L(\lambda) = \frac{1}{\alpha(\lambda)} \quad (2)$$

kde:  $\Phi(x, \lambda)$  je tok fotonů vniklých do určité hloubky od povrchu materiálu

$x_L(\lambda)$  je absorpční délka

Absorpční délka udává fakt, že v této vzdálenosti se absorbuje 64 % veškeré intenzity toku fotonů vniklých do materiálu.

Absorpce je schopnost fotonů interagovat s materiálem. Děje se tak na třech úrovních:

Tabulka 1 - typy interakcí s materiálem a jejich důsledek

Typy interakcí fotonů s materiálem	Důsledek
interakce s mřížkou	zvýšení teploty
interakce s volnými elektrony	zvýšení teploty
interakce s vázanými elektrony	tvorba volných nosičů náboje

Zdroj: [6]

Z tabulky [Tabulka 1] je patrné, že interakce s mřížkou a volnými elektrony má za následek zvýšení teploty materiálu a pouze jedna interakce je schopná vytvořit volné nosiče náboje.

### 2.1.1.2. Generování nerovnovážných nosičů náboje

V polovodičích dochází k jevu, kdy vlivem zakázaného pásu závisí elektrická propustnost tohoto materiálu na polaritě přiloženého napětí. To se děje vlivem zakázaného pásu, který musí být větší, než je vazební energie elektronu. Tuto hladinu můžeme definovat jen pokud je polovodič v termodynamické rovnováze [6].

V okamžiku, kdy na polovodič bude dopadat tok fotonů a bude absorbován, nebude již polovodič v termodynamické rovnováze a začne generovat páry elektron – díra. To se může dít jen tehdy, pokud energie fotonů bude větší, než je šířka zakázaného pásu  $W_g$  a platí:

$$n = n_0 + \Delta n, \quad p = p_0 + \Delta p \quad (3)$$

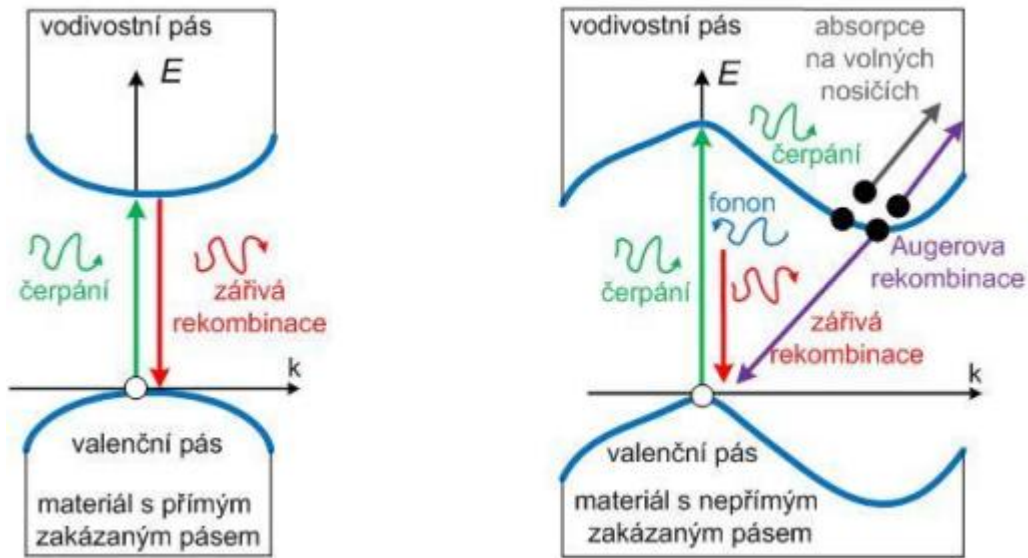
kde:  $n, p$  je celková koncentrace elektronů/děr po ozáření

$n_0, p_0$  je koncentrace polovodiče při termodynamické rovnováze

$\Delta n, \Delta p$  je koncentrace nerovnovážných nosičů náboje vlivem ozáření

Část těchto vytvořených nerovnovážných nosičů náboje rekombinuje zpět. Existují tři typy rekombinace. Proces, při němž elektron rekombinuje s dírou a svou energii má postačující k tomu, aby generoval další elektron se nazývá Augerova rekombinace. V druhém typu rekombinace dochází při přeskočení elektronu do díry k emitaci fotonu. Tato rekombinace je často nazývána jako přímá nebo zářivá. Třetí rekombinací je rekombinace pomocí lokálních center neboli Shockley-Read-Hall rekombinace. K té dochází v okamžiku, kdy jsou v polovodiči přítomny nečistoty, které vytvoří v zakázaném pásu více hladin. Elektron tak nejprve rekombinuje do lokálního centra a následně do díry na druhé straně zakázaného pásu [7].

Pravděpodobnost přeskočení závisí na dvou typech pásových struktur. V prvním případě se jedná o tzv. přímou pásovou strukturu.



Obrázek 1 – přímý a nepřímý zakázaný pás u polovodičů

Zdroj: [8]

Přímá pásová struktura se vyznačuje svým minimem o velikosti  $W_g$  v bodě vlnového vektoru  $k = 0$ . S rostoucím  $k$  roste i hustota stavů, a tedy pravděpodobnost generace páru elektron-díra, platí pro něj že  $W_2 = W_1 + hv$ , čili elektron přejde z valenčního pásu do vodivostního za pomoci energie fotonu.

V případě nepřímé pásové struktury dochází k interakci jen tehdy, pokud je přítomen ještě foton, který předá patřičnou energii k přeskočení do vodivostního pásu [6].

### 2.1.1.3. Vliv šířky zakázaného pásu na konverzi sluneční energie

Ke generaci nerovnovážných nosičů náboje dochází pouze tehdy pokud platí:

$$W_g \leq h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad (4)$$

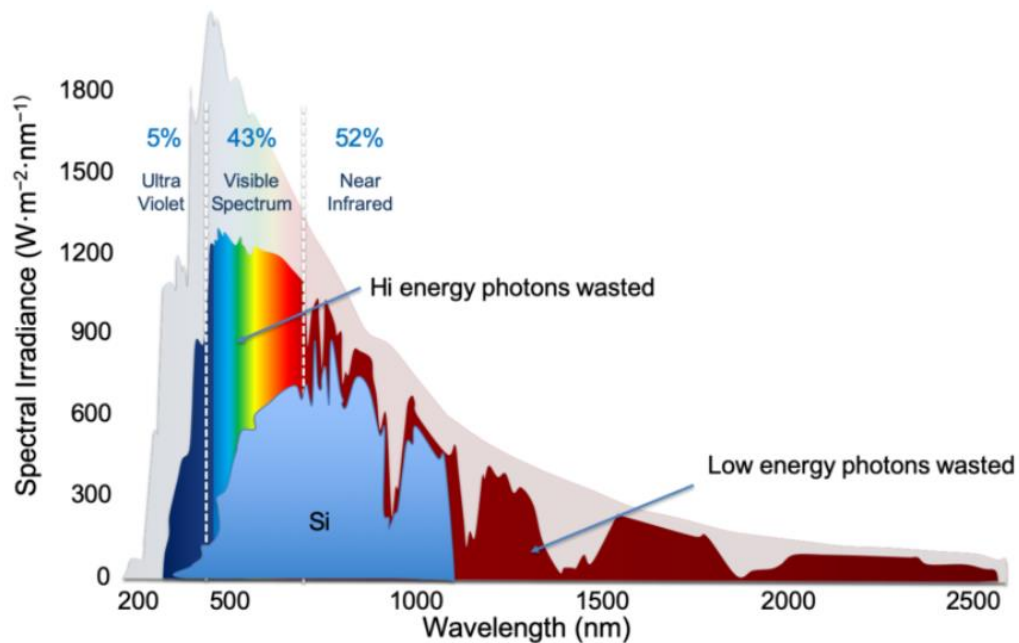
kde:  $W_g$  je energie potřebná k překonání zakázaného pásu

$h$  je Planckova konstanta odpovídající  $6,626 \cdot 10^{-34} [J \cdot s]$

$c$  je rychlost světla odpovídající  $299,792 \cdot 10^6 [m \cdot s^{-1}]$

$\lambda$  je vlnová délka

Fotony s větší energií, než je  $W_g$  tedy generují páry elektron – díra. Fotony s energií menší již nejsou schopny předat elektronu takovou energii, aby překonal zakázaný pás a nemohou se tedy účastnit fotovoltaického jevu. Pokud ovšem nastane situace, kdy foton předá takovou energii páru elektron – díra, že by již polovodič nebyl v termodynamické rovnováze, dojde k vyloučení přebytečné energie v teplo [6]. Tyto dva jevy vysvětluje následující obrázek:



Obrázek 2 – vliv šířky zakázaného pásu na generování volných nosičů náboje

Zdroj: [9]

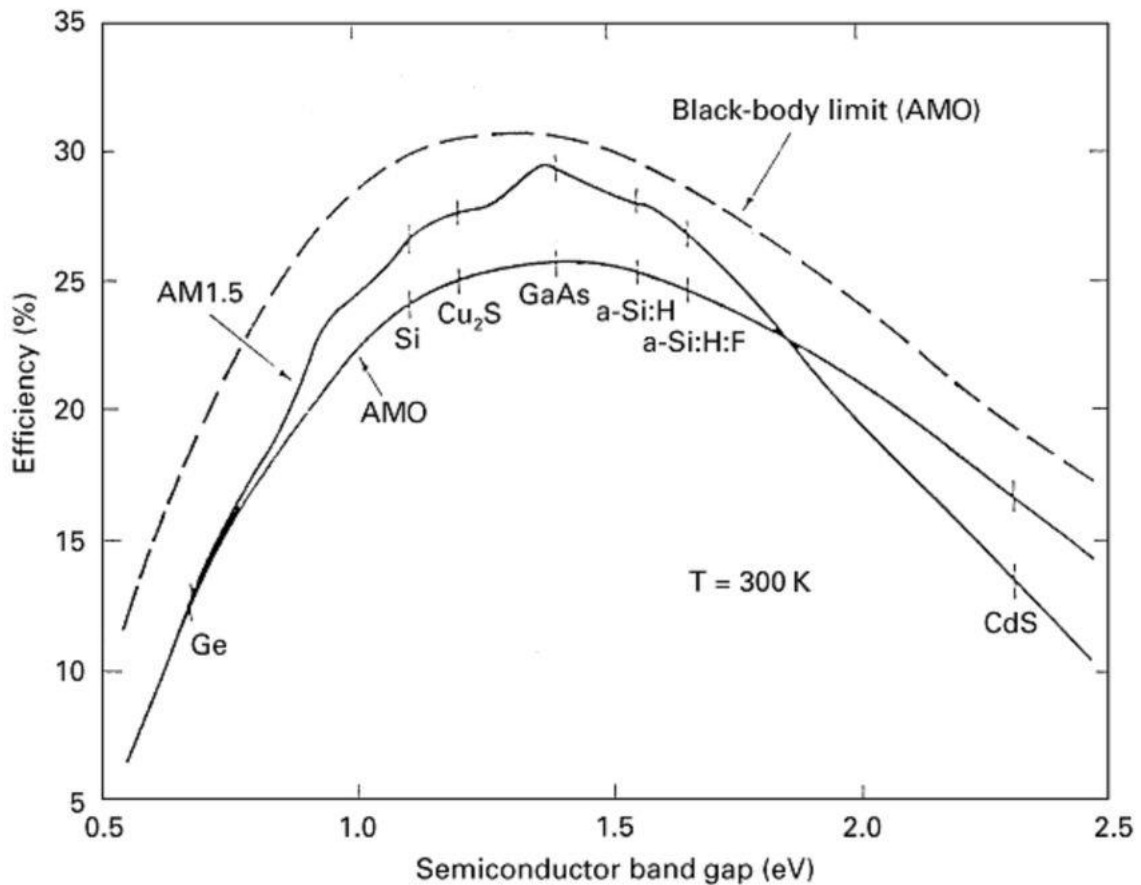
Na obrázku [Obrázek 2] je spektrum slunečního záření dopadající na povrch Země. Je vidět, že z celkové plochy je schopen křemíkový fotovoltaický článek konvertovat na vytvoření nerovnovážných nosičů náboje pouze modrou plochu. Žlutá část je oblast, kde mají elektrony příliš velkou energii a tu vyloučí na teplo. Šedá část naopak ukazuje oblast, kde elektrony nedostanou dostatečnou energii k překonání zakázaného pásu.

### 2.1.2. Teoretická účinnost

Hlavním cílem návrhu fotovoltaických článků je co nejvíce zvětšit plochu kterou článek je schopen přeměnit na elektrickou energii. Lze ji zvětšit jen změnou šířky zakázaného pásu, a to lze provést vhodnou volbou materiálů a jejich následné úpravě do různých slitin. Pro kvantifikaci slouží pojem maximální teoretická dosažitelná účinnost podle Shockley-Queisser teorému, která vyjadřuje poměr plochy spektra sloužícího ke generování nerovnovážných nosičů náboje se spektrem zdroje záření (většinou Slunce) [6].



V následujícím obrázku jsou naznačeny jednotlivé materiály používané pro výrobu fotovoltaických článků.



Obrázek 3 – teoretická účinnost různých materiálů pro fotovoltaické články

Zdroj: [10]

Na obrázku [Obrázek 3] lze vidět vhodné materiály, které mají perspektivní využití v budoucnu. Není zde ale hojně diskutovaný perovskit, který je náchylný na degradaci vlivem vlhkosti a kyslíku v atmosféře [11].

Na úrovni výzkumu se v současnosti hovoří o vícepřechodových fotovoltaických člancích. Jsou to články, které tvoří více polovodivých vrstev různých materiálů nanesených na sebe. Tyto materiály jsou schopny vytvořit elektrickou energii z různých vlnových délek a tím se maximalizuje účinnost fotovoltaických článků. V dnešní době jsou již vyráběny čtyřvrstvé fotovoltaické články s účinností téměř 48 % [12].

Díky tomu bude v následujících letech možné instalovat tyto sériově vyráběné moduly a pokud navíc použijeme technologii optimalizérů, která bude schopna maximalizovat účinnost těchto



### 2.1.3. V-A charakteristika fotovoltaického článku

Máme fotovoltaický článek, který je ozařovaný. V ozářené oblasti jsou generovány nerovnovážné nosiče náboje a ty difundují směrem k PN přechodu. Hustota proudu tohoto článku je dána součtem jednotlivých proudových hustot oblastí (P, N a PN přechod) pro jednotlivé vlnové délky [6]. Můžeme tedy psát:

$$J_{PV}(\lambda) = J_{PVN}(\lambda) + J_{PVP}(\lambda) + J_{OPN}(\lambda) \quad (5)$$

kde:  $J_{PV}(\lambda)$  je celková proudová hustota generovaného proudu

$J_{PVN}(\lambda)$  je proudová hustota oblasti polovodiče typu N

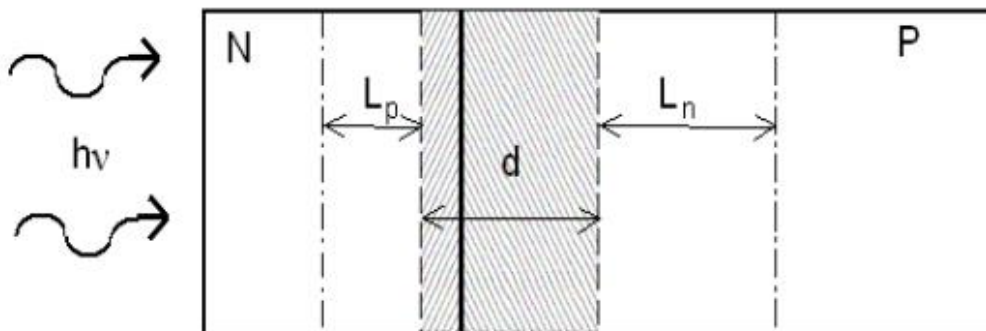
$J_{PVP}(\lambda)$  je proudová hustota oblasti polovodiče typu P

$J_{OPN}(\lambda)$  je proudová hustota oblasti PN přechodu

Jednotlivé proudové hustoty jsou pak definovány jako integrál doby života koncentrací nerovnovážných nosičů náboje přes celou šířku pásu N a P až k oblasti PN přechodu. Výsledná proudová hustota je tak přímo úměrná osvětlení.

#### 2.1.3.1. Náhradní schéma fotovoltaického článku

Při tvorbě náhradního schématu musíme brát ohled na několik faktů. Prvním je fakt, že pokud nerovnovážné nosiče náboje difundují směrem k PN přechodu, chová se systém z hlediska elementárních částí náhradního schématu jako dioda zapojená paralelně na proudový zdroj.



Obrázek 5 - ilustrační popis fotovoltaického jevu pro stanovení náhradního schématu

Zdroj: [6]

Obrázek [Obrázek 5] popisuje právě difuzní délky jednotlivých typů polovodičů a definuje oblast PN přechodu. Celková proudová hustota je součet jednotlivých proudových hustot

polovodičů obou typů a proudové hustoty v oblasti PN přechodu. Difuzní délka je vzdálenost, kterou je schopen nosič náboje urazit než rekombinuje a je definována jako:

$$L_i = \sqrt{D_i \cdot \tau_i} \quad (6)$$

kde:  $D_i$  je difuzní koeficient polovodiče typu N či P

$\tau_i$  je doba života nerovnovážného nosiče náboje typu N či P

Pro úplnost zde uvádím způsob určení difuzního koeficientu. Ten existuje tam, kde dochází k difuzi a následně tím vytváří hustotu proudu [14]. Difuzní koeficient tedy lze stanovit jako:

$$D_i = \frac{k \cdot T}{e} \cdot \mu_i \quad (7)$$

kde:  $k$  je se Boltzmanova konstanta

$T$  je absolutní teplota článku

$e$  je elementární náboj

$\mu_i$  je pohyblivost nosičů náboje polovodiče typu N či P

S využitím rovnice 5 a nahrazením fotovoltaiického článku pomocí diodového modelu dostaneme rovnice:

$$J = J_{01} \cdot \left( e^{e \cdot \frac{U_j}{\xi_1 \cdot k \cdot T}} - 1 \right) + J_{02} \cdot \left( e^{e \cdot \frac{U_j}{\xi_2 \cdot k \cdot T}} - 1 \right) \quad (8)$$

$$\xi_1 \in \langle 1; 2 \rangle, \xi_2 \in \langle 2; \infty \rangle \quad (9)$$

$$I = J \cdot A \quad (10)$$

kde:  $J$  je celková proudová hustota diody

$J_{01}$  je proudová hustota části polovodiče typu N a P

$J_{02}$  je proudová hustota společné části v oblasti PN přechodu

$U_j$  je napětí na článku mezi horní a spodní částí polovodiče

$\xi_1$  a  $\xi_2$  jsou pomocné koeficienty pro lepší modelaci vlastností polovodiče pomocí diodového popisu

$k$  je Boltzmanova konstanta

$T$  je absolutní teplota článku

$J_{01}$  tedy respektuje proudové hustoty v oblastech polovodiče typu P a N a  $J_{02}$  respektuje proudovou hustotu v přechodové oblasti PN. Jednotlivé hustoty pak lze rozepsat podle [14]:

$$J_{01} = n_i^2 \cdot e \cdot \left( \frac{D_n}{L_n} \cdot \frac{1}{p_{p0}} + \frac{D_p}{L_p} \cdot \frac{1}{n_{n0}} \right), J_{02} = \frac{e \cdot n_i \cdot d}{\tau_{SC}} \quad (11)$$

kde:  $n_i$  je koncentrace volných nosičů náboje (děř i elektronů)

$D_n$  je difuzní koeficient vyjadřující jak rychle dochází k difuzi

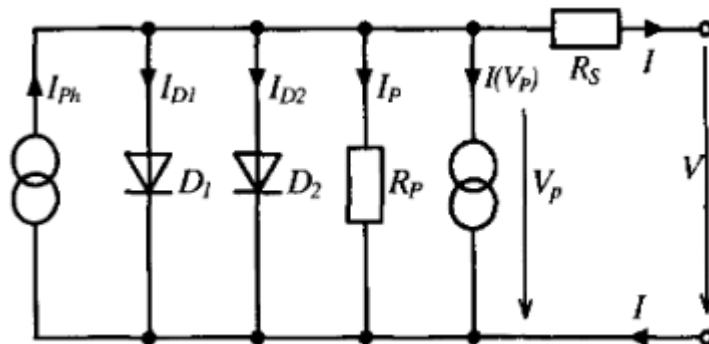
$L_n$  je difuzní délka částic daná dobou jejich života

$p_{p0}, n_{n0}$  jsou koncentrace děř a elektronů

$d$  je šířka PN přechodu

$\tau_{SC}$  je doba života nosičů náboje při stavu na krátko

Dalším faktem je vliv paralelního a sériového odporu. Paralelní odpor reprezentuje vady způsobené výrobou [15]. Sériový odpor je ovlivněn kvalitou a množstvím kontaktů na přední a zadní straně a jejich vlivem na V-A charakteristiku se budu podrobněji zabývat v následujících kapitolách. Pro takto popsané komponenty náhradního schématu již můžeme sestavit náhradní schéma:



Obrázek 6 – náhradní schéma fotovoltaiického článku

Zdroj: [16]

Jednotlivé proudové hustoty  $J_{01}$  a  $J_{02}$  odpovídají proudům  $I_{D1}$  a  $I_{D2}$  po jejich vydělení celkovou plochou článku. Náhradní součástka připomínající transformátor respektuje chování článku při napěťovém průrazu závěrným napětím přiloženém na diody [16].

Z tohoto náhradního schématu, při zanedbání článku reprezentující chování při průrazu, můžeme dále psát:

$$I = I_{PV} - I_{D1} - I_{D2} - I_{SH} \quad (12)$$

kde:  $I_{PV}$  je proud generovaný článkem

$I_{D1}$  a  $I_{D2}$  jsou proudy náhradních diod

$I_{SH}$  je proud paralelním odporem

Při dosazení do rovnice (12) vztahy (8) a (10), a vyjádřením napětí jako  $U_j = U + R_s \cdot I$ , dostaneme výsledný vztah pro voltampérovou charakteristiku [6]:

$$I = I_{PV} - I_{01} \cdot \left( e^{\frac{U+R_s \cdot I}{\xi_1 \cdot k \cdot T}} - 1 \right) - I_{02} \cdot \left( e^{\frac{U+R_s \cdot I}{\xi_2 \cdot k \cdot T}} - 1 \right) - \frac{U + R_s \cdot I}{R_p} \quad (13)$$

kde:  $I_{01}$  a  $I_{02}$  jsou proudy náhradních diod respektující části polovodivého článku

$U$  je napětí na svorkách článku

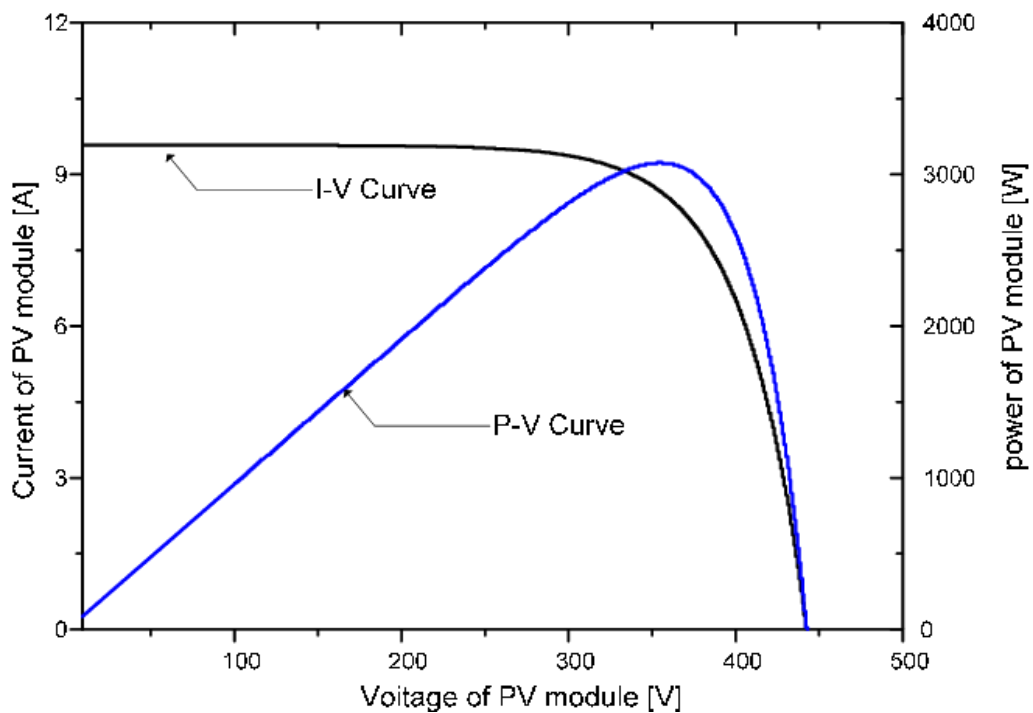
$I$  je proud vytvořený připojením spotřebiče na svorky článku

$R_s$  je sériový odpor článku

$R_p$  je paralelní odpor článku

### 2.1.3.2. Výsledná V-A charakteristika

Z rovnice (13) je při dosazení všech parametrů článku možno získat funkci  $f(I, U)$ .



Obrázek 7 – V-A charakteristika fotovoltaického článku

Zdroj:[17]

Na obrázku [Obrázek 7] je vyznačeno několik důležitých bodů charakteristiky. Tučnou čarou je naznačena funkce  $f(I, U)$  a modrou čarou  $f(P, U)$ . Na obou křivkách leží bod maximálního výkonu  $P_m$ , který se nachází v maximu funkce  $f(P, U)$ . Pro porovnávání kvality jednotlivých článků jsou stanoveny dvě veličiny. První, činitel plnění, je definován jako:

$$FF = \frac{U_{mp} \cdot I_{mp}}{U_{OC} \cdot I_{SC}} \quad (14)$$

kde:  $FF$  se nazývá fullfill faktor

$U_{mp}, I_{mp}$  jsou souřadnice bodu maximálního výkonu

$U_{OC}$  je napětí na prázdko

$I_{SC}$  je proud na krátko

Druhou veličinou je tzv. účinnost článku, která se určí jako:

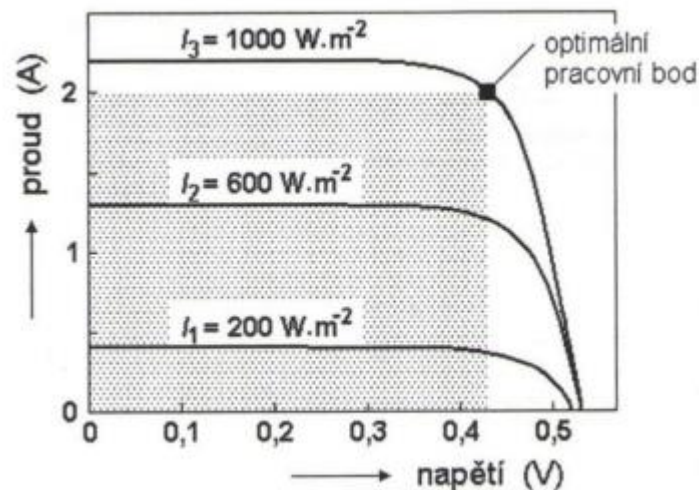
$$\eta = \frac{U_{mp} \cdot I_{mp}}{P_{in}} \quad (15)$$

Kde:  $\eta$  je účinnost fotovoltaického článku získaná z V-A charakteristiky

### 2.1.3.3. Vlivy změn jednotlivých parametrů na V-A charakteristiku

Pro posouzení chování fotovoltaického článku jako takového je nutné pochopit, jak se bude V-A charakteristika měnit při změnách jednotlivých parametrů.

Vliv ozáření při konstantní teplotě je jedním z nejdůležitějších parametrů na chování V-A charakteristiky. Můžeme říct, že s rostoucím ozářením je proud nakrátko větší a také bod maxima se posouvá do vyšších hodnot.



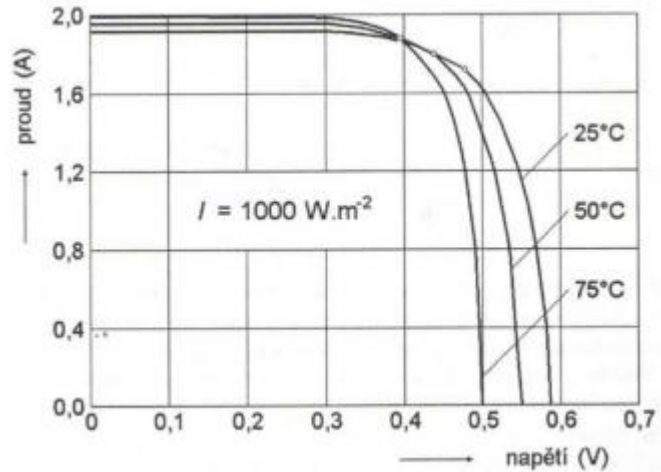
Obrázek 8 – V-A charakteristika při různých hodnotách osvitů

Zdroj: [18]

Avšak z obrázku [Obrázek 8] je patrné, že napětí na prázdko se téměř nemění.

Dalším parametrem je vliv teploty při konstantním ozáření. Teplota je důležitá zejména pro dimenzování délky řetězce modulů, protože při změnách teploty dochází k větším změnám napětí na prázdko.



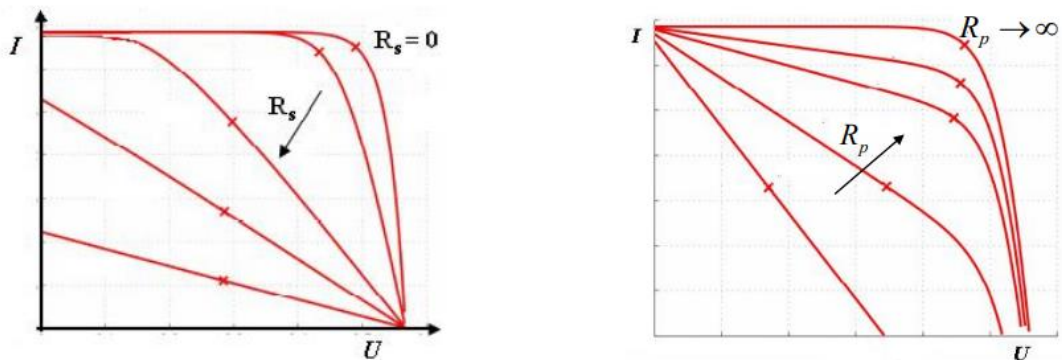


Obrázek 9 – V-A charakteristika při různých teplotách

Zdroj: [18]

Na obrázku [Obrázek 9] můžeme vidět, že naopak proud na krátko se při změnách teplot téměř nemění. Můžeme ale konstatovat, že proud na krátko s rostoucí teplotou roste a napětí na prázdko s rostoucí teplotou klesá.

Vliv parazitních odporů na charakteristiku je neméně zanedbatelný. Výrobci panelů se však snaží o co největší paralelní odpor  $R_p$  a co nejmenší sériový odpor  $R_s$ . Nežádoucí změny těchto odporů mají za následek pokles FF faktoru a tím i účinnosti konverze [6].



Obrázek 10 – V-A charakteristika a vliv parazitních odporů

Zdroj: [6]

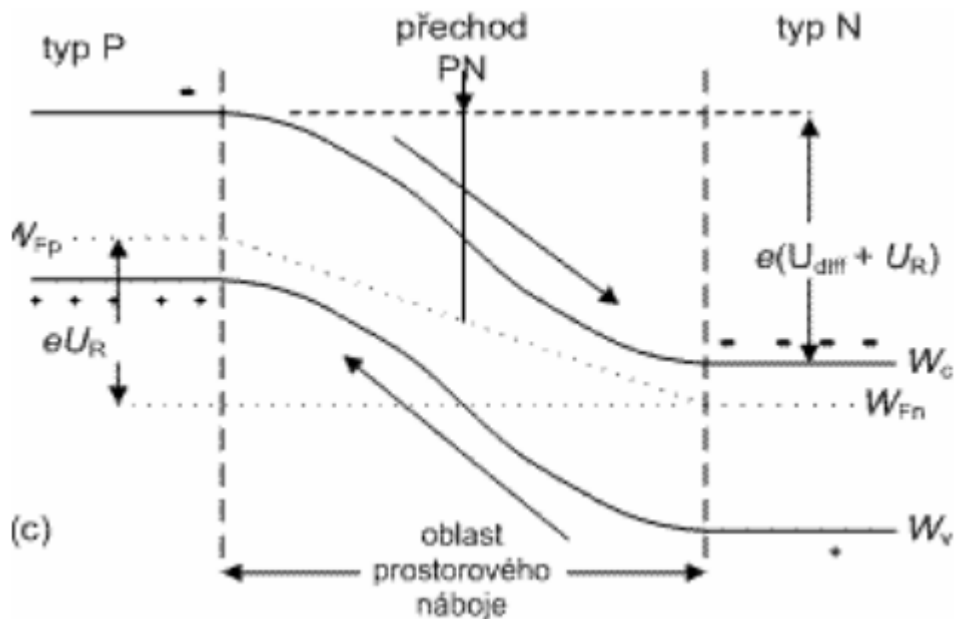
Z obrázku [Obrázek 10] je patrné jakým způsobem se charakteristika mění. Sériový odpor způsobí, že se bod maximálního výkonu přesouvá jak z hlediska napětí tak proudu do nižších hodnot až do nuly proudu. V případě paralelního odporu je patrné, že při jeho poklesu dojde také k poklesu bodu maximálního výkonu až na nulu napětí.

## 2.1.4. Konstrukce

Popsat konstrukci všech typů článků s různými použitými materiály není téměř možné. Vzhledem k tomuto faktu se budu zabývat pouze články, které jsou vyrobené z monokrystalického nebo multikrystalického křemíku. Konstrukce článků obecně, čili to jakým způsobem bude odsátí elektronů a děr ke sběrním a tím vytvoření proudu, je pro efektivitu panelu stejně tak důležitá jako samotná volba materiálu. Obecně lze u všech typu konstrukcí konstatovat fakt, že pokud použijeme materiál absorbující světlo, který generuje nerovnovážné nosiče náboje, bude na jeho čelní (ozářené) straně vrstva sloužící k odsátí elektronů a na zadní straně vrstva sloužící k odsátí děr.

### 2.1.4.1. Vytvoření gradientu elektrického pole pro odvedení elektronů nebo děr

Existují nejčastěji používané tři způsoby jak odsátí docílit. Ve všech případech jde principiálně o to, že spojením dvou různých typů polovodiče (v případě PN přechodu) nebo také spojením dvou různých kovů (heteropřechod), anebo vložení mezi polovodiče typu N a P vrstvu se slabě dotovaným nebo také intrizickým polovodičem, lze docílit gradientu elektrického pole v určitém směru. Elektrony nebo díry tedy budou mít tendenci v tomto směru difundovat [19].



Obrázek 11 – ilustrace PN přechodu z hlediska energií

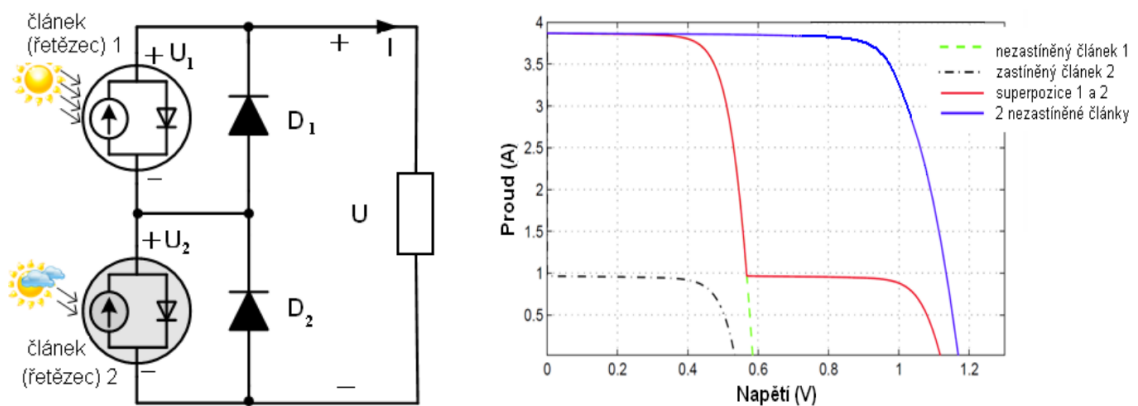
Zdroj: [14]

Vytvoření takového gradientu, jak můžeme vidět na obrázku [Obrázek 11] je nezbytné k odvedení elektronu nebo díry vhodným směrem. Elektrony budou z pásu generujícím volné

nosiče náboje difundovat ve směru gradientu elektrického pole tak, že elektrony budou směřovat do oblasti polovodiče typu N a díry do oblasti polovodiče typu P.

### 2.1.4.2. Konstrukce modulů

Fotovoltaický článek je skládán do větších celků, které se nazývají moduly. Tyto články se spojují co série nebo paralelně podle toho jakých hodnot proudu a napětí chceme v modulu dosáhnout. Je obecně známo, že složením článku do série dosáhneme součtu napětí jednotlivých článků a složením článků paralelně dosáhneme součtu proudů. Také je potřeba si uvědomit, jaký vliv bude mít na fotovoltaický modul jeho částečné zakrytí, například vlivem nečistot na skle modulu, či vlivem degradace článku nebo jeho úplné poškození. Vzhledem k velkému množství článků v jednom modulu je nutné s těmito jevy počítat. Vzhledem k tomu, že by pokles výroby jednoho článku měl za následek omezení proudu tekoucími všemi články zapojenými do série s tímto vadným kusem, docházelo by tak k brzkému poklesu výkonu celého modulu. K eliminaci tohoto problému je vhodné použít překlenovací diody připojené paralelně ke článku či k celé větvi. V případě poklesu proudu na krátko v jednom z článků pod hodnotu proudu tekoucí články v sérii, dojde k aktivaci diody a proud se prožene skrze překlenovací diodu a tím nedojde k jeho omezení přesně tak, jak je vidno na obrázku [Obrázek 12] níže [20]. Tuto skutečnost využijeme v budoucím měření, kde se pokusíme snižovat výkon zakrýváním jednotlivých článků modulu a zkoumat jaký to má vliv na panelové větve bez optimizérů, nebo s optimizéry.



Obrázek 12 - příklad vlivu překlenovací diody na celkový výkon modulu při zastínění článku

Zdroj: [20]

Vlivem poklesu výroby jednoho článku dojde k poklesu výkonu celého řetězce, avšak díky diodě nedojde k omezení proudu a tím razantního poklesu celkového výkonu. Je však nutné mít na paměti, že i tak dojde k poklesu bodu maximálního výkonu modulu. V případě, že by jeden

modul v jedné panelové větvi snížil dramaticky svůj výkon, sníží výrobu celé větve. Tento nepříjemný fakt je možné vyřešit řízením bodu maximálního výkonu na úrovni panelů.

## 2.1.5. Ztráty modulu

Vzhledem k tomu, že do nedávné doby byly na trhu dostupné panely jen s nízkou účinností, bylo nutné se pozorně zabývat eliminací jednotlivých ztrát modulů. Tyto ztráty lze obecně rozdělit do několika kategorií, přičemž mechanismus ztrát rekombinací byl popsán ve výše uvedených kapitolách. Lze poskytnout obecný náhled na jednotlivé typy ztrát, přičemž vybranými se budu podrobněji zabývat.

Tabulka 2 - ztráty ve fotovoltaickém modulu

Optické	Rekombinací	Elektrické
odrazem	v oblasti emitoru	sériovým odporem
zastíněním	v oblasti báze	paralelním odporem
neabsorbovaným zářením	povrchovou rekombinací	-

### 2.1.5.1. Optické ztráty

Již při výrobě fotovoltaického článku je nutné zajistit, aby co nejvíce světla dopadajícího na článek bylo zachyceno a došlo k maximální absorpci. To lze umožnit vytvořením antireflexní vrstvy nad povrchem modulu, texturací povrchu nebo maximální číroostí vrchního skla.

Antireflexní vrstva je vlastně materiál s vhodným indexem lomu tak, aby odražené záření na povrchu tohoto materiálu bylo nulové. To lze zajistit jednak volbou materiálu a jednak zvolením jeho vhodné tloušťky (optické dráhy uvnitř materiálu) [21]. Na obrázku [Obrázek 13] je popsán mechanismus odrazů slunečního paprsku, přičemž pro tloušťku materiálu plyne jednoduchý zákon dle [21]:

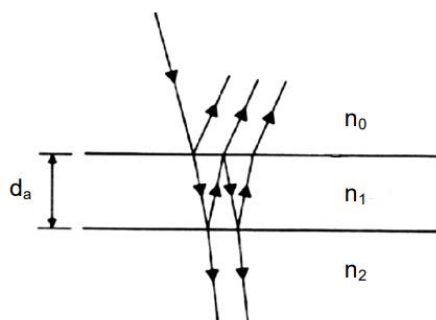
$$d_a = \frac{\lambda}{4 \cdot n_1} \text{ kde } n_1 = \sqrt{n_0 \cdot n_2} \quad (16)$$

kde:  $d_a$  je tloušťka vrstvy [m]

$n_1$  je počet odrazů uvnitř materiálu

$n_2$  je počet paprsků prošlých materiálem

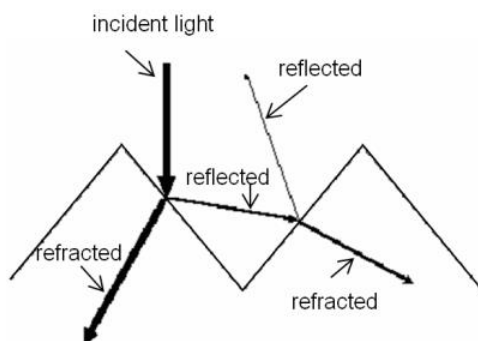
$n_0$  je počet paprsků odražených na hraně materiálu



Obrázek 13 - dopad slunečního paprsku na antireflexní vrstvu

Zdroj: [21]

V případě texturace povrchu dochází k jeho zvrásnění. To lze provést například leptáním v hydroxidu draselném [22]. Princip je podobný antireflexní vrstvě, kdy dochází vlivem odrazu na povrchu článku odrazení vhodným směrem na další povrch destičky a jeho následné absorpci tak, jak je ukázáno na obrázku [Obrázek 14].



Obrázek 14 - dopad slunečního paprsku na texturovaný povrch

### 2.1.5.2. Elektrické ztráty

Můžeme je obecně rozdělit na ztráty způsobující pokles paralelního odporu a na ty, co způsobují nárůst sériového odporu. Obě změny těchto parametrů mají za následek pokles výkonu celého modulu. V zásadě jde vždy o vhodnou volbu materiálu tak, aby rezistivita byla buď co největší (paralelní odpor) či co nejmenší (sériový odpor), nebo zvolit co největší počet sběrnic, provést nejkvalitnější pájené spoje či jen zvolit vhodnou metodu výroby [21], [6].

## 2.1.6. Degradace modulu

V této kapitole budu popisovat náhled do jednotlivých druhů degradace, a také uvedu do souvislosti vliv změn klíčových hodnot na jednotlivé větve fotovoltaické elektrárny. Na problematiku nárůstu ztrát celé větve fotovoltaických panelů zapojených do série se lze dívat z jiné perspektivy a to tak, že v případě rovnoměrného okamžitého ozáření celé větve modulů, dochází během doby života fotovoltaické elektrárny k nerovnoměrnému poklesu výkonu. Za tímto účelem se používá právě technologie optimizérů, která fenomén z této kapitoly 2.1.4.2, vztahený na moduly zapojené v sérii s dalšími, může eliminovat.

Vzhledem k tomu, čím jsou jednotlivé degradace charakteristické, lze je přibližně rozdělit na ty co způsobují jevy charakteristické pro pokles náhradního paralelního odporu a nárůst sériového odporu. Vzhledem k tomu, že jsou projevy pokaždé stejné, snížení celkového výkonu panelové větve, dochází ke zbytečnému poklesu celé elektrárny.

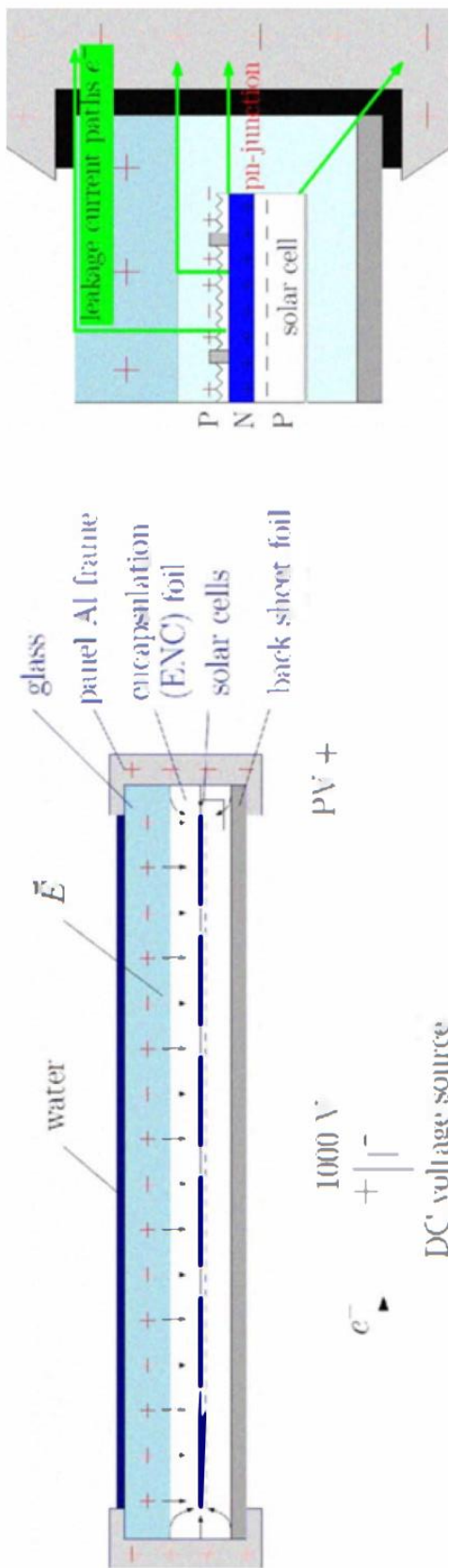
Tabulka 3 - rozdělení podle charakteristického vlivu na výkon panelu

<b>Nárůst sériového odporu</b>	<b>Pokles paralelního odporu</b>
elektrochemická koroze	LID (light induced degradation)
zlomení článku	PID (potencial induced degradation)
narušení zapouzdření (prasknuté sklo, vniknutí vlhkosti)	lokální průraz, lokální ztráty
delaminace	degradace vlivem lokálního stínění
pokles izolační pevnosti	-
porucha překlenovací diody	-

Jak již bylo uvedeno, vzhledem k tomu, že modulové optimizéry mají tento vliv snížit, budu se vybranými mechanismy degradace dále zabývat.

### 2.1.6.1. Degradace vlivem potenciálu

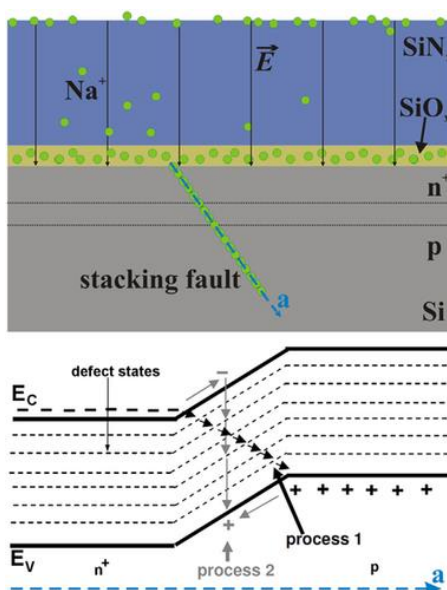
Potenciálem indukovaná degradace je fenomén, který postihuje všechny fotovoltaické druhy panelů. Má za následek destrukci modulů a rychlost této degradace závisí na polaritě a velikosti potenciálu mezi modulem a zemí.



Obrázek 15 - mechanismus degradace

Zdroj: [23]

Na povrchu se hromadí volné ionty sodíku, které prostupují až na povrch článku, kde dochází k reakci s tímto povrchem, což nakonec vede k vytvoření vrstvy, která zkratuje PN přechod [24].



Obrázek 16 - mechanismus PID degradace

Zdroj: [24]

Na obrázku [Obrázek 16] je vidět, že dochází ke změnám energetických úrovní článku a tím ke zhoršení odčerpávání volných nosičů náboje.

Vliv PID svým vlivem na panel odpovídá poklesu paralelního odporu. Některé střídače mají zabudovanou možnost regenerace opačnou polaritou napětí, kde dochází k regenerování jednotlivých modulu v noci [25]. Jednou z těchto technologií jsou zařízení firmy Solar Edge.

### 2.1.6.2. Degradace vlivem světla

Jak publikace naznačují, je degradace fotovoltaického modulu vlivem světla způsobena přítomností kyslíku a bóru v čelních vrstvách modulu. Zejména bór, jímž se dotuje křemík, je nezbytný pro výskyt LID. Degradace nenastane, pokud je akceptorem galium místo boru. Ačkoli je proces obecně označován jako LID, ukázalo se, že jádrem degračního mechanismu je přítomnost menšinových nosičů (elektronů), které se objevují jako výsledek vlivem ozáření [26].

Proces rekombinace lze regenerovat žíháním při teplotě kolem 200 °C po dobu několika minut ve tmě. Tento proces však další degradaci vlivem světla nezabrání, pokud však žíháme při zvýšených teplotách pod osvětleným modulem, dojde ke stabilizaci [27].

Vliv UV záření se tedy projevuje zežloutnutím EVA vrstvy a tím se snižuje transparentnost. Vzniká přitom kyselina octová, která způsobuje korozi kontaktů a zároveň dochází k delaminaci.

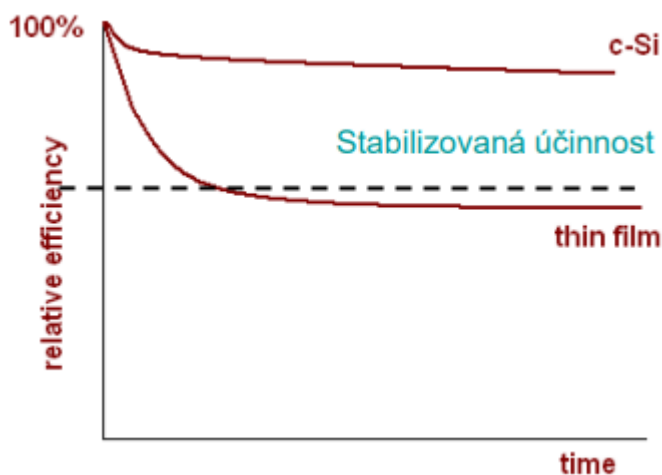


Jak již bylo uvedeno, důležitými prvky degradace je kyslík a bór. Vytvářejí rekombinační centra a tím způsobují pokles proudu fotovoltaického modulu. Tyto projevy odpovídají poklesu sériového odporu [25].

### 2.1.6.3. Vliv nelineární degradace na ekonomický model

Výše uvedené mechanismy se podílejí na poklesu výkonu panelů v průběhu života fotovoltaické elektrárny. Vliv různých stupňů degradační křivky je třetím nejvíce důležitým faktorem po diskontní sazbě a počátečních nákladech. Proto počítání s lineární degradací není dostatečně přesné. Také je nutné brát ohled na kvalitu zrychleného testování modulů, protože může určitou degradaci zesílit, zatímco jinou zamaskovat, což by se mohlo ukázat jako dominantní při vystavení modulu reálným podmínkám různých prostředí. Chování časového průběhu lze modelovat exponenciálně nebo rozdělit do dvou odlišných fází, přičemž po počátečním poklesu následuje stabilnější fáze. První přístup může být přesnější, ale druhý je často pohodlnější navzdory subjektivitě určit přesný začátek stabilnějšího období [28].

Pro dobrý odhad tedy můžeme zanedbat první rychlou, exponenciální, degradaci vlivem tzv. zaještění modulu v prostředí (není nutno s touto exponenciální degradací počítat, protože u velkých instalací jsou moduly položeny a vystaveny Slunci o mnoho měsíců dříve než je elektrárna skutečně uvedena do provozu) a dále popisovat pokles výkonu jako přibližně lineární a to v části stabilizované účinnosti jak je vidět na obrázku [Obrázek 17].



Obrázek 17 - pokles účinnosti fotovoltaického panelu během času

Zdroj: [25]

Většina výrobců tuto lineární část garantuje a po 20 až 25 letech uvádí účinnost 80 %.

### 3. Konstrukce pro fotovoltaické panely

---

Vzhledem k tomu, že je fotovoltaický panel během doby života namáhán řadou vlivů, je nutné ho uchytit k pevným částem konstrukce domu či pozemku. Podmínkami tohoto uchycení pro pozemní konstrukce se zabývá například norma ČSN EN 61215-1-2 Pozemské fotovoltaické moduly – Posouzení způsobilosti konstrukce a schválení typu nebo ČSN EN IEC 61730 ed.2 kde se v části 1 zabývají požadavky na konstrukci. Tato diplomová práce zabývá pouze střešními instalacemi, budu se tedy podrobněji zabývat střešními konstrukcemi jak pro šikmé střechy, tak pro rovné.

#### 3.1.1. Konstrukce pro šikmé střechy

Existuje mnoho způsobů uchycení k šikmé střeše. Obecně platí, že pro šikmé střechy je nutné konstrukci pevně uchytit ke střešní konstrukci, aby během doby života nedošlo k nekontrolovatelnému pohybu instalace na střeše. Způsob uchycení je závislý na typu střechy (tašková, trapézová atd...).

##### 3.1.1.1. Uchycení do taškové, ocelové a břidlicové střechy

Přichycení fotovoltaických panelů se provádí například pomocí střešních háků. Ty mohou být pevné nebo stavitelné a lze je upravit na míru až na střeše [29]. Takovýto hák či svorka se zasouvá pod střešní tašky, kde se šroubem sevře s trámovou konstrukcí střechy, nebo se přímo několika vruty do dřeva přichytí pomocný trám ke střešní konstrukci a následně na něj umístí střešní hák.

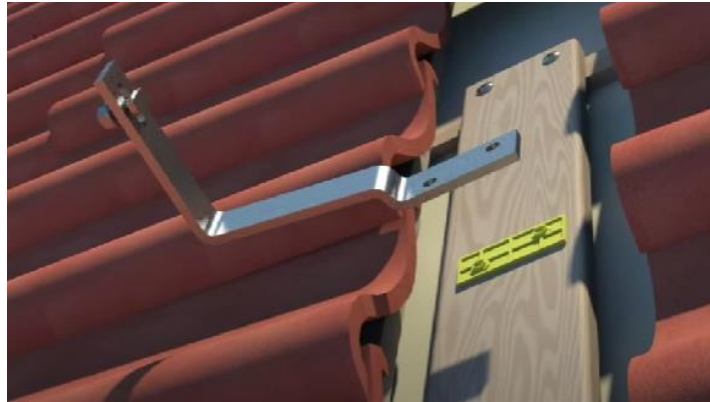


Obrázek 18 - příklad instalace střešního háku 1

Zdroj: [30]

Tento příklad instalace na obrázku [Obrázek 18] ukazuje jakým způsobem lze přichytit svorku ke střešní konstrukci. Zvrásněná spodní část háku umožní zvýšit třecí sílu mezi hákem a dřevěným

trámem umístěným pod střešními taškami. Tento způsob se zdá být tím nejjednodušším, avšak je třeba mít na paměti, že se konstrukce opírá o střešní tašky, které by se mohly v průběhu života fotovoltaické elektrárny rozdrobit a tím háky uvolnit.



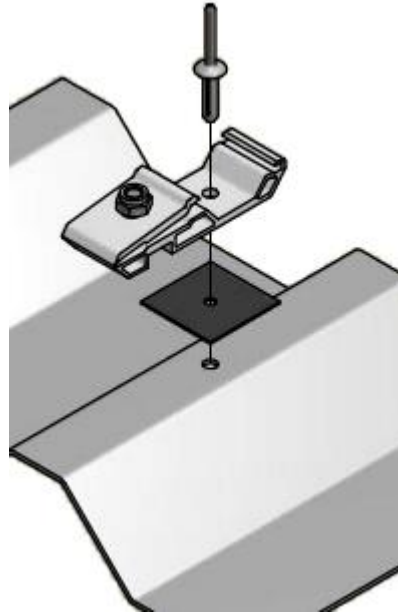
Obrázek 19 - příklad instalace střešního háku 2

Zdroj: [31]

Na obrázku [Obrázek 19] je znázorněn druhý příklad takovéto instalace, která se opírá hlavně o vložený kus trámu, který je uchycen ke střešní konstrukci.

### **3.1.1.2. Uchycení do trapézové a vlnité střechy**

Toto způsob uchycení se často používá u starších průmyslových budov, jako například sklady či prostory pro dobytek. Na vrchní část trapézu se umístí svorka, která se pak šroubem připevní skrze trapézový či vlnitý plech jak je uvedeno na obrázku níže.

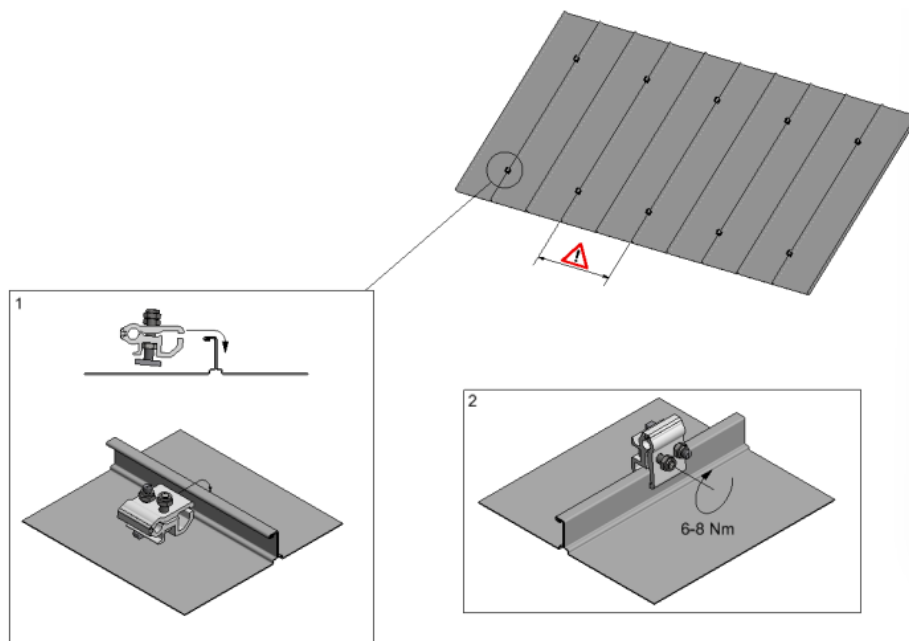


Obrázek 20 - příklad instalace svorky pro trapézové střechy

Zdroj: [32]

### **3.1.1.3. Uchycení do střechy se stojatou drážkou**

Tato instalace se používá na nové typy střech se stojatou drážkou. Jsou typické zapadajícími švy, které jsou spojeny do sebe. Tato střecha je poměrně odolná vůči povětrnostním vlivům a je ideální pro instalace panelů [33].

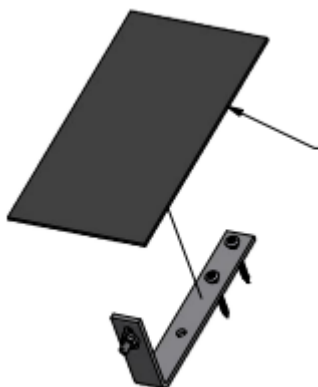


Obrázek 21 - příklad instalace svorky pro střechy se stojatou drážkou

Zdroj: [34]

#### 3.1.1.4. Uchycení do střechy s bitumenovou, EPDM nebo PVC krytinou

Tento typ střech je také hojně používán u rovných střech. V případě, že tato střecha je šikmá, je třeba konstrukci upevnit buď ve vrstvě pod touto krytinou, nebo až na konstrukci střechy. V následujícím obrázku je znázorněn případ uchycení až na konstrukci střechy. To se provádí pomocí odkrytí PVC vrstvy a uchycení vruty do dřeva střechy. Často je tento typ uchycení nazýván jako membránový a to z důvodu nutnosti instalace tepelně svařitelné membrány, která zapříčiní voděodolný spoj.



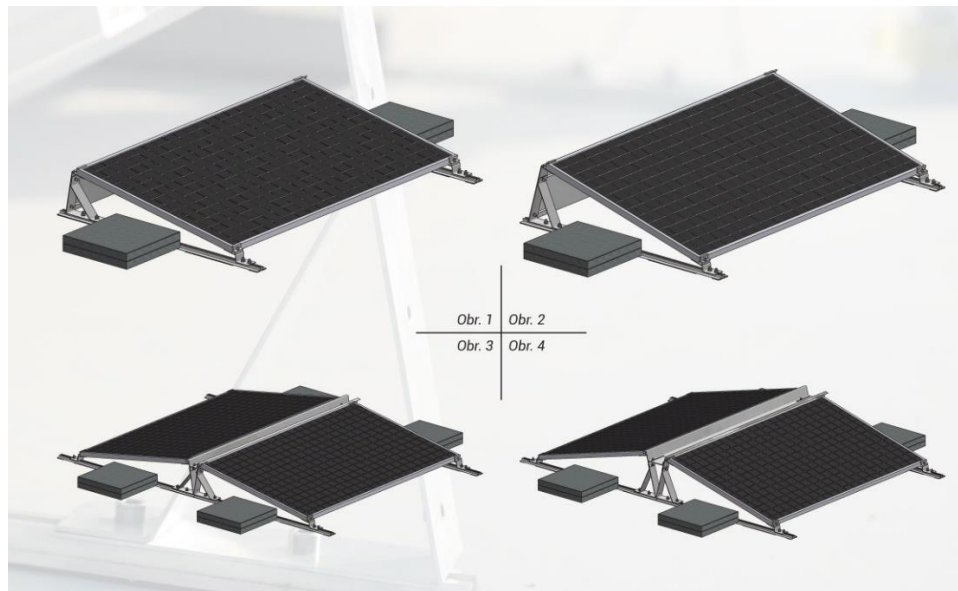
Obrázek 22 - příklad instalace do PVC střechy

Zdroj: [35]

### 3.1.2. Konstrukce pro rovné střechy

Hlavní výhodou rovných střech je, že jejich sklon je tak nízký, že umožňuje se vyhnout narušení střešního pláště střechy. Tyto systémy jsou obecně zátěžové a jsou pouze na střeše položeny. Následně se tato konstrukce podle zátěžového plánu zatíží, tak aby vyhověla jednak statickému posudku střechy, tak i s ohledem na vlivy počasí. Hlavní výhodou tak je jednoduchost této instalace a také možnost kdykoliv tuto instalaci sundat bez zásahu do střechy. Nevýhodou této instalace jsou nároky na statiku střechy, protože je tento systém mnohem těžší než ostatní. Na obrázku níže je příklad takové instalace. K zátěži se používají klasické betonové dlaždice. Je možná variabilita typu, rozměru a váhy dlaždic, avšak vždy je nutné dodržet statický posudek a zátěžový plán.

Optimizéry se umísťují k patě vrcholu šikmé roviny vytvořenou sloněným panelem.



Obrázek 23 - příklad instalace zátěžového systému na střechu

Zdroj: [36]

### 3.1.3. Upevnění panelu ke konstrukci

Po instalaci konstrukce na střechu je nutné následně přichytit panel ke konstrukci. Většinou se panel stáhne svorkami k základní konstrukci bez narušení rámu panelu, či v případě zátěžové konstrukce se zatíží balastem.

#### 3.1.3.1. Šikmé střechy

Po instalaci svorek uchycující konstrukci ke střeše se obvykle instalují vodící profily, na které se pak kladou panely.



Obrázek 24 - příklad uchycení vodících profilů

Zdroj: [31]

Následně se panely uchytí pomocí svorek do tohoto vodícího profilu. Panel se pak připevní do této svorky a šroubem utáhne.

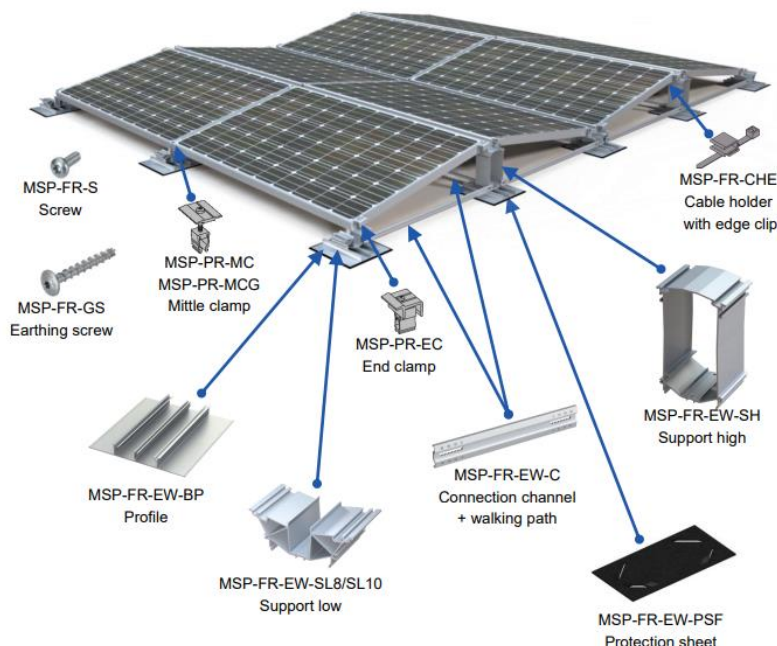


Obrázek 25 - uchycení panelové svorky

Zdroj: [31]

### 3.1.3.2. Rovné střechy

U těchto střech je nutné také brát ohled na sklon. Konstrukce by tedy měla zajistit i definování pevného sklonu všech panelů.



Obrázek 26 - příklad uchycení panelů ke konstrukci a definování pevného sklonu

Zdroj: [37]

Na obrázek [Obrázek 26] jsou jednotlivé komponenty této konstrukce. Lze si zde všimnout jedné věže (MSP-FR-EW-SH), která slouží jak k definování pevného sklonu a také má v sobě zabudovaný závit pro uchycení zemního vodiče. Některé konstrukce mívají i druhou menší věž (MSP-FR-EW-SL8/SL10) a to z důvodu oddálení panelů od střešního pláště. Zátěžový systém se následně pokládá na lištu MSP-FR-EW-C. Vidíme také takzvané „papuče“ (MSP-FR-EW-PSF), která se používají na izolování konstrukce od střešního pláště a to z důvodu většího tření konstrukce vůči zemi a ochranu konstrukce před namočením do vody ležící na zvrásněné foliové střeše.

### 3.1.4. Dilatace fotovoltaických konstrukcí

Při návrhu rozmístění panelů fotovoltaické elektrárny je jedním z omezení co do tvorby konstrukčních bloků dilatace konstrukce. Existují dva hlavní materiály, které se používají pro výrobu konstrukcí a těmi jsou hliník a ocel. Ocel je mnohem těžší než hliník a tak se může stát, že takovýto návrh neprojde statickým posouzením střechy. Hliník je lehčí, ale na druhou stranu má téměř poloviční roztažnost oproti oceli a je tedy nutné tvořit menší bloky než z ocele. Obecně, každý výrobce má definovanou maximální velikost bloku.



<b>Max. block size</b>	14,0 m x 14,0 m
<b>Min. block size, stand alone</b>	3 gables x 1 row / 1 gable x 3 rows
<b>System height</b>	280 – 300 mm
<b>Ground clearance</b>	80 mm
<b>Min. edge distance</b>	150 mm
<b>Inclination angle of the module</b>	8° – 10° (depending on module width)
<b>Panel width</b>	950 mm – 1335 mm
<b>Panel length</b>	1555 mm – 2399 mm
<b>Panel height</b>	28 mm – 45 mm
<b>Ballast stone width</b>	100 mm
<b>Ballast stone length</b>	200 mm
<b>Ballast stone height</b>	40 mm – 80 mm

Obrázek 27 - technické informace zátěžového systému East-West firmy Schweizer

Zdroj: [37]

Výrobce definoval i minimální rozměr konstrukčního bloku, to hlavně z důvodu zátěže, protože takto malý blok by bylo nutno zatížit velkým množstvím dlaždic.

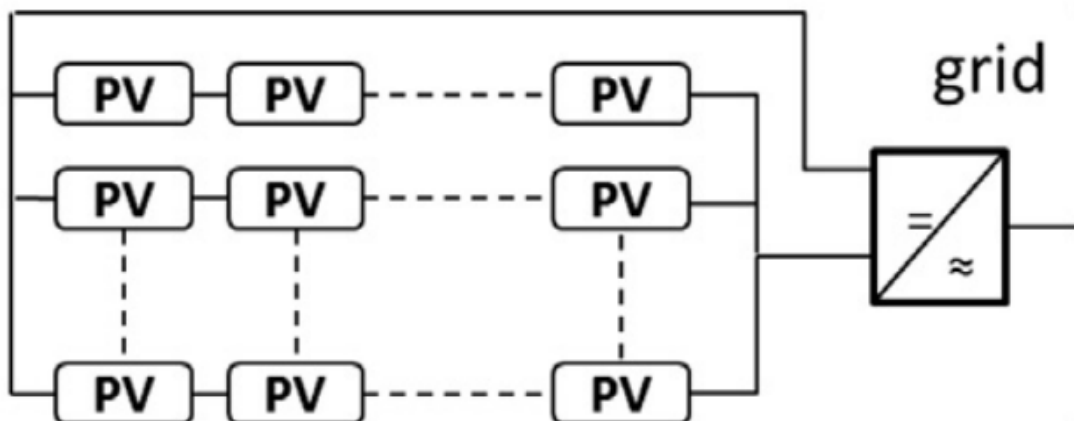
## 3.2. Střídač

Střídače neboli invertory jsou z pohledu AC sítě právě to zařízení, které generuje střídavý elektrický výkon a v síťových výpočtech je právě toto zařízení reprezentováno náhradní reaktancí a zkratovým výkonem.

Obecně se střídače rozdělují na ty, které jsou schopny pracovat v ostrovním režimu a ty, které pracují jen pokud jsou napojeny na střídavou síť. Vzhledem k drtivé většině instalací s tzv. on-grid (těmi připojenými k distribuční síti) střídači, budu se zabývat pouze tímto konceptem. Tyto střídače se dále dají rozdělit na několik základních typů.

### 3.2.1. Centrální střídače

Tento typ střídače umožňuje zapojit mnoho stringů do jednoho střídače. Střídač má zabudovaný jeden společný sledovač maximálního výkonu (MPPT) pro všechny větve. Díky tomu však v průběhu života dochází k mnohem razantnějšímu poklesu vyrobeného DC výkonu, a to z důvodu vlivu degradace či zastínění panelů v elektrárně na celkový výkon elektrárny tak, jak je popsáno v kapitole 2.1.6. Vyznačuje se na trhu hlavně největšími jmenovitými výkony oproti ostatním. Tyto střídače bývají, z pohledu celkové ceny instalace, levné. Proto se tedy používají k instalacím v největších elektrárnách [38].

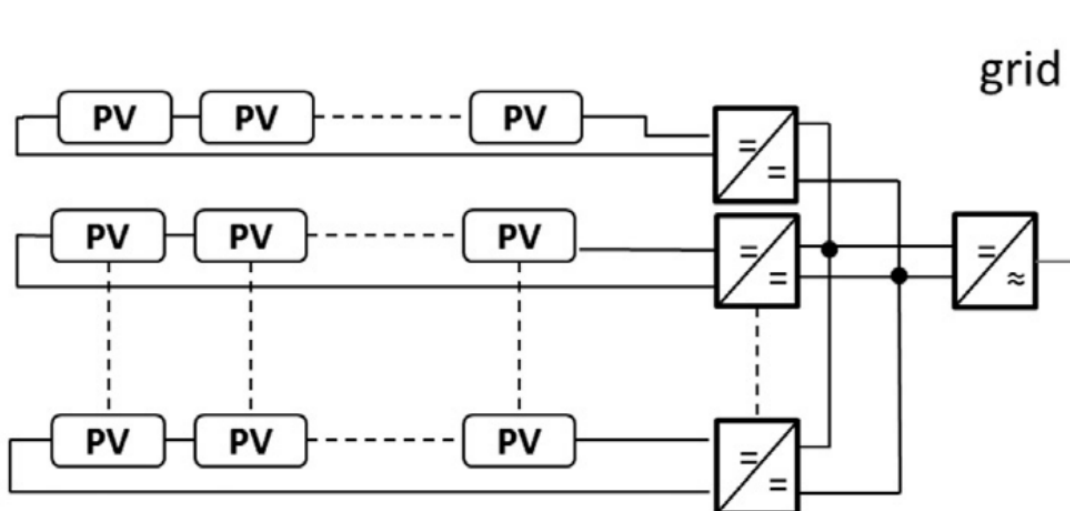


Obrázek 28 - diagram topologie centrálního střídače

Zdroj: [39]

### 3.2.2. Stringové střídače

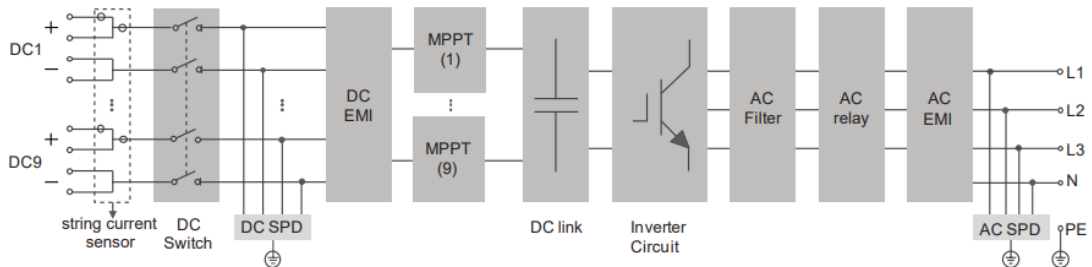
V porovnání s centrálním měničem jsou tyto střídače vhodné pro menší výkony a v rámci celé elektrárny se jich může vyskytovat hned několik. Jsou specifické zejména tím, že jeden střídač obsahuje více MPPT zařízení na který lze připojit jeden či dva stringy. Na obrázku [Obrázek 29] je ukázán koncept střídače přímo pro každý string. Tato topologie je v porovnání s centrálními měniči nákladnější a je vhodné ji použít k menším elektrárnám, avšak poskytuje větší výtěžnost při degradaci či zastínění panelů elektrárny než centrální měniče [38].



Obrázek 29 - diagram topologie stringového střídače

Zdroj: [39]

Někdy se používá inverter, který má více MPPT zařízení v rámci jednoho střídače s jednou střídací jednotkou a tím vlastně kombinuje centrální střídač se stringovým. Tento způsob je levnější a umožňuje použití menšího množství střídačů oproti klasickým stringovým měničům.



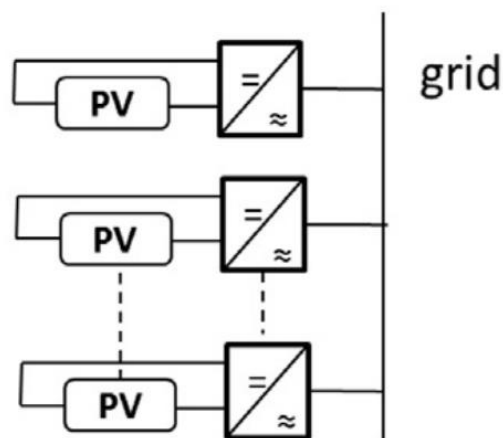
Obrázek 30 - vícepólové zapojení části střídače

Zdroj: [40]

Na obrázku [Obrázek 30] jsou do jednoho MPPT zařízení zapojeny dva stringy a je nutné věnovat pozornost na orientaci a počtu panelů v nich zapojených.

### 3.2.3. Modulové střídače

Tyto střídače se ve velkých elektrárnách téměř nepoužívají, protože jejich velký počet by byl velmi nákladný instalovat či jen spravovat. Na druhou stranu je výtěžnost DC výkonu vzhledem k degradaci či zastínění panelů mnohem větší než u ostatních konceptů. Vyrábí jako malé přístroje instalované přímo na modul či na jeho konstrukci [38].



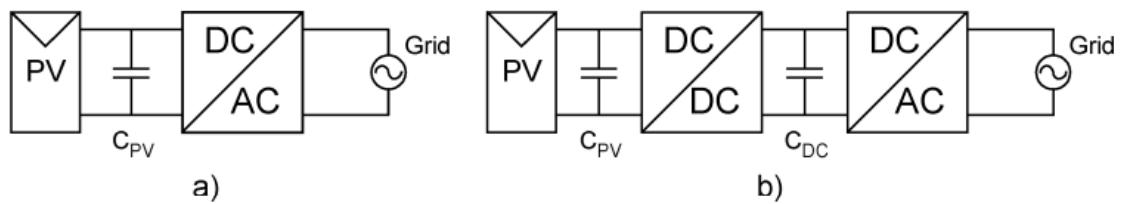
Obrázek 31 - diagram topologie modulového střídače

Zdroj: [40]

Je možné uvažovat nad tím, zda je efektivnější používat malé modulové měniče místo stringových měničů s optimizéry, když vlastně by ke konverzi na střídavý výkon mohlo docházet již na úrovni modulu. To by přineslo zkvalitnění celé instalace ve formě ještě větší výtěžnosti, avšak počáteční investice a poruchovost by mnohonásobně narostla.

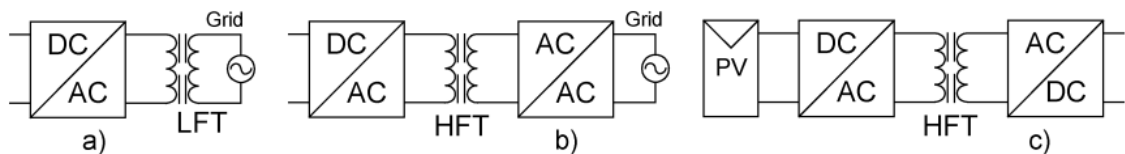
### 3.2.4. Princip funkce střídačové části střídače

Obecně lze střídače rozdělit na typ s integrovaným transformátorem v AC mezičásti obvodů a toho bez.



Obrázek 32 - vnitřní topologie střídače, část 1

Zdroj: [41]



Obrázek 33 - vnitřní topologie střídače, část 2

Zdroj: [41]

Na obrázek [Obrázek 32] je znázorněna topologie bez transformátoru. V části a) musí jednostupňový střídač ve svých obvodech zvládnout funkce MPPT i střídání signálu na požadovanou kvalitu distribuční sítě v jednom modulu. To je typická konfigurace pro centralizované střídače se všemi nevýhodami, které jsou s tím spojené. V části b) je vidět dvoustupňový invertor. Převodník DC–DC slouží jako MPPT zařízení. Na výstupu z tohoto DC/DC měniče je buď čistě stejnosměrné napětí, nebo výstupní proud stejnosměrného měniče je modulován tak, aby mohla následovat konverze na střídavý průběh. DC/DC měnič se v takovém případě může nacházet přímo u modulu. Úprava stejnosměrného signálu a jeho následné nastřídání je provedeno pomocí pulzní modulace (PWM) [41].

Na obrázku [Obrázek 33] je vidět, že některé měniče používají vestavěný transformátor ve vysokofrekvenčním stejnosměrném měniči nebo stejnosměrném střídači, jiné používají

frekvenční transformátor v části, která je připojena ke stávající AC infrastruktuře centrální sítě. Tyto střídače s transformátorem ve výstupní AC části jsou rozumnou volbou pro centrální měniče. V posledních letech je trendem používat vysokofrekvenční transformátory. Výsledkem jsou zcela nové konstrukce, jako je tištěný spoj, deska (PCB) integrované magnetické součástky [42]. Je obtížné dosáhnout vysoce účinného napěťového zesílení bez transformátoru, když je vstupní napětí v rozsah od 23 do 45 V. Na druhou stranu transformátor je nadbytečný, když je vstupní napětí dostatečně vysoké [41].

Normální střídač s plným můstkem nelze použít jako síťové rozhraní, pokud obojí vstup a výstup střídače jsou uzemněny. Díky velké ploše FV modulů je navíc nutné uvažovat s velkou kapacitou (přibližně 0,1 nF 10 nF na modul) vůči zemi [43]. To může také způsobit silnou rezonanci mezi FV moduly a (bloudivé) proudy indukčnosti v obvodu. Pouze několik bez transformátorových topologií s vysokým vstupním napětím lze ještě uzemnit i na vstupu [41].

## 4. Legislativní podmínky instalace FVE

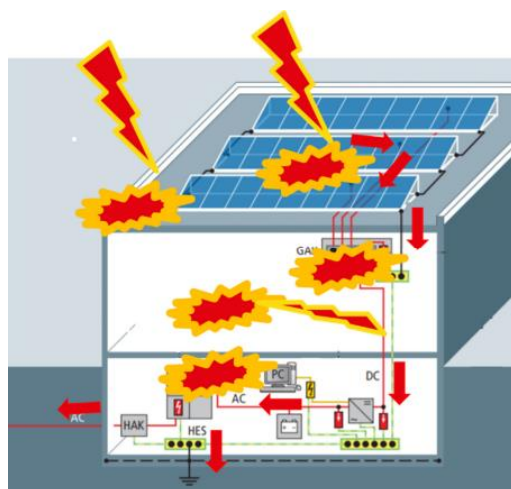
### 4.1.1. Ochrana před bleskem

Vzhledem k umístění střešní fotovoltaické elektrárny na vrcholu budovy musíme fotovoltaickou elektrárnu ochránit před bleskem. To je důležité zejména z důvodu drahých komponent jako jsou měniče, optimizéry či panely, ale také z důvodu pojistného plnění na zasažených instalacích.

Jakýkoliv vynucený zásah do ochrany před bleskem nad rámec opravy (výměny) je nutné znovu posoudit a navrhnout novou ochranu před bleskem podle ČSN EN 62305. Dále je také nutné podle vyhlášky 268/2009 Sb. o technických požadavcích na stavby zpracovat analýzu rizika v ochraně před bleskem. Pouze na základě kladného výsledku správně provedené analýzy lze u objektu upustit od instalace vnější ochrany před bleskem. Instalací fotovoltaiky na střechu jakéhokoliv objektu měníme parametry tohoto objektu (připojená vedení), je tedy nutno znovu zpracovat analýzu rizika v ochraně před bleskem, pokud se s FVE v původní analýze nepočítalo [44].

#### 4.1.1.1. Bez vnějšího systému ochrany před bleskem

Prokáže-li analýza rizika možnost vnější systém ochrany před bleskem neinstalovat, měl by být v objektu instalován systém vnitřní ochrany před bleskem pro vyrovnání potenciálů a koordinovaných svodičů bleskového proudu a svodičů přepětí. Dle odst. 4.5 ČSN CLC/TS 50539-12 je instalace přepětíových ochran nezbytná, pokud analýza rizika neprokáže opak. Podle ČSN 33 2000-4-443 musí být přepětíové ochrany instalovány i v budovách bez vnějšího hromosvodu [44].



#### 4.1.1.2. S vnějším systémem ochrany před bleskem

Navrhujeme-li FVE na stavbu, kde nám analýzou rizika vyjde nutnost instalace vnějšího systému ochrany před bleskem, což je převážná většina staveb, musíme zohlednit fyzické rozměry a polohu. Definováním způsobu vyhodnocení rizika a stanovením metod ochrany před bleskem se zabývá norma ČSN EN 62305-2 ED.2. Optimizéry dle tvrzení výrobce jsou dimenzovány dle normy IEC62109 a musí odolat OVC II (kategorie přepětí v napájecích systémech). Volba tohoto druhu ochrany před přepětím je výrobcem doporučována [45].

- Izolovaný (oddálený) systém ochrany před bleskem

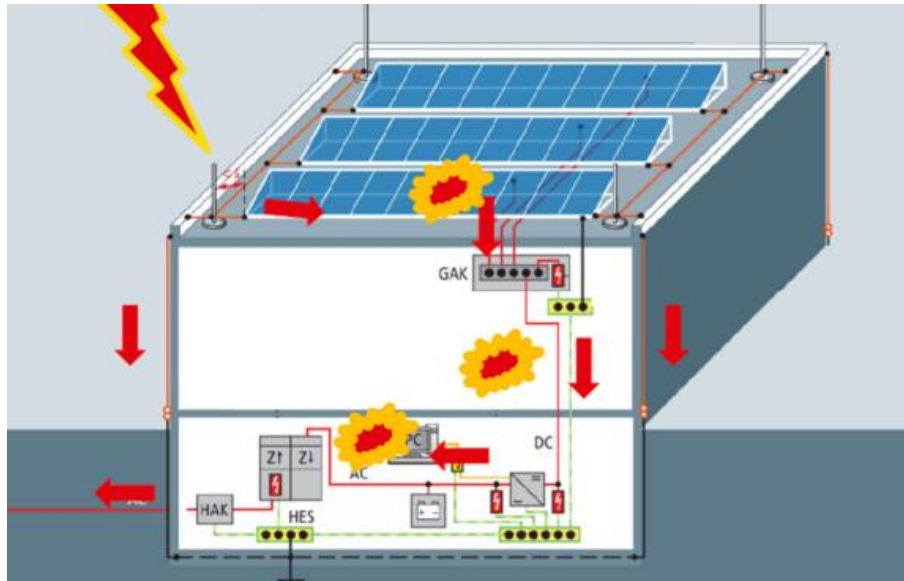
Izolovaný (oddálený) vnější LPS od chráněné stavby by měl být použit v případě, že tepelné a výbušné účinky v místě úderu nebo ve vodičích, které vedou bleskový proud, mohou způsobit škody na stavbě nebo na jejím obsahu. Typickými příklady jsou stavby s hořlavou krytinou, stavby s hořlavými stěnami a s prostředím s nebezpečím výbuchu a požáru. Z toho tedy plyne, že v případě budovy s hořlavou krytinou (folie – PVC-P, MAP – modifikované asfaltové pásy, lepenka atd.), s hořlavými stěnami (dřevostavby, zateplené zdi atd.), nebezpečím výbuchu či požáru, musí projektant navrhnout izolovaný (oddálený) systém ochrany před bleskem [44].

Přitom je také třeba přihlédnout k článku 5.2.4 ČSN EN 62305-3, že lehce hořlavé součásti stavby nesmí být v přímém kontaktu s částmi hromosvodu a nesmí se nacházet přímo pod kovovou krytinou, která může být při úderu propálena. Tomu se musí věnovat pozornost i při méně hořlavých materiálech, jako jsou například dřevěné desky [44].

- Neizolovaný (neoddálený) systém ochrany před bleskem

LPS, jehož jímací soustava a svody jsou umístěny tak, že dráha bleskového proudu může být v dotyku s chráněnou stavbou. Provedení jímací soustavy u objektu s neoddáleným hromosvodem může být realizováno následujícími způsoby [46]:

- pokud střecha není z hořlavého materiálu, může být jímací soustava položena na střeše objektu
- je-li střecha z lehce hořlavého materiálu, musí být dodržena vzdálenost mezi jímacím vedením a materiálem střechy. Dostatečná vzdálenost je minimálně 10 cm.



Obrázek 35 - neizolovaný (neoddálený) systém ochrany před bleskem

Zdroj: [44]

#### 4.1.1.3. Metody návrhu LPS

Při projektování fotovoltaické elektrárny je provedení návrhu LPS naprosto stěžejní.

Existují tři metody, které jsou dle normy přípustné:

- Metoda valící se koule

Tato metoda je vhodná pro všechny případy. Návrh můžeme zpracovat v kreslicím programu Autocad nebo pomocí konstrukce zmenšeného modelu či pomocí vyšetření řezů ve všech směrech daného objektu [47]. Je však nutné dodržet přeskokové vzdálenosti definované v ČSN EN 62305-3 a to tak, aby nedošlo k poškození optimizérů či panelů.

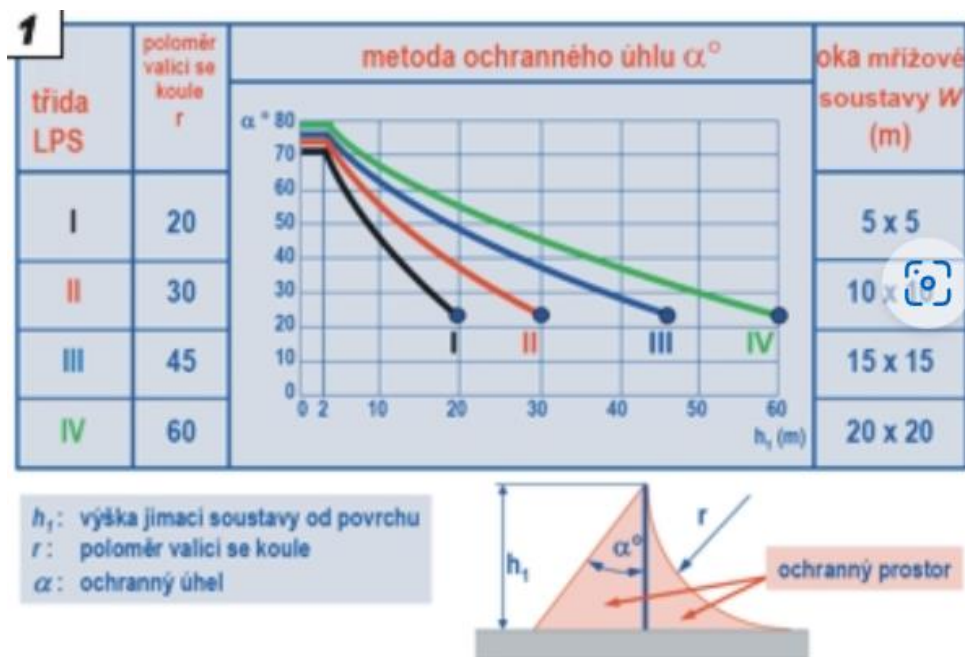
- Metoda ochranného úhlu

Tuto metodu je vhodné použít pro jednoduché tvary budov, ale je ohraničena výškou střešní konstrukce, která se vztahuje k dané úrovni umístění ochranného zařízení [47]. Optimizéry je také možné tímto úhlem ochránit.

- Metoda mřížové soustavy

Lze ji použít pro ochranu rovinných ploch nezávisle na výšce objektu a boku výškových budov [47].





Obrázek 36 - hodnoty soustav podle třídy LPS

Zdroj: [48]

Jednotlivé třídy LPS definuje projektant na základě zvážení všech proměnných instalace, ve většině případů se používá třída III nebo IV.

#### 4.1.2. Přepět'ové ochrany

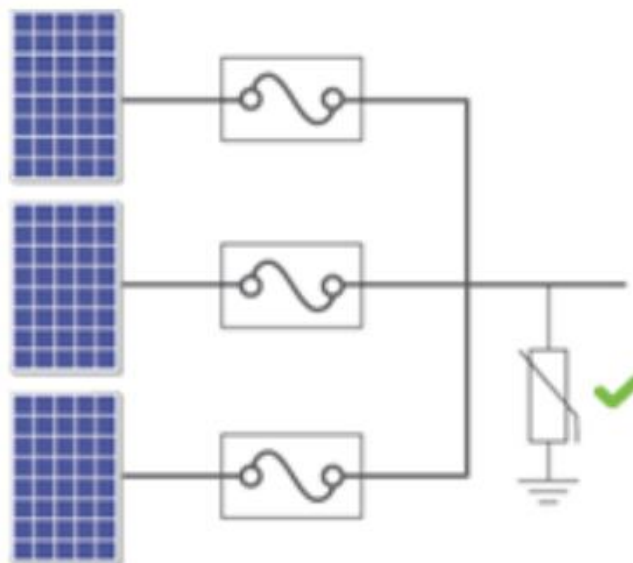
Přepět'ové ochrany jsou jednou z možností ochrany fotovoltaické instalace a jejích komponent jako jsou DC, AC části, optimizéry, komunikační linky, měniče a samotné panely.

##### 4.1.2.1. Ochrana DC části

Jednou z možností ochrany DC části je již zmíněná instalace LPS a ověření návrhu, zda je instalace skutečně chráněna. Pokud objekt není opatřen vnější ochranou proti blesku (hromosvodem) nebo pokud je možné dodržet přeskokovou vzdálenost, pak se na stejnosměrné straně uvažuje pouze s indukovaným přepětím a podle normy postačuje svodič přepětí typu 2 (DS50PVS nebo kvalitnější DS50VG PVS) [49]. Tím se vytvoří dostatečná ochrana i pro optimizéry

##### 4.1.2.2. Ochrana optimizérů

Optimizéry se musí chránit přepět'ovou ochranou tak jak je uvedeno na obrázku [Obrázek 37] kde je znázorněno jak se takový optimizér chrání. Tuto přepět'ovou ochranu je možné instalovat do tzv. GAK, avšak je nutné dodržet délku DC vodičů od prvního modulu stringu podle obrázku [Obrázek 37].



Obrázek 37 - umístění přepět'ové ochrany optimizérů

Zdroj: [45]

#### 4.1.2.3. Ochrana AC části

Na střídavé straně mají být vždy důsledně použity svodiče přepětí, které chrání FVE proti přepětí přicházejícímu z napájecí sítě. Nejlepší ochranu poskytuje kombinovaný svodič přepětí typu 1+2+3 hned na vstupu do budovy. Díky kombinaci všech tří stupňů ochrany má velice dobrou ochrannou úroveň a velmi vysokou výbojovou schopnost [49].

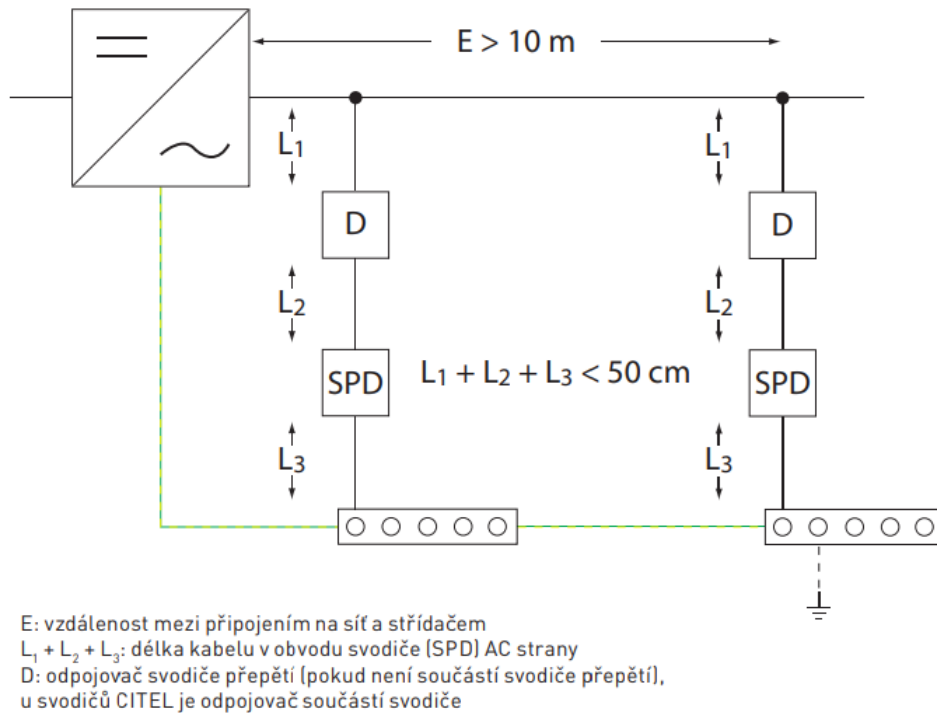
#### 4.1.2.4. Průřezy vodičů

Norma ČSN CLC/TS 50539-12 uvádí minimální průřezy vodičů u svodičů přepětí na DC straně a vodičů pro vyrovnání potenciálů [50]:

- Průřez připojovacích vodičů ke svodiči přepětí na DC straně musí být nejméně stejně velký jako je průřez aktivních vodičů na DC straně.
- Průřezy vodičů pro vyrovnání potenciálu, kterými nemůže procházet bleskový proud: minimálně 6 mm<sup>2</sup> Cu nebo ekvivalent.
- Průřezy vodičů pro vyrovnání potenciálu, kterými může procházet bleskový proud: minimálně 16 mm<sup>2</sup> Cu nebo ekvivalent.
- Propojovací vodiče mezi přípojnici pro vyrovnání potenciálu: → minimálně 16 mm<sup>2</sup> Cu nebo ekvivalent.

#### 4.1.2.5. Délka vodičů

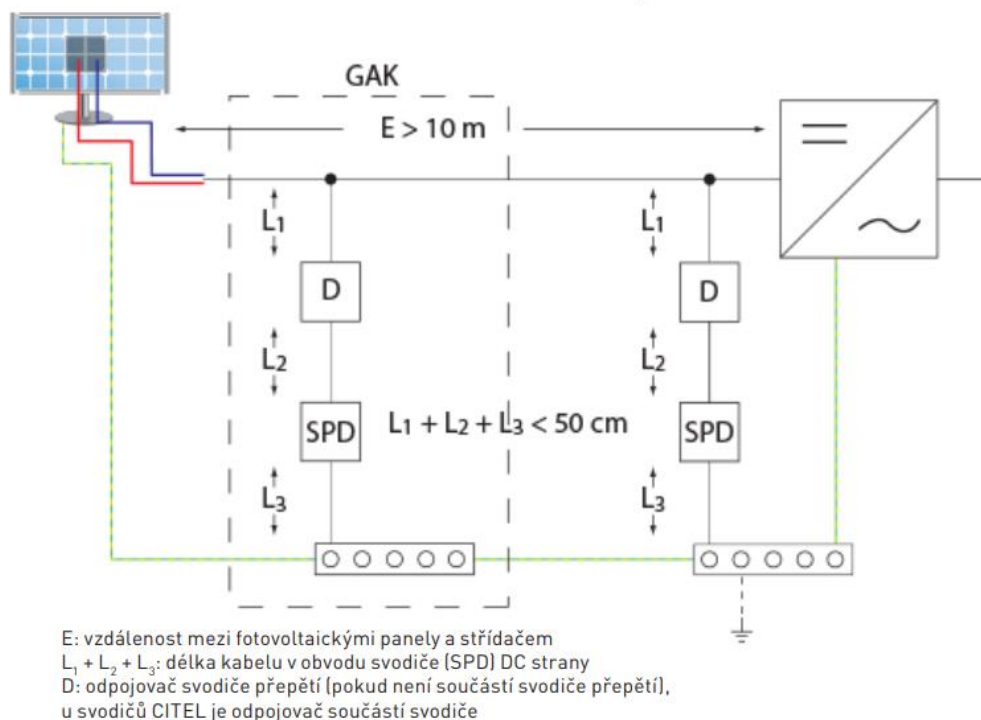
Pro vhodnou ochranu všech komponent fotovoltaické elektrárny je vhodné zkontrolovat délky jednotlivých vodičů, aby nedošlo k výskytu nevhodného přepětí například optimizérů. Pokud je délka kabelů na AC nebo na DC straně delší než 10 m, je zapotřebí použít 2 svodiče přepětí (SPD) [49].



Obrázek 38 - ochrana AC strany pro vzdálenost mezi připojením na síť a střídačem větší než 10 m

Zdroj: [49]

Na obrázku [Obrázek 38] je ukázáno jak lze vhodně instalovat přepětňové ochrany pro AC část fotovoltaické elektrárny. Je nutné si uvědomit, že celková délka vodiče je dána součtem jednotlivých délek celé cesty vodiče.



Obrázek 39 - ochrana DC strany pro vzdálenost mezi připojením na síť a střídačem větší než 10 m

Zdroj: [49]

Z obrázku [Obrázek 39] je patrné, že je doporučeno instalovat mezi fotovoltaické panely a střídač RDC boxy (GAK), které umožní instalaci přepět'ových ochran v dostatečné blízkosti příslušných panelových bloků. Taková to instalace chrání jak panely tak optimizéry. Instalace RDC boxu také umožní eliminaci délek  $L_2$  a  $L_3$ .

## 4.2. Připojovací podmínky pro fotovoltaické elektrárny

Podmínky pro připojení jsou různé pro jednotlivé provozovatele distribučních soustav. Protože společnost ČEZ je jedním z hlavních dodavatelů elektrické energie, je dobré čerpat základní podmínky z jejich dokumentace.

### 4.2.1. Základní podmínky

O způsobu připojení a jejich podmínkách výrobny k distribuční síti rozhoduje provozovatel distribuční soustavy. Volba konkrétního způsobu připojení na NN i VN se provádí na základě výpočtu, které zohledňují výkon a druh výrobny i parametry místní sítě a její využití ostatními uživateli [51]. V zásadě jsou tyto připojovací podmínky naprosto stěžejní pro správný návrh fotovoltaické elektrárny.

Všechny výroby (kromě připojených mikrozdrojů) musí být schopny operativního odpojení při stavech nouze při nebo předcházení stavu nouze [51].

Provozovatel výroby je povinen nepřekračovat sjednanou hodnotu rezervovaného výkonu a zajistit, že ani maximální okamžité hodnoty výkonu dodávaného do distribuční soustavy nepřekročí hodnotu odpovídající hodnotě rezervovaného výkonu [51].

#### **4.2.2. Požadavky na instalace FVE do 11 kW**

Všechny výroby s instalovaným výkonem do 11 kW včetně s možností dodávky do distribuční soustavy musí být schopny úrovněového řízení činného výkonu. Regulace změny dodávky výkonu výroby se bude provádět ve všech fázích současně v úrovních 0 % a 100 % jmenovitého výkonu [51]. Není požadováno měření a signalizace na dispečink provozovatele distribuční soustavy.

U jednofázových fotovoltaických elektráren připojených do sítě NN je omezen výkon na maximálně 3,7 kVA na fázi [51].

#### **4.2.3. Požadavky na instalace FVE od 11 kW do 100 kW**

Regulace se provádí stejně jako u fotovoltaických instalací s výkonem do 11 kW a také není požadováno měření a signalizace na dispečink provozovatele distribuční soustavy.

#### **4.2.4. Požadavky na instalace FVE nad 100 kW**

Výroby musí být schopny víceúrovňového řízení činného výkonu stanovených v připojovacích podmínkách. Výrobna je ze strany provozovatele distribuční soustavy řízena pouze v případech stanovených v energetickém zákoně. Jedná se o možnost přechodné změny dodávky výkonu výroby, je teda možné výrobu provozovat s nižším výkonem, nebo ji na nezbytně nutnou dobu úplně odstavit [51].

Na dispečink provozovatele distribuční soustavy musí být zákazníkem zajištěn přenos měření a signalizace přes jednotku modulu provozovatele distribuční sítě ,do které provozovatel dodá SIM kartu [51].

U výroby připojované do sítě NN je ze strany provozovatele distribuční soustavy nutná autonomní funkce  $f(Q,U)$ . U výroby připojované do sítě VN nebo VVN je požadována plynulá regulace na zadanou hodnotu napětí  $U/Q$  dle aktuálních lokálních podmínek distribuční sítě. Zadaná hodnota napětí je zadávána a přenášena dálkově z dispečerského řídicího systému na jednotku výroby (střídač) [51].

#### **4.2.5. Dodatek o podmínkách pro fotovoltaické elektrárny**

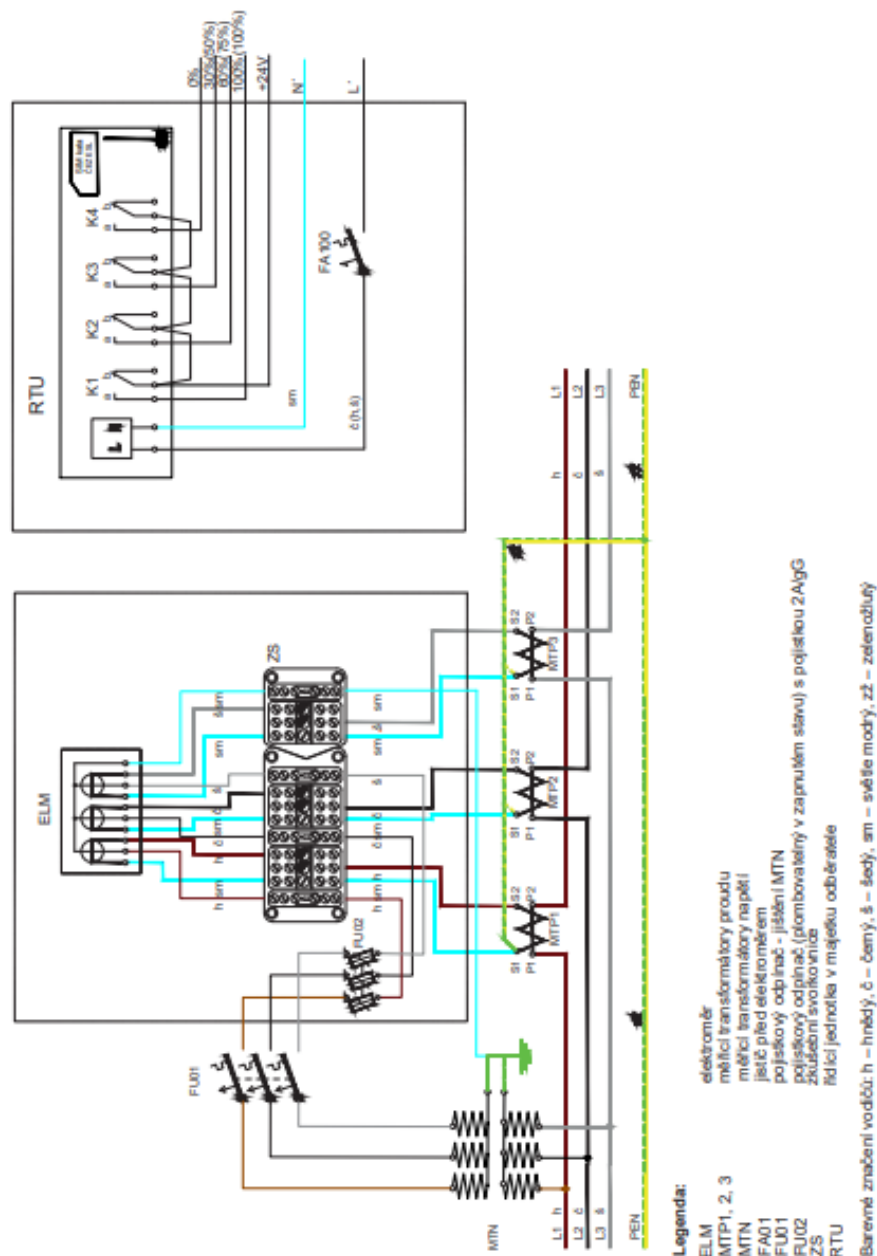
Regulace změny dodávky výkonů výroby do distribuční soustavy se provádí ve všech fázích současně v úrovních 0 %, 30 %, 60 % a 100 % jmenovitého výkonu. Regulace mezi jednotlivými stupni musí probíhat bez přechodu na mezistupeň 100 %, nebo 0 %. U výroben s výkonem nad 100 kW do 2 MW, vzhledem k jejich možnému vlivu na kvalitu elektrické energie je nutné, aby součástí prováděcí projektové dokumentace výroby a jejího technologického napojení na distribuční soustavu byla i přesná specifikace technického opatření k zamezení nežádoucího vlivu vyšších harmonických na kvalitu el. energie, zpracovaná na základě měření v místě připojení k distribuční soustavě. [51].

#### **4.2.6. Rozpadové místo elektrárny**

Rozpadové místo výroby musí umožnit zajištění spínače generátoru v poloze „VYPNUTO“. Musí být zajištěno spolehlivé a bezpečné odpojení výroby od distribuční soustavy. Umístění rozpadového místa musí být jednoznačně definováno a jeho funkce popsána v projektové dokumentaci.

#### **4.2.7. Měření v NN části s regulací výkonu výroby**

ČEZ poskytuje schéma správného připojení výroby elektriny s výkonem jak do 100 kW tak nad 100 kW pro různé tarifové měření s regulací výkonu. Měření lze uskutečnit buď přímo či nepřímě. Nepřímé měření je často prováděno pomocí měřících transformátorů proudu a používá se ve větších instalacích.



Obrázek 40 - výrobná s výkonem do 100 kW, dvoutarifové měření NN s regulací výkonu

Zdroj: [51]

### 4.3. Požadavky na požární bezpečnost FVE

V rámci nebezpečí vzniku požáru fotovoltaické elektrárny se lze setkat s několika různými informacemi popisujícími příčinu vzniku požáru fotovoltaických systémů. Příčinou vzniku požáru může být chybný návrh jednotlivých komponent fotovoltaického systému, poddimenzování kabeláží či technická závada. Jedná se o problém, kde samotné působení

elektrického zkratu je poruchový jev, při kterém dochází k silnému vývinu tepla, přičemž teplota v prostoru působení jevu může dosáhnout až 3 750 °C. Jelikož se v konstrukci elektrických rozvodných zařízení vyskytují plasty a hořlavá izolace kabeláží s teplotou vznícení 380 až 550 °C, může při výskytu elektrického zkratu snadno dojít k překročení teploty vznícení zmiňovaných materiálů, čímž pak dochází ke vzniku nežádoucího jevu, požáru [52]. Optimizéry s sebou přinášejí zvýšení rizika poruchy a tím i požáru. Je dobré si uvědomit, že na jednu stranu jsou optimizéry vhodné pro umožnění zásahu na střeše, ale samy toto riziko zásahu zvyšují.

Podmínky pro instalaci fotovoltaické elektrárny jsou upravovány nebo definovány například v energetickém zákoně č. 458/2000 Sb. § 23 odstavce 3s, který například ukládá povinnost splnit požadavky na bezpečnou instalaci v případě výroben elektřiny z obnovitelných zdrojů energie s instalovaným výkonem do 50 kW připojených k distribuční soustavě, které nevyžadují stavební povolení ani ohlášení podle stavebního zákona [53].

Další předpisy, které upravují bezpečnost FVE jsou například zákon č. 180/2005 Sb. o podpoře využívání obnovitelných zdrojů, stavební zákon č. 183/2006 Sb., který v § 103, odstavci 1 vkládá nově od roku 2022 odstavec e, který nařizuje že, stavební povolení ani ohlášení stavebnímu úřadu nevyžadují stavební úpravy nezbytné pro instalaci využívající obnovitelný zdroj energie s celkovým instalovaným výkonem do 50 kW, pokud se jimi nezasahuje do nosných konstrukcí stavby, nemění se způsob užívání stavby, nevyžaduje posouzení vlivů na životní prostředí, jsou splněny podmínky zejména požární bezpečnosti podle právního předpisu upravujícího požadavky na bezpečnou instalaci výroben elektřiny [54]. Tato liberalizace legislativních podmínek znamená pro instalace převážně rodinných domů mnohem snazší implementaci.

Jedním z důležitých předpisů jsou také vyhláška č. 246/2021 o požární prevenci a vyhláška o technických podmínkách požární ochrany staveb, nebo také nařízení vlády, která stanovuje technické požadavky na elektrická zařízení nízkého napětí [55].

Nedávno vydaná novela zákona č. 460/2021 Sb. o kategorizaci staveb z hlediska požární bezpečnosti a ochrany obyvatelstva definuje čtyři kategorie staveb na které je nutné brát ohled při návrhu fotovoltaické elektrárny [56]. Jednotlivé kategorie definují úroveň stavby a nebezpečí vzniku požáru. Vytvoří se zpráva, podle které se pak upraví stávající zásahový plán. Obsahuje zejména informace jaký typ elektrárny to je, kde je STOP tlačítko a kde se nacházejí jednotlivé komponenty elektrárny.

V tom jistým způsobem pomáhá instalování optimizérů. Nejen, že svým chováním umožňují v případě zásahu snížit napětí ve stringu na bezpečné minimum pro provedení zásahu, ale také v monitorovacím portálu umožňují monitoring na úrovni panelů, tím lze odhalit mnohem dříve možnou budoucí příčinu požáru fotovoltaické elektrárny. To naopak zase riziko poruchy snižuje.



Bude pak na budoucím statistickém měření zda prokáže, jestli z tohoto hlediska je použití optimalizérů vhodnější

#### **4.3.1. Nároky na provedení střešního pláště**

V případě střechy, na které není umístěna fotovoltaická elektrárna, musí být požární odolnost (R)EW. Pokud je na konstrukci střechy instalována fotovoltaická elektrárna, nachází se na střeše nahodilé požární zatížení vlivem fotovoltaických panelů, a tudíž musí konstrukce střechy splňovat odolnost REI. Dále musí být splněny požadavky na požárně technické charakteristiky střešního pláště. V oblasti instalovaných fotovoltaických panelů je nutné, aby střešní plášť splňoval požadavek Broof(t3). Také index šíření plamene po povrchu střešního pláště  $i_s = 0,0$  mm/min [52]. S ohledem na tyto informace pak je potřeba upravit návrh fotovoltaické elektrárny.

#### **4.3.2. Definování odstupových vzdáleností od fotovoltaických panelů**

V současné době neexistuje v České republice norma zabývající se požární bezpečností fotovoltaických elektráren. Ve spojení s fotovoltaickými elektrárnami a jejichmi požárními riziky by se mohlo hovořit o mnoha faktorech, která doposud nebyly stanoveny nebo nejsou známy. V současnosti se odstupy od fotovoltaických elektráren definují podle ČSN 73 0804, kde vzhledem k neznalosti vlastností a chování těchto zařízení dochází k tomu, že se odstupové vzdálenosti provádí jednoduchým způsobem podle kapitoly odstupových vzdáleností od otevřených technologických zařízení, kde je v těchto případech je odstupová vzdálenost 6,5 m [57]. Tato hodnota odstupové vzdálenosti je stejná i pro samostatný fotovoltaický panel. Umístění novostaveb na pozemku vzhledem k hranicím sousedních pozemků je v současnosti minimálně 3,0 m. Z toho důvodu může být umístění fotovoltaických panelů na budově limitující vzhledem k okolním pozemkům a stavbám [52].

##### **4.3.2.1. Hašení požáru fotovoltaické elektrárny**

Při hašení požáru fotovoltaické elektrárny je třeba uvažovat s metodickým listem HZS ČR. Ten říká, že při požáru střešní konstrukce s fotovoltaickou elektrárnou je nutné především požadovat a zajistit odpojení elektrárny od vnější elektrické sítě a odpojení panelů od střídače. Je také nutno zabránit šíření požáru mimo požárem zachvácenou oblast na střeše a to jednak zásahem ze spodu, k ochraně nosných konstrukcí (ochlazováním, aby nedošlo ke ztrátě jejich nosnosti) a k zabránění šíření požáru dovnitř budovy, a jednak vnější zásahovou cestou, na střešní konstrukci z výškové techniky (nepoužívat nastavovací žebříky) nebo jiného vhodného místa mimo zasaženou střechu roztržitým proudem obdobně jako běžná zařízení a vedení pod napětím do 400 V. Pro hašení elektrických zařízení pod napětím jsou vypracovány standardní postupy. Rozdíl

mezi ČR a Německem je pouze v horní hranici napětí. Zatímco v Německu se standardně hasí vodou elektrická zařízení pod napětím do 1000 V, v České republice je to jen do 400 V [58]. To má za následek obrovský rozdíl v přístupu hašení jednotlivých elektráren. Zejména u těch, které svým počtem panelů v jedné větvi převyšuje hranici 400 V.

Řešením je právě použití sofistikované metody optimizérů. Ty v případě stisknutí tlačítka STOP FVE dostanou pokyn, aby nastavily své napětí na straně orientované do stringu na 1 V. Střídač je nastaven tak, že v případě ztráty síťového napětí vydá pokyn právě optimizérům, které nastaví bezpečné napětí. Pokud by v budoucnu hranice bezpečného napětí byla 120 V po vzoru Německa, SolarEdge je již na tuto legislativní změnu připraven. V současnosti, s očekáváním právě této legislativní změny, jsou tyto elektrárny investory preferovány.

### **4.3.3. Návrh vyhlášky z roku 2023**

V tomto roce se bude projednávat návrh zákona o požadavcích na bezpečnou instalaci výroby elektřiny využívající obnovitelné zdroje energie s instalovaným výkonem do 50 kW. Ten definuje zejména:

#### **4.3.3.1. Požadavky na materiálové provedení**

Pro instalaci výroby elektřiny využívající energii slunečního záření umístěné na stavbě, která je budovou, je požadován plochý fotovoltaický panel tvořený nehořlavou konstrukcí. Prvky konstrukce fotovoltaického panelu musí být z materiálu třídy reakce na oheň A1 nebo A2 s výjimkou stínicí folie a izolačních hmot. Konstrukce, na níž je umístěný fotovoltaický panel, musí být z materiálu třídy reakce na oheň A1 nebo A2 [59]. Z tohoto důvodu je nutné brát ohled na vybrání vhodných materiálů

#### **4.3.3.2. Požadavky na vypnutí a odpojení**

Vypnutí a odpojení výroby elektřiny od elektrické energie musí být zajištěno vypínacím prvkem, který je umístěn na přístupném místě, řádně označen a je zabráněno jeho volnému užití. Za dostatečné se považuje umístění vypínacího prvku do rozvodné skříně s hlavním jističem na přívodu elektřiny do objektu. Umístění zvláštního vypínacího prvku není požadováno v případě, že hlavní jistič současně vypíná a odpojuje výrobu elektřiny využívající energii slunečního záření [59].

### **4.3.4. ČSN 73 0847 Požární bezpečnost staveb – fotovoltaické systémy**

Tato norma definuje požadavky na fotovoltaické systémy. Tato norma je zatím v procesu schvalování a není uvedena v platnost. Rozděluje požadavky dle místa instalace:

- Mimo stavební objekty
- Na stavebních objektech

Rozdělení z pohledu množství tepla uvolněného z FV panelů:

- S omezeným vývinem tepla
- Bez omezeného vývinu tepla

Stanovuje také odstupové vzdálenosti dle typu panelů a jejich umístění a popisuje požadavky na zřízení samostatných požárních úseků:

- Prostory pro každou elektrorozvodnu FV systému
- Prostory na rozmístění FV panelů na střeše (uličky, odstupové vzdálenosti od světlíků, střešních oken, atd...)

A stanovuje podmínky pro zásah JPO, nebezpečí úrazu elektrickým proudem a jiné [60].

Mimo jiné také definuje vzdálenosti od jednotlivých střešních konstrukcí (světlíků, atik a kraje střechy), instalovaných konstrukcí (vzduchotechnika, komíny atd...) a maximální velikost fotovoltaických bloků tak, aby se mezi nimi vytvořila mezera pro požární zásah.

Pravděpodobně bude právě v této normě také zakotveno bezpečné napětí pro možný požární zásah, čímž přímo zvýhodňují technologii optimizérů.

## **4.4. Požadavky na statiku a zátěž FVE**

Pro úplný návrh fotovoltaické elektrárny je nutno zvážit vliv tíhy panelů na konstrukci stavby. Při tomto návrhu je potřeba koordinovat výsledky statického testu stavby se zátěžovým plánem, který je z principu přesně opačného charakteru než je statika stavby. Zátěžový plán má za úkol co nejvíce zatížit panelové konstrukce tak, aby nedošlo k jejich nedovolenému pohybu na střešní konstrukci. Tato hodnota jde však proti výsledkům statiky, která definuje maximální možnou hmotnost na jednotku plochy, která je ještě pod kritickou hranicí stability střešní konstrukce.

### **4.4.1. Statistický posudek**

Pro zpracování statického posudku je nutné vycházet z poskytnutých dokumentů o architektuře stavby. Obsah a metody posouzení jsou definovány dle ČSN ISO 13822 Zásady navrhování konstrukcí – hodnocení existujících konstrukcí, ČSN EN 1990 Zásady navrhování konstrukcí a ČSN 1991 Zatížení konstrukcí: Část 1-1: Obecná zatížení.

Často se výpočet rozděluje na výpočet zatížení sněhem a větrem a dojde k započítání optimizérů. Výstupem pak je hodnota užitého zatížení (kN/m<sup>2</sup>). V posudku se vydá stanovisko, zda byla prokázaná možnost instalace fotovoltaických panelů na střechu.

## 5. Princip návrhu střešní fotovoltaické elektrárny

---

Vzhledem k tomu, že je návrh instalací fotovoltaických elektráren poměrně čerstvé téma, které se začíná rozvíjet až v posledních letech je velmi málo odborníků, kteří mají s projektováním těchto elektráren zkušenosti. Z tohoto důvodu budu popisovat jednotlivé stupně dokumentace tak jak se projekt chronologicky vyvíjí a zároveň ukážu na příkladech instalací elektráren v areálu výrobního závodu ŠKODA v Mladé Boleslavi u haly U6C (DSPS), fotovoltaické elektrárny na střeše Kongresového Centra Prahy (DPS), elektrárny na střeše kovohutí Příbram (DSP) a elektrárny Okrouhlá u Chebu (AS) způsob, jakým se zpracovávají různé stupně dokumentace, jak se taková elektrárna reálně navrhuje a proč se do výkresů kreslí právě ty informace, které jsou v nich uvedené. Budu se zabývat jednotlivými stupni dokumentace od předběžné studie až po dokumentaci skutečného provedení stavby. Obsah dokumentace se řídí podle vyhlášky č. 499/2006 Sb., kde jsou popsány jednotlivé stupně dokumentace a co mají obsahovat. Předběžná studie neboli architektonická studie (AS) není v této vyhlášce definována. Ostatní, projektové dokumentace, jsou již definovány pod § 2 a to dokumentace pro provádění stavby (DPS) a dokumentace skutečného stavu (DSPS). Obě tyto dokumentace se většinou zpracovávají až po získání stavebního povolení. K tomu je potřeba také zpracovat dokumentaci pro vydání společného povolení (DSP). Tato dokumentace je popsána v této vyhlášce, jedná se o § 1a, b, c, d. Existují ještě jiné stupně dokumentace, ale ty nejsou součástí projektových dokumentací fotovoltaických elektráren. Vzhledem k výkresům formátu A0 jsou všechny příložené dokumenty k dispozici pouze elektronickým způsobem.

### 5.1. Architektonická studie (AS)

Studie se provádí jako předběžný návrh. Slouží k tomu, aby investor měl k dispozici základní odhad o proveditelnosti, rentabilitě své investice a mohl zanést technické požadavky na instalaci fotovoltaické elektrárny do návrhu budovy. V příloze 1a je několik souborů, které by měla tato studie obsahovat. Ze studie pak lze informace o instalovaném výkonu, zatížení panelů ( $\text{kg/m}^2$ ), AC výkon a způsob napojení na distribuční soustavu, použít pro určení počáteční investice a stanovit odhadovanou výrobu v průběhu let. Hlavní dokumenty, které je nutné zpracovat jsou: rozmístění panelů na střeše, jednopólové schéma a technická zpráva. Příložené dokumenty, které se doporučují investorovi sdělit, jsou: datový list uvažovaných panelů, střídačů, podpanelové konstrukce a případně zpráva od výrobce zátěžových konstrukcí o celkovém zatížení ( $\text{kg/m}^2$ ). Nyní jednotlivé obsahy těchto dokumentů popíšeme.

### **5.1.1. Rozmístění panelů**

Dokument [Příloha 1a – OKRO\_01\_CZ\_Rozmístění\_panelů\_v.1.pdf] ukazuje výkres střechy budoucí haly v Okrouhlé u Chebu. Na této střeše je nejprve vyznačen její obrys nebo i místa, kde je možné dle majitele instalovat panelové bloky. Následně jsou vyznačeny na střeše ty části, kam není možné instalovat panely a nedojde k odstranění těchto překážek během výstavby elektrárny (např. hromosvody). Následně jsou podle pravidel požární bezpečnosti a s ohledem na stanovisko PBŘ implementovány ochranné vzdálenosti od prvků střechy (světlíky, vzduchotechnika, kraj střechy, atd...). U plochých střech nutné respektovat jejich mírný sklon a tím vytvořené zlomy na zdánlivě rovné střeše. Převážně se panelová konstrukce dá mírně ohnout na vrcholu střechy, ale nelze ji ohnout v dolním zlomu střechy, kde by se taková konstrukce nedotýkala střechy po celé své délce. Bloky je tedy vhodné volit tak, aby nebyly přes střešní zlomy. Navíc je ještě potřeba respektovat minimální a maximální velikost bloku dle výrobce, aby nedošlo k popraskání panelů vlivem dilatace materiálu v důsledku změny teploty a zohlednit vytvoření koridoru pro požární zásah dle platné vyhlášky.

Celkový počet panelů se odvíjí od požadavku investora, stanovisek statika, PBŘ či možnosti vyvedení výkonu. Převážně je počet omezen velikostí výkonu transformátorů, které jsou v areálu k dispozici. V tomto případě je střecha vhodná na instalaci téměř 3,5 MVA, ale díky transformátoru 1 MVA lze instalovat jen tento DC výkon. Lze polemizovat nad tím, že nebude, doba, kdyby celý tento výkon byl ve dne směřován do distribuční sítě. Navíc, když jsou panely orientovány východ/západ, by v případě výpadku elektroinstalace podniku mohlo předimenzování instalace přivést transformátor do přetížení. Jak se dimenzuje střídač bude popsáno v části zabývající se DPS.

### **5.1.2. Jednopolové schéma**

Jedná se o dokument [Příloha 1a – OKRO\_01\_CZ\_Technická\_zpráva\_v.1.pdf], který se příkládá k žádosti o připojení fotovoltaické elektrárny do distribuční soustavy. Obsahuje zejména informaci o instalovaném výkonu, počtu panelů a má jednoduše naznačit jakým způsobem a jaké stavy se budou přenášet do skříně dispečerského řízení podle připojovacích podmínek distributora. Definiuje také rozpadové místo elektrárny, přičemž nakonec v dalších stupních dokumentace může vzniknout hned několik rozpadových míst, avšak u architektonické studie jde o jednoduchý návrh, který není podrobněji aplikován na konkrétní střechu.

### **5.1.3. Technická zpráva**

Technická zpráva architektonické studie slovně popisuje jednotlivé komponenty návrhu, provoz a jednotlivé rozvaděče, které budou použity při instalaci za různým účelem. Definiuje přibližně jaká kabelová vedení budou použita a jak bude provedeno nastavení ochran této elektrárny. Dokument je naprosto stěžejní pro další rozhodování o investici, realizaci či způsobu provedení.

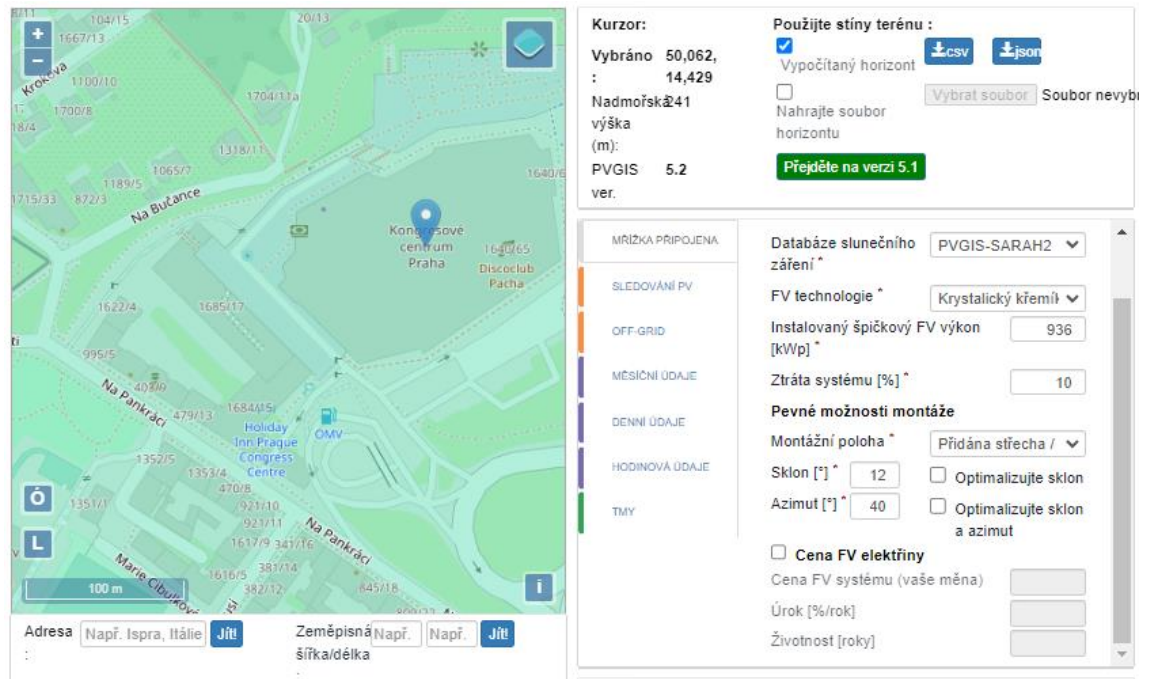
### **5.1.4. Přílohy**

Zároveň je žádoucí poskytnout investorovi i datové listy jednotlivých hlavních komponent jako panely a střídače. Investor si sám může pročíst výhody a nevýhody jednotlivých zařízení popřípadě navrhnout alternativy.

### **5.1.5. Odhad výroby**

Investor by měl mít dostupný model určující odhad výroby navrhované fotovoltaické elektrárny během životnosti, který pak má možnost použít do finančního modelu. Vzhledem k tomu, že matematický popis predikce takovéto výroby je velmi složitý, je vhodné použít software, který používá statisticky zpracovaná data měření sítě bodů rozprostřených po povrchu Země. Tyto body jsou programem většinou interpolovány tak, aby bylo možné popsat všechny body na planetě s ohledem na jejich nadmořskou výšku, statistické počasí či zakalení atmosféry.

Pro tento příklad byl použit volně dostupný program Photovoltaic Geographical Information System. Program umožňuje na základě hrubých dat modelovat predikci výroby fotovoltaické elektrárny.



Obrázek 41 - vstupní data pro výpočet výroby fotovoltaické elektrárny na střeše kongresového centra

Zdroj: [61]

Obrázek [Obrázek 41] ukazuje, které data je nutné znát. Na první pohled je velmi jednoduchý, avšak neumožňuje volit mezi způsobem instalace panelu (orientace na jih, orientace východ/západ) a počítá pouze s orientací na jih. To lze obejít rozdělením elektrárny na polovinu s azimutem definovaným jako:

$$\delta_{\text{východ}} = \delta_n - 90^\circ \quad (17)$$

a také:

$$\delta_{\text{západ}} = \delta_n + 90^\circ \quad (18)$$

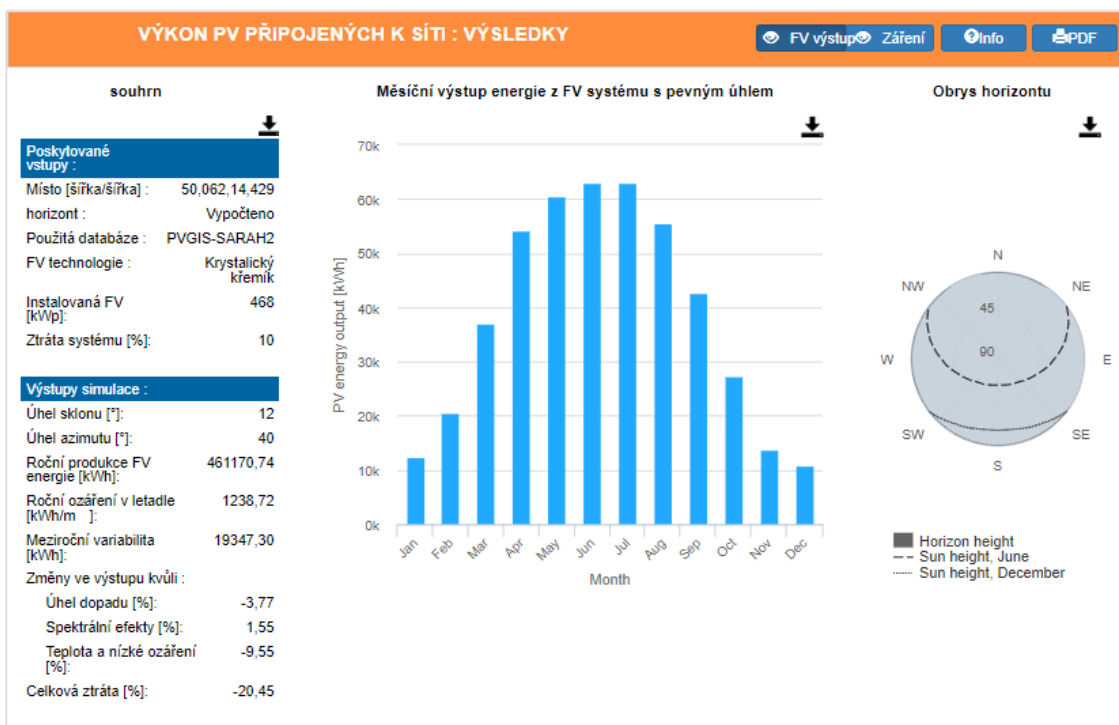
kde:  $\delta_{\text{východ}}$  je azimut panelů orientovaných na východ tak, jako kdyby to byly panely orientované na jih

$\delta_{\text{západ}}$  je azimut panelů orientovaných na západ tak, jako kdyby to byly panely orientované na jih

$\delta_n$  je azimut dvojice panelů orientovaných východ/západ

Následně je možné výsledky sečíst a tím dosáhnout celkové predikce panelů orientovaných východ/západ.





Obrázek 42 - polovina výkonu západní orientace fotovoltaické elektrárny KCP

Zdroj: [61]

Na obrázku [Obrázek 42] je ukázána výroba fotovoltaické elektrárny v jednotlivých měsících a v postranním panelu celková roční produkce se svou roční odchylkou, která je definována jako směrodatná odchylka ročních hodnot za období s údaji o slunečním záření ve zvolené databázi slunečního záření. Získáme tím přehled o různých ztrátách na výstupu FV způsobených různými klimatickými vlivy [62]. Z obrázku lze vyčíst i celkové ztráty fotovoltaického systému s ohledem na klimatické podmínky.

### 5.1.6. Žádost o připojení

Dokument slouží k podání žádosti o připojení [Příloha 1b – Žádost o připojení + dotazník pro vlastní výrobu.pdf]. Díky vypracované studii lze snadno vyplnit důležité informace k žádosti o připojení. Každý distributor má jinou podobu žádosti, avšak obecně jsou základní požadované informace stejné. Obsahuje jednotlivé údaje o žadateli (instalační firma), výrobci elektřiny (provozovatel) a informace o tomto zdroji jako takovém, například instalovaný výkon či provozované napětí. Tento formulář je dle mého názoru zavádějící, protože nevhodně rozlišuje mezi výkonem střídače a celkovým výkonem všech střídačů a už vůbec nezohledňuje možnost více střídačů s různým výkonem.

## **5.2. Dokumentace pro vydání společného povolení (DSP)**

Dokumentace je nezbytná pro vydání stavebního povolení k realizaci stavby. Příklad podoby takovéto dokumentace je uveden v příloze 2. Obsah podléhá vyhlášce 499/2006 Sb. Lze jej rozdělit na dokumenty části A – průvodní zpráva, B – souhrnná technická zpráva, C – výkresy širších vztahů, D – dokumentace objektu a přiložené doplňující výkresy o rozmístění panelů a zohlednění rozměrů budovy.

### **5.2.1. A – Průvodní zpráva**

Průvodní zpráva [Příloha 2 – A\_Průvodní zpráva.pdf] má za úkol zaznamenat všechny informace o zúčastněných subjektech. Jedná se o údaje o stavbě jako jsou: adresa, členění stavby, technologická zařízení, výčet stavebních parcel v katastrálním území a související parcely atd. Dále zde musí být uvedeny údaje o žadateli a zpracovateli této dokumentace, kde se uvádí jméno hlavního projektanta a další jména různých zpracovatelů posudků či stanovisek dotčených orgánů. Doporučuje se uvést seznam vstupních podkladů, kde se právě na tyto stanoviska lze odkázat.

### **5.2.2. B – Souhrnná technická zpráva**

Zpráva [Příloha 2 – B\_Souhrnná\_Technická\_zprava.pdf] má za úkol blíže přiblížit, kde se stavba nachází, jak vypadá, k čemu se používá a jestli určitým způsobem mění vzhled, charakter či bezpečnost okolí a zda by pro stavbu bylo potřeba vyjádření dalších orgánů (památkový ústav, ústav ochrany přírody atd.). Žadatel musí splnit také urbanistické podmínky, bezpečnost, zohlednit PBŘ. Definuje také pro koho je stavba vhodná či zda nemá nepříznivý vliv na okolí (hluk, kontaminace). Vyžaduje se také definování infrastruktury vhodné pro manipulaci v souvislosti se stavbou.

### **5.2.3. C – Výkresy širších vztahů**

Jde se o výkresy [Příloha 2 – C\_Výkresy širších vztahů.pdf], které určují jak stavba zapadá do současného architektonicko-stavebního řešení v okolí, definuje ochranná a bezpečnostní pásma, jak je napojena na infrastrukturu, kde bude pomocná technika (jeřáby, stavební buňky), a definuje dočasné či trvalé zábery. Dělí se na tři druhy výkresů: situační výkres širších vztahů, katastrální situační výkres, koordinační situační výkres a speciální situační výkres.

## 5.2.4. D – Dokumentace objektů

Dokumentace [Příloha 2 – D\_Dokumentace\_objektu.pdf] se zabývá popisem jednotlivých částí stavby. Rozděluje se na architektonicko-stavební část, stavebně konstrukční řešení, požárně bezpečnostní řešení a techniku prostředí staveb.

Architektonicko-stavební část pojednává o způsobu instalace panelů na střechu přičemž popisuje jak podpanelovou konstrukci tak samotnou střechu (velikost, sklon, uchycení) a vliv elektrárny na architektonický ráz budovy.

Stavebně konstrukční řešení pojednává o vlastním návrhu elektrárny na střechu tak, jak bylo popsáno v kapitolách architektonické studie a navíc obsahuje statické posouzení budovy i s uvažováním instalace fotovoltaické elektrárny a jeho závěry.

Požárně bezpečnostní řešení uvádí stanovisko posouzení stavby z hlediska vlivu fotovoltaické elektrárny na stávající požárně bezpečnostní řešení a stanovuje nové postupy či požadavky.

Část techniky prostředí staveb popisuje stavbu elektrárny jako takovou, definuje účel užívání stavby a uvádí základní parametry elektrárny, způsob měření a definování vnějších vlivů, které jsou často opomíjeny při návrhu DPS. Jde hlavně o předběžnou detailní technickou zprávu, která pak bude sloužit jako podklad pro zpracování dokumentace pro provádění stavby.

## 5.3. Dokumentace pro provádění stavby (DPS)

V této části dokumentace se musí jednotlivé požadavky na instalaci plynoucí ze zpracované dokumentace ke stavebnímu povolení a vyjádření jednotlivých orgánů zapracovat do dokumentace, podle které se bude stavba realizovat. Tato dokumentace trvá ze všech nejdéle, protože je nutné vytvořit detailní řešení všech částí stavby. Budu se tedy touto dokumentací zabývat podrobně a uvádět příklady z přílohy 3. Ostatní problematika návrhu, která zde nebude popsána a je stejná jako v předchozích částech (AS a DPS).

### 5.3.1. Dimenzování výkonu střídačů

Vzhledem k tomu, že již z předchozích stupňů dokumentace známe počet instalovaných panelů, jsme schopni dimenzovat výkon střídačů a jejich počet. Obecně lze napsat vzorec pro výpočet počtu střídačů jako:

$$n_s \stackrel{\text{zaokr.na horu}}{\approx} \left( \frac{\sum_{i=1}^n (n_{pi} \cdot P_{pi})}{(1 + \varepsilon) \cdot S_{Si}} \right) \quad (19)$$

kde:  $n_s$  je počet střídačů

$S_{si}$  je AC výkon zamýšlených střídačů

$n_p$  je počet panelů [–]

$\sum_{i=1}^n (n_{pi} \cdot P_{pi})$  je součet všech výkonů panelů instalovaných v elektrárně

$\varepsilon$  je přetížení střídače, poměr vstupního DC výkonu ku výstupnímu AC výkonu

Ve větších elektrárnách je většinou vhodné použít jeden typ střídače. Výsledkem je takové celé číslo, které splňuje podmínku nerovnosti. Střídače se dimenzují s mírným přetížením s ohledem na orientaci panelů. Pro orientaci na jih se střídače téměř nepřetěžují, v případě orientace východ/západ je lze přetížít až od 20%, to lze zjistit například z průběhů výkonu fotovoltaické elektrárny různě orientovaných v prostoru. Poměr mezi maximem výkonu panelů orientovaných na jih vůči těm orientovaným na východ/západ je možné považovat právě za činitel přetížení. Pro ověření správnosti návrhu je nutné provést výpočet pro stanovení maximálního výkonu výroby celé elektrárny a porovnat ji s distribučním transformátorem či hlavním jističem, ke kterému je fotovoltaická elektrárna připojená. To lze provést bilancí:

$$\sum S_{si} \leq \sum S_{tr} \text{ nebo } \sum I_{s\_max} \leq \frac{S_{tr}}{\sqrt{3} \cdot U_{tr}} \quad (20)$$

kde:  $\sum S_{tr}$  je součet výkonů transformátorů do kterých je výkon z fotovoltaické elektrárny vyveden

$\sum I_{s\_max}$  je maximální AC proud, který je schopen střídač vyvinout, najde se v datovém listu střídačů

$U_{tr}$  je napěťová hladina na které střídač pracuje

Tento vzorec určuje, aby výkon fotovoltaické elektrárny byl menší či roven instalovanému výkonu všech traf, do kterých je fotovoltaická elektrárna vyvedena. Alternativní vzorec je mnohem přesnější, protože často použití obecného vzorce pro převod výkonu střídače na jeho maximální proud často neodpovídá uvedeným datům.

### 5.3.2. Tvorba panelových větví

Kapitola pojednává o způsobu jakým se tvoří panelové větve, zkráceně stringy. Způsobem jakým se tvoří stringy obecně závisí na dvou faktech. Prvním způsobem je zohlednění vlivu teploty na napětí panelu a druhým je zanesení provedení DC strany střídače.

### 5.3.2.1. Vliv typu střídače na string

Obecně platí, že pokud má střídač společné MPPT zařízení pro více stringů, je důležité dodržet dvě pravidla a to počet panelů na jedno MPPT zařízení musí být v každém stringu stejné a musí být orientované na stejnou stranu. V případě, že by tyto podmínky nebyly dodrženy, došlo by k tomu, že MPPT zařízení nebude schopno se ustálit na maximálních hodnotách výkonu z důvodu velmi rozdílných parametrů stringů.

### 5.3.2.2. Návrh stringů

Při návrhu stringů je důležité umístit příslušný střídač co nejblíže k panelům. Díky tomu budou stringy co nejkratší a uplatní se přepět'ová ochrana instalovaná ve střídačích na každém MPPT zařízení nebo stringu. V případě, že vzdálenost je taková, že by přepět'ové ochrany nebyly schopny správně fungovat, je nutné instalovat tzv. RDC boxy, které jsou v bezprostřední blízkosti fotovoltaických bloků a obsahují přepět'ové ochrany. Typicky je taková DC přepět'ová ochrana typu I + II na 1000V. U technologie SolarEdge je možnost stringy sdružit po třech. To umožní ušetřit za přepět'ové ochrany, které jsou drahé.

Dále je vhodné navrhnout délku stringu s ohledem na dvě předchozí kapitoly a také na maximální vstupní napětí střídače, které bývá většinou menší než je maximální délka stringu.

Stringy se vedou v kabelových trasách, popřípadě v UV odolných ohebných trubkách od kabelové trasy k panelové konstrukci. Jedná se o dvě žíly převážně tvořené kabelem H1Z2Z2-K. První žíla je kladný pól a druhá záporný. Záporný pól začíná u posledního panelu a kladný pól končí u posledního panelu. Vedení záporného pólu se musí provést tak, aby nevznikaly indukční smyčky. To se provede vedením po stejné cestě jako kladný pól. Kabel se při vedení pod panelem přichytne na stahovací pásky s klipsou, či se jen stahuje pásky k podpanelové konstrukci.

Z návrhu [Příloha 3 – KCPX\_01\_CZ\_Stringplán\_v.1.pdf], který se kreslí tak, aby byl co nejpodobnější realitě jsou dva výstupy. Prvním je délka kabelu do BOM (soupis materiálu pro obchodní sektor firmy), která nezahrnuje délku kabelu integrovanou pro panel, druhým je celková délka průchodu proudu díky níž se počítá úbytek.

### 5.3.3. Návrh optimizérů

Návrh je závislý na typu optimizéru. Existují optimizéry pro dva panely nebo pro jeden. V případě použití jednoho panelu na jeden optimizér je nutné instalovat 14 či 16 panelů. V případě 14 panelů se jedná o optimizéry pro vyšší napětí. V případě použití jednoho optimizéru pro dva panely je nutné minimální počet zdvojnásobit. Maximální počet je většinou u všech optimizérů

30 kusů. Což oproti klasickým stringovým měničům je téměř třikrát více než při návrhu maximálního počtu panelů bez optimizérů.

Navíc pokud je hladina napětí součtu optimizérů stejná jako na vstupu do měniče nedochází téměř k žádným úbytkům a jednotlivé stringy pak mohou být mnohem delší než u klasických stringových elektráren.

### 5.3.4. Výpočet úbytku napětí

Podle normy ČSN 33 2000-5-52 ED.2 je maximální úbytek napětí mezi počátkem instalace a odběrným bodem definován jako 3 %, pro průmysl je dovoleno až 5 %. Převážně se instaluje na DC straně délka kabelu s úbytkem do 3%, což může být někdy problematické. Použití většího průřezu je nevhodné z důvodu spojení (fotovoltaický konektor) s integrovaným kabelem panelu.

Všechny tyto výsledné informace i o tom jaký string veden na jaký střídač, jsou uvedeny v dokumentu [Příloha 3 – KCPX\_01\_CZ\_Připojovací\_plán\_v.1.pdf].

#### 5.3.4.1. Výpočet úbytku napětí DC vodičů

Obecně je výpočet definován jen odporem vodiče. Indukčnost se průchodem DC signálu neuplatní. Výpočet je tedy definován jako:

$$\Delta u_{DC\%} = \frac{\sum P_p \cdot \gamma_{vodiče} \cdot l_{string}}{(\sum U_p)^2} \quad (21)$$

kde:  $\Delta u_{DC\%}$  je DC úbytek napětí v procentech

$\gamma_{vodiče}$  je měrný odpor DC vodiče

$l_{string}$  je délka stringu

$\sum U_p$  je součet napětí panelů instalovaných ve stringu

Úbytek je kontrolován, zda nepřesáhl 3%. Pokud ano, je možné uvážit změnu uspořádání panelů ve stringu, či změnu polohy střídače.

#### 5.3.4.2. Výpočet úbytku napětí AC vodičů

Výpočet úbytků napětí na AC straně je rozšířen o vliv indukčnosti kabelu. Používám pro něj rozšířený vzorec, který respektuje všechny veličiny mající vliv na okamžitou teplotu vodiče. Celý výpočet lze nalézt v příloze 5. Vycházíme ze známého modelu pro vedení:

$$M \cdot c_p \cdot \frac{dT_{AV}}{dt} = P_J + P_S + P_M - P_R - P_C \quad (22)$$

kde:  $M$  je poměrná hmotnost vodiče

$c_p$  je měrná tepelná kapacita vodiče

$P_J$  jsou Joulovy ztráty vlivem průchodu proudu

$P_S$  je výkon dodaný slunečním zářením

$P_M$  je ohřev vodiče magnetickým polem

$P_R$  je výkon odvedený sáláním

$P_C$  je výkon odvedený konvekcí

Předpokládejme, že maximální proudová zatížitelnost vodiče je výrobcem zkoušena při přibližně známých veličinách a stavech. Například, že vodič byl testován v bezvětrí, pod přímým ozářením  $1000 \text{ W/m}^2$  pod pravým úhlem k ose vodiče, při teplotě okolí  $30^\circ\text{C}$  a typu uložení stejném jako v případě testu pro stanovení maximální proudové zatížitelnosti.

Vzorec (22) **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** lze upravit do tvaru pro ustálený stav prohlášením:

$$\frac{dT_{AV}}{dt} = 0 \quad (23)$$

A vyjádřením  $P_J$  jako:

$$P_J = I \cdot R_{DC_{20^\circ\text{C}}} \cdot [1 + \alpha_\Omega \cdot (T_{AV} - T_{min})] \quad (24)$$

kde:  $R_{DC_{20^\circ\text{C}}}$  [ $\Omega$ ] stejnosměrný odpor při teplotě  $20^\circ\text{C}$  a lze ho najít v datovém listě vodiče

$\alpha_\Omega$  je součinitel tepelného odporu a lze ho najít pro různé materiály vodiče

$T_{AV}$  je teplota povrchu vodiče

$T_{ok}$  je teplota okolí

Dosazením (23) a (24) do (22) a vyjádřením proudu  $I$  dostaneme:

$$I = \sqrt{\frac{P_R + P_C - P_S}{R_{DC_{20^\circ C}} \cdot [1 + \alpha_\Omega \cdot (T_{AV} - T_{min})]}} \quad (25)$$

Rozeepíšeme jednotlivé výkony, pro výkon odvedený radiací můžeme psát:

$$P_R = \sigma \cdot \varepsilon \cdot \pi \cdot D \cdot [(T_{AV} - 273,15)^4 - (T_{ok} - 273,15)^4] \quad (26)$$

kde:  $\sigma$  je Stefanova-Boltzmannova konstanta

$\varepsilon$  je emisivita tepelného záření, která je pro PVC 0,9 [63]

$D$  je charakteristický rozměr a lze ho vypočítat jako [64]:

$$D = \frac{4 \cdot S}{o} \quad (27)$$

Kde:  $S$  je povrch vodiče

$o$  je omočený obvod – obvod, který je vystaven konvekci

Pro výkon odvedený konvekcí:

$$P_C = \alpha_{konv} \cdot \pi \cdot D \cdot (T_{AV} - T_{min}) \quad (28)$$

kde:  $\alpha_{konv}$  je součinitel přestupu tepla konvekcí

Pro výkon dodaný slunečním zářením:

$$P_S = a \cdot D \cdot I_{př} \cdot \sin \omega \quad (29)$$

kde:  $a$  je koeficient pohltivosti slunečního záření, pro PVC je 0,6 [65]

$I_{př}$  je přímé sluneční záření, pro osvětlený vodič dobré uvažovat 1000 W/m<sup>2</sup> (zjištěno v modelu v příloze 6, že nemá téměř vliv)

$\omega$  je úhel mezi osou vodiče a slunečními paprsky

Pro stanovení jediné obtížně spočitatelné veličiny  $\alpha_{konv}$  se dosadí všechny ostatní známé veličiny, kde platí pro vodič:

- je maximální dovolená teplota vodiče na kterou je testován - 70°C pro PVC [66]
- je minimální dovolená teplota vodiče na kterou je testován - 30°C pro uložení na vzduchu [66]
- $I_{max}$  maximální zatížení vodiče na vzduchu



Všechny ostatní konstanty uvedené výše se dosadí a  $\alpha_{konv}$  se pro ně dopočítá. V příloze 6 je dokument, kde je celý tento výpočet ukázán pro AYKY 3x240+120 výrobce NKT<sup>1</sup>.

Upravíme vzorec tak, abychom měli pro všechny výkony pro variantu při maximálních dovolaných podmínkách vodiče a pro něj stanovený proud  $I_{max}$ . Druhá varianta bude při neznámé okamžité teplotě povrchu vodiče  $T_i$  a při výpočtové teplotě  $I_v$ . Z poměru definovaném jako:

$$\Psi = \frac{I_v}{I_{max}} \quad (30)$$

zjistíme vypočítanou teplotu povrchu vodiče  $T_i$  při  $I_v$ . Následně ji dosadíme do vzorce pro výpočet úbytku napětí:

$$\Delta u_{AC\%} = \frac{l_{vod} \cdot \sqrt{3} \cdot U_v \cdot I_v}{U_v^2} \cdot \sqrt{(R_{T_i})^2 + (2 \cdot \pi \cdot f \cdot L)^2} \quad (31)$$

kde:  $l_{vod}$  je délka AC kabelu [ $\frac{\Omega}{km}$ ]

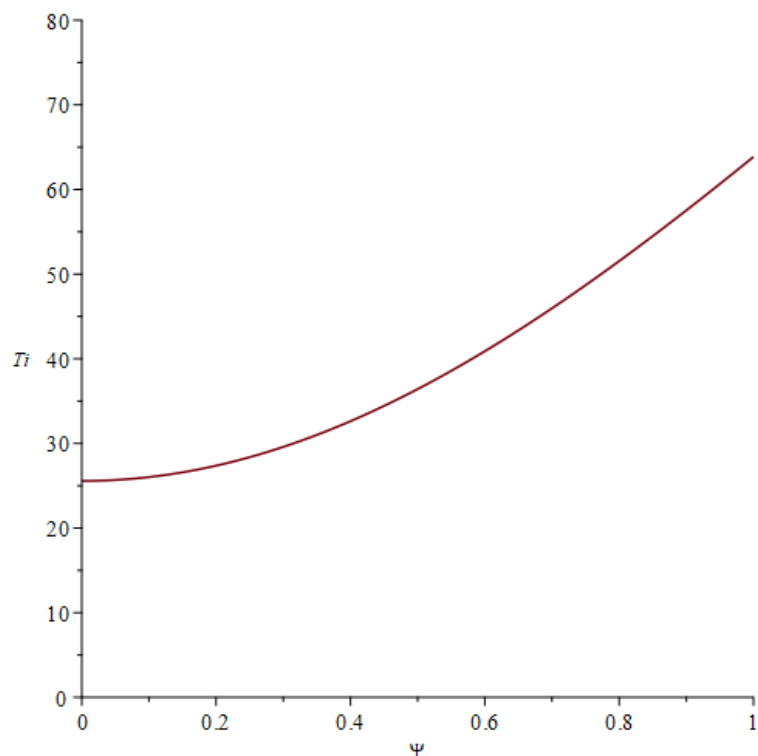
$U_v$  je napětí, na kterém je kabel provozován

$L$  je indukčnosti kabelu

---

<sup>1</sup> V modelu zjištěno, že minimální ( $0 W/m^2$ ) a maximální osvětlení vodiče ( $1000 W/m^2$ ) má vliv při dopočtu  $\alpha_{konv}$  jen  $5 W/m^2 \cdot K$

Pro ilustraci, zde pro vodič AYKY 3x240+120, výrobce NKT, předkládám diagram zatížení.



Obrázek 43 - závislost poměru  $\Psi$  na teplotě povrchu vodiče  $T_i$  při  $I_v$

Na obrázku [Obrázek 43 - **závislost** je závislost, kde lze pro tento daný vodič odečíst teplotu při zatížení vodiče proudem  $I_v$ .

### 5.3.5. Spojení DC kabelů

Kabely jsou spojeny pomocí speciálně navržených konektorů pro fotovoltaické instalace. Mají zajistit propojení vodičů s integrovaným kabelem panelů či se střídači nebo RDC boxy. Toto spojení musí zajistit provoz s co nejnižším odporem po celou dobu života elektrárny a také zajistit bezpečné spojení a odolné vůči vlhkosti.



Obrázek 44 - male část konektoru MC 4 od firmy Stäubli

Zdroj: [67]



Obrázek 45 - female část konektoru MC 4 od firmy Stäubli

Zdroj: [67]

Takovéto provedení je podobné pro všechny výrobce. Z kabelu se odstraní kousek ochranné bužírky a ta se zalisuje do vložky. Samotná vložka se zacvakne do plastové části konektoru.

Optimizéry jsou z výroby vybaveny stejnými konektory. Optimizér 2:1 (pro dva panely) má celkem šest vývodů. Čtyři slouží pro připojení panelů a dva delší pro napojení optimizérů na string. Je nutné brát ohled na délku propojovacího DC vodiče mezi jednotlivými optimizéry tak, aby délka nepřekročila 16 m, to by mělo za následek nemožnost s tímto optimizérům komunikovat. V případě, že je tato délka větší je nutné použít speciálního optimizéru, který je pro tento případ speciálně navržený.

### 5.3.6. Vyvedení výkonu do distribuční soustavy

Každá instalace má jiný způsob napojení elektrárny na stávající infrastrukturu. Obecně je elektrárna oddělena hlavním deonem od stávající instalace. Za tímto deonem se většinou nachází měřící transformátory proudu nebo přímo elektroměr. Transformátory proudu jsou propojeny s elektroměrem, aby bylo možné měřit vyrobený výkon. Je však nutné vždy respektovat připojovací podmínky distributora.

### 5.3.7. Tvorba zátěžového plánu

Pro zátěžové konstrukce popsané v předchozích kapitolách, používané na plochých střechách, je nutné vytvořit zátěžový plán. V takovém případě se navržené rozmístění panelů vloží do programu výrobce, například od firmy Schweizer či Areocompact, společně s informacemi jako

jsou například výška budovy, výška a šířka parapetu, zatížení větrem a sněhem podle oblastí do kterých stavba spadá. Vliv má také povrch střechy, který definuje třecí konstantu mezi konstrukcí a povrchem střechy. Je dobré si uvědomit, že zátěžová konstrukce je o něco těžší právě o příspěvek optimizérů. Po vložení program informace zpracuje a vytvoří zátěžový plán, který je možné nalézt v příloze 3.

### **5.3.8. Popis ostatních dokumentů**

V dokumentaci nalezneme výkres DC tras a AC tras, který ukazuje, kudy budou trasy vést, v jakých trasách budou kabely vedeny, dále obsahuje výkresy nosné konstrukce pro střídače RDC boxy a AC boxy. V dokumentaci je i výkres hromosvodní sítě, neboť bylo třeba upravit stávající síť a přidat hromosvody podle výše uvedených kapitol.

Dále jsou v projektu uvažovány celkem čtyři STOP tlačítka fungující tak, aby byly stále pod napětím a v případě vypnutí či přerušení kabelu dojde k vypnutí cívky držící hlavní dva deony v zapnutém stavu. Následkem toho je elektrárna bezpečně vypnuta a je možnost provést zásah na střeše.

Kongresové centrum a distributor požadoval zjišťovat stavy o fotovoltaické elektrárně a možnost ji ovládat dle připojovacích podmínek. Za tímto účelem je instalován rozvaděč RTU, který má za úkol jednotlivé stavy střídačů, hlavních deonů a meteostanice zpracovat a přenést je do sítě kongresového centra nebo distributora. Střídače komunikují přes sériovou linku 485 a v RTU rozvaděči je PLC, které jednotlivé stavy zpracuje a převede na ethernetovou linku kongresového centra a také je pošle do rozvaděče AXY v místnosti distributora, kde se bude následně signál přenášet přes GSM modul.

Pro monitoring na úrovni panelů, je nutné do webové aplikace naskenovat QR kódy jednotlivých optimizérů a vytvořit tak výkres s detekovanými optimizéry, které se následně přiřadí jednotlivým střídačům.

## **5.4. Dokumentace skutečného provedení stavby (DSPS)**

Pro finální podobu je potřeba zkompletovat všechny dokumenty a vytvořit ucelenou zprávu. Příklad takové dokumentace je uveden v příloze 4. Dokumentace je sestavená podle § 14 vyhlášky č. 499/2006 Sb. a obsahuje pět částí. První čtyři jsou popsány v předchozích kapitolách pojednávajících o stupních dokumentací.

### **5.4.1. Dokladová část**

Pátá část dokumentace je povinnost pro firmu doložit, že použily výrobky či materiál jen s platnými certifikáty a oprávněním používat je pro evropské realizace. Na konci realizace je povinnost doložit certifikáty a potvrzení o kvalitě materiálu všech použitých komponent. Vzhledem k tomuto faktu bývá dokládání těchto dokumentů často velmi časově náročné a obsáhlé pro nezanedbatelný počet dokumentů. Mnohé z firem tuto dokladovou část zanedbávají, avšak pro úplné dokončení projektu je důležité investorovi poskytnout doklady, aby se mohl v průběhu života elektrárny, v případě poruchy či pojistné události, těmito doklady chránit.

## **5.5. Místní provozní předpis (MPP)**

Na základě instalace fotovoltaiky do průmyslového prostředí, kde jsou stanoveny místní provozní předpisy, je někdy nutné do nich zanezt změny týkající se této instalace. Úprava tedy spočívá v uvedení hlavních informací o elektrárně, vyvedení výkonu, do jaké transformovny, rozhraní odpovědnosti a popis technologie na úseku transformovna – fotovoltaická elektrárna. Obsahuje informace, kde a do jaké distribuční soustavy je výkon vyveden a kontakty na jednotlivé subjekty jako je provozovatel, servisní firma a dispečink distribuční soustavy. Dokument musí být jednotlivými subjekty podepsán.

## **5.6. Uvedení fotovoltaické elektrárny do provozu**

Po dokončení výstavby je fotovoltaická elektrárna připravena k uvedení do provozu. Je však nejprve nutné vyzkoušet všechny STOP tlačítka a změřit základní parametry pro spuštění elektrárny. Tyto parametry se většinou měří speciálním přístrojem k tomu určeným, jako například zařízení od firmy Metrel.

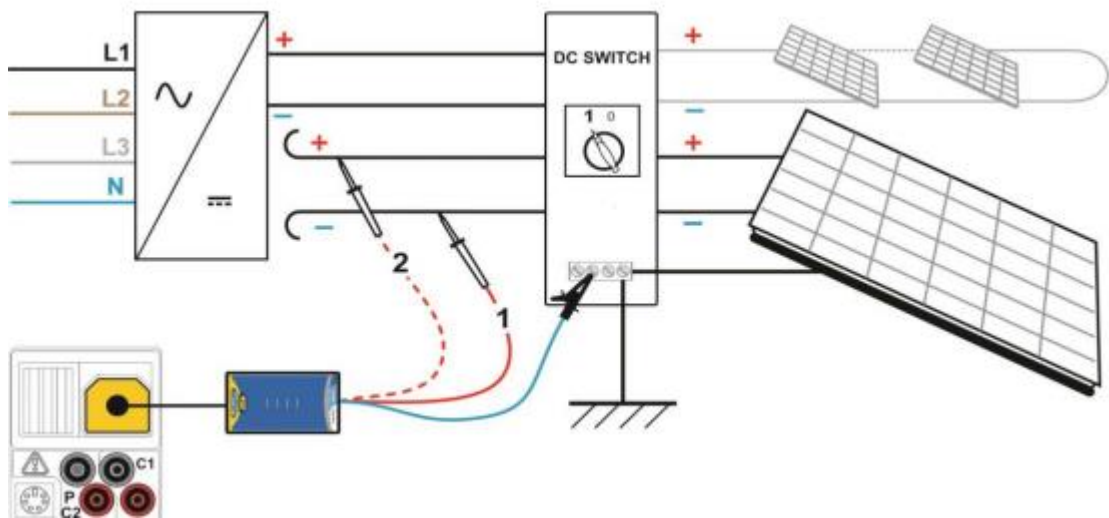
### **5.6.1. Měření izolace**

Izolace se obecně měří na konkrétním vodiči a to vždy vodiče mezi sebou jak je u AC silových vodičů prováděno tak vodiče proti zemi. Měření probíhá vystavením kabelu napětí 500 V nebo 1000 V dle doporučení výrobce střídače, panelů, optimizérů. Metoda je nedestruktivní, ale v měřeném obvodu by neměly být zapojené přepět'ové ochrany, které by mohly vybavit.

### 5.6.1.1. Izolace DC vodičů

Měření se provede vytažením kladného i záporného pólu ze střídače a měřením proti technické zemi. Lze buď měřit zvlášť kladný a zvlášť záporný pól tak, jak je na obrázku [Obrázek 46] nebo se vodiče zkratují do uzlu a ten se změří proti zemi.

V případě měření technologie Solar Edge s optimizéry, je nutné modifikovat toto měření. To se provede spojením kladného a záporného pólu do uzlu, který se pak spojí s červeným vývodem měřicího přístroje. Modrý je zapojen stejně jako ve standartním měření. Tím se změří izolace celého okruhu.



Obrázek 46 - příklad zapojení měření DC vodičů při osvětlených panelech

Zdroj: [68]

Bohužel, v manuálu není popsáno jak konkrétní metoda funguje. Podle [69] lze vyhodnotit naměřený odpor dle rozlohy modulů, přičemž pro  $m^2$  panelů daného stringu platí:

$$R_{iso} > 40 M\Omega \cdot m^2 \quad (32)$$

kde:  $R_{iso}$  se určí jako:

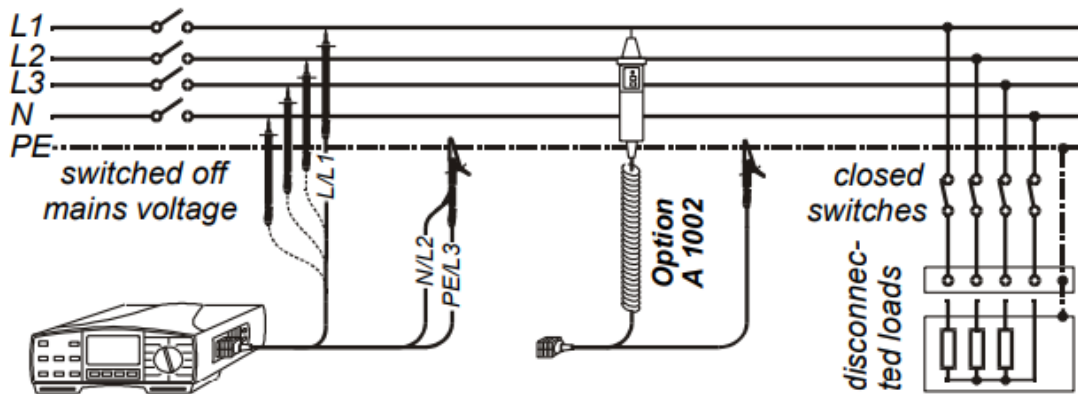
$$R_{iso} = \frac{R_{isostring}}{n} \quad (33)$$

kde:  $R_{isostring}$  je odpor naměřeného stringu

$n$  je počet modulů v řetězci

### 5.6.1.2. Izolace AC vodičů

Měření izolace AC vodičů se provádí z důvodu zajištění bezpečnosti před neúmyslným dotykem a ověření, zda během instalace nedošlo k poškození izolační vrstvy kabelu o ostré hrany kabelových konstrukcí.



Obrázek 47 - příklad zapojení měření AC vodičů

Zdroj: [70]

Na obrázku [Obrázek 47 - příklad zapojení měření AC vodičů] je znázorněno jak takové měření probíhá. Většinou je ještě třeba třetí vodič spojit s konstrukcí či hlavním ekvipotenciálním pospojením budovy. Měří se jednotlivé žíly mezi sebou (L1-L2, L1-L3, L2-L3), každá žíla proti technické zemi (L1-PE, L2-PE, L3-PE) a nulový vodič proti technické zemi (N-PE) pokud je přítomen, ale většina střídačů pracuje v IT síti, kde se nulový vodič nevyskytuje. Naměřené hodnoty se pak dosadí do vztahu [71]:

$$R_{iso} = \frac{1}{R_{L1}} + \frac{1}{R_{L2}} + \frac{1}{R_{L3}} + \frac{1}{R_N} \quad (34)$$

kde:  $R_{Lx}$  je odpor x-tého fázového vodiče

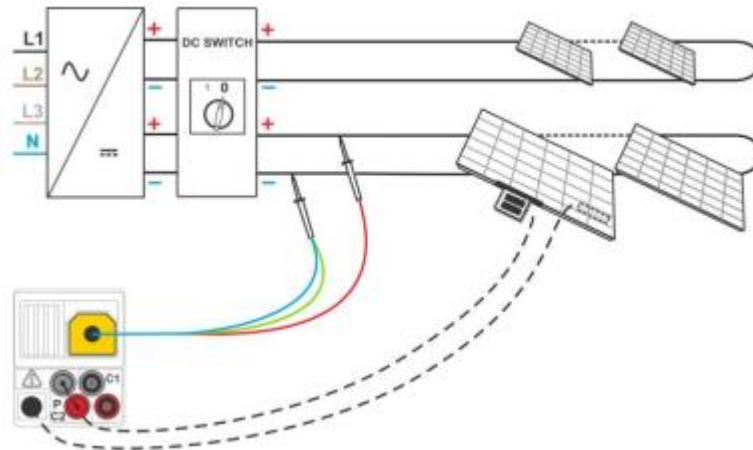
$R_N$  je odpor nulového vodiče

Pokud je celkový odpor  $R_{iso}$  větší než  $5 \text{ M}\Omega$  pro pětižilový a  $6,67 \text{ M}\Omega$  pro čtyřžilový dle ČSN 33 1610, vyhovuje [71].

### 5.6.2. Měření napětí na prázdko a proudu na krátko

Pro ověření, že realizace je v souladu s projektovou dokumentací, se používá měření  $U_{oc}$  a  $I_{sc}$  jednotlivých stringů fotovoltaické elektrárny. Díky tomu lze ověřit, že je ve stringu správný počet panelů nebo optimizérů.

V případě konceptu fotovoltaické elektrárny s optimizéry, jsou výsledky měření jiné. Běžně by došlo k naměření napětí odpovídajícího součtu napětí na panelech. V případě stringu s optimizéry je při vytažení stringů z měniče a tím výpadku komunikace s optimizéry na nich nastaveno přibližně napětí 1 V (až 1,2 V). Tím jsme schopní přímo z měření zjistit jestli počet optimizérů odpovídá skutečnosti.



Obrázek 48 - příklad zapojení univerzálního měření  $U_{oc}$  a  $I_{sc}$  fotovoltaických stringů

Zdroj: [68]

Na obrázku [Obrázek 48 - příklad zapojení univerzálního měření  $U_{oc}$  a  $I_{sc}$  fotovoltaických stringů] je uveden příklad univerzálního zapojení. Měření probíhá napojením sondy na kladný a záporný pól a spojení zemního vodiče s konstrukcí panelů pospojovaným ochranným vodičem. Na základě toho se pak porovná s připojovacím plánem a odhalí se špatně vedené stringy či špatně zapojené panely.

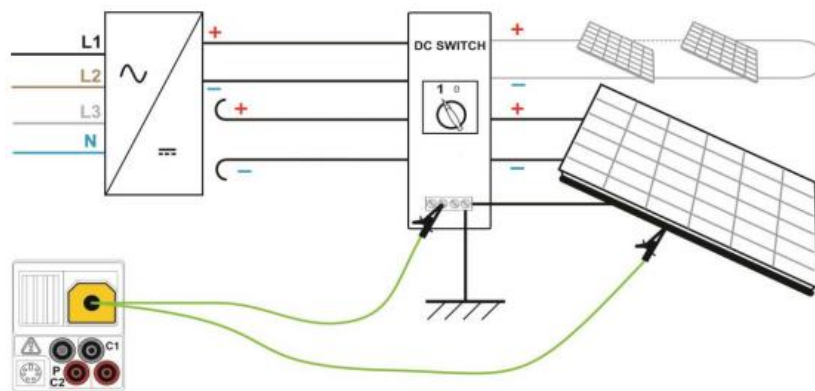
### 5.6.3. Měření zemního spojení kovových částí instalace

Pro ověření, zda jsou rámy modulů, podpanelové konstrukce a jednotlivá zemní pospojení propojena, slouží měření odporu  $R_{LOW}$ . Testuje se, zda mezi plášťovými součástmi zařízení a uzemněním existuje vodivé spojení. Využívá měření vysokým proudem a měří se úbytek napětí, z něj se pak stanoví odpor [72].

Provádí se také měření kontinuity zemnění. Provádí se testováním průchodnosti krytu se zemněním [72].

Výsledné hodnoty by se porovnájí s kritickou hodnotou, kterou jsem nikde nenašel.





Obrázek 49 - příklad zapojení pro měření vodivého spojení rámu fotovoltaických modulů

Zdroj: [68]

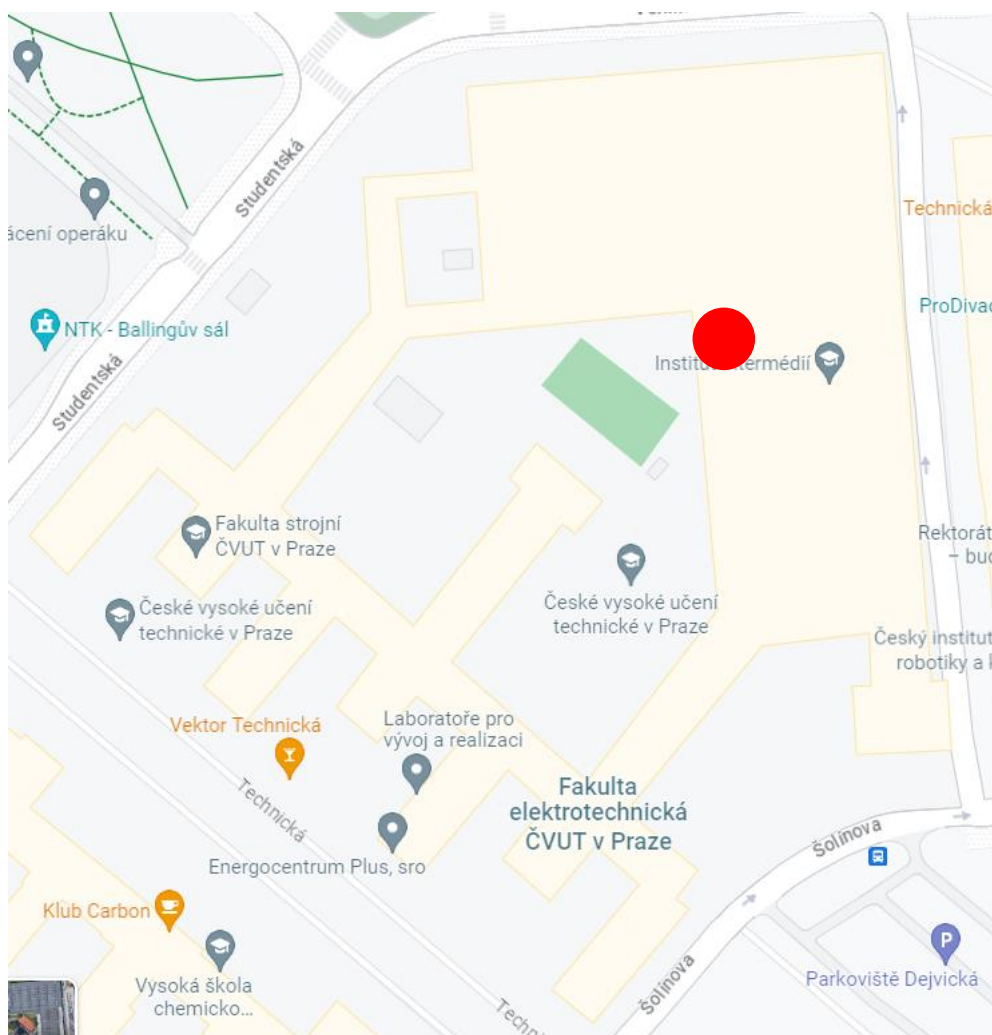
Na obrázku [Obrázek 49 - příklad zapojení pro měření vodivého spojení rámu fotovoltaických modulů] je příklad zapojení měření vodivého pospojení rámu s fotovoltaickým panelem. Jeden vodič se spojí s podpanelovou konstrukcí a druhý s rámem panelu. Setkal jsem se převážně s panely, které mají rám potažený lakem, proto je potřeba měřit buď na svorce držící panel ke konstrukci, protože svorka tento lak svým utažením narušila, nebo tento lak narušit jinak, například mechanicky.

## 6. Porovnání klasických stringových měničů s technologií optimizérů (Solar Edge)

V této kapitole se budu zabývat provedením pokusu, kde ověřím, že optimizéry společně se střídačem od firmy Solar Edge jsou vhodné pro použití v praxi. Porovnám je s nulovou variantou, která nezahrnuje optimizéry a v další kapitole obě varianty ekonomicky porovnám.

### 6.1. Použité komponenty fotovoltaické elektrárny

Byla realizována střešní fotovoltaická elektrárna na střeše halových laboratoří ve fakultě elektrotechnické v Dejvicích.



Obrázek 50 - místo realizace střešní fotovoltaické elektrárny

Na obrázku [Obrázek 50] je červeným bodem vyznačeno konkrétní místo realizace této fotovoltaické elektrárny. Na místě mírně nakloněné části střechy, která byla nejnvdnější, byla

realizována zátěžová konstrukce. Tato konstrukce je uzpůsobena pro pokládku panelů východ/západ.

Jsou použity panely FAK450E8D o výkonu 450 Wp a rozměrech 2094x1038x40 o celkovém počtu 14 kusů, v příloze [Příloha 7 - FAK450E8D.pdf] je pak možné si prohlédnout celý datový list tohoto panelu.

Vzhledem k tomu, že technologii Solar Edge není možné provozovat bez optimizérů, byl použit jiný střídač o výkonu 10 kVA připojený na střídavou třífázovou síť. V příloze [Příloha 7 - Goodwe GW10K.pdf] je k dispozici celý datový list tohoto měniče.

V případě použití optimizérů, byl instalován třífázový inverter Solar Edge SE10K o jmenovitém výkonu 10 kVA, připojený stejně jako předchozí střídač na třífázovou síť. V příloze [Příloha 7 - SE10K datasheet.pdf] je přiložen datový list.

Konstrukce pod panely byla použita ze zásob školního skladu tak, aby byl zajištěn stejný sklon panelu orientovaných na východ a západ.

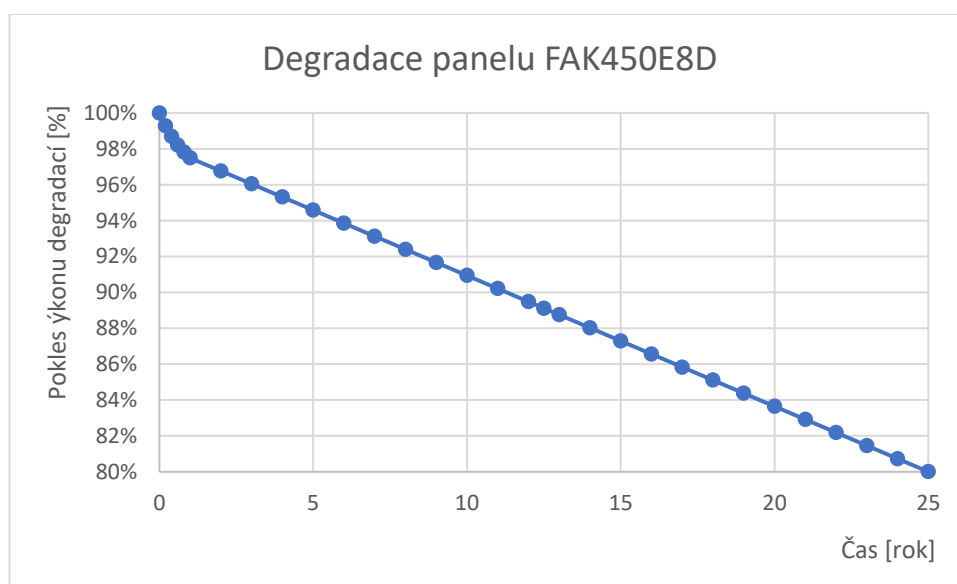
Byly použity optimizéry P505 o maximálním napětí 83 V DC a počtu 14 kusů, instalovaném na každý panel. Tím jsem zajistil správnou funkci střídače, který by v menším počtu nebyl schopen nastavit takové svorkové napětí výstupu optimizéru do stringu tak, aby na vstupu do střídače bylo požadovaných 750 V, což je popsáno v manuálu uvedeném v příloze [Příloha 7 - Optimizér P505.pdf]. Optimizéry totiž po DC lince komunikují se střídačem. Jakým způsobem a o jaký protokol se jedná není možné zjistit, neboť výrobce jej odmítl poskytnout, je to jeho know-how.

Optimizéry si lze představit jako buck-boost DC/DC měnič, který je schopen na výstupu nastavit napětí od cca 1V až po své maximální napětí. V případě, že je střídač nastaven do fault režimu, či ztratí připojení k síti, dojde k nastavení napětí na výstupu optimizéru na 1 V. Tím se dosáhne bezpečného napětí na celém stringu, který může maximálně obsahovat 50 takových optimizérů. Elektrárna je tím bezpečně odstavena na DC straně a je možno například provést požární zásah nebo opravy.

## **6.2. Metodika měření**

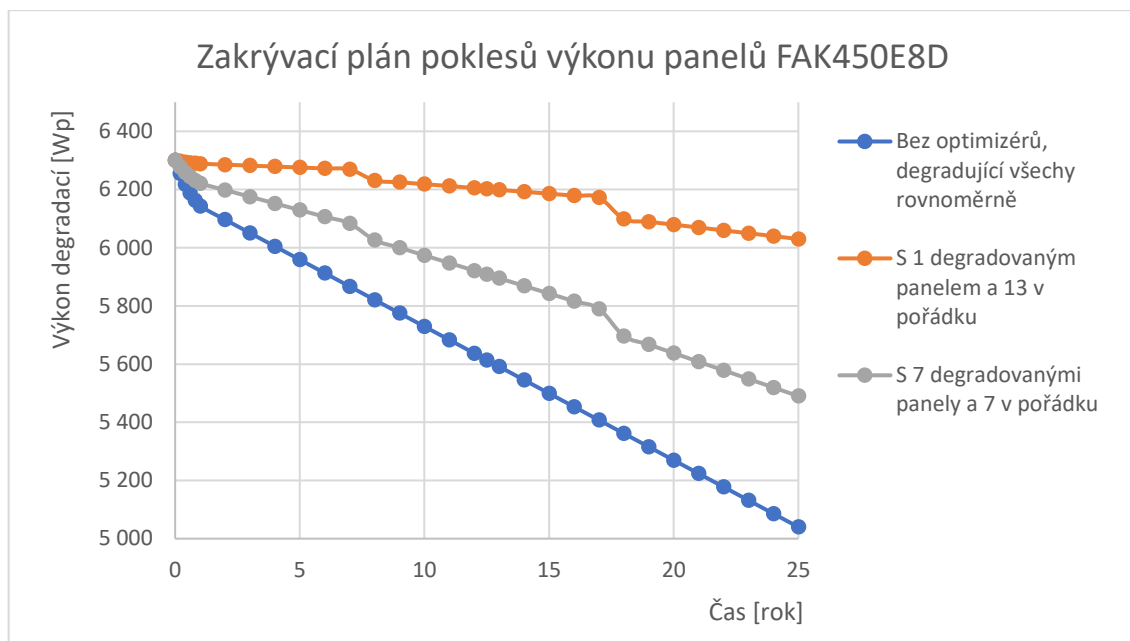
Vzhledem k tomu, že optimizéry jsou vhodné k použití nejen z hlediska legislativy ČR, ale také díky své schopnosti eliminovat poklesy výkonů panelů ve stringu, je toto měření navrženo tak, aby bylo možné prokázat, zda je využití optimizérů i v tomto pohledu rentabilní.

Funkce optimizérů se v tomto ohledu se začne projevovat až po několika letech provozu elektrárny, kdy dochází k postupné degradaci panelů vlivem mechanismů popsaných v kapitole 2.1.6, bylo nutno vymyslet jakým způsobem bude tento pokles výkonu vlivem degradace proveden. Jednou z možností bylo použít degradované panely, ale v tomto případě by nebylo možné simulovat pokles po celou dobu života. Druhou, již použitou možností, bylo simulovat pokles výkonu pro vybrané okamžiky z křivky poklesu výkonu jednotlivých panelů tak, aby výkon celé fotovoltaické elektrárny byl zmenšený. Celý tento postup je v příloze [Příloha 6 - Naměřená a zpracovaná data + ekonomický model.pdf]. Průběh tohoto poklesu výkonu je možné pozorovat na grafu [Graf 1]



Graf 1 - průběh poklesu výkonu udávaný výrobcem panelů

Tento pokles výkonu pak byl promítnut do zakrývacího plánu poklesů výkonů. Plán je naznačen v grafu níže.



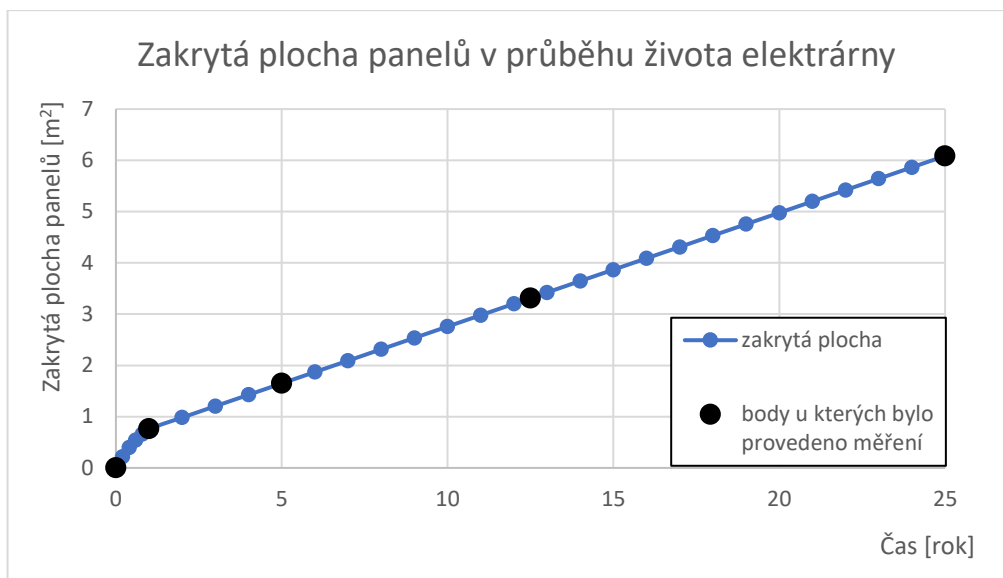
Graf 2 - plán degradace panelů FAK450E8D

Plán respektuje jednotlivé poklesy výkonu, přičemž je rozdělen na dvě základní varianty, tu s optimizéry a tu bez optimizérů.

První varianta, bez optimizérů, byla provedena tak, že pokles výkonu v průběhu aktivního života panelu (25 let) uvedeném datasheetu výrobce byl přepočítán na plochu, kterou je potřeba zakrýt každý panel tak, aby odpovídal právě konkrétnímu okamžiku na degradační křivce. Tento způsob byl proveden aniž by ani na jednom z panelů nedošlo k zakrytí více než jednoho článku jedním krycím listem. Díky tomu bude pokles co nejvíce lineární tak jak je vidno na grafu [Graf 2] v oblasti mezi prvním a posledním rokem života elektrárny.

Druhou variantu jsem rozdělil na dva případy. Prvním je zakrývání pouze jednoho z panelů a tím je možné pozorovat, jak se bude projevovat vliv optimizérů v případě, že dojde k výrazné degradaci pouze na velmi malé části stringu. Druhým je pak zakrývání poloviny stringu tak, aby pokles výkonu opět odpovídal plánu degradace. Pokud plocha, kterou bylo nutné zakrýt, převýšila plochu danou rozměry panelů, pokračovalo se v zakrývání dalších panelů. Tím bylo možné respektovat plán poklesů výkonů.

Pro úplnost zde uvádím i přehled velikosti zakrývané plochy vytvořenou dle křivky poklesu výkonu. Na grafu [Graf 3 - zakrytá plocha panelů v průběhu života elektrárny] je možné vidět jednotlivé velikosti zakrývané plochy po celou dobu života elektrárny. Jsou zde vyznačené jednotlivé body, při kterých bylo provedeno měření výkonu.



Graf 3 - zakrytá plocha panelů v průběhu života elektrárny

Body byly vybrány s ohledem na jednotlivé charakteristické úseky, aby bylo možné provést proložení křivkou.

Měření probíhalo od 3.2.2023 až 5.5.2023. Následující tabulka [Tabulka 4] ukazuje celý program měření.

Tabulka 4 - program měření

Varianta		Ekvivalentní výkon						
		celkem	100% [Wp]	97.5% [Wp]	94.6% [Wp]	89.1% [Wp]	80% [Wp]	
Bez optimalizérů	Rozsah měření	03.02.2023	03.02.2023	09.02.2023	15.02.2023	21.02.2023	27.02.2023	
	Počet dnů	31	6	6	6	6	7	
S optimalizéry degradován 1 panel	Rozsah měření	06.03.2023	06.03.2023	12.03.2023	18.03.2023	24.03.2023	30.03.2023	
	Počet dnů	31	6	6	6	6	7	
Bez optimalizérů degradováno 7 panelů	Rozsah měření	05.04.2023	05.04.2023	12.04.2023	18.04.2023	24.04.2023	30.04.2023	
	Počet dnů	30	6	6	6	6	6	

V tabulce je vidět jednotlivé časové úseky tak, aby bylo možné toto měření na jednom stringu měřit. Výsledky tohoto měření byly zaznamenány v portálu Solar Edge, kam bylo nejprve nutno celou instalaci panelů vložit a následně ji propojit s tímto měničem. Měření výkonu probíhalo autonomně a zásahy se prováděly pouze ve dnech, kdy po západu Slunce bylo potřeba změnit konfiguraci zakrytí panelů.

### 6.3. Naměřená data

Jednotlivé výsledky se následně vyexportovaly do csv souboru a v programu Excel byly upraveny do srozumitelné podoby. Měření výroby se provádělo vždy od nové započaté hodiny až po poslední minutu dané hodiny. To probíhalo celý den a v případě, kdy bylo Slunce za obzorem byl výkon nulový.

### 6.4. Zpracování měření

Protože hodnoty byly naměřené v různých časech, kdy Slunce mění svůj maximální úhel nad obzorem bylo nutno každý den přepočítat na ten charakteristický. Tento charakteristický den volíme na rovnodennost 21.03.2023 nebo 23.09.2023. Je vhodné zahrnout i vliv teploty kdy panel má vyšší účinnost dle kapitoly 2.1.3 v době, kdy je nižší teplota, to by znamenalo posunutí charakteristiky paradoxně časově dopředu, protože respektujeme množství výroby a víme, že při dnech v časové ose dopředu elektrárna vyrábí více, tedy charakteristický den leží někde v oblasti za 21.03.2023, nebo před 23.09.2023.

První možností bylo zvolit přepočet dle cosinu úhlu pro charakteristický den, kdy pro 21.03.2023 vychází uhel mezi horizontem a sluncem  $90^\circ - 50.1^\circ$ . Pro výpočet by tedy bylo vhodné naměřená data přepočítat dle tohoto úhlu v poměru ku úhlu daným vrcholem Slunce daného dne. Bohužel tento přístup se projevil jako naprosto chybný, neboť hodnoty měsíce dubna převyšovaly očekávané hodnoty téměř 1,5 krát.

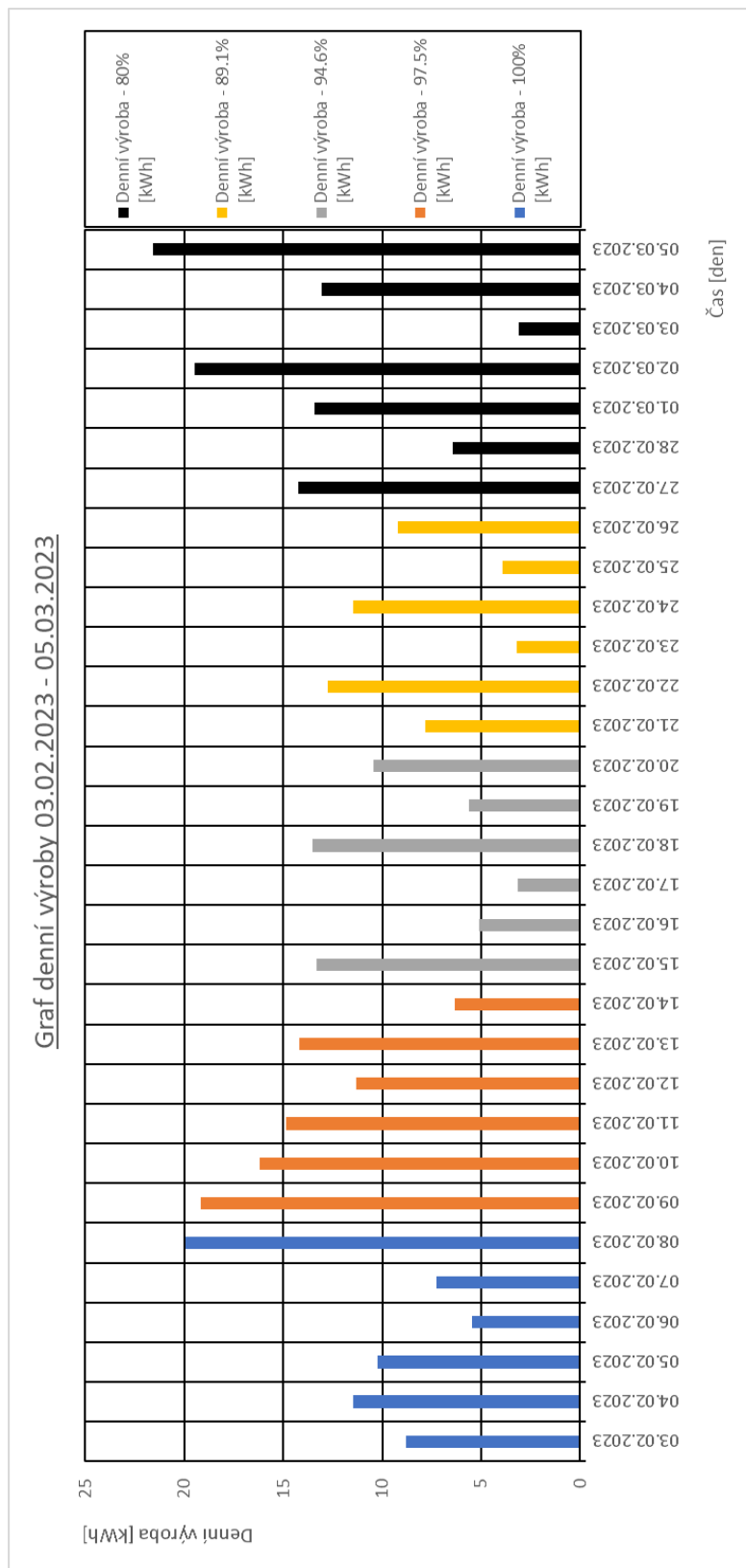
Druhou možností pak bylo zvolit přepočet dle statistických hodnot portálu PV GIS. Dosadil se stejný model elektrárny na stejném místě a pro jednotlivé měsíce byl vytvořen graf. Přepočet se zvolí na hladinu odpovídající průměrné hodnotě měsíční výroby.

Díky tomuto přepočtu je pak možné stanovit výrobu za celý rok pro jednotlivé varianty.

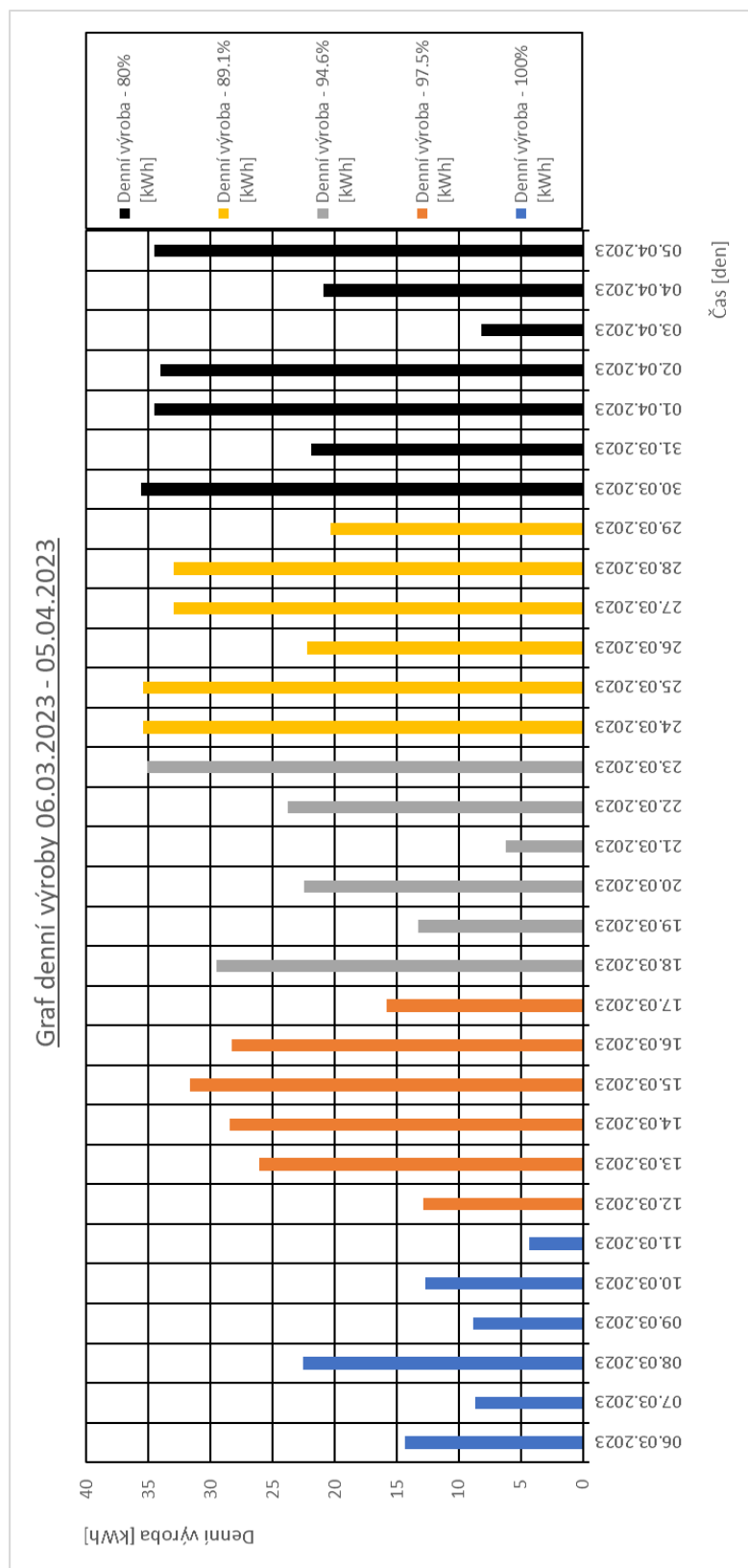
### 6.5. Výsledky měření

Výsledky měření jsou prezentovány v následujících grafech. Jak již bylo uvedeno, měření bylo provedeno pro tři různé konfigurace (bez optimizérů, s optimizéry - 1 panel degradován, s optimizéry - 7 panelů degradováno) a v rámci těchto konfigurací bylo provedeno 5 měření dle zakrývacího plánu z grafu [Graf 2]. Byly vytvořeny grafy denní výroby z naměřených dat a výsledná tabulka součtu výrob pro jednotlivé konfigurace.

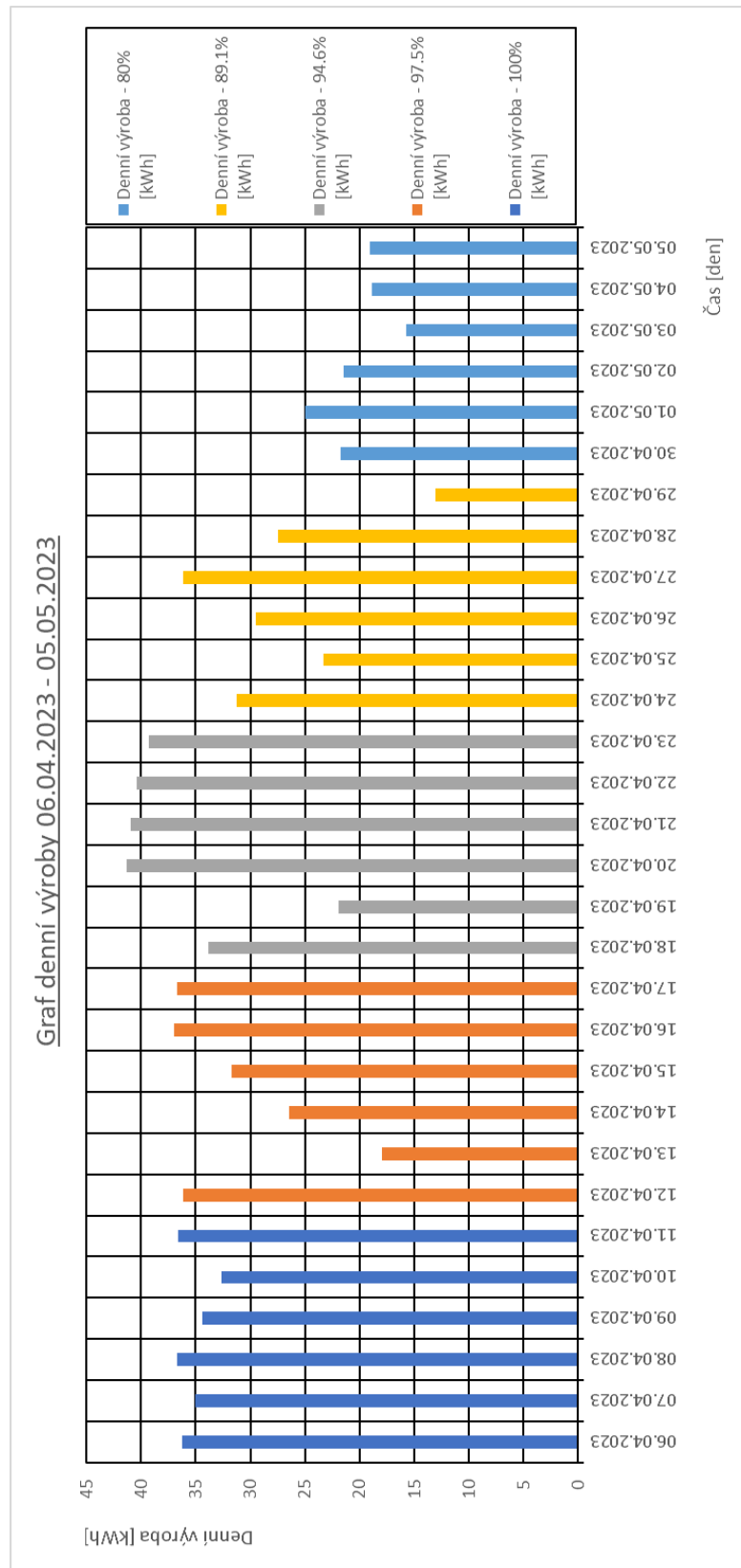




Graf 4 - denní výroba fotovoltaické elektrárny mezi dny 03.02.2023 - 05.03.2023



Graf 5 - denní výroba fotovoltaické elektrárny mezi dny 06.03.2023 - 05.04.2023



Graf 6 - denní výroba fotovoltaické elektrárny mezi dny 06.04.2023 - 05.05.2023

Předkládám grafy denní výroby pro tyto tři typy konfigurací fotovoltaické elektrárny. Na všech třech grafech jsou vyobrazené měření uměle degradovaných panelů zakrýváním. Můžeme na grafech vidět dny, kdy byla jasná obloha a fotovoltaická elektrárna díky nízké teplotě vyráběla nadprůměrně elektrickou energii. To potvrzuje fakt, že vrcholové hodnoty v únorových dnech dosahovali 7°C.

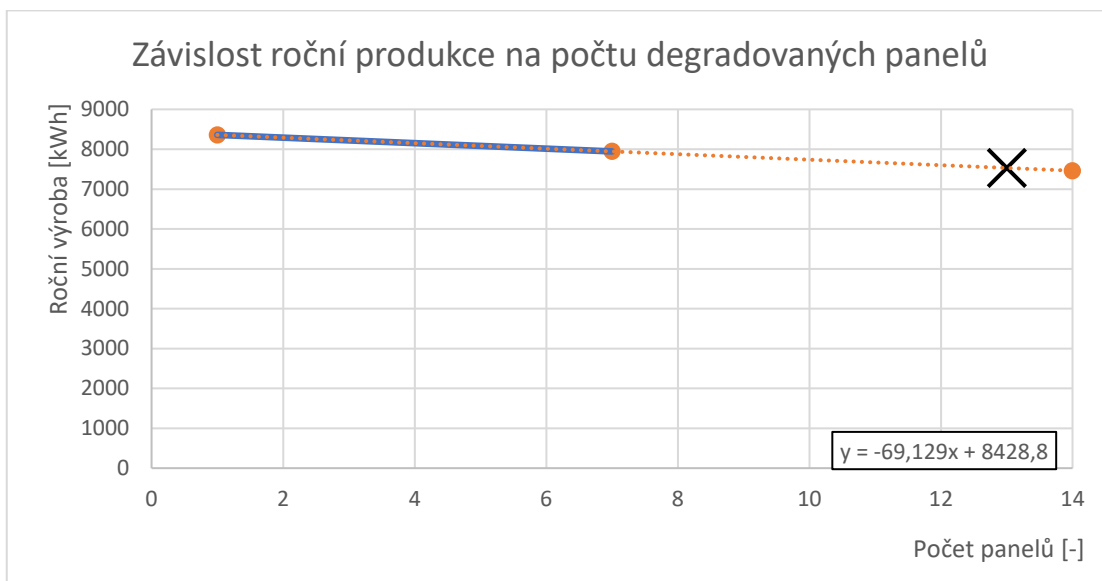
Vzhledem k tomu, že jsme měřili data jednotlivých degradovaných výkonů, které byly závislé na počasí během dne. Provedl jsem v rámci dalšího srovnání z těchto hodnot průměr a tím více přiblížit výslednou hodnotu k pravděpodobnějším výsledkům (centrální limitní věta). Tím jsme respektovali degradaci výkonu v pokusu a vytvořili průměrnou hodnotu za celou dobu života fotovoltaické elektrárny, kterou následně použijeme pro srovnání tří variant. Níže je uvedena tabulka výsledné roční produkce.

Tabulka 5 - srovnání odhadované roční produkce el. energie pro měřené varianty

<b>kategorie</b>	<b>roční výroba [kWh]</b>
Bez optimizérů	7361
S optimizéry degradováno 7 panelů	7945
S optimizéry degradován 1 panel	8360

V této tabulce [Tabulka 5] je také ještě jedna informace, kterou je možné využít. Můžeme srovnat dvě varianty s optimizéry. Vidíme, že podle předpokladu je varianta se zakrývaným jedním panelem produktivnější než ta se zakrývanými sedmi panely. Tyto dvě hodnoty poslouží ke stanovení závislostní přímky. Ta musí co nejvíce odpovídat skutečnosti, jak může elektrárna v průběhu let degradovat, a to v období od 1 roku po 25 let aktivního života. To tedy znamená tyto dvě hodnoty proložit přímkou, která reprezentuje pokles výkonu v důsledku degradace různého počtu panelů. Panely ve stringu v některých případech (zejména u krajích stringů) jsou

namáhány různě, například krajní panely mají o něco menší teplotu než ty uprostřed, nebo jsou namáhány větším větrem než ty uprostřed. Tyto panely degradují rychleji než ostatní. Proto tedy nedochází k rovnoměrné degradaci, avšak je velmi obtížné stanovit kolik těchto panelů je v elektrárně krajních, protože tento počet je závislý na velikosti elektrárny, tedy i na výkonu. Na konci života si tedy můžeme představit elektrárnu, která má tyto krajní, minoritní panely degradovány lehce pod hranici popsanou výrobcem a ostatní panely, majoritní, jsou degradovány o něco méně, z tohoto důvodu je rozumné volit hodnotu z grafu [Graf 7] něco před plným degradováním všech panelů.



Graf 7 - závislost roční produkce na počtu degradovaných panelů

Dosazením do rovnice této přímky za hodnotu 13, dostaneme pravděpodobnou průměrnou roční produkci této elektrárny 6,3 kWp určenou z degračního chování po celou dobu aktivního života. Tuto hodnotu následně použijeme v ekonomickém modelu ke srovnání s variantou bez optimizérů.

Tabulka 6 - výsledná roční produkce dvou typů elektráren

kategorie	roční výroba [kWh]
Bez optimizérů	7361
S optimizéry	7530

Z tabulky [Tabulka 6] pak můžeme určit o kolik procent je varianta s optimizéry výhodnější než varianta bez nich. Pro naši elektrárnu vyjde, že je lepší o 2,3 % než ta bez optimizérů. Ve finančním modelu pak zhodnotíme jestli toto procentuální zlepšení oproti variantě bez optimizérů bude stačit na to, aby se vykompenzovala počáteční investice do optimizérů v průběhu 25 let a zároveň stanovím jejich rozdíl LCOE mezi těmito variantami.

## 7. Ekonomické zhodnocení obou typů elektráren

---

V poslední kapitole srovnáme z ekonomického pohledu vliv optimizérů na základní ekonomické ukazatele. Budeme porovnávat NPV a LCOE jednotlivých variant. Pro vytvoření tohoto modelu využiji známý projekt Kongresového centra Prahy, jejíž dokumentace je v příloze 3.

### 7.1. Metodika finančního modelu

Pro výpočet NPV je nutné vytvořit model jednotlivých finančních toků spojených s realizací, provozem či likvidací po celou dobu života fotovoltaické elektrárny. Některé vstupní parametry jsem odvodil, jedná se o diskont, inflaci, eskalaci ceny elektrické energie a nárůst spotřeby, u které se současně s počáteční investicí prokázalo, že nejsou na výsledku finančního modelu závislé. Cenu počáteční investice jsem určil z prostého faktu, že instalace velké fotovoltaické elektrárny stojí 30 000 Kč<sup>2</sup> za instalovanou kW.

Vzhledem k tomu, že se snažime ukázat o kolik jsou optimizéry lepší či horší, co se týká NPV, budeme moci všechny jednorázové náklady, které nejsou závislé na optimizérech, vzniklé v průběhu provozu (koupě nového střídače, nové vodiče, konstrukce atd), vynechat a zahrnout pouze ty, kde se vyskytují optimizéry. Pro jednoduchost a obecný přehled se budou brát ohledy jen na ty nejvýznamnější parametry, které ovlivní cenu.

Po vytvoření modelu jsem stanovil NPV a LCOE. LCOE jsem určil tak, že jsem vzal diskontované všechny vstupní náklady a vydělil jsem je celkovou vyrobenou elektrickou energií.

#### 7.1.1. Nulová varianta

Pro vstup do našeho modelu jsem zvolil nulovou variantu, kdy nedojde k realizaci žádné fotovoltaické elektrárny. Tento finanční model pak bude sloužit jako výnos pro porovnání dvou variant. Tím jsem docílil toho, že výsledky budou kladné v případě, že by se jakákoliv investice do fotovoltaické elektrárny vyplatila.

### 7.2. Ekonomický model

Nejprve bylo použito přepočtu výsledků z tabulky [Tabulka 6] z výkonu 6.3 kW na elektrárnu 936 kW, při zanedbání nerovnoměrností spojených s rozlehlostí instalace či jejím provedení.

---

<sup>2</sup> Záměrně neuvádím odkud mám tuto informaci

V dalším kroce jsem díky výše zmíněnému jednoduchému pravidlu určil počáteční investici a cenu optimizérů. Proto jsem mohl vytvořit pro každý rok, s ohledem na eskalace položek, peněžní toky těchto variant. Po zahrnutí vlivu diskontu jsem vypočítal NPV. Výsledné varianty NPV jsem následně porovnal mezi sebou a stanovil jejich rozdíl tak, kdy v případě, že by varianta s optimizéry vycházela lépe, byl kladný.

Závěrem jsem provedl analýzu citlivosti jednotlivých parametrů. Zvolil jsem jen ty parametry, které se týkaly optimizérů. Jedná se o parametry: cena optimizérů, roční vyrobená energie varianty s optimizéry, vliv příspěvku optimizérů a velikost instalovaného výkonu.

Cenu (6 000 Kč/MWh) volím podle spotových cen silové elektrické energie k prosinci 2022 a její eskalaci 3.5 % dle dynamického chování této komodity.

### 7.3. Vstupní data

Pro model byly použity základní vstupní data ke zkoumání jejich závislosti na rozdílu NPV.

Tabulka 7 - základní parametry elektrárny a počáteční investice

Cena optimizérů [Kč]	1 500
Počet optimizérů [ks]	1 040
Počet panelů [ks]	2 080
Cena za optimizéry celkem [Kč]	1 560 000
Výkon panelu [Wp]	450
Instalovaný výkon DC [kWp]	936
Cena za 1 kWh instalace [Kč/kW]	30 000
Požizovací cena elektrárny [Kč]	24 000 000
Výkon střídače [kVA]	100
Počet střídačů [ks]	8
AC výkon [kVA]	800
AC/DC poměr	117%
Ztráty FV	10%
Celkový skutečný výkon [kVA]	720

Celková tabulková hodnota pořizovací ceny takovéto fotovoltaické elektrárny o výkonu 936 kW je 24 milionů Kč. Panely byly použity 450 Wp o celkovém počtu 2080 ks a z toho polovina optimizérů a byly použity dva panely na jeden optimizér. Cena jednoho takového optimizéru se pohybuje od 1500 Kč po 3000 Kč za kus. Elektrárna má poměr DC/AC 117 %, tím se zajistila větší efektivita instalace východ západ.



Tabulka 8 - cena a spotřeba elektrické energie

Cena elektřiny [Kč/MWh]	6 000
Spotřeba elektřiny [MWh]	25 000

Cenu (6 000 Kč/MWh) volím podle aktuálních spotových cen silové elektrické energie. Spotřeba elektrické energie dle výroční zprávy Kongresového centra Prahy [73] činí 10 000 MWh za rok.

Tabulka 9 - průměrná roční degradovaná spotřeba obou variant

Bez optimizérů [MWh]	1094
S optimizéry [MWh]	1119
Výtěžnost optimizérů	2.3%

V tabulce [Tabulka 9] jsou vstupní data naměřená z přechozí kapitoly přepočtená dle instalovaného DC výkonu. Jak je vidět že celková roční výroba elektrárny s optimizéry je o 2.3% lepší, než elektrárna bez optimizérů.

Tabulka 10 - časové parametry

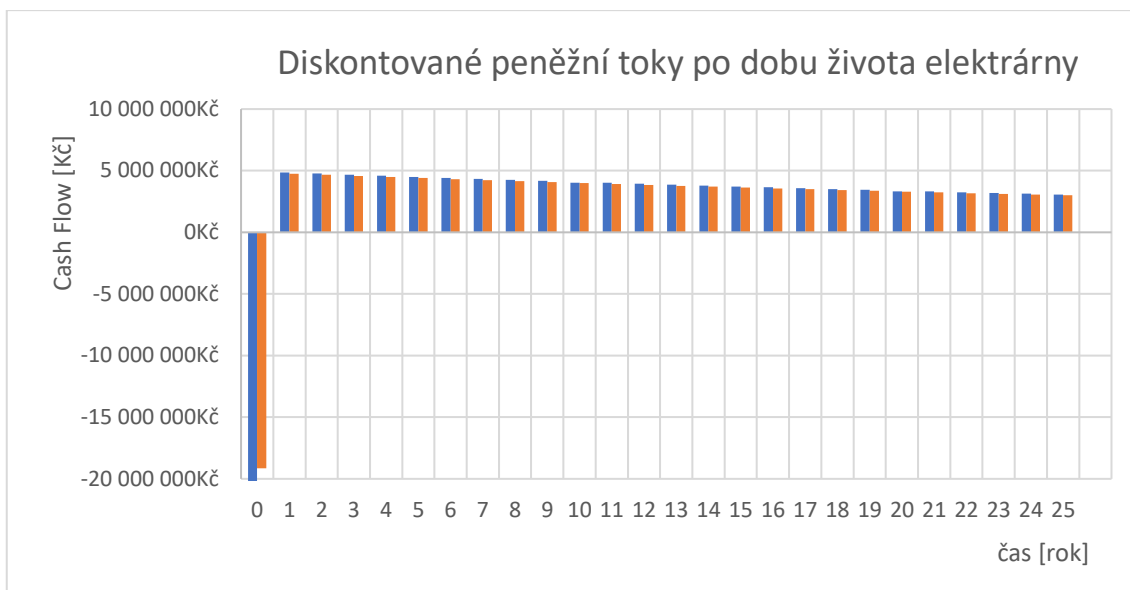
Diskont [Kč/rok]	5.5%
Inflace [Kč/rok]	4.4%
Eskalace ceny elektřiny [Kč/rok]	3.5%

Vzhledem k tomu, že se bude cena elektrické energie vyvíjet v průběhu celého života elektrárny, je nutné brát v úvahu časové parametry eskalující ceny všech finančních položek.

## 7.4. Výsledky

Pro námi zvolené parametry které jsou v tabulkách 8, 9 a 10, jsme vypočítali NPV jednotlivých variant a porovnali je mezi sebou. Rozdíl těchto NPV vypovídá, že investice do elektrárny s optimizéry je výhodnější než varianta bez ní a pro takovou elektrárnu činí tento rozdíl po 25 letech přibližně 606 000 Kč. Investice do optimizérů se vrátí v 18-tém roce, kdy rozdíl mezi sumou diskontovaných peněžních toků obou variant bude již částka větší než byla investice do optimizérů. Celková investice do fotovoltaické elektrárny se vrátí v 6-tém roku.

Na grafu [Graf 8] je přehled jednotlivých finančních toků fotovoltaické elektrárny pro obě varianty. Díky diskontu pak dochází k postupnému útlumu jednotlivých sum v každém roce. Vidíme zde vysokou počáteční investici ale na druhou stranu náš fiktivní finanční výnos je každý rok více než 4 000 000 Kč což umožňuje financovat realizaci částečně z cizího kapitálu.



Graf 8 - přehled finančních toků v průběhu života elektrárny

## 7.5. LCOE

Ke stanovení LCOE jsme sečetli všechny diskontované náklady po celou dobu jejího života. Vzhledem k zanedbání nákladů na údržbu a likvidaci, či prodej komponent, je součet všech vstupních nákladů dán součtem počáteční investice a jednorázových náhrad komponent. Celková vyrobená energie je dána průměrnou výrobou s ohledem na degradaci elektrárny po dobu 25 let. Výsledné hodnoty jsou pak k dispozici v tabulce [Tabulka 11].

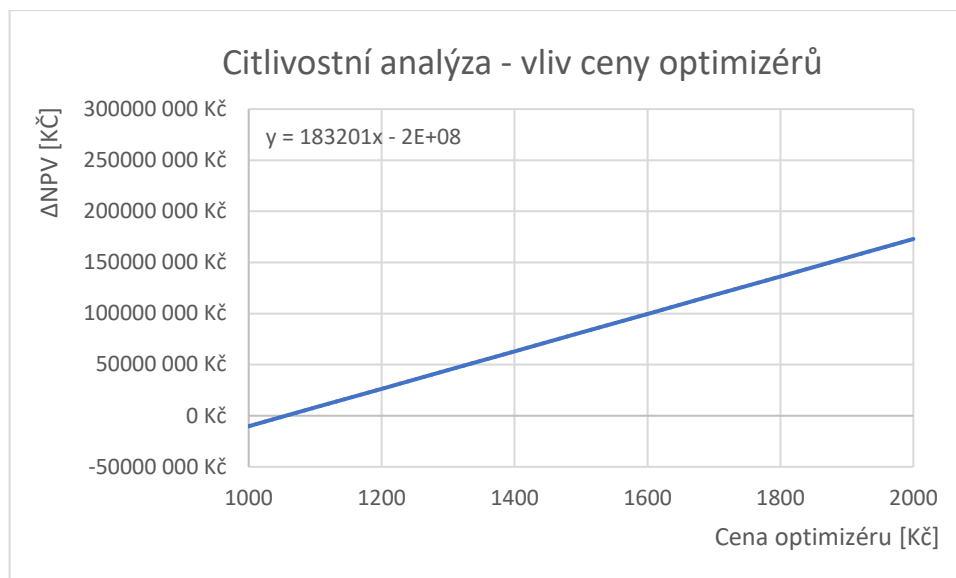
Tabulka 11 - výsledky LCOE pro jednotlivé varianty

LCOE Bez optimizérů [Kč/MWh]	940
LCOE S optimizéry [Kč/MWh]	858
rozdíl	82

Do 1 MWh musíme investovat přibližně 900 Kč, přičemž v porovnání obou variant je o 82 Kč lepší varianta s optimizéry.

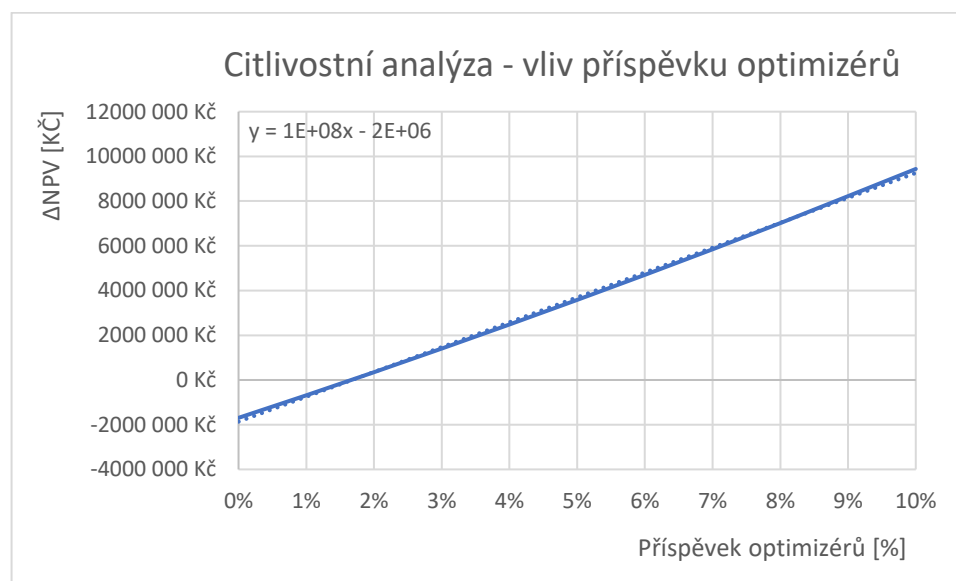
## 7.6. Citlivostní analýza

Pro jednotlivé parametry týkající se optimizérů jsem provedl citlivostní analýzu. Zkoumal jsem jak citlivé jsou na změnu jednotlivých parametrů.



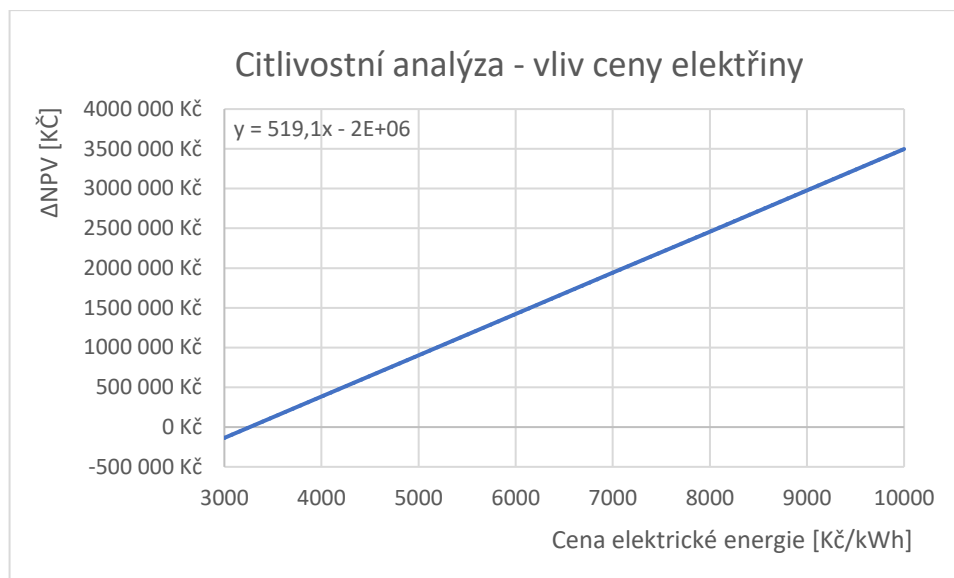
Graf 9 - vliv citlivosti parametru ceny optimizérů na NPV

V grafu [Graf 9] vidíme lineární závislost mezi pořizovací cenou jednoho optimizéru a jeho vliv na NPV. Vidíme, že tato cena je v porovnání s ostatními druhá nejcitlivější. Proto je důležité při zvažování investice do této varianty, dát důraz na snížení tohoto nákladu.



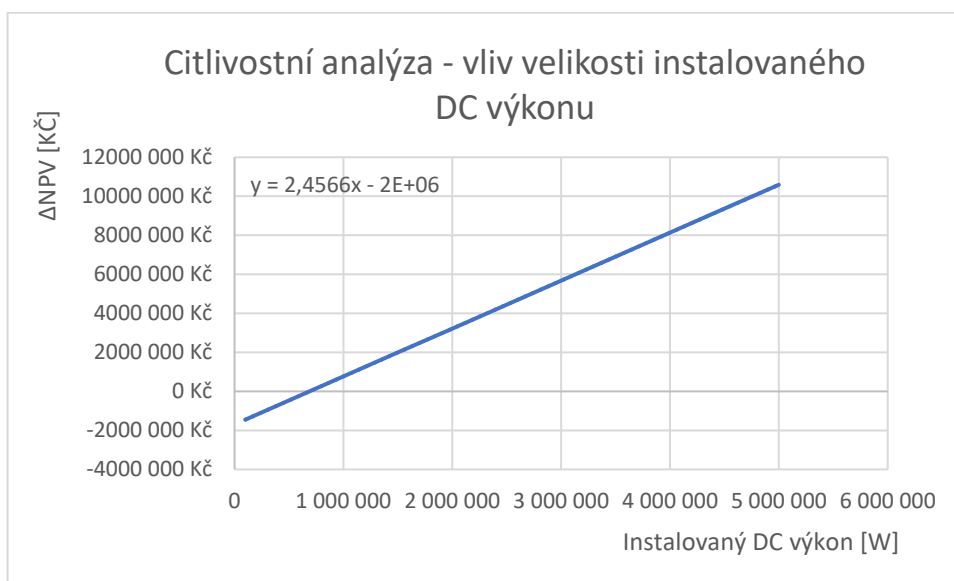
Graf 10 - vliv citlivosti parametru příspěvku optimizérů na NPV

V případě porovnání citlivosti parametru příspěvku optimizérů docházíme k závěru, že právě tento parametr je nejcitlivější na změnu rozdílu NPV obou variant. V zásadě můžeme říci, že při změně o 1 % dojde k nárůstu rozdílu NPV o 1 000 000 Kč za 25 let.



Graf 11 - vliv citlivosti parametru ceny elektrické energie na NPV

Na grafu [Graf 11] můžeme pozorovat závislost ceny silové elektrické energie na velikosti rozdílu NPV. Můžeme říci, že při zvýšení ceny elektrické energie o 1000 Kč dojde k nárůstu rozdílu mezi NPV obou variant o 519 100 Kč.



Graf 12 - vliv citlivosti parametru instalovaného DC výkonu na NPV

Nejméně citlivým parametrem na rozdíl NPV obou variant je vliv instalovaného DC výkonu fotovoltaické elektrárny. Při zvýšení tohoto výkonu o 1 MW, dojde k nárůstu rozdílu o téměř 2 500 000 Kč a to bychom mohli, vzhledem k tak razantnímu nárůstu výkonu elektrárny, čekat mnohem větší rozdíl, avšak další náklady za optimizéry tento rozdíl smažou.

## **7.7. Manažerské shrnutí**

Vzhledem k pozitivním výsledkům porovnání obou variant vydávám doporučení investovat do varianty s optimizéry. Tato varianta si stála v porovnání s variantou bez optimizérů lépe. Bohužel, vzhledem velmi malému rozdílu mezi NPV v porovnání s celkovým NPV obou variant, které jsou kolem 76 000 000 Kč a také vzhledem k úspoře nákladů na výrobu 1MW přibližně 82 Kč mezi variantami není varianta s optimizéry natolik rozhodující, že by budoucí investoři preferovali pouze tuto variantu. Je dobré zvážit i z jiného hlediska, zda je použití konceptu s optimizéry vhodné či nikoliv.

## 8. Závěr

---

V této práci byla zhodnocena možnost použití optimizérů na střešní fotovoltaické elektrárně s ohledem na všechny faktory a zároveň bylo ukázáno jakým způsobem se takovéto elektrárny projektují, na co si dát pozor, jak postupovat a uvedl příklady jednotlivých stupňů dokumentací v přílohách.

Pokud se podíváme na optimizéry z technického hlediska, je to další předmět, který se musí do fotovoltaické elektrárny instalovat a nezanedbatelně zvyšuje počáteční investici. Také četnost těchto optimizérů ve velkých elektrárnách je v řádech tisíců a musí být kladen důraz na bezporuchovost těchto zařízení. Tím tedy optimizéry mohou znatelně zvýšit riziko požáru budovy či jen způsobit nevýrobu. Firma Solar Edge však dává k dispozici důmyslnou platformu, která umožní monitoring elektrárny na úrovni panelů, a proto je schopná budoucí poruchy detekovat. Také je možné v této platformě komunikovat s celým konceptem (optimizéry a střídač) přes vzdálený přístup a tím jej nechat diagnostikovat přímo monitoringem Solar Edge.

Pokud se na optimizéry podíváme z hlediska požární bezpečnosti a budoucí legislativy tvořenou po vzoru Německa, jsou firmy disponující technologií optimizérů v nepochybné výhodě a budou mít po schválení těchto pravidel, kdy bude nutné elektrárnu na úrovni panelů odstavit na bezpečné napětí 120 V, dočasný monopol na trhu. Vzhledem k tomuto faktu firma Solar Edge razantně prosadila na trh pro dobré výchozí postavení. Nepochybně má jejich technologie jistý náskok oproti jiným firmám, které zatím funkční koncept (optimizéry, monitoring na úrovni panelu atd...) nemají. Nejspíše však bude, dle mých zkušeností, problémový koncept nahrazen mnohem sofistikovanější technologií optimizérů, která tohoto vývoje využije ve svůj prospěch.

Při porovnání výsledků z měření a ekonomického modelu chci zhodnotit přesnost výsledků ke kterým jsme dospěli. Vzhledem k tomu, že měsíc březen měl přívětivější počasí než únor, kde jsme měřili variantu se zakrýváním jednoho panelu, je charakteristika z grafu [Graf 7] mírně nepřesná, avšak dobře kopíruje chování zkoumané vlastnosti. Teprve dlouhodobé měření na všech variantách současně by mohlo přinést mnohem přesnější výsledky kde, dle mého názoru bude hodnota 2,3 % příspěvku optimizérů do celkové roční produkce mírně růst. V ekonomickém modelu není uvažován žádný prodej (jsou přetoky zakázané) a tím je vztah mezi skupinou ČEZ a Kongresovým centrem co do ceny za MWh nezjistitelný. Model ale naopak ukazuje, že naprosto jistě optimizéry se v průběhu života elektrárny zaplatí. Nakonec je otázkou budoucnosti legislativy a vývoje zda se optimizéry stanou standardem každé fotovoltaické elektrárny.

## 9. Použitá literatura

---

- [1] Anonym, „Zelená dohoda pro Evropu“, *Rada Evropské unie*, 2022.
- [2] Anonym, „World enegy transitions“, International Renewable Energy Agency, Masdar City, 2022.
- [3] M. Brozou, „The European Green Deal and the war in Ukraine: Addressing crises in the short and long term“, *European think tanks group*, 2022.
- [4] W. C. Sinke, „Development of photovoltaic technologies for global impact“, *Renewable Energy*, s. 911–914, 2019.
- [5] B. Bechník, „Stručná historie fotovoltaiky“, *TZB-info*, 2014.
- [6] V. Benda, „Fyzikální principy konstrukce fotovoltaických článků“, prezentováno v Aplikace solárních systémů, České vysoké učení technické: Fakulta elektrotechnická, 2022.
- [7] J. Dolenský, „Diagnostické metody fotovoltaických článků využívající lokální emisi světla“, Vysoké učení technické v Brně, Katedra elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014.
- [8] M. Vašíček, „Studium vlastností CdTe senzorů“, Vysoké učení technické v Brně, Katedra elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011.
- [9] Anonym, „Our Technology“, *QD Solar*.
- [10] B. S. Xakalashé, „Silicon processing: from quartz to crystalline silicon solar cells“, Southern African institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, 2011.
- [11] D. Wang, M. Wright, N. K. Elumalai, a A. Uddin, „Stability of perovskite solar cells“, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2016.
- [12] H. Cotal *et al.*, „III–V multijunction solar cells for concentrating photovoltaics“, *Energy & Environmental Science*, s. 174–192, 2009.
- [13] Anonym, „Best Research-Cell Efficiency Chart“, *Fotovoltaic research*, 2022.
- [14] V. Benda, „Základní vlastnosti polovodičů“, prezentováno v Aplikace solárních systémů, České vysoké učení technické: Fakulta elektrotechnická, 2022.
- [15] Anonym, „Shunt Resistance“, *PV Education*, 2022.
- [16] V. Quaschnig a R. Hanitsch, „Numerical simulation of current-voltage characteristics of photovoltaic systems with shaded solar cells“, *Solar Energy*, s. 513–520, 1996.
- [17] D.-W. Kim *et al.*, „Characteristic Analysis of HTS Magnet Charging System Combined with PV System Using MPPT Control“, *Progress in Superconductivity and Cryogenics*, roč. 14, 2012.
- [18] N. Bodnár, „Hodnocení výkonu a účinnosti fotovoltaické elektrárny v Hostětíně“, Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta, geografický ústav, 2016.
- [19] V. Müllerová, „PN přechod. v přechodu MIS“, 2017.
- [20] V. Benda, „Provozní podmínky fotovoltaických systémů“, prezentováno v Aplikace solárních systémů, České vysoké učení technické: Fakulta elektrotechnická, 2023.
- [21] V. Benda, „Fotovoltaický jev, fotovoltaické články a jejich charakteristiky“, prezentováno v Aplikace solárních systémů, 2023.
- [22] V. Benda, „Fotovoltaické články z krystalického křemíku“, prezentováno v Aplikace solárních systémů, České vysoké učení technické: Fakulta elektrotechnická, 2022.
- [23] S. Pingel *et al.*, „Potential Induced Degradation of solar cells and panels“, in *2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2010, s. 2817–2822.

- [24] S. Yamaguchi, B. B. Van Aken, A. Masuda, a K. Ohdaira, „Potential-Induced Degradation in High-Efficiency n-Type Crystalline-Silicon Photovoltaic Modules: A Literature Review", *Solar RRL*, s. 210–0708, 2021.
- [25] V. Benda, „Provozní spolehlivost a diagnostika fotovoltaických systémů", prezentováno v Aplikace solárních systémů, České vysoké učení technické: Fakulta elektrotechnická.
- [26] M. Vaqueiro-Contreras *et al.*, „Identification of the mechanism responsible for the boron oxygen light induced degradation in silicon photovoltaic cells", *Journal of Applied Physics*, s. 185–704, 2019.
- [27] M. A. Green, „Commercial progress and challenges for photovoltaics", *Nat Energy*, Art. č. 1, led. 2016.
- [28] D. C. Jordan, T. J. Silverman, B. Sekulic, a S. R. Kurtz, „PV degradation curves: non-linearities and failure modes", *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, s. 583–591, 2017.
- [29] Anonym, „Úchyty pro šikmé střechy".
- [30] *ValkPitched - Clamp - Slimline*, (2015).
- [31] *ValkPitched - Clamp - Smartline*, (2014).
- [32] *Van der Valk Solar Systems ValkPitched - Trapezoidal Insert*.
- [33] M. Metal, „Standing Seam Metal Roofing Systems - Standing Seam Steel Roofing | McElroy Metal".
- [34] Anonym, „Instalatin Manual - ValkPitched Standing Seam". Van der Valk, 2023.
- [35] Anonym, „Installation manual - Roof membrane". Van der Valk, 2023.
- [36] Anonym, „Solární konstrukce pro rovné střechy", *Envi energy czech*, 2023.
- [37] Anonym, „MSP-FR-EW-PSF Protection sheet". Ernst Schweizer.
- [38] V. Benda, „Fotovoltaické systémy připjené k rozvodné síti", prezentováno v Aplikace solárních systémů, České vysoké učení technické: Fakulta elektrotechnická, 2022.
- [39] M. Díez-Mediavilla, M. I. Dieste-Velasco, M. C. Rodríguez-Amigo, T. García-Calderón, a C. Alonso-Tristán, „Performance of grid-tied PV facilities based on real data in Spain: Central inverter versus string system", *Energy Conversion and Management*, s. 1128–1133, 2014.
- [40] Anonym, „SG110CX datasheet". Sungrow, 2022.
- [41] S. B. Kjaer, J. K. Pedersen, a F. Blaabjerg, „A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules", *IEEE Transactions on Industry Applications*, č. 5, s. 1292–1306, 2005.
- [42] M. Meinhardt *et al.*, „Miniaturised ‚Low Profile‘ module integrated converter for photovoltaic applications with integrated magnetic components", prezentováno v APEC '99. Fourteenth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition. 1999 Conference Proceedings (Cat. No.99CH36285), 1999, s. 305–311.
- [43] M. Calais, J. Myrzik, T. Spooner, a V. G. Agelidis, „Inverters for single-phase grid connected photovoltaic systems-an overview", prezentováno v 2002 IEEE 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Proceedings (Cat. No.02CH37289), 2002, s. 1995–2000.
- [44] E. Černočová, „Rizika spojená s instalací FVE v důsledku úderu blesku Návrh systému ochrany před bleskem u FVE", 2023.
- [45] Anonym, „Overvoltage surge proteciton - Technical note". SolarEdge.
- [46] C. Koudelka, „Ochrana před bleskem", Vysoká škola báňská, 2007.
- [47] Anonym, „Technická zařízení budov prakticky: Návrh hromosvodní ochrany dle souboru norem ČSN EN 62305". Dashofer, 2023.



- [48] Anonym, „LPS podle nového souboru norem ČSN EN 62305 (část 2) -“, *Odbornecasopisy.cz*, 2023.
- [49] Anonym, „Moderní řešení bezpečnosti provozu pro fotovoltaické elektrárny“. CITEEL.
- [50] Anonym, *ČSN CLC/TS 50539-12*.
- [51] Anonym, „Připojovací podmínky pro výroby elektriny“. ČEZ energetické služby, 2023.
- [52] Anonym, „sborník 1. studentské vědecké konference“, roč. 2018.
- [53] Anonym, *458/2000 Sb. Energetický zákon*.
- [54] Anonym, „183/2006 Sb. Stavební zákon“, *Zákony pro lidi*.
- [55] Anonym, „Požární bezpečnost fotovoltaických systémů“, *Odbornecasopisy.cz*.
- [56] Anonym, *460/2021 Sb. Vyhláška o kategorizaci staveb z hlediska požární bezpečnosti a ochrany obyvatelstva*.
- [57] Anonym, *ČSN 73 0804 Požární bezpečnost staveb - Výrobní objekty*.
- [58] Anonym, „Požáry fotovoltaiky a riziko úrazu elektrickým proudem - TZB-info“.
- [59] Anonym, *Návrh vyhlášky o požadavcích na bezpečnou instalaci výroby elektriny využívající obnovitelné zdroje energie s instalovaným výkonem do 50 kW*.
- [60] M. Valouch, „Požadavky požární ochrany na FVE“, prezentováno v Požární řešení pro FVE, 2023.
- [61] Anonym, „JRC Fotovoltaický geografický informační systém (PVGIS) - Evropská komise“, *Fotovoltaický gologický informační systém*, 2023. [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/) (viděno 22. duben 2023).
- [62] Anonym, „Návod k použití PVGIS“.
- [63] Anonym, „Technické izolace detailně (III) - návrh technických izolací a využití výpočtových programů“, *TZB-info*.
- [64] J. Vočko, „Dimenzování silových kabelů z hlediska tepelného namáhání“, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, 2014.
- [65] Anonym, „Absorption coefficient of solar radiation“, *Cableizer*.
- [66] Anonym, *Norma ČSN 33 2000-5-52 ed. 2 (1. část)*.
- [67] Anonym, „Cable coupler MC4 with barrel crimp contacts“. Stäubli Electrical Connectors, 2023.
- [68] Anonym, „EurotestPV Lite Instruction manual“. Metrel, 2023.
- [69] Anonym, „Advisory Guid for String inverters“. SMA.
- [70] Anonym, „Eurotest 61557 - User Manual“. Metrel, 2023.
- [71] R. Anonym, „Měření elektrických spotřebičů při revizích“, *Odbornecasopisy.cz*, 2023.
- [72] Anonym, „The diference between ground continnuity test and bond test“, *TecoTec*, 2023.
- [73] R. Anonym, „Výroční zpráva 2021“. Kongresové centrum Prahy, 2021.