

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vliv teploty FV článků na dodávaný výkon

Originál (kopie) zadání BP/DP

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na posouzení vlivu teploty panelů na výkon fotovoltaického systému. Úvod je věnován slunečnímu záření a možnostem využití fotovoltaické technologie k výrobě elektrické energie. Rovněž jsou zde popsány důležité vlastnosti FV článků. V dalších kapitolách jsou shrnuty a vyhodnoceny výsledky provedených měření výkonů a teplot panelů a článků konkrétní FV elektrárny.

Klíčová slova

Sluneční záření, fotovoltaický panel, výkon FV panelu, vliv teploty FV panelu, solární článek, voltampérová charakteristika FV článku

Abstract

The aim of this Bachelor thesis is the effect of panel temperature on power output of a photovoltaic system. The introduction of my Bachelor thesis deals with solar radiation and also is concerned with utilization of photovoltaic technology to generate electrical energy. Also, there are described important characteristics of photovoltaic cells. In other chapters there are summarized and evaluated the results of executed measuring of power outputs and temperatures for panels and cells of concrete photovoltaic plant.

Key words

Solar radiation, Photovoltaic panel, Power output of PV panel, Effect of PV panel temperature, solar cell, current-voltage characteristic of PV cell

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 9. 6. 2014

Jaroslav Lejsek

Poděkování

Děkuji doc. Ing. Pavle Hejtmánkové, Ph.D. za odborné vedení práce a za poskytování rad a materiálních podkladů doc. Ing. Emilu Dvorskému, CSc.

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM ZKRATEK:	8
ÚVOD	9
1 SLUNEČNÍ ZÁŘENÍ A ENERGETICKÁ BILANCE SVĚTLA DOPADAJÍCÍHO NA ZEMI	10
1.1 SLUNEČNÍ ENERGIE	10
1.2 SLUNEČNÍ KONSTANTA	11
1.3 INTENZITA GLOBÁLNÍHO ZÁŘENÍ	11
1.4 SLUNEČNÍ ZÁŘENÍ A JEHO SPEKTRÁLNÍ SLOŽENÍ	12
1.5 PRŮCHOD FOTONŮ ATMOSFÉROU	13
2 VYUŽITÍ SOLÁRNÍ ENERGIE	15
2.1 FOTOVOLTAICKÉ SOLÁRNÍ ČLÁNKY	15
2.1.1 <i>Materiál na výrobu solárních článků</i>	16
2.1.2 <i>P-N přechod</i>	16
2.2 FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI FV ČLÁNKU	17
2.3 VLIV TEPLoty PANELU NA VÝKON FV ČLÁNKU	20
2.4 VLIV INTENZITY SVĚTLA NA VÝKON FV ČLÁNKU	21
3 FOTOVOLTAICKÁ ELEKTRÁRNA NA FEL ZČU	22
4 MĚŘENÍ VÝKONŮ A TEPLOT NA FV ELEKTRÁRNĚ	24
4.1 POSTUP MĚŘENÍ V-A CHARAKTERISTIK	24
4.2 VÝSLEDKY MĚŘENÍ V-A CHARAKTERISTIK	26
4.3 ZÁVĚRY Z MĚŘENÍ V-A CHARAKTERISTIK	27
4.4 VÝSLEDKY MĚŘENÍ TERMOKAMEROU	27
4.5 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ	31
5 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	32
5.1 POSOUZENÍ EKONOMICKÉ ZTRÁTY	32
5.2 URČENÍ DOBY NÁVRATNOSTI	34
ZÁVĚR	35
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	36
PŘÍLOHY	37

Seznam zkratk:

AM	atmosférické číslo
ES	elektrizační soustava
FV	fotovoltaický
FVE	fotovoltaická elektrárna
FEL	Fakulta elektrotechnická ZČU
MPP	maximum power point
MX	svorkovnice
nn	nízké napětí
STC	standardní zkušební podmínky
V-A	volt-ampérová
ZČU	Západočeská univerzita v Plzni

Úvod

Energie ze Slunce je v současnosti jednou z mediálně nejprobíranějších zdrojů elektrické energie. Po problémech, které způsobila jaderná havárie v japonské elektrárně Fukušima, se výroba elektrické energie odkloňuje od jadra a přechází se na obnovitelné zdroje.

A je to právě Slunce, které se považuje za nevyčerpatelný zdroj energie. Díky tomu prodělala fotovoltaika technickou revoluci. V roce 1839 francouzský vědec Antoine César Becquerelem objevil fotovoltaický jev. První funkční solární článek byl sestaven o 45 let později americkým vynálezcem Charlesem Fritzem. Tento článek byl sestaven ze seleniového polovodiče s tenkou vrstvou zlata na povrchu. Články dosahovaly jedno procentní účinnosti. Masová výroba byla nemyslitelná, a to hlavně z důvodu finančního hlediska. K velkému průlomů došlo v roce 1939, kdy byl objeven P-N přechod. Články využívající tohoto přechodu dosahovaly účinnosti kolem 5 %.

Velký průlom ve fotovoltaické technice nastal koncem 80. let 20. století, kdy byly do provozu uvedeny články tzv. první generace. Jejich účinnost dosahuje maximálně 31 %. V dnešních dobách se rozvoj soustředí nejvíce na panely druhé a třetí generace.

Cílem této práce je vysvětlit přeměnu sluneční energie na energii elektrickou a objasnit fyzikální vlastnosti FV článků, provést a vyhodnotit měření FV systému umístěného a střeše jedné z budov Západočeské univerzity v Plzni a posoudit, zda jsou všechny články v pořádku a dodávají maximální možný výkon do elektrizační soustavy.

1 Sluneční záření a energetická bilance světla dopadajícího na Zemi

Slunce je naší nejbližší hvězdou. Pokud bychom srovnávali Slunce s ostatními hvězdami v Mléčné dráze, jedná se o hvězdu střední velikosti, která svými vlastnostmi nijak nevyčníká. V tab. 1.1 můžeme vidět její základní charakteristické hodnoty.

Tab. 1.1: Charakteristika Slunce. [4]

Slunce	
Průměr	1 392 020 km
Povrch	$6,98 \cdot 10^{12} \text{ km}^2$
Povrchová teplota	5780 K
Hmotnost	$1,98 \cdot 10^{30} \text{ kg}$
Vyzářený výkon	$3,36 \cdot 10^{24} \text{ MWh/rok}$
Celkový vyzářený tok	$3,85 \cdot 10^{26} \text{ W}$

1.1 Sluneční energie

Slunce je vzdálené 149 milionů kilometrů od Země. Je složeno převážně ze dvou prvků a to vodíku a helia. Ostatní prvky tvoří asi 1 % jeho objemu. Helium a vodík mají na svědomí samo regulovanou termonukleární reakci, při které dochází ke slučování 4 jader atomu vodíku s jádrem atomu helia. Tato reakce má za následek uvolnění energie, kterou popsal A. Einstein snad neznámějším vztahem (1.1):

$$E = \Delta m \cdot c^2 \quad (1.1)$$

kde:

- E [J] - uvolněná energie,
- c [m/s] - rychlost světla ve vakuu,
- Δm [kg] - hmotnost, o kterou přišlo jádro hélia.

Pokud by záření s touto energií dopadlo na povrch Země, nikdy by život nevznikl. Částice, která je vyzařována z jádra, můžeme nazvat foton. Tento foton při cestě na povrch Slunce naráží do dalších částic v jádře, a tím zaniká a vytváří se nový foton s podstatně menší energií. [1], [2] Když se tento foton dostane na zemský povrch, má tedy o mnoho menší

energii.

Po celá staletí se vědci snažili zjistit konečnou rychlost, kterou tento foton má. Až v roce 1983 byla na všeobecném kongresu o mírách a váhách definována rychlost šíření světla jako 299 792 458 m/s. Pokud tedy budeme vycházet z této hodnoty, sluneční záření se k Zemi dostane přibližně za 8 minut a 20 sec. Slunce je tedy považováno za nevyčerpatelný zdroj energie a jeho vlivy na Zemi jsou popsány v tab. 1.2.

Tab. 1.2: Vliv slunce na Zemi. [1]

Vliv na Zemi	
Příkon záření na povrchu Země	$1,2 \cdot 10^{11}$ MW
Energie záření dopadajícího na Zemi	$1,54 \cdot 10^{15}$ MWh/rok
Hustota záření na povrchu	1000 W/m ²

1.2 Sluneční konstanta

Jak jsme řekli, foton opouští povrch Slunce rychlostí přibližně $3 \cdot 10^8$ m/s. Po cestě k Zemi ztrácí svoji energii a dodává měrný tok energie 1353 W/m². Můžeme si tedy zavést tzv. sluneční konstantu, která je charakterizována slunečními paprsky dopadajícími kolmo na povrch Země. [1], [3]

1.3 Intenzita globálního záření

Při průchodu fotonů atmosférou dochází ke ztrátě energie. Tato ztráta intenzity světla může být způsobena několika faktory. Jsou to mraky, vodní páry, prachové a jiné částice, které způsobují rozptyly paprsků. Z toho tedy vyplývá, že při úplně čisté obloze dosahuje intenzita nejvyšších hodnot. Průměrně dopadá na Zemi sluneční záření o intenzitě 600-1000 W/m². [1], [3], [4]. Ostatní meteorologické jevy jsou vidět v tab. 1.3.

Tab. 1.3: Intenzita globálního záření. [1]

	Intenzita globálního záření [W/m²]
Modré nebe	800 – 1000
Zamlžené nebe	600 – 900
Mlhavý podzimní den	100 – 300
Zamračený zimní den	50
Celoroční průměr	600

1.4 Sluneční záření a jeho spektrální složení

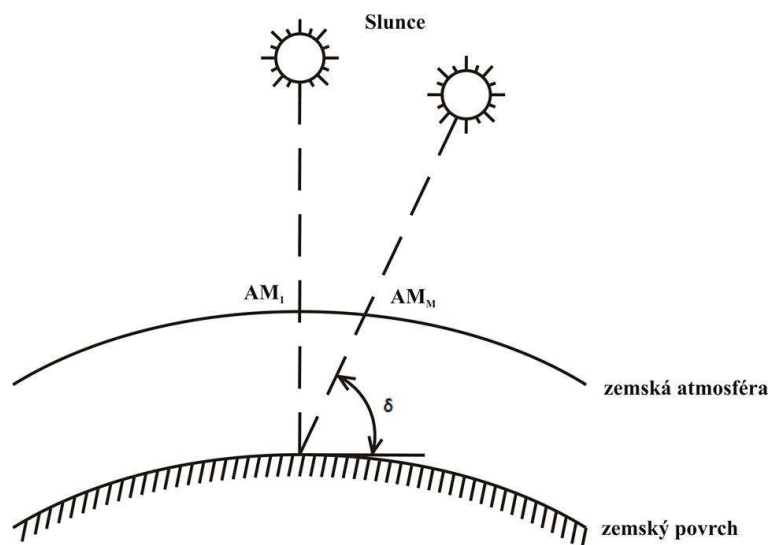
Ze slunce vycházejí vysokoenergetické fotony. Pod tímto pojmem si můžeme představit fotony s různou frekvencí f a tedy i jinou vlnovou délkou λ , souvislost ukazuje vztah (1.2). Tyto fotony jsou tedy nositeli jiného náboje. [4]

$$f = \frac{1}{\lambda} \quad (1.2)$$

kde:

f [Hz] - frekvence
 λ [-] - vlnová délka

Nejdříve vysvětlíme tzv. atmosférické číslo (viz obr. 1.1). Rozlišení atmosférických čísel se dělá pomocí tzv. faktoru m . Tento faktor, popsáný vztahem (1.3), vyjadřuje nejmenší možnou dráhu světla k povrchu země a ve většině případů se píše za atmosférické číslo (např. AM 1,5). Pokud budeme počítat s kolmým dopadem (tedy $\delta = 90^\circ$), vyjde $\sin \delta = 1$. [3], [4]



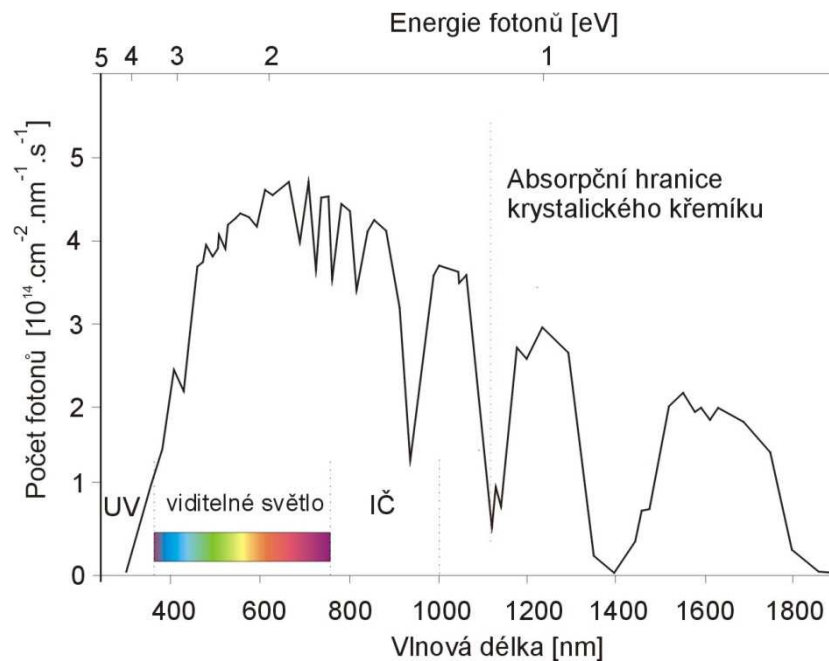
Obr. 1.1: Znárodnění atmosférické čísla AM [4]

Po dosazení do vzorce (1.3) tedy vyjde faktor m roven jedné. Pokud by vyšel faktor dvojnásobný, znamenalo by to, že je cesta světelného paprsku dvojnásobně delší než u kolmého dopadu.

$$m = \frac{1}{\sin \delta} \quad (1.3)$$

Z toho tedy vyplývá, že čím menší úhel mezi povrchem Země a Sluncem je, tím větší je tato dráha. Dá se tedy říci, že v poledne, kdy je Slunce kolmo nad Zemí, dopadá na povrch světlo s nejvyšší intenzitou. Zatímco při jiném úhlu světlo letí delší dráhu, a tím se více mění spektrální rozložení slunečního záření. [4]

V příkladu uvedená hodnota AM 1,5 nebyla náhodná. Jedná se totiž o úhel $\delta = 41,75^\circ$. Změřené sluneční spektrum právě pro tento úhel je zobrazeno na obr 1.2.



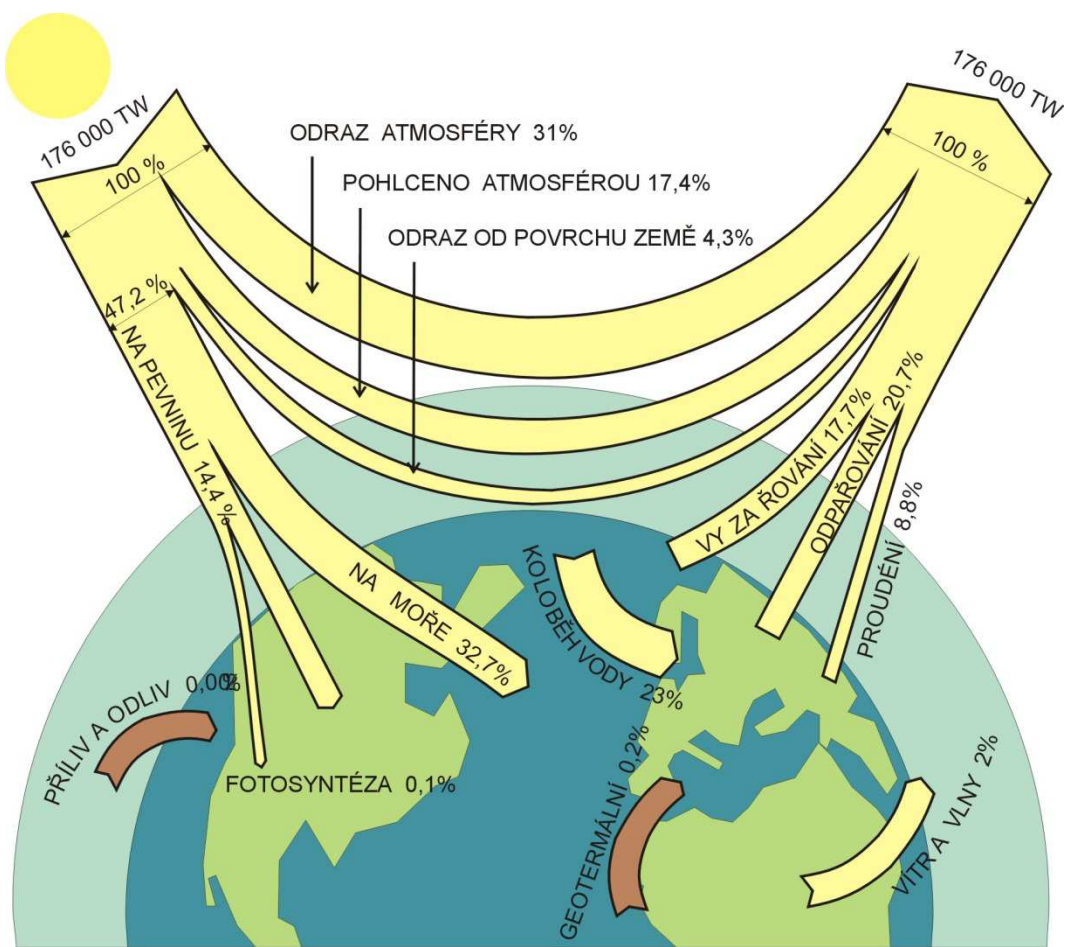
Obr. 1.2: Sluneční spektrum pro úhel 42° . [12]

1.5 Průchod fotonů atmosférou

Ve vrstvách atmosféry, které jsou výše než 10 km nad povrchem Země, dochází k pohlcení vlnové délky 1-100 nm. V těchto vlnových délkách se nachází ultrafialové a rentgenové záření, tedy záření, které je životu nebezpečné. Pokud bychom se na toto světlo dívali z energetického hlediska, nejedná se o příliš velkou ztrátu. [1], [5], [6]

V další vrstvě atmosféry (v tzv. troposféře) dochází k dalšímu úbytku energie. To je zapříčiněno mraky, zemským povrchem a částicemi prachu, které odráží světlo zpět do vesmíru. Podle nejnovějších poznatků se jedná až o 34 % celkového slunečního toku. [1]

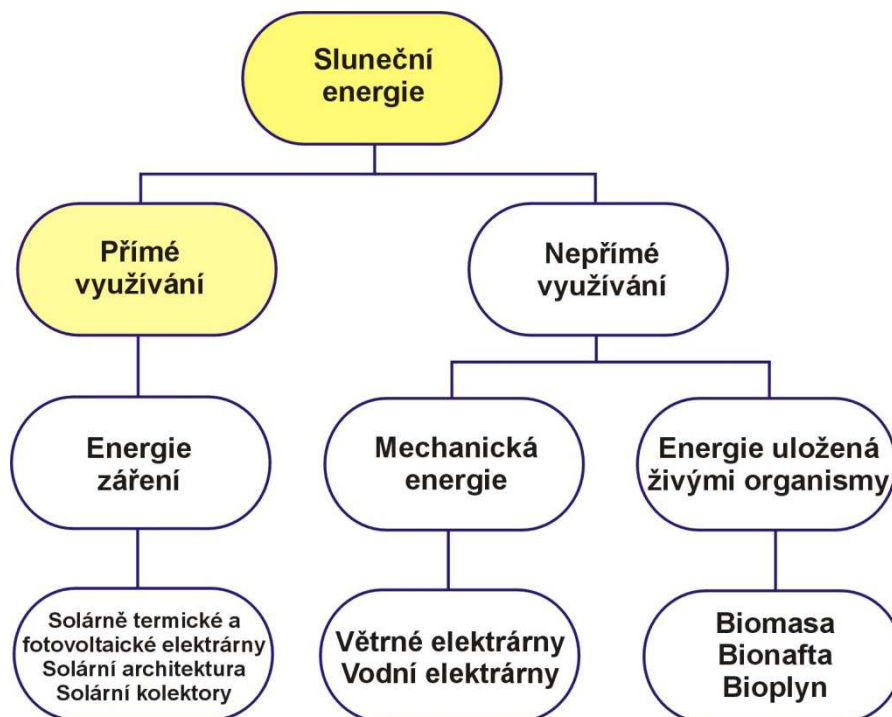
K zemskému povrchu tedy dorazí kolem 47 % energie, což je názorně vidět na obr. 1.3. Největší využití má tato energie v přírodě. Rostliny vyrábějí díky slunečnímu záření kyslík. Tento jev se nazývá fotosyntéza a dochází při ní ke změně neorganických látek na látky organické.



Obr. 1.3: Energetická bilance Země. [3]

2 Využití solární energie

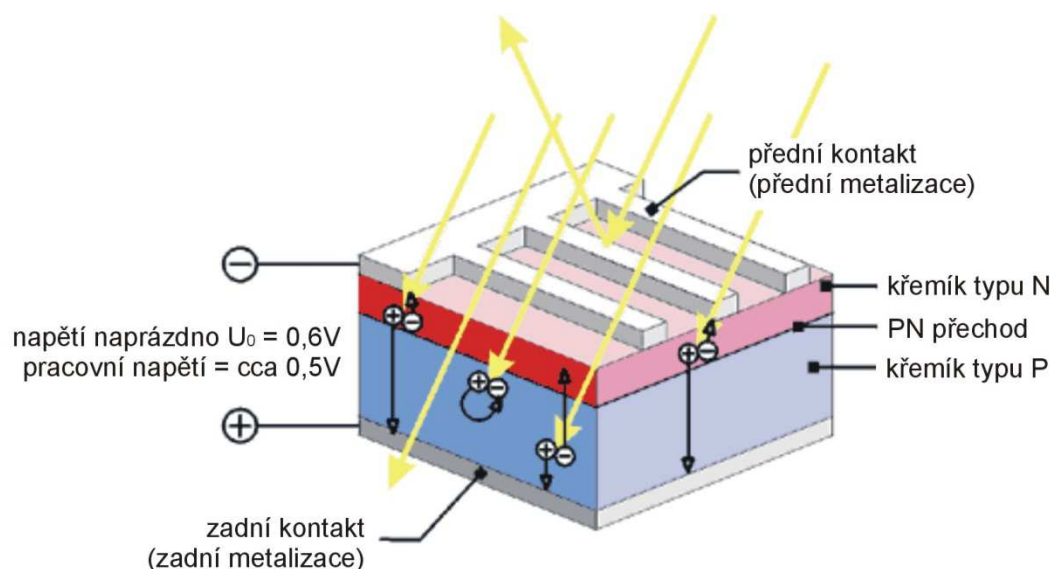
V současné době dochází k využívání sluneční energie dvěma způsoby (viz obr. 2.1), a to přímo a nepřímo. V mé práci se budeme soustředit na přímé využití sluneční energie. Zde dochází k přímé přeměně sluneční energie na teplo či elektřinu. Této přeměny dosahujeme kupříkladu pomocí solárně termické a fotovoltaické elektrárny nebo solárními kolektory. V nepřímé metodě se využívá mechanické energie (větrné a vodní elektrárny) nebo energie, která byla vložena do živých organismů.



Obr. 2.1: Možnosti využití sluneční energie. [12]

2.1 Fotovoltaické solární články

Fotovoltaický článek je základním prvkem pro přímou přeměnu slunečního záření na elektrickou energii. Tento článek využívá dopadajícího světla na P-N přechod (viz obr. 2.2). Jedná se tedy o polovodičový prvek s jedním nebo i více P-N přechody. [6]



Obr. 2.2: Princip činnosti FV článku. [9]

2.1.1 Materiál na výrobu solárních článků

Pro výrobu solárních článků se jako materiál nejčastěji používá křemík. Využití křemíku v polovodičové technice má hlavně dva důvody. První důvod je množství křemíku na Zemi, po železe je to druhý nejčastější prvek v zemské kůře. Výhody křemíku představují i jeho fyzikální a chemické vlastnosti, díky nimž je křemík dobře technologicky zpracovatelný.

Čistý křemík se považuje za dobrý izolant, obsahuje tedy jen velmi málo volných elektronů. Množství volných elektronů je ovlivňováno hlavně teplotou. Za předpokladu nízké teploty křemík obsahuje jen velmi malé množství volných nosičů záporné elektrické energie (elektronů). Pokud bude stoupat teplota, v křemíku dojde ke zvýšení pohybu atomů. Při tomto pohybu dochází k uvolňování některých vazeb, a tedy navyšování počtu volných elektronů. Při uvolnění elektronu z vazby dochází ke vzniku díry, která představuje kladný nosič náboje. Tento jev můžeme nazvat jako vlastní vodivost. [4], [5]

2.1.2 P-N přechod

Pro vytvoření P-N přechodu potřebujeme dva typy polovodičů, které musí být v těsném kontaktu, aby došlo k návaznosti krystalických mřížek.

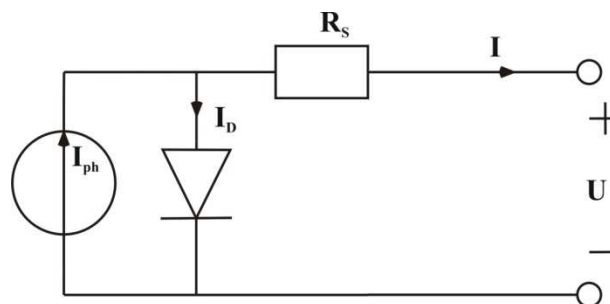
Polovodič typu N obsahuje tzv. donor. To znamená, že do čistého křemíku přidáme prvek s vyšším množstvím valenčních elektronů (tedy prvek z V. skupiny Mendělejevovy tabulky), tím křemík znečistíme, čímž vzniknou v krystalické mřížce volné elektrony. Tyto nadbytečné elektrony (donory) mají možnost volného pohybu v mřížce a způsobují vlastní vodivost. [7]

Polovodič typu P je dotován prvkem z III. skupiny Mendělejevovy tabulky. Po přidání příměsi způsobíme vznik místa s chybějícím elektronem. Toto místo se nazývá díra a je nositelem kladného náboje. Příměs, kterou dodáváme do prvku, je nazývána akceptor. [7]

Spojením obou typů vodičů, P a N, vznikne tzv. hradlová vrstva se specifickými vlastnostmi. Volné nosiče náboje se mohou volně pohybovat krystalem. Díky rozdílu koncentrací kladných a záporných nábojů přecházejí elektrony do bloku polovodiče typu P a díry do N. V hradlové vrstvě však mohou elektrony rekombinovat s děrami, a tudíž bude v této oblasti méně volných nosičů náboje, tj. vyšší měrný odpor. V této vrstvě tedy vzniká rozdílný potenciál a spád tohoto potenciálu pak působí proti další difúzi. Po připojení elektrod k jednotlivým blokům a uzavření obvodu přes zátěž bude obvodem protékat proud úměrný intenzitě záření dopadajícího na P-N přechod. [7]

2.2 Fyzikální vlastnosti FV článku

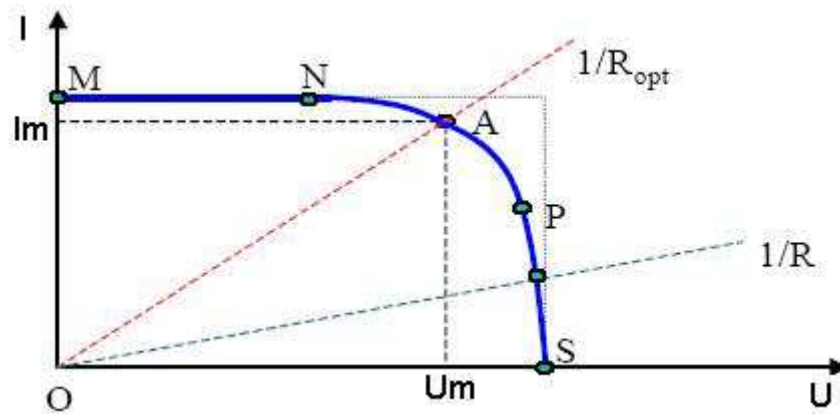
Fyzikální vlastnosti FV článku popíšeme pomocí matematického modelu solárního článku (viz obr. 2.3), kde můžeme článek nahradit ekvivalentním elektrickým obvodem. V tomto obvodu se vyskytuje proudový zdroj, dioda a odpor.



Obr. 2.3: Matematický model FV článku. [12]

Proud I_{ph} , který produkuje proudový zdroj, představuje zdroj ss napětí. Tedy dopadající světlo na FV článek. Dioda, přes kterou teče proud I_D , reprezentuje chování P-N přechodu. Výsledný proud I je omezen odporem R_s , který symbolizuje odpor článku a případné spojení mezi více články.

Jak funguje FV článek lze nejlépe pochopit z voltampérové charakteristiky (viz obr. 2.4) Při zvyšování výsledného napětí U je proud I konstatní. To se děje do maximální hodnoty napětí, kdy dojde k otevření diody a nárůstu proudu I_D . Když prochází všechen produkováný proud přes diodu, na výstupu je nulové napětí. Což lze vyzorovat na voltampérové charakteristice viz obr. 2.4.



Obr. 2.4: Voltampérová charakteristika FV článku. [6]

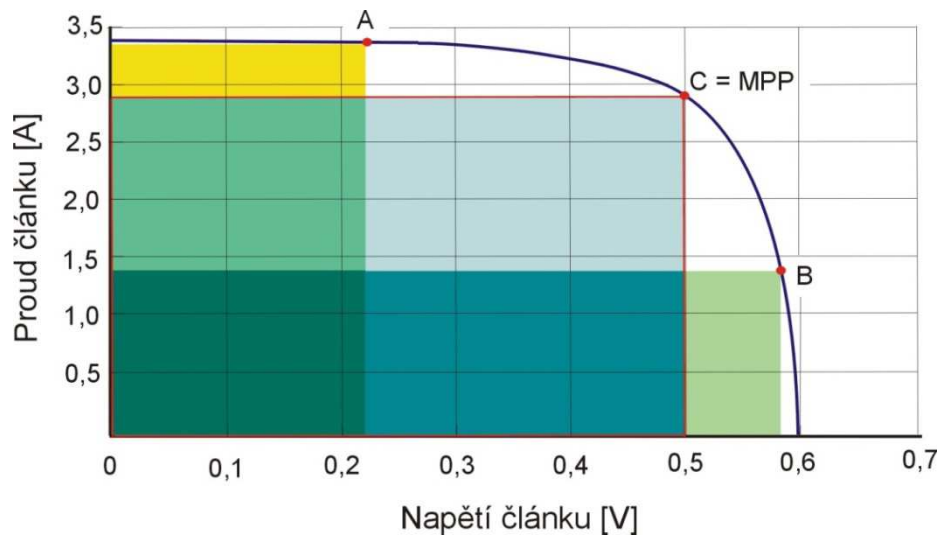
Připojením odporové zátěže na výstup získáme pracovní bod, který bude průsečíkem V-A charakteristiky odporu a solárního článku. Na obr. 2.4 tento postup znázorňuje přímka $1/R$. Pokud zvolíme malou hodnotu odporové zátěže, výsledná přímka se bude pohybovat mezi body M a N. To má za následek, že se článek chová jako zdroj konstantního proudu, který je přibližně rovný proudu nakrátko. Pokud ale zvolíme hodnotu odporu vysokou, bude se pracovní bod nacházet v oblasti mezi P a S (jako v našem případě přímka $1/R$) a článek se bude chovat jako zdroj konstantního napětí.

Z hlediska výroby elektrické energie je nejdůležitější veličinou u FV článků jejich výkon. [8] Jde tedy o co největší součin hodnot napětí a proudu, tedy o obsah obdélníka, který tento součin vytvoří. Zvolíme si tedy tři body na V-A charakteristice FV článku a to body A, B a C. Jak vyplývá z obr. 2. 5, nabývá jejich součin různé velikosti obdélníků. Pokud tedy porovnáme barevné plochy z hlediska obsahu, můžeme určit bod, ve kterém má FV článek maximální výkon. V našem případě se jedná o bod C.

Tento bod je v technické literatuře označován jako MPP (Maximum Power Point). [6] V elektrárnách, které jsou připojené na síť, se snažíme pracovat právě v bodě MPP, neboť právě v tomto bodě dojde k největší přeměně slunečního záření na elektrický proud.

To vysvětluje přímku $1/R_{opt}$, která je na obr. 2.4. Tato přímka zde vede do bodu A (MPP). Jedná se tedy o hodnotu optimální odporové zátěže, která je připojena na výstup, abychom dosáhli maximálního dodávaného výkonu do sítě.

Průběh V-A charakteristiky není závislý jen na intenzitě dopadajícího světla na článek. Mezi další důležité faktory, které ovlivňují V-A charakteristiku, patří materiál, ze kterého je článek vyroben, a teplota, na jakou je článek zahřát.



Obr. 2.5: Výkon dodávaný článkem pracujícím v různých pracovních bodech (A, B, C). [12]

Abychom mohli porovnat FV články, byly určeny parametry, při kterých dochází k měření. Jedná se o tzv. standardní zkušební podmínky (STC=Standart test conditions). [1] Intenzita, která má dopadat na článek při měření, byla určena na hodnotu 1000 W/m^2 , teplota článku má mít $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Pokud tedy máme nastavené podmínky pro měření, budeme určovat [5]:

- Proud I_{450} (měřeno při napětí $U_C = 450 \text{ mV}$), podle kterého se rozdělují články do kvalitativních skupin.
- Proud nakrátko $I_{k,C}$, tj. největší proud generovaný článkem při zkratovaných svorkách ($U_C = 0$).
- Napětí naprázdno $U_{0,C}$, tj. největší napětí na článku, které můžeme naměřit při rozpojených svorkách ($I_C = 0$).
- Maximální výkon, který může článek dodávat $P_{\max,C}$. Tento výkon se nazývá špičkový výkon a má jednotku $\text{watt}_{\text{peak}} [\text{W}_p]$. Jeho velikost určíme ze vztahu:

$$P_{\max,C} = U_{\max,C} \cdot I_{\max,C} \quad (2.1)$$

- Proud $I_{\max,C}$ (optimální), při kterém solární článek dodává maximální výkon.
- Napětí $U_{\max,C}$ (optimální), při kterém solární článek dodává maximální výkon.
- Parametr FF (Fill Factor), který se zjišťuje výpočtem podle vzorce:

$$FF = \frac{U_{\max,C} \cdot I_{\max,C}}{U_{0,C} \cdot I_{k,C}} \quad (2.2)$$

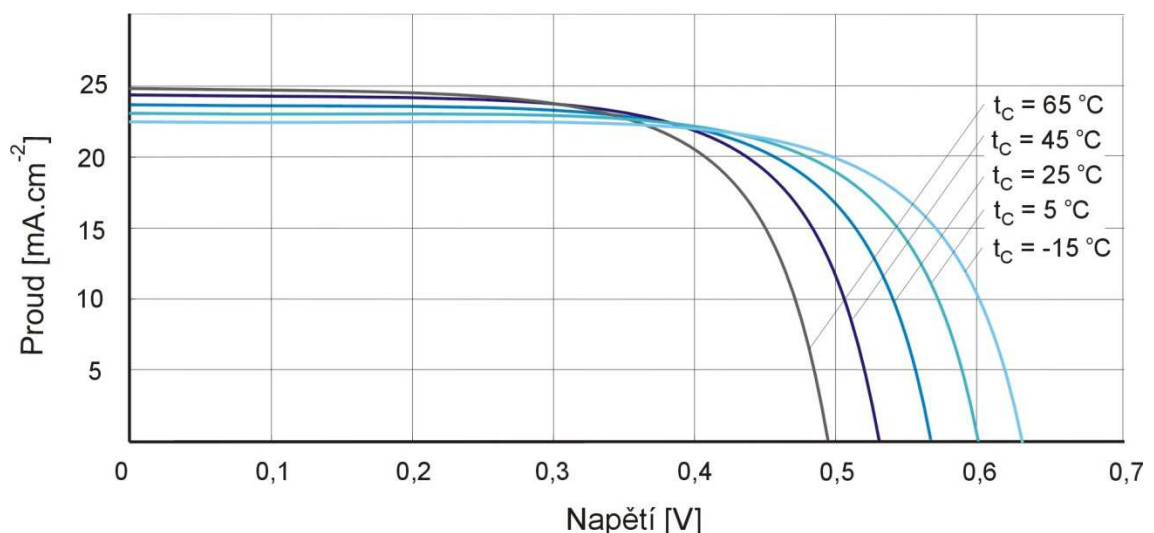
- Sériový odpor solárního článku R_s .
- Paralelní odpor solárního článku R_p .

- Účinnost solárního článku, která se většinou označuje anglickou zkratkou EEF (Energy Efficiency).

2.3 Vliv teploty panelu na výkon FV článku

V průběhu dne jsou solární články zatíženy různou intenzitou záření a při činnosti dochází k zahřívání povrchu FV panelu. Tyto dva faktory mají největší vliv na V-A charakteristiku panelu.

Při zvyšování teploty dochází k růstu proudu tekoucím přes článek, to má za následek snižování celkového napětí a výkonu. [9] Pokud bychom dokázali udržet konstantní hodnotu intenzity světla a jen měnili hodnotu teploty na FV článku, zjistili bychom, že maximální výkon dodávaný do sítě bude při nízkých teplotách. Z obr. 2.6 vyplývá právě závislost teploty na výkonu. Kdy nejlepší hodnota výkonu vyšla pro hodnotu 15°C.



Obr. 2.6: V-A charakteristika článku pro různé teploty. [12]

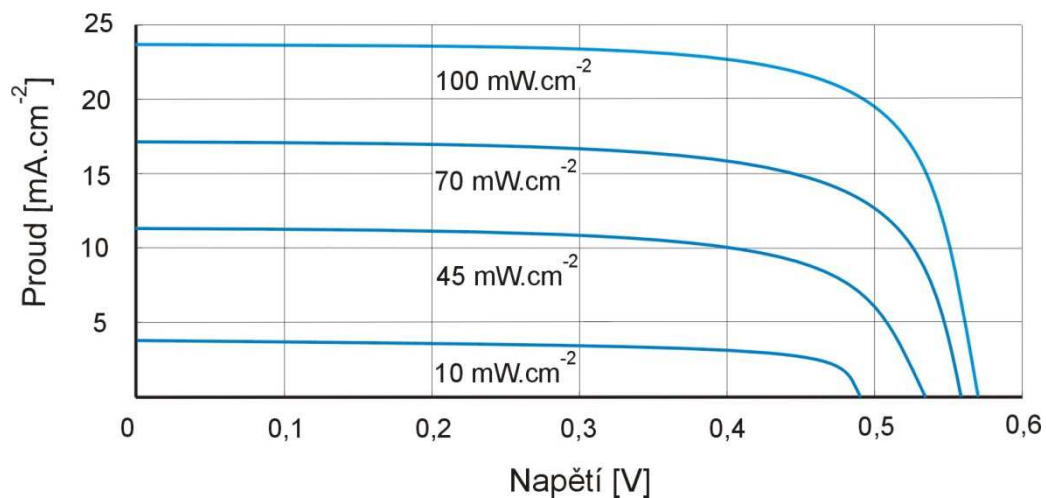
Výrobci udávají pokles o 0,4 % výkonu s každým dalším stupněm. Pokud bychom počítali se základní teplotou 25 °C (samozřejmě při konstantní hodnotě intenzity záření) a zvýšili bychom teplotu dvojnásobně, tedy na hodnotu 50 °C, pak bychom přišli přibližně o 10 % možného maximálního výkonu.

Při letních měsících, kdy hodnota intenzity slunečního záření dosahuje největších hodnot, přicházíme o výkon z důvodu ohřevu panelů. [9] Paradoxně tedy dochází k situaci, kdy největší hodnoty výkonů získáváme v zimních měsících.

2.4 Vliv intenzity světla na výkon FV článku

Jak již jsme řešili v kapitole 2.3, na výkon FV panelů má výrazný vliv hodnota intenzity záření dopadající na panel. Z obr. 2.6 vyplývá závislost výkonu na hodnotě intenzity dopadajícího světla. Výkon FV elektrárny tedy ovlivňuje hned několik faktorů, které mohou ovlivňovat dopadající sluneční paprsky. Například počasí (mraky, mlha), AM atd.

Při pohledu na obr. 2.7 můžeme vypožorovat, že při dopadu světla 10 mW/cm^2 je výkonový obdélník nejmenší. Zatímco, kdyby na tento samý panel dopadalo světlo o intenzitě 100 mW/cm^2 výkon by se zdesetinásobil.



Obr. 2.7: V-A charakteristika článku pro různé intenzity záření. [12]

3 Fotovoltaická elektrárna na FEL ZČU

Fotovoltaická elektrárna (viz obr. 3.1), na které bylo prováděno měření, je umístěna na střeše budovy Fakulty elektrotechnické ZČU a byla uvedena do provozu 12. 3. 2004. Celkový výkon dodávaný do sítě je přibližně 17 000 kWh/rok. Nejdůležitější údaje o elektrárně jsou uvedeny v tab. 3.1.

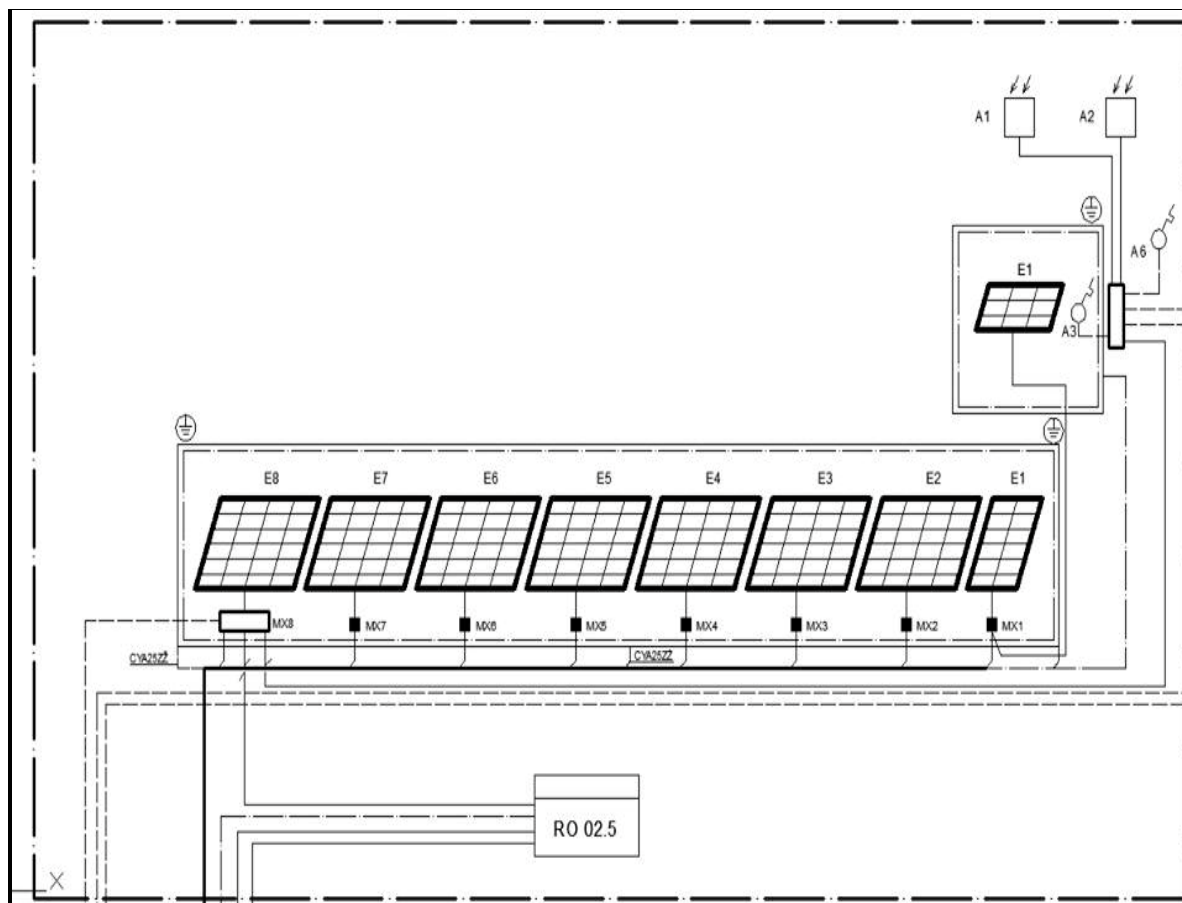
Tab. 3.1: Charakteristika FV elektrárny. [11]

Fotovoltaická elektrárna	
Počet panelů	192
Celková plocha	163,2 m ²
Počet střídačů	8
Sklon panelů	45°
Orientace	Jih
Předpokládaný výkon	20 kWp

Elektrárna obsahuje 192 monokrystalických panelů [11], které jsou sestaveny do 8 sestav. Tyto sestavy jsou označeny E1-E8. To znamená, že každá sestava obsahuje 24 panelů. Panely samostatně jsou zapojeny v sérii po osmi kusech. Každá tato soustava 8 kusů panelů je přivedena do střídače SunProfi SP2500-450. Na střeše je tedy 8 těchto střídačů, které jsou svedeny do rozvaděče s označením RO 02.5. Tento rozvaděč je umístěn v pátém patře budovy. Z rozvaděče vedou silové kabely do 8 měničů, které poté dodávají elektrickou energii do nn sítě. Celkové blokové schéma je vidět na obr. 3.2.



Obr. 3.1: Fotovoltaický systém na budově FEL ZČU. [10]



Obr. 3.2: Blokové schéma fotovoltaického systému. [zdroj vlastní]

Legenda zařízení znázorněných na obr. 3.2:

- A1 snímač osvitů FV 45 % – Solartec SG2460,
- A2 snímač globálního osvitů – Pyranometr typ CM21,
- A3 snímač teploty panelů – Typ F1020,
- A6 snímač venkovní teploty,
- E(1-8) fotovoltaické soustavy – 192 panelů Solartec PE 72-106,
- MX(1-7) skříně převodníků,
- MX8 svorková skříně FV sestavy, z této skříně vychází i datové vedení,
- RO 02.5 rozvaděč.

4 Měření výkonů a teplot na FV elektrárně

Pro změření závislosti výkonu na teplotě panelu jsme potřebovali přístroj, který umožní vykreslit V-A charakteristiku článku a z kterého můžeme odečíst hodnotu výkonu, dodávaného v té chvíli článkem do sítě. Tento přístroj mi byl zapůjčen z Katedry elektroenergetiky a ekologie ZČU. Jednalo se o přístroj I-V 400, který na trh dodává společnost HT. Tento přístroj je znázorněn na obr. 4.1. Jedná se o ideální přístroj I-V pro běžnou kontrolu fotovoltaických systémů. Pomocí něhož lze snadno nalézt poruchu v systému. Neměří jen V-A charakteristiku, ale měří i venkovní teplotu a intenzitu dopadajícího světla.

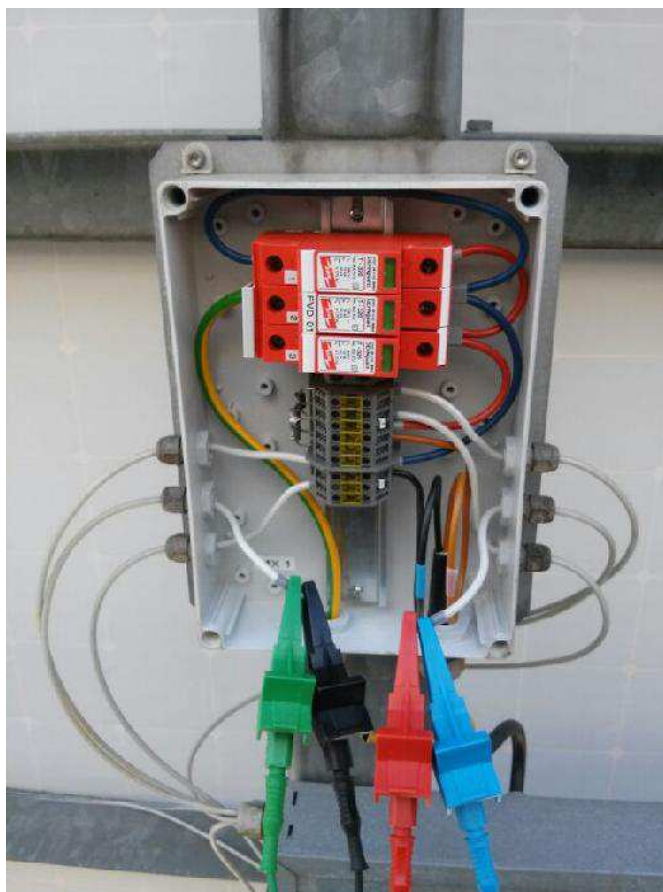


Obr. 4.1: Přístroj na měření V-A charakteristik FV panelů. [zdroj vlastní]

4.1 Postup měření V-A charakteristik

Samotné měření výkonů FV panelů spočívá v připojení čtyř sond na svorkovnici (viz obr. 4.2) a odečtení V-A charakteristiky z obrazovky přístroje. Na každé svorkovnici došlo ke 3 měřením. Výsledná V-A charakteristika tedy odpovídala osmi panelům spojených do série. Pokud bychom objevili chybu (tedy poruchu panelu), postupně bychom změřili panel po panelu, dokud bychom nenašli vadný kus. Na základě získaných výsledků jsme toto následné měření dělat nemuseli. Měření probíhalo při venkovní teplotě 9 °C a teplotě panelu 17 °C. Hodnota intenzity slunečního záření byla 665 mW/cm².

Jak je vidět z obr. 4.2, dvě sondy se připojují na plusový vývod (červená a modrá sonda) a dvě na vývod minusový (barva zelená a černá). Z přístroje jsou vyvedeny ještě dvě sondy a to na měření venkovní teploty a měření intenzity světelného záření. Sonda světelného záření musí být přiložena na právě měřený FV panel. Po spuštění měření přístroj zaznamená hodnoty maximálního výkonu, proudu protékajícího obvodem, napětí a vykreslí V-A charakteristiku.



Obr. 4.2: Otevřená svorkovnice se zavedenými sondami. [zdroj vlastní]

Měření probíhalo od svorkovnice MX8 a postupovalo sestupně podle čísel až ke svorkovnici MX1. Začali jsme vždy shora soustavy, tedy panely 1-8. Tento postup je zjevný z obr. 4.3.

1	2	3	4
5	6	7	8
9	10	11	12
13	14	15	16
17	18	19	20
21	22	23	24

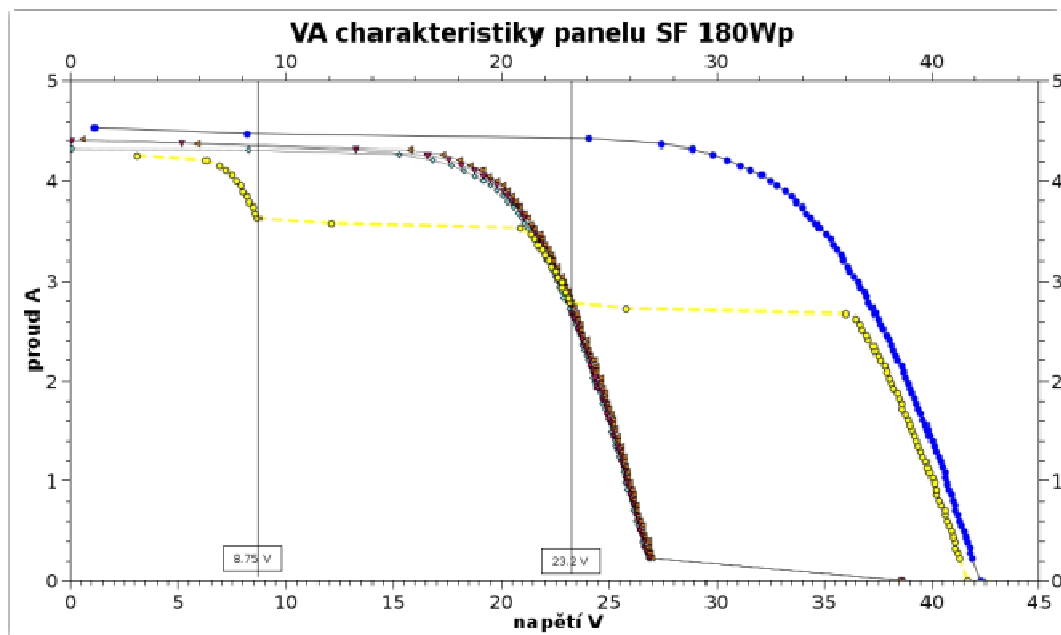
Obr. 4.3: Nákres části FV systému s číselným označením jednotlivých panelů. [zdroj vlastní]

Poté jsme pokračovali dále panely 9-16 a jako poslední jsme na svorkovnici měřili spodní panely 17-24. U další svorkovnice jsme panely číslovali od hodnoty 25 a dále.

4.2 Výsledky měření V-A charakteristik

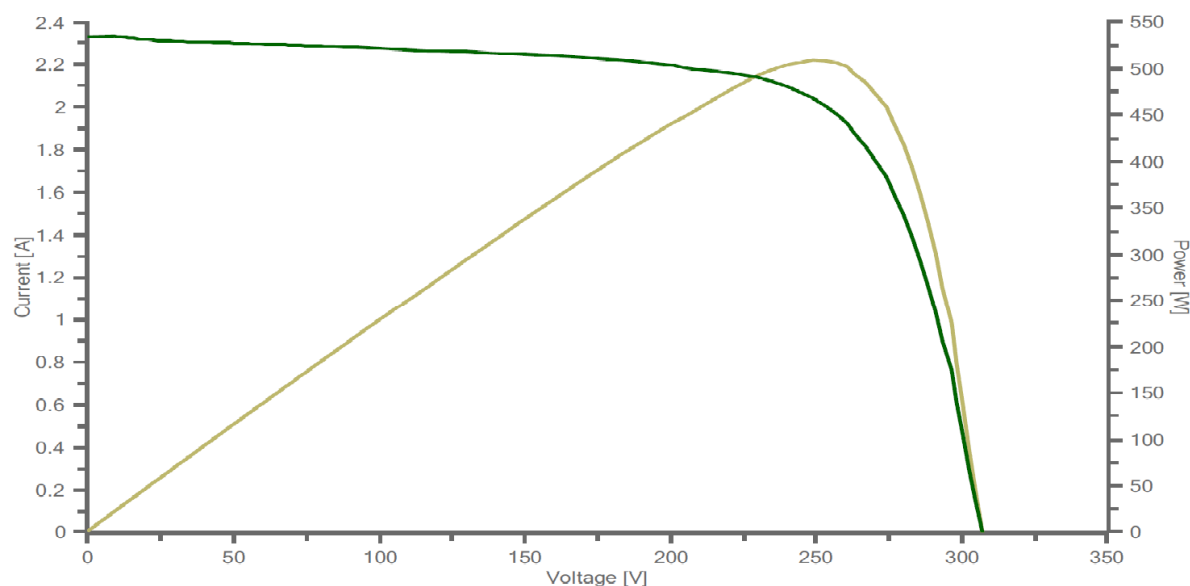
Výsledné V-A charakteristiky jsme převedli do programu Topview, kde byly dále upravovány. Tento program umožňuje snadnou analýzu dat.

V případě, že panel obsahuje závadu, je jeho V-A charakteristika zborcená, jak je vidět na obr. 4.4. Vadný panel je označen žlutou barvou. V obrázku je pro porovnání znázorněna i voltampérová charakteristika správně fungujícího panelu, která je označena modrou barvou. Závada zde může být způsobena několika faktory, např. se jedná o špatné pospojování kontaktů nebo závadné diody.



Obr. 4.4: V-A závadného panelu. [13]

Výsledná V-A charakteristika pro prvních osm sériově zapojených panelů je vidět na obr. 4.5, ostatní výsledky jsou shrnuty v příloze. Zelená barva vždy označuje V-A charakteristiku soustavy, žlutá značí křivku výkonu. Maximální výkon dodávaný touto skupinou panelů do nn sítě je 508,23 W. Další důležité hodnoty jsou uvedeny v tab. 4.1.



Obr. 4.5: V-A charakteristika prvních osmi FV panelů. [zdroj vlastní]

Kromě maximálního dodávaného výkonu (P_{\max}) jsou to např. hodnoty U_{mpp} a I_{mpp} , které vytyčují maximální obdélník, jehož plocha odpovídá maximálnímu výkonu (viz kapitola 2.2), a hodnota U_{oc} , která představuje maximální napětí, kdy výkon dodávaný do sítě je nulový.

Tab. 4.1: Naměřené hodnoty pro prvních osm panelů.

	P_{\max} [W]	U_{oc} [V]	U_{mpp} [V]	I_{mpp} [A]	Okolní teplota [$^{\circ}\text{C}$]
Naměřené hodnoty	508,23	306,96	249,24	2,04	9

4.3 Závěry z měření V-A charakteristik

Po proměření všech voltampérových charakteristik a jejich pečlivém prozkoumání jsme neobjevili žádnou vnější závadu, neboť všech 24 V-A charakteristik mělo řádný průběh. Z toho lze usoudit, že všechny články pracují bez výrazného poškození a nepotřebují tedy vyměnit.

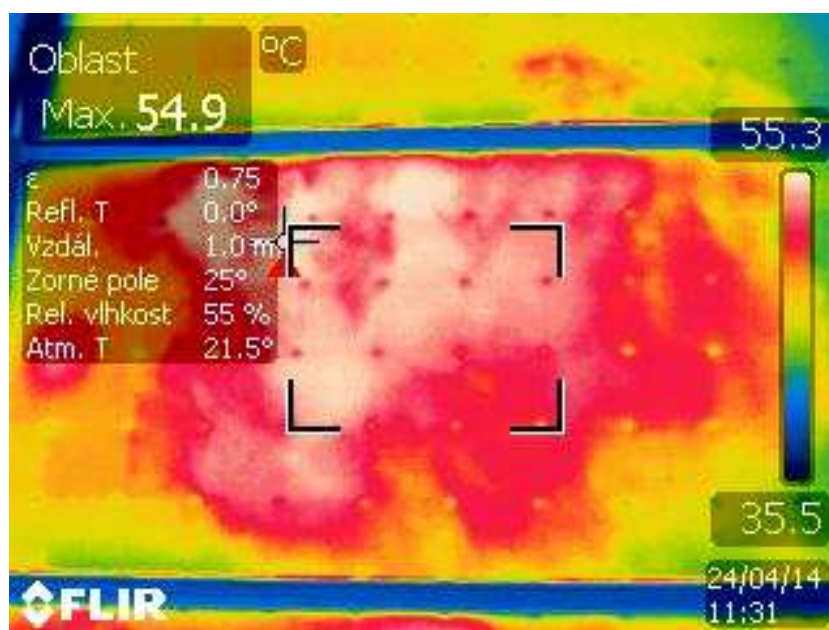
4.4 Výsledky měření termokamerou

V případě naměření zdeformované V-A charakteristiky panelu můžeme dál hledat vadu pomocí termokamery, která umožňuje detailní náhled na článek. Na obr. 4.6 je ukázán detailní záběr na článek. Na tomto obrázku je vidět správné teplotní rozložení, jde tedy o článek bez vad.



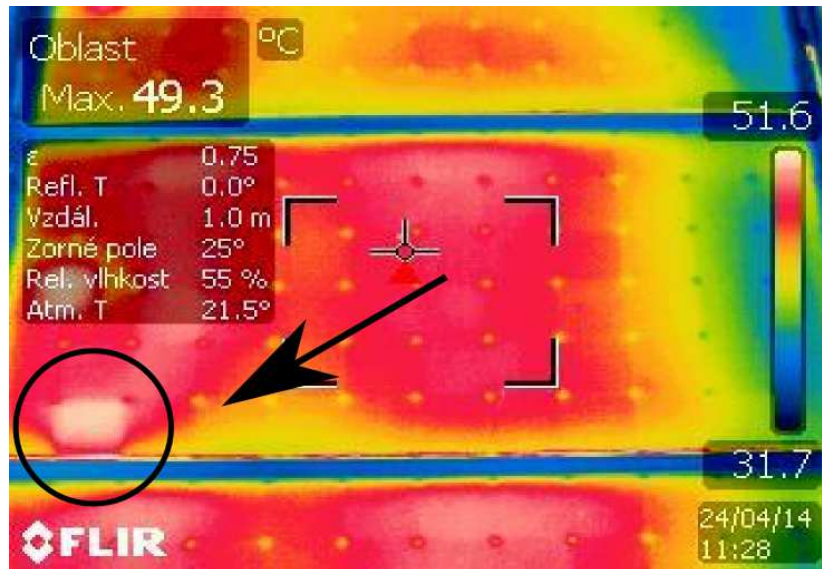
Obr. 4.6: Detailní náhled na FV článek termokamerou. [14]

Pokud nejsou panely poškozené, mají v celém systému přibližně stejnou teplotu. Pokud se podíváme detailněji na obrázky 4.6 a 4.7, žluté okraje (nižší teploty) jsou způsobeny lepším ochlazováním na okrajích článků. Aby se výsledky daly dobře porovnávat, měly by se při měření dodržovat podmínky STC (popsané v kapitole 2.2.). Na obr. 4.7 nedošlo k dodržení těchto podmínek, z tohoto důvodu je zde patrná tzv. mlhovina. Tato mlhovina je způsobena odrazem paprsků od mraků.

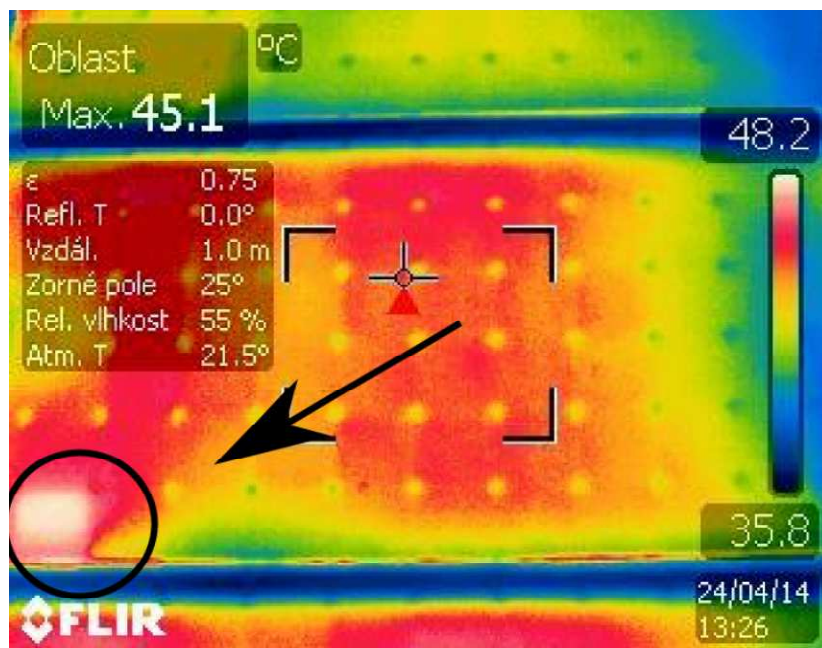


Obr. 4.7: Detailní náhled na FV článek s mlhovinou. [14]

Článek, který obsahuje vadu, se projevuje výraznějším místem. Jedná se tedy o místo, kde bude výrazně zvýšená teplota. Na obr. 4.8 je toto místo označené šipkou. Tuto vadu jsme nafotili ještě jednou a to z větší blízkosti, jak je vidět na obr. 4.9.

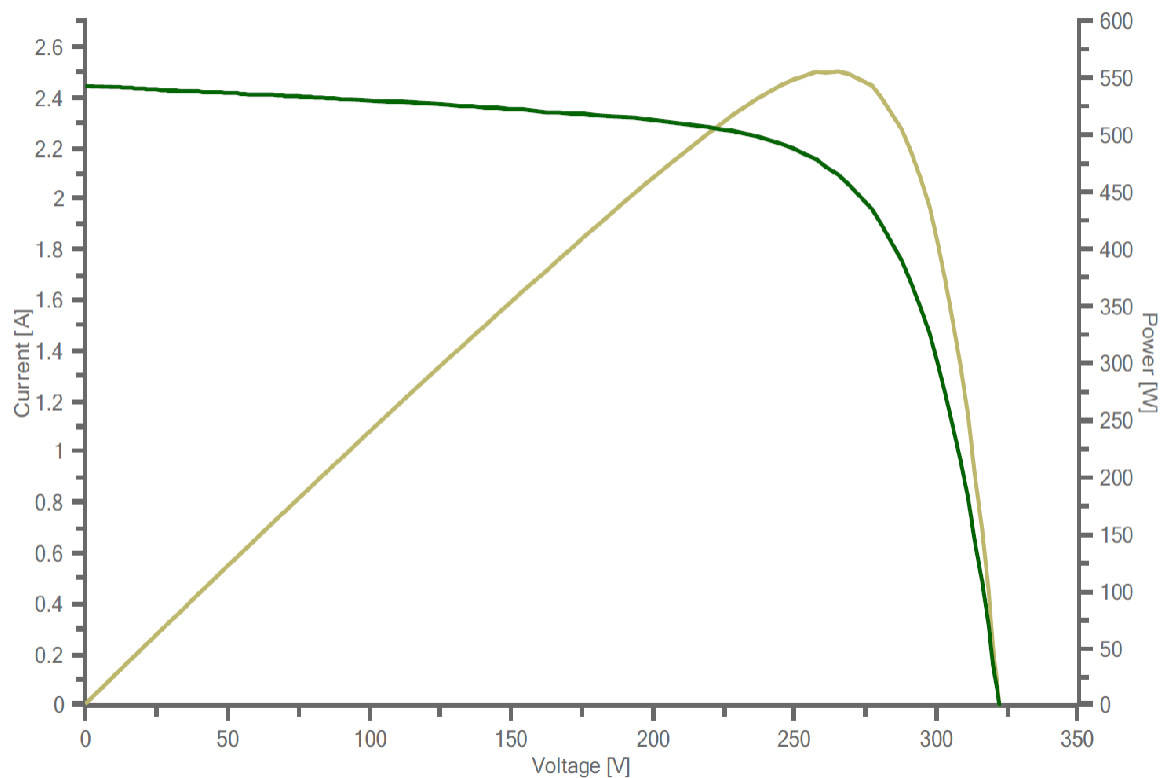


Obr. 4.8: Náhled na FV článek s vadou. [14]



Obr. 4.9: Detailní náhled na FV článek s vadou. [14]

Tato vada je způsobena špatnými spojem článků. Po proměření celé FV elektrárny jsme našli několik defektů. Z důkladného prozkoumání V-A charakteristiky ale vyplývá, že se nejedná o poškození panelu, ale o špatné odizolování krabičky umístěné na jeho druhé straně. V tomto případě ani nedochází k ochlazování okrajů článku a to z důvodu pevného připojení krabičky na zadní stranu panelu.



Obr. 4.12: V-A charakteristika panelu, která nepotvrdila poruchu. [zdroj vlastní]

4.5 Vyhodnocení výsledků měření

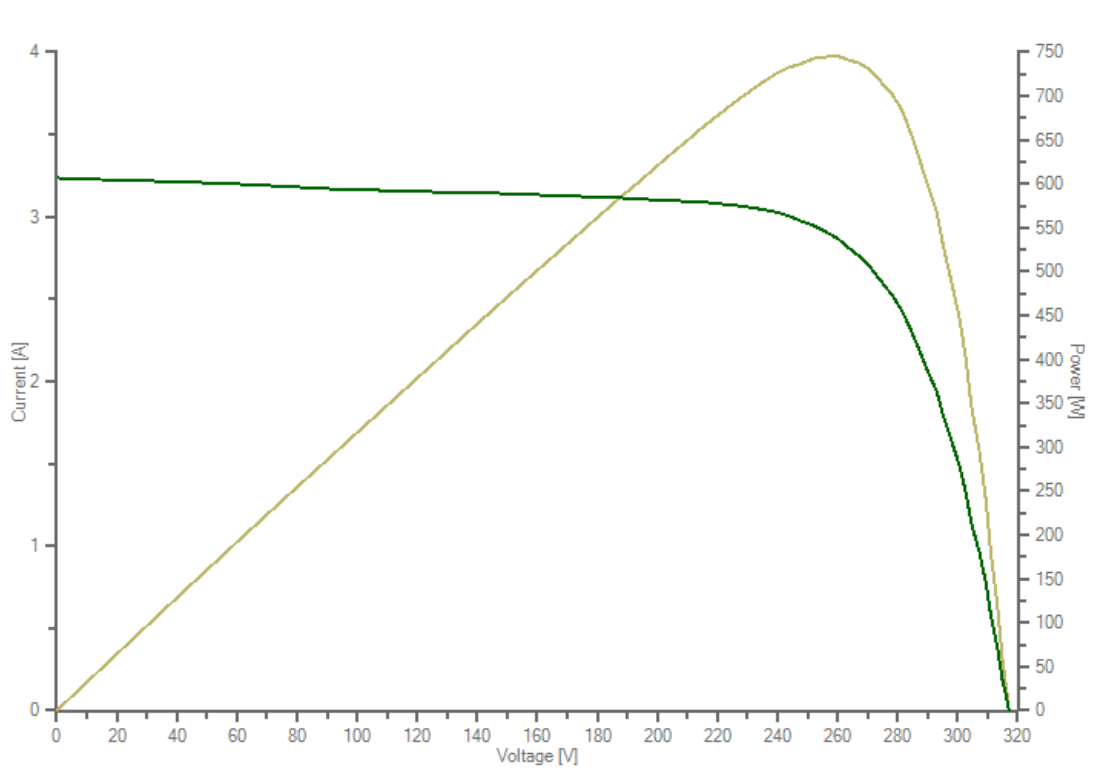
Záběry z termokamery odhalily teplejší místa způsobená špatným chlazením. Tento problém se ale nezdá být příliš výrazný. U závady teplotního pásu jsme ověřovali vadu na naměřené V-A charakteristice. Tato vada se zde neprojevila a při opakovaném měření termokamerou se již neobjevil ani teplotní pás.

5 Ekonomické zhodnocení

V této části práce se budeme věnovat ekonomické ztrátě vzniklé případnými vadami panelů. Voltampérové charakteristiky ukázaly, že žádný ze 192 panelů není výrazně poškozen. To ale neznamená, že by elektrárně nedocházelo k žádným ztrátám. Především se jedná o ztráty způsobené teplotou panelů, které výrazně snižují množství vyrobené elektřiny.

5.1 Posouzení ekonomické ztráty

Při detailnějším pohledu na V-A charakteristiky jsou zde patrné velké rozdíly, a to hlavně v maximální hodnotě výkonu dodávaného do sítě. Když porovnáme dvě voltampérové charakteristiky z hlediska maximálního dosaženého výkonu a vyčíslíme procentuální rozdíl, můžeme zjistit, o kolik jedna měřená soustava (skupina 8 sériově spojených F panelů) vyrábí více než druhá. Maximální naměřený výkon je vidět na obr. 5.1, dosahoval zde hodnoty 750 W.



Obr. 5.1: V-A charakteristika panelů 161-168. [zdroj vlastní]

Zatímco hodnota maximálního výkonu byla 750 W, nejmenší naměřený výkon měl hodnotu 508,23 W (viz obr. 6.1). To znamená, že v tomto případě druhá skupina panelů dodává do soustavy jen 67,76 % maximálního dosaženého výkonu skupiny první (soustavy panelů s maximálním naměřeným výkonem), tj. o 32,24 % méně.

Vzorec pro výpočet poměrného procentuálního výkonu je zobrazen jako vztah (5.1). Na základě určení tohoto poměru stanovíme i poměrnou cenu, kterou by bylo možno získat při daném výkonu za prodej elektřiny dodané do sítě (vztaženo na 1 kWh) jednotlivými skupinami panelů.

$$P_{proc} = \frac{P_{měř}}{P_{max}} \cdot 100 \quad (5.1)$$

kde:

- P_{proc} [%] - procentuální výkon,
 $P_{měř}$ [W] - naměřený výkon,
 P_{max} [W] - maximální naměřený výkon.

Výkupní cena elektrické energie ze Slunce se v průběhu let výrazně mění, což je názorně vidět v tab. 5.1.

V naší analýze jsme pro výpočet na základě Cenového rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 4/2013 ze dne 27. listopadu 2013 použili výkupní cenu elektřiny pro FV zdroje uvedené do provozu před 31. 12. 2005, tedy 7,418 Kč/kWh.

Tab. 5.1: Vývoj výkupní ceny elektřiny z FVE do 30 kW. [15]

Rok	2004	2005	2006	2007	2008
Cena [Kč/kWh]	6	6,04	13,2	13,46	13,46
Rok	2009	2010	2011	2012	2013
Cena[Kč/kWh]	12,79	12,25	7,5	6,16	2,83 – 1. pol., 2,43 – 2. pol.

Pokud by tedy všechny panely vyrobily naměřené maximum tj. 750 W, celkový výkon elektrárny (24 skupin panelů) by dosáhl hodnoty 18 kW. Z toho vyplývá, že maximální cena, kterou je možné u této elektrárny získat za 1 h dodávky elektřiny do sítě, je 133,524 Kč. Cena, kterou je možno získat za energii dodanou jednou soustavou (8 panelů) za 1 hodinu při hodnotě dodávaného výkonu 750 W je 5,564 Kč.

V tab. 5.2 je uveden procentuální výkon jednotlivých soustav panelů, oproti výkonu maximálnímu (750 W). A dále je zde vidět cena, kterou lze získat za elektrickou energii dodanou během hodiny do ES příslušnou skupinou panelů.

V následující tab. 5.3 jsou shrnuty výše uvedené veličiny pro celou FV elektrárnu. Jak je vidět elektrárna dodává jen 87,13 % maximálního dosažitelného výkonu, což může být způsobeno teplotními ztrátami fotovoltaických panelů. Právě tyto ztráty pak mají vliv na cenu získanou z prodeje elektřiny, která je hodinově oproti max. možné hodnotě o 11,637 Kč nižší.

Tab. 5.2: Porovnání ceny elektřiny a max. naměřeného výkonu u jednotlivých skupin FV panelů.

Soustava panelů	Naměřený výkon [W]	Poměrný procentní výkon [%]	Cena [Kč]
1-8	508,23	67,76	3,770
9-16	512,08	68,28	3,799
17-24	555,40	74,05	4,120
25-32	586,01	78,13	4,347
33-40	560,40	74,72	4,157
41-48	605,50	80,73	4,492
49-56	606,12	80,82	4,497
57-64	590,80	78,77	4,383
65-72	636,20	84,83	4,720
73-80	614,76	81,97	4,561
81-88	654,05	87,21	4,852
88-96	671,32	89,51	4,980
97-104	671,31	89,51	4,980
105-112	632,11	84,28	4,689
113-120	701,29	93,51	5,203
121-128	696,66	92,89	5,168
129-136	734,60	97,95	5,450
137-144	690,50	92,07	5,123
145-152	733,50	97,80	5,442
153-160	750,00	100,00	5,564
161-168	732,70	97,60	5,430
169-176	746,81	99,57	5,540
177-184	748,20	99,76	5,551
185-192	745,31	99,37	5,529

Tab. 5.3: Porovnání ceny elektřiny a výkonu FV elektrárny.

Stav	Naměřený výkon [W]	Poměrný procentní výkon [%]	Cena [Kč]
Posuzovaný	15 683,86	87,13	121,887
Ideální	18 000,00	100,00	133,524

5.2 Určení doby návratnosti

Z důvodu nenalezení poškozených FV panelů (elektrárna při měření pracovala na 87,13 % max. výkonu bez zjevných vad) se v současné době nevyplatí celková rekonstrukce elektrárny. Další důvod proč FVE nerekonstruovat je stále se snižující výkupní cena elektřiny ze solárních systémů (viz tab. 5.1). Právě z těchto důvodů jsem dobu návratnosti nepočítal.

Závěr

Tato bakalářská práce shrnuje základní důležité poznatky týkající se problematiky využití FV systémů k výrobě elektřiny v souvislosti s ovlivněním výkonu panelů jejich teplotou či poškozením, příp. intenzitou slunečního záření.

V úvodní části jsem charakterizoval sluneční záření dopadající na Zemi, objasnil princip a možnosti jeho využití FV technologií a pomocí matematického modelu přiblížil fyzikální vlastnosti FV článku.

Hlavním cílem práce bylo zjistit, jak ovlivní teplota FV panelů výkon a množství vyrobené elektrické energie, dále na základě provedených měření posoudit současný stav FV článků již 10 let provozovaného systému a provést ekonomické zhodnocení.

Za tímto účelem jsem nejprve změřil voltampérové charakteristiky celého systému (viz příloha). Výsledky těchto měření jsem v práci podrobně rozebral, přičemž jsem vycházel z teoretického rozboru uvedeného v kapitole 2.2, díky kterému jsem mohl získané grafy dobře analyzovat.

Na záběrech z termokamery uvedených v kapitole 4.4, na kterých jsou dobře patrné rozdíly mezi zdravými a poškozenými články, jsem detailně popsal nejčastější vady, které mohou na FV článku nastat.

Po důkladném proměření fotovoltaické elektrárny umístěné na střeše Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni, jsem dospěl k názoru, že i po 10 letech nepřetržitého provozu je elektrárna v dobrém stavu a žádná část z naměřených skupin FV panelů nepotřebuje výměnu.

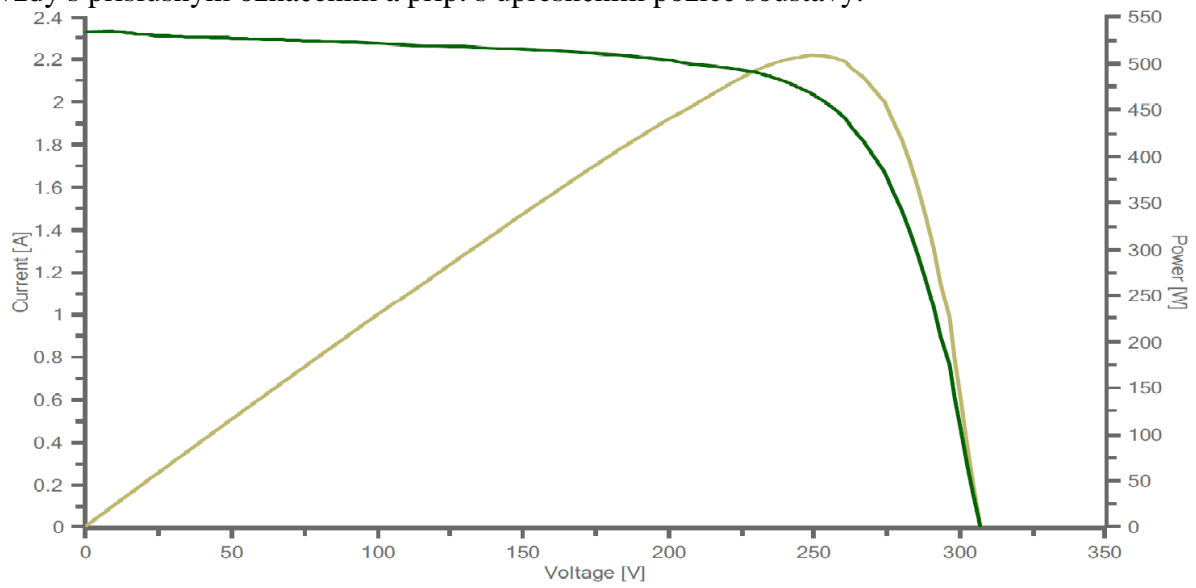
V závěru práce jsem provedl pro posuzovaný FV systém výpočet ekonomické ztráty, která mohla vzniknout z důvodu nepříznivého oteplení panelů. Z výsledků vyplynulo, že do ES je elektrárnou dodáváno 87,13 % maximálního možného výkonu, čímž je za 1 h způsobena celková peněžní ztráta ve výši 11,637 Kč.

Seznam literatury a informačních zdrojů

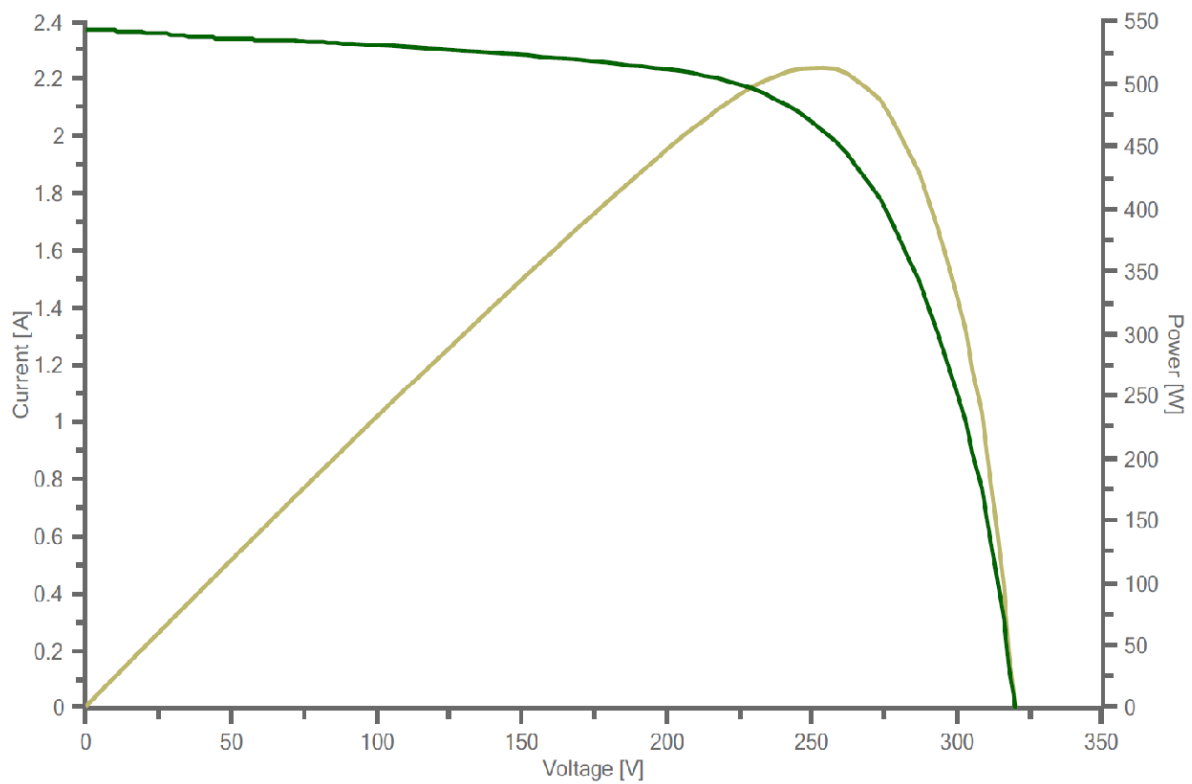
- [1] Cenka, M., Obnovitelné zdroje energie, FCC Public Praha, 2001, s. 204
- [2] Ginzburg, V. L., Astrofyzika, Nauka, Moskva, 1970, s. 275
- [3] Henze, Hillerbrand, Strom von der Sonne, Verlag GmbH, Freiburg, 2000, s. 136
- [4] Karamanolis, S., Sluneční energie, Sdružení MAC, Praha, 1996, s. 238
- [5] Kaminský, Vrtek, Obnovitelné zdroje energie, VŠB – Technická univerzita Ostrava, Ostrava, 1999, s. 102
- [6] Boyle ,G., Reneweble energy , Oxford, Amersham, 2012, s. 566
- [7] Doleček, J., Moderní učebnice elektroniky 2: Polovodičové prvky a elektronika, BEN-technická literatura, Praha, s. 208
- [8] Balák, R., Nové zdroje energie, SNTL, Praha, 1989, s. 205
- [9] Quasching, V., Obnovitelné zdroje energií, Grada Publishing, Praha, 2010, s. 296
- [10] Laboratoře a specializované pracoviště [online], [cit. 20. 5. 2014],
[www.<http://www.kee.zcu.cz/laboratore.html>](http://www.kee.zcu.cz/laboratore.html)
- [11] Škorpil, J., A přece se točí [online], [cit. 20. 5. 2014],
[www.<http://www.zcu.cz/u_noviny/index.html?file=/u_noviny/2012/duben/vrtul.html >](http://www.zcu.cz/u_noviny/index.html?file=/u_noviny/2012/duben/vrtul.html)
- [12] Hejtmánková, P, Problematika výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů, ZČU, Plzeň, 2005, s. 258
- [13] Solartec, PV test – Diagnostická laboratoř [online], [cit. 10. 5. 2014],
[www.<http://www.solartec.cz/rozsahle-instalace/provozovani-fve-elektraren/pv-test-diagnosticka-laborator>](http://www.solartec.cz/rozsahle-instalace/provozovani-fve-elektraren/pv-test-diagnosticka-laborator)
- [14] Schmidt, W., Analýza degradace 20 kWp FV systému, ZČU, Plzeň, 2014, s. 56
- [15] ERU, Vývoj výkupních cen větrné energie a ostatních obnovitelných zdrojů, [cit. 10. 5. 2014]
[www.<http://www.csve.cz/clanky/graf-vyvoje-vykupnich-cen/278>](http://www.csve.cz/clanky/graf-vyvoje-vykupnich-cen/278)

Přílohy

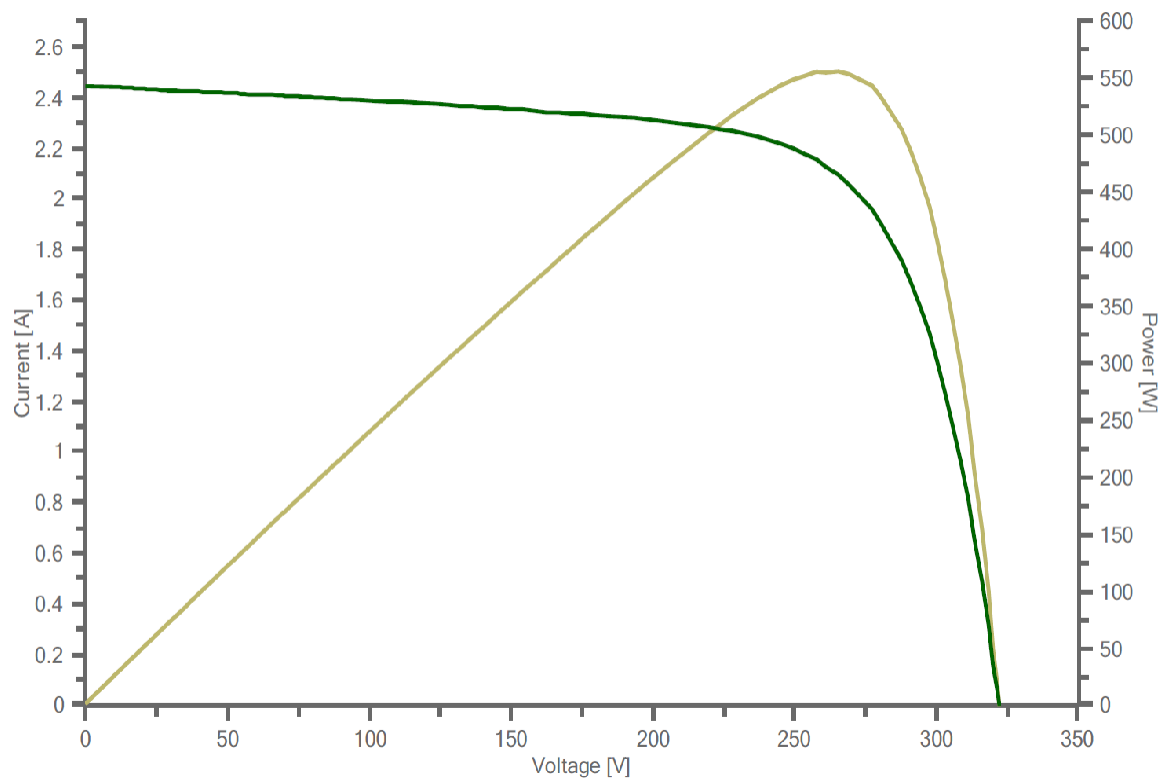
V příloze (viz obr. 6.1 – 6.25 [zdroj vlastní]) jsou shrnuty naměřené V-A charakteristiky, vždy s příslušným označením a příp. s upřesněním pozice soustavy.



Obr. 6.1: V-A charakteristika prvních osmi FV panelů.

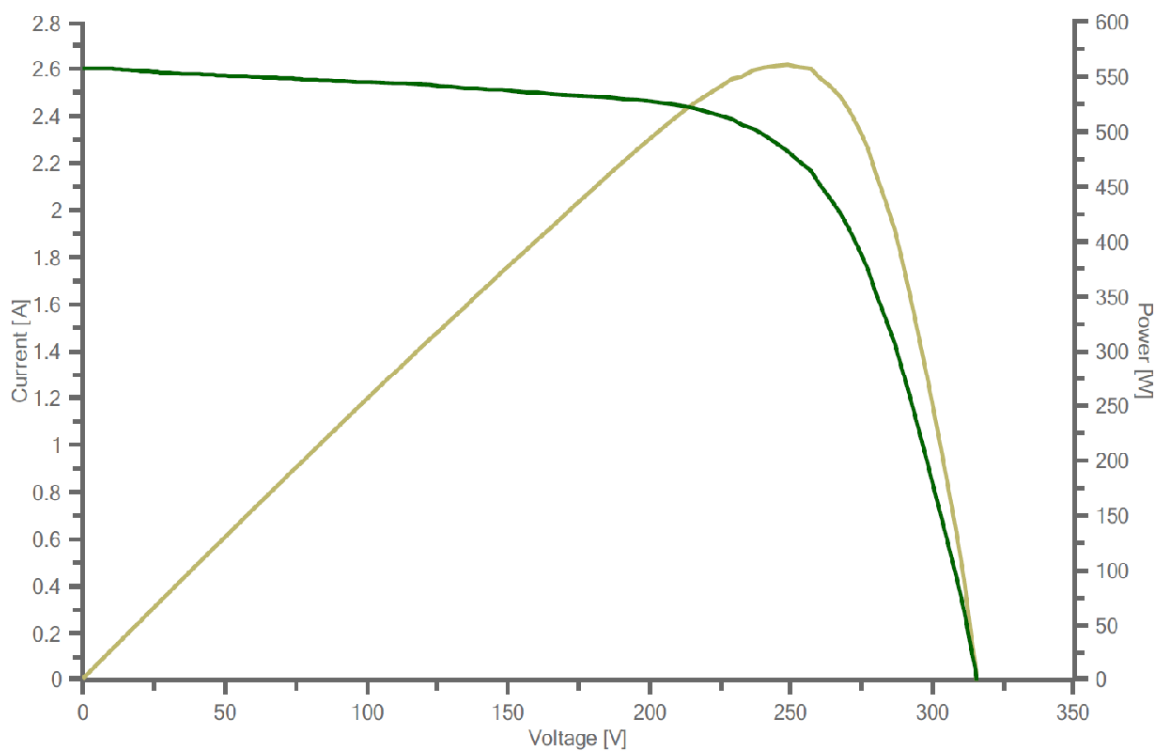


Obr. 6.2: V-A charakteristika panelů 9-16.

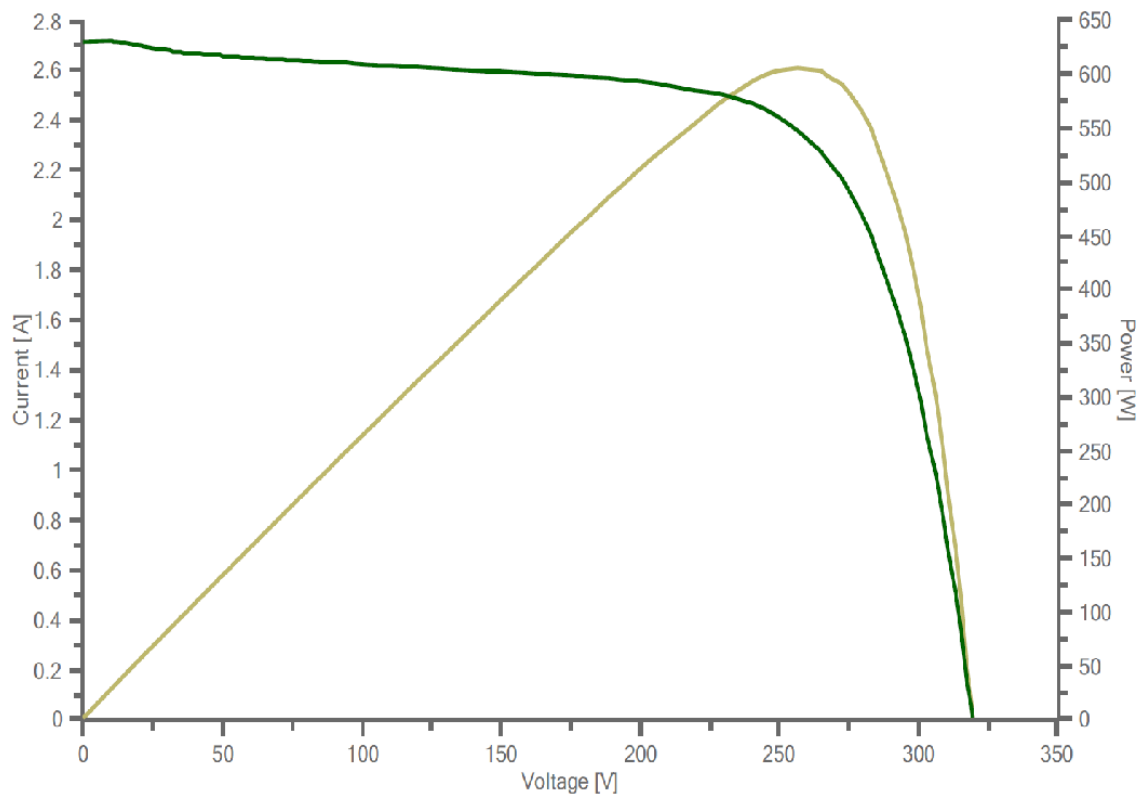


Obr. 6.3: V-A charakteristika panelů 17-24.

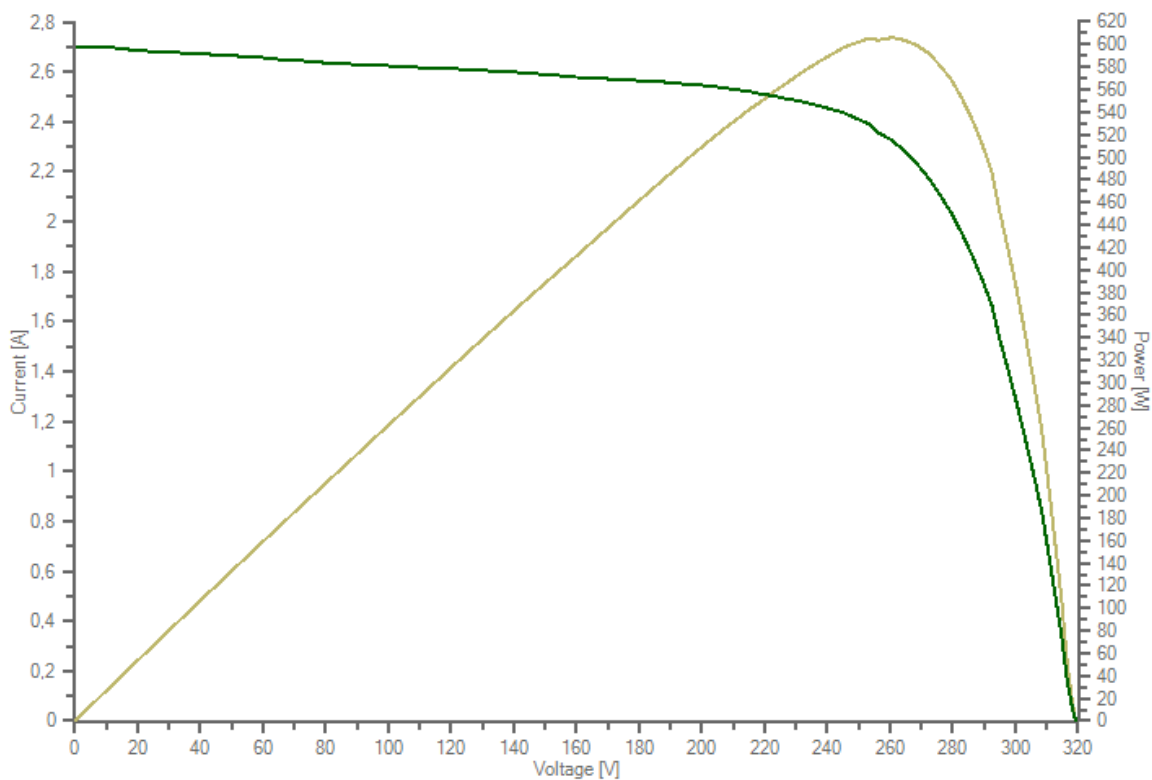
Panely 25 až 48 mají vývod v druhém střídači, s názvem MX7.



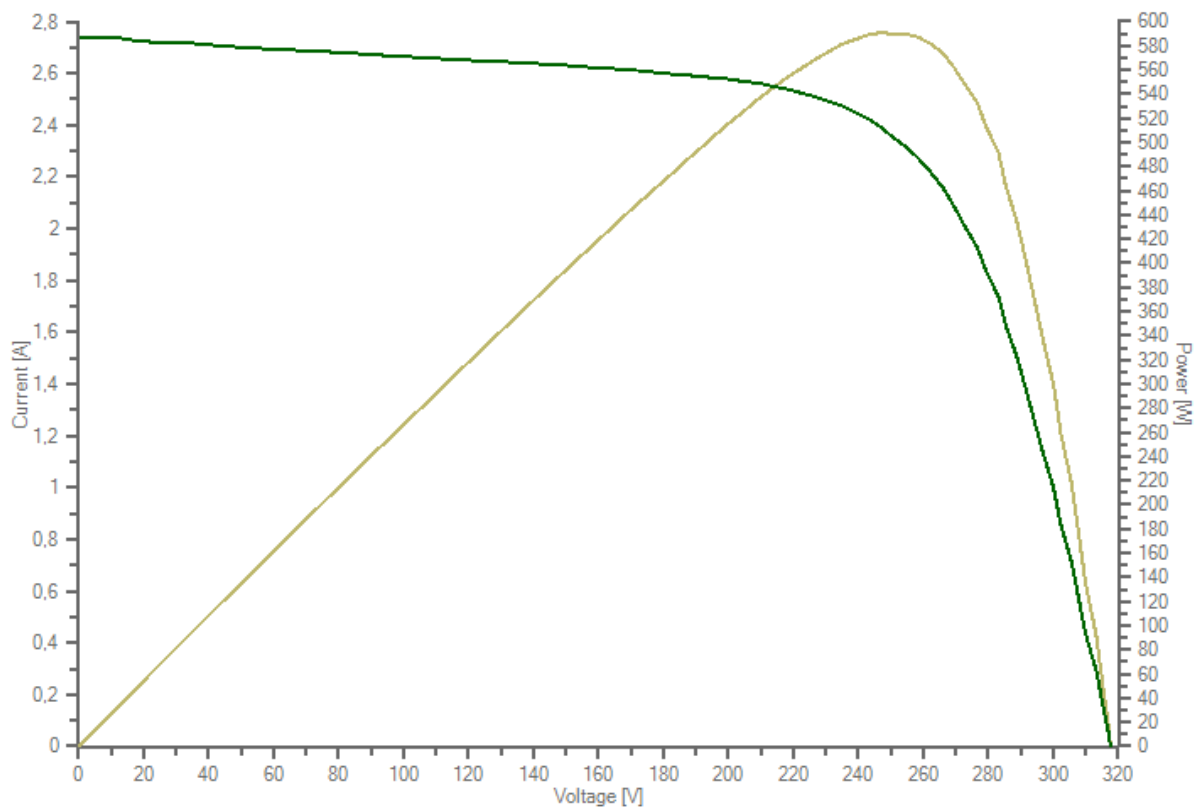
Obr. 6.4: V-A charakteristika panelů 25-32.



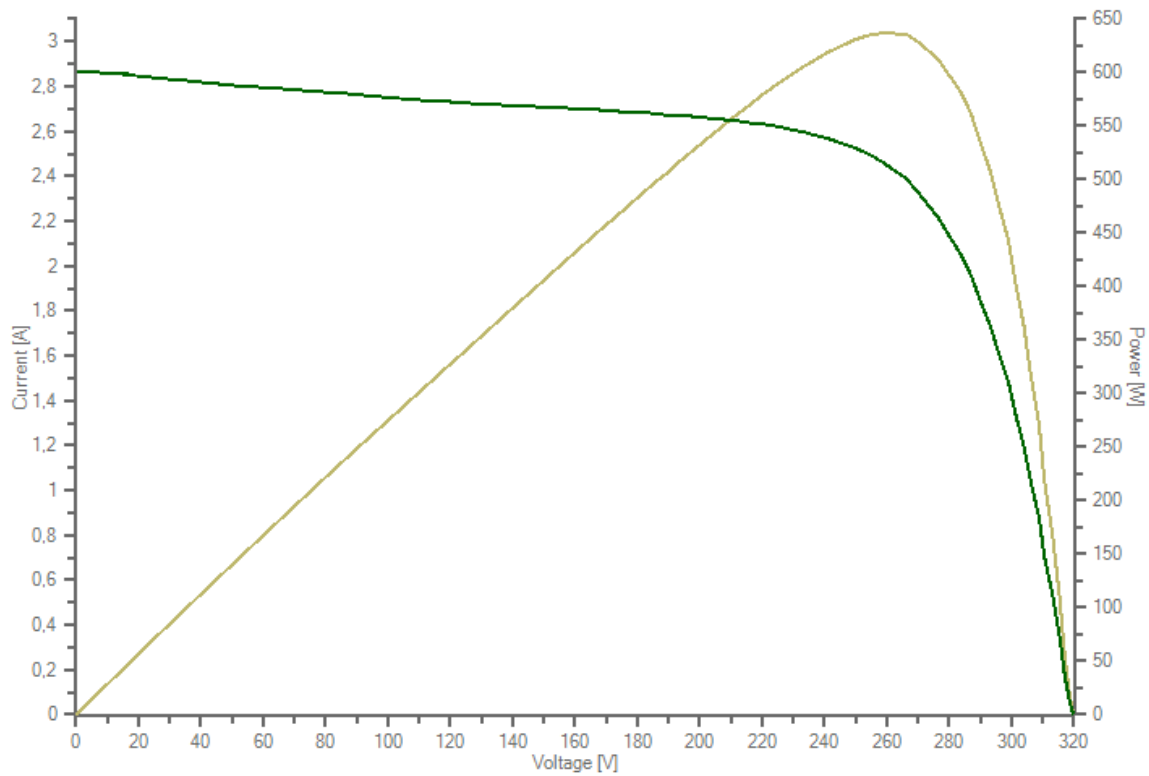
Obr. 6.5: V-A charakteristika panelů 33-40.



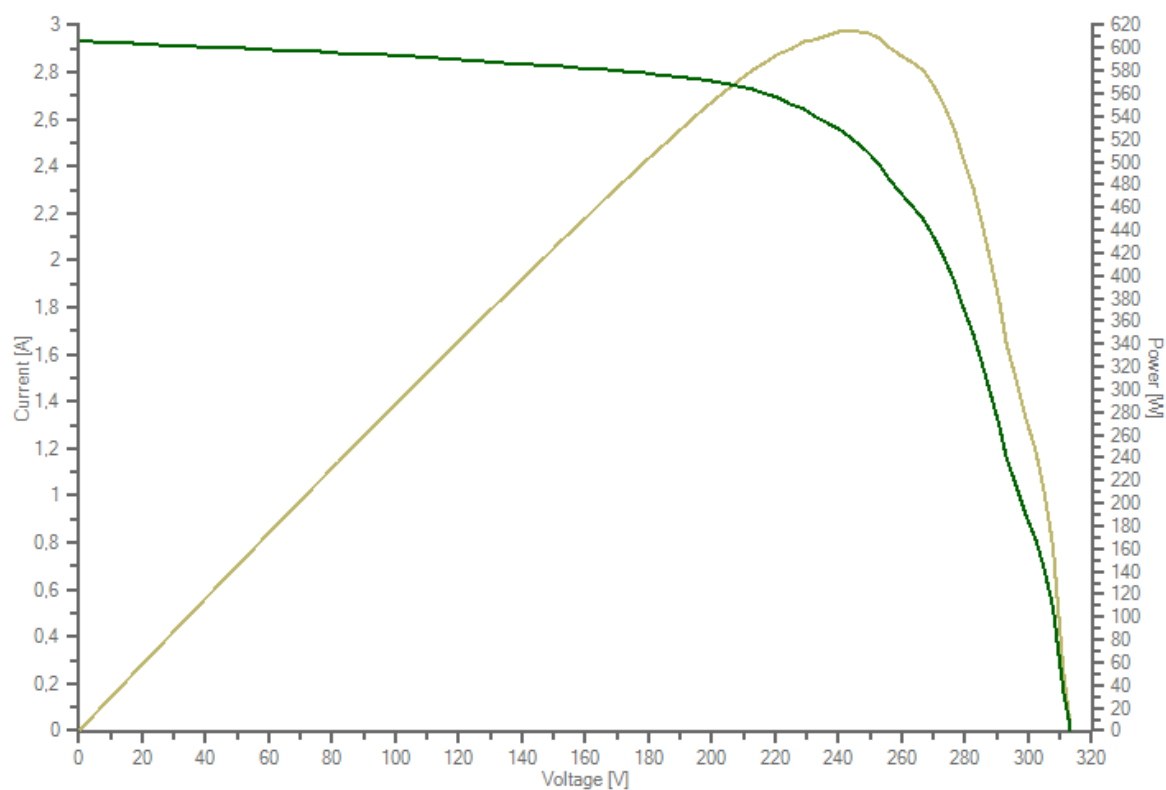
Obr. 6.6: V-A charakteristika panelů 41-48.



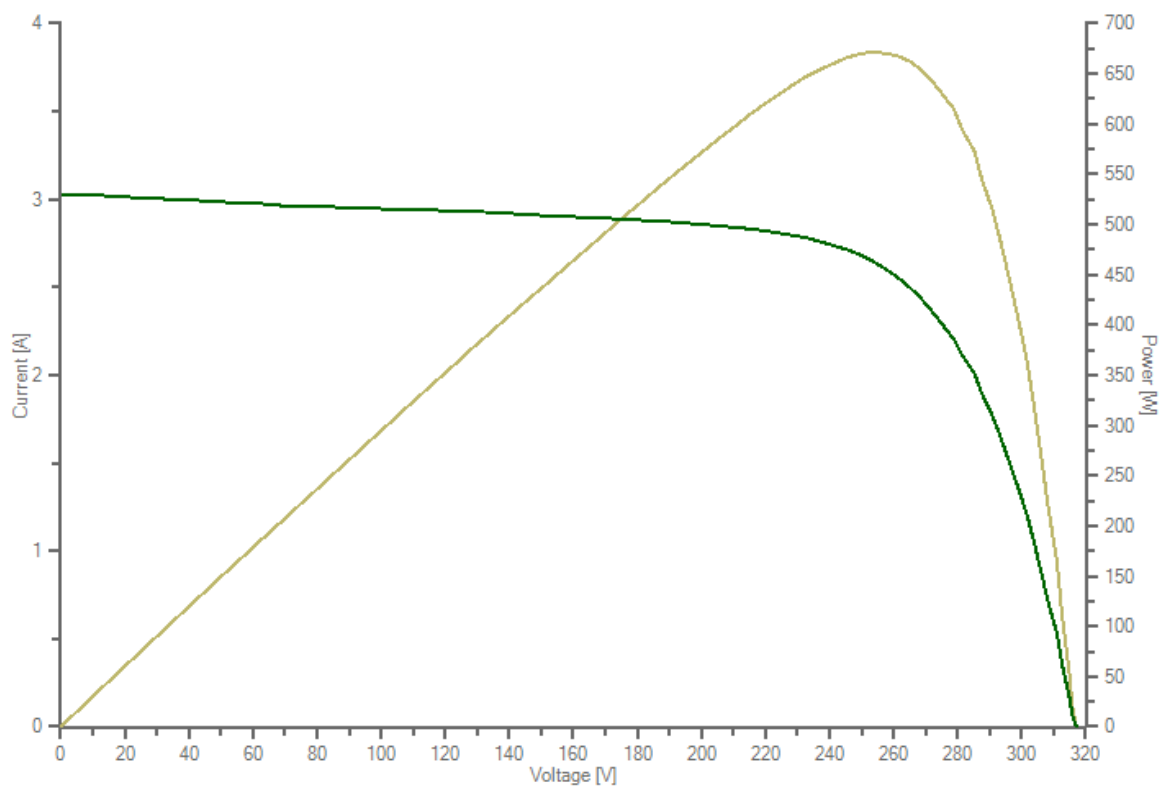
Obr. 6.7: V-A charakteristika panelů 49-56.



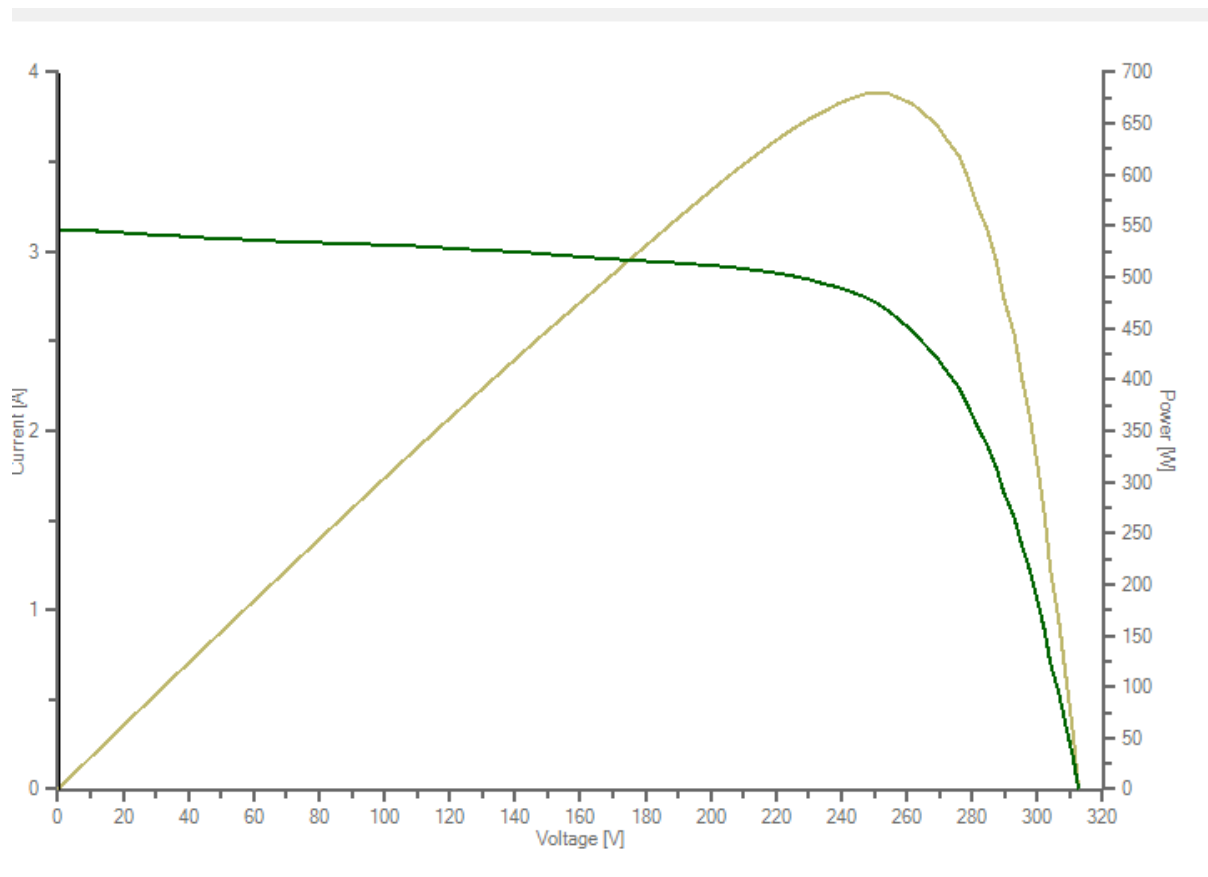
Obr. 6.8: V-A charakteristika panelů 57-64.



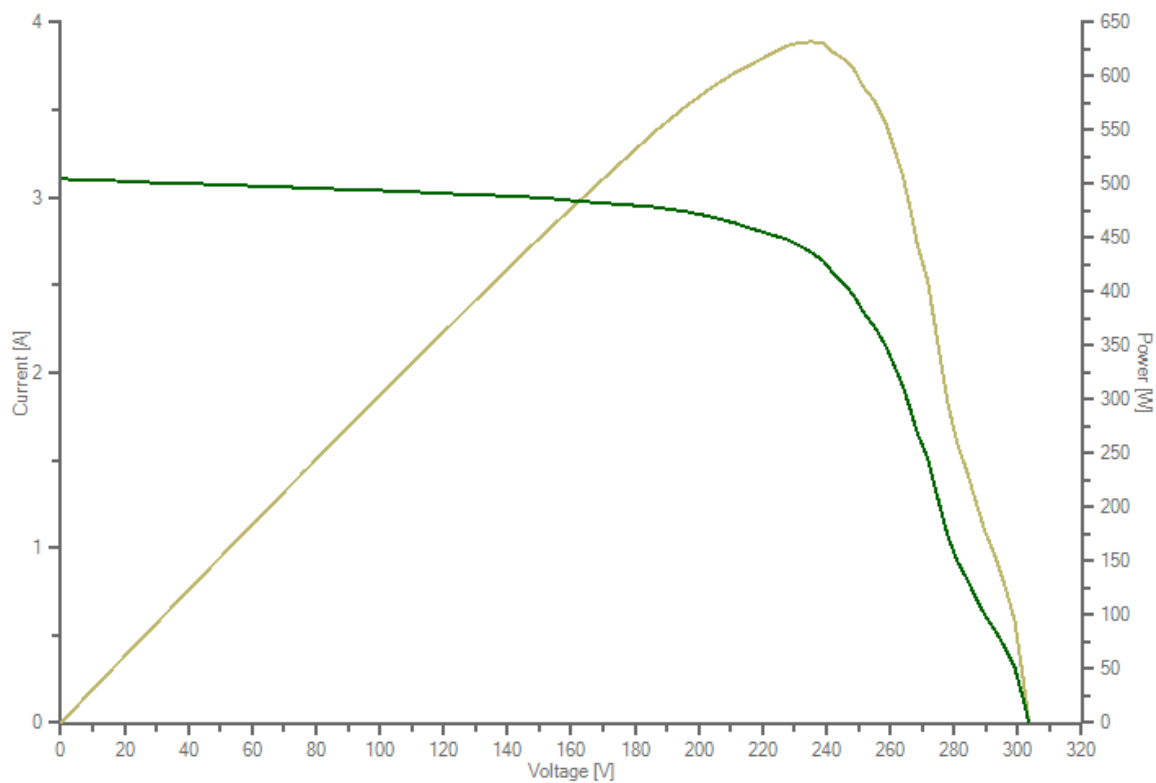
Obr. 6.9: V-A charakteristika panelů 65-72.



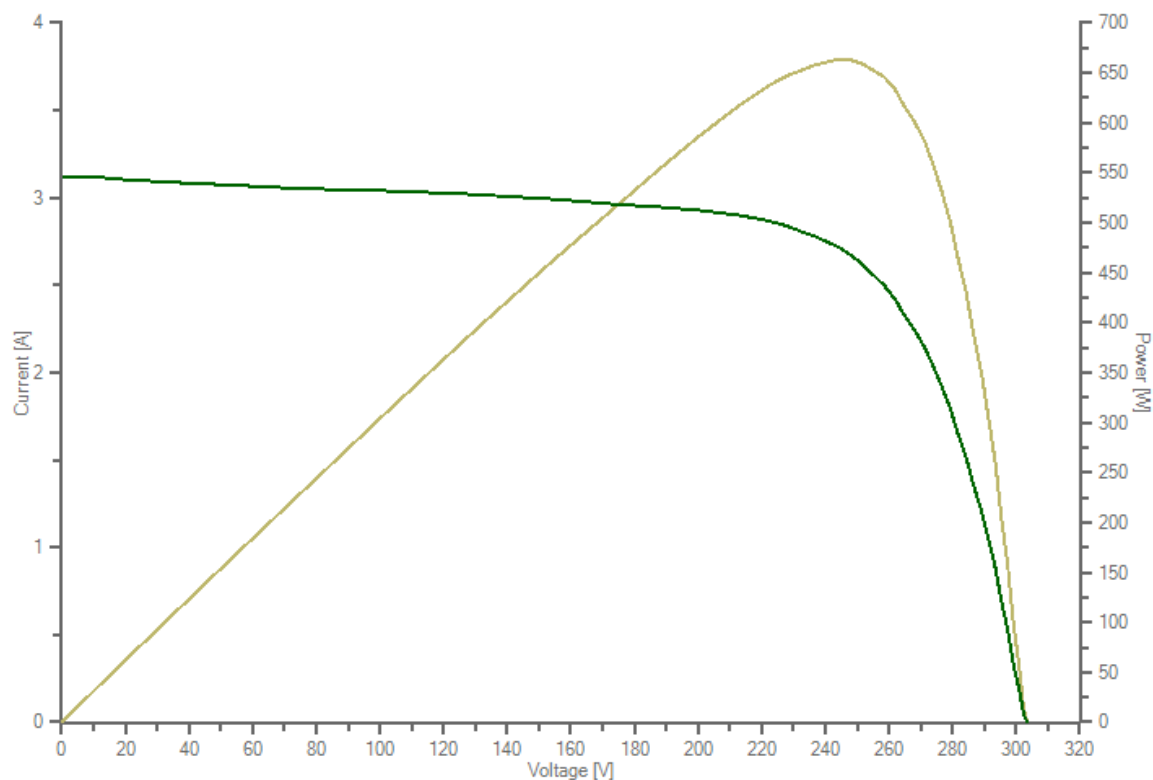
Obr. 6.10: V-A charakteristika panelů 73-80.



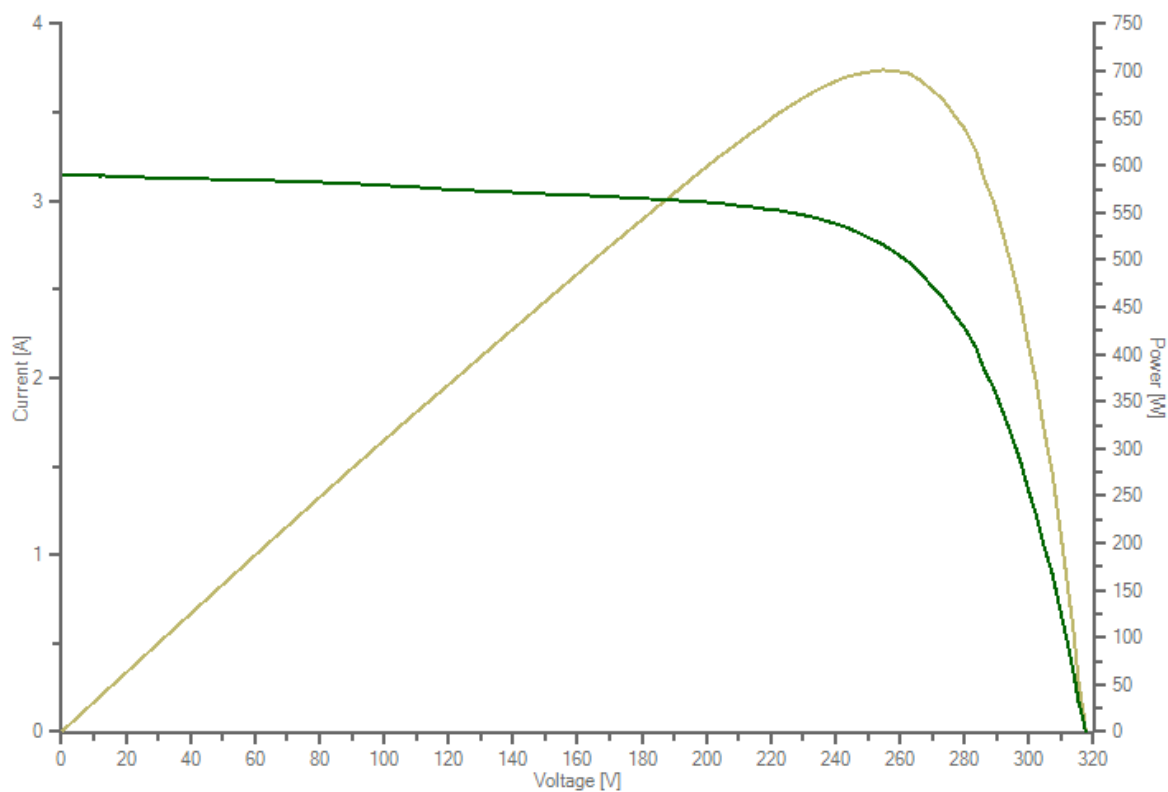
Obr. 6.11: V-A charakteristika panelů 81-88.



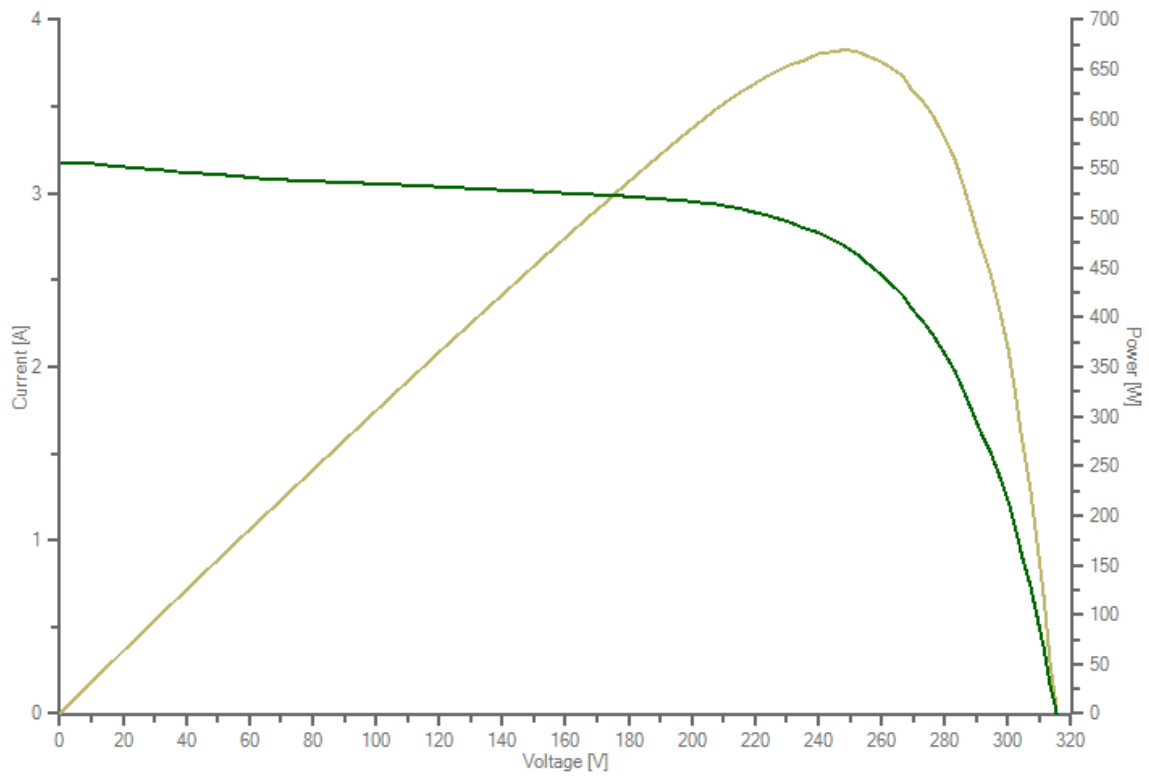
Obr. 6.12: V-A charakteristika panelů 89-96.



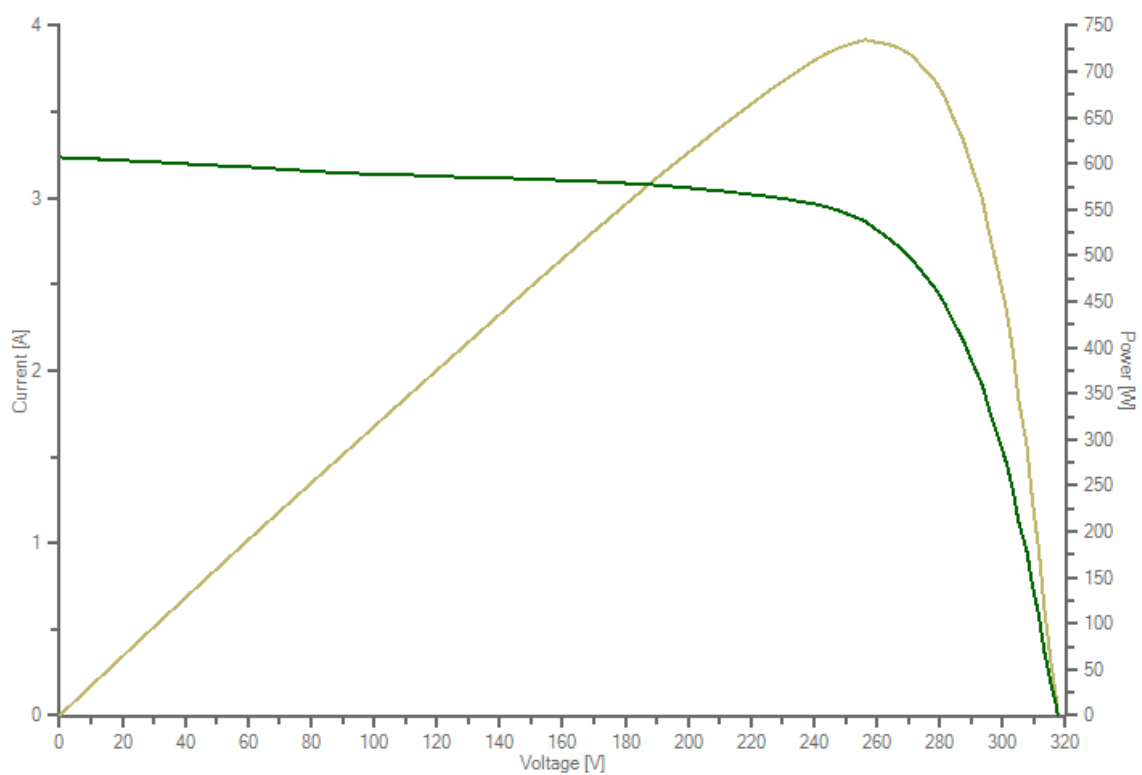
Obr. 6.13: V-A charakteristika panelů 97-104.



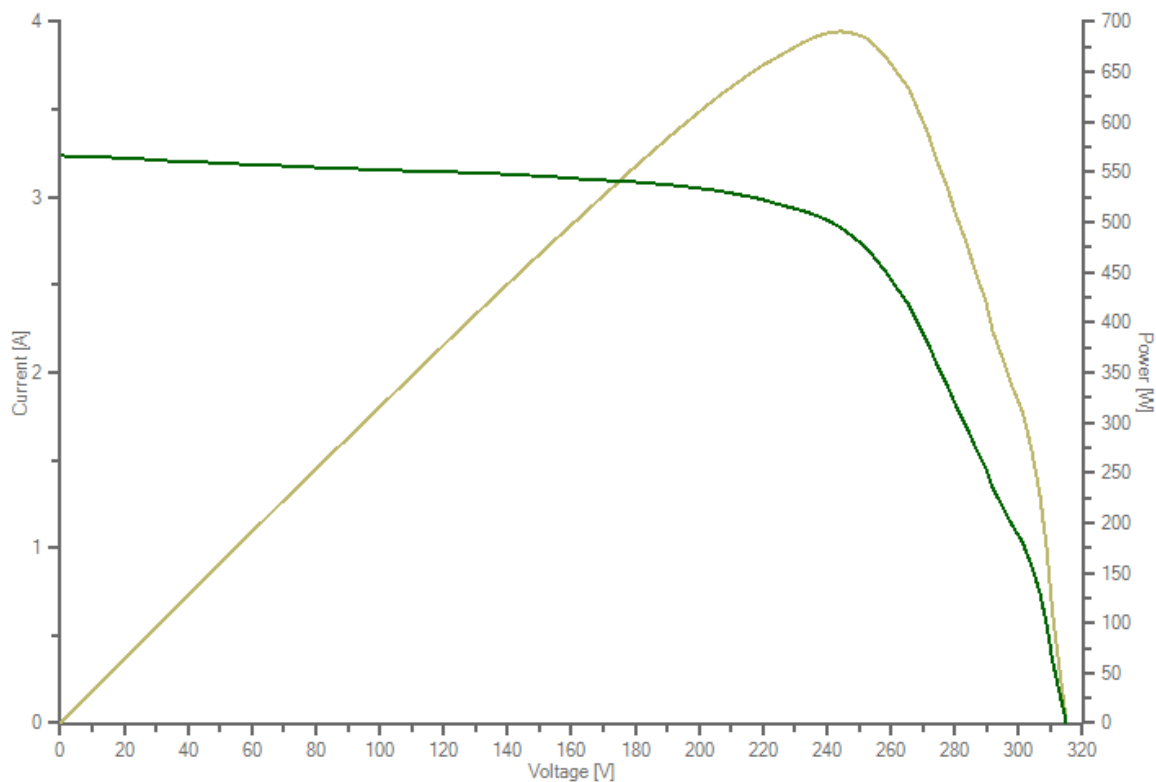
Obr. 6.14: V-A charakteristika panelů 105-112.



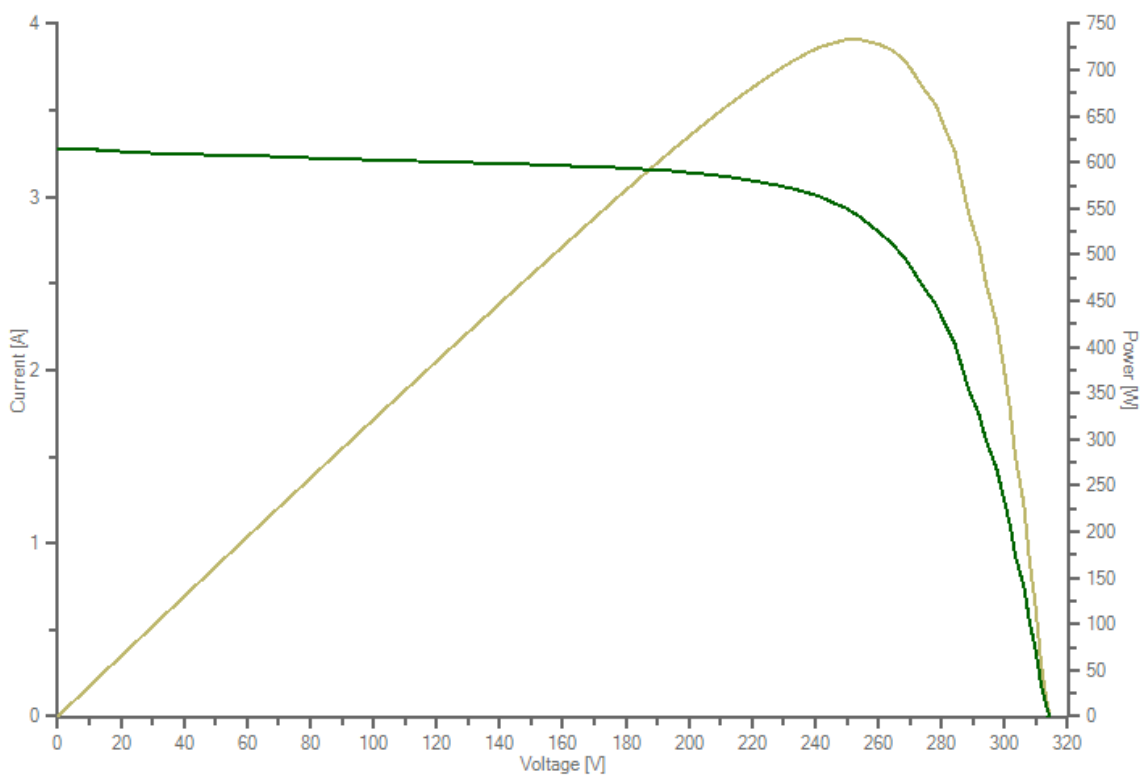
Obr. 6.15: V-A charakteristika panelů 113-120.



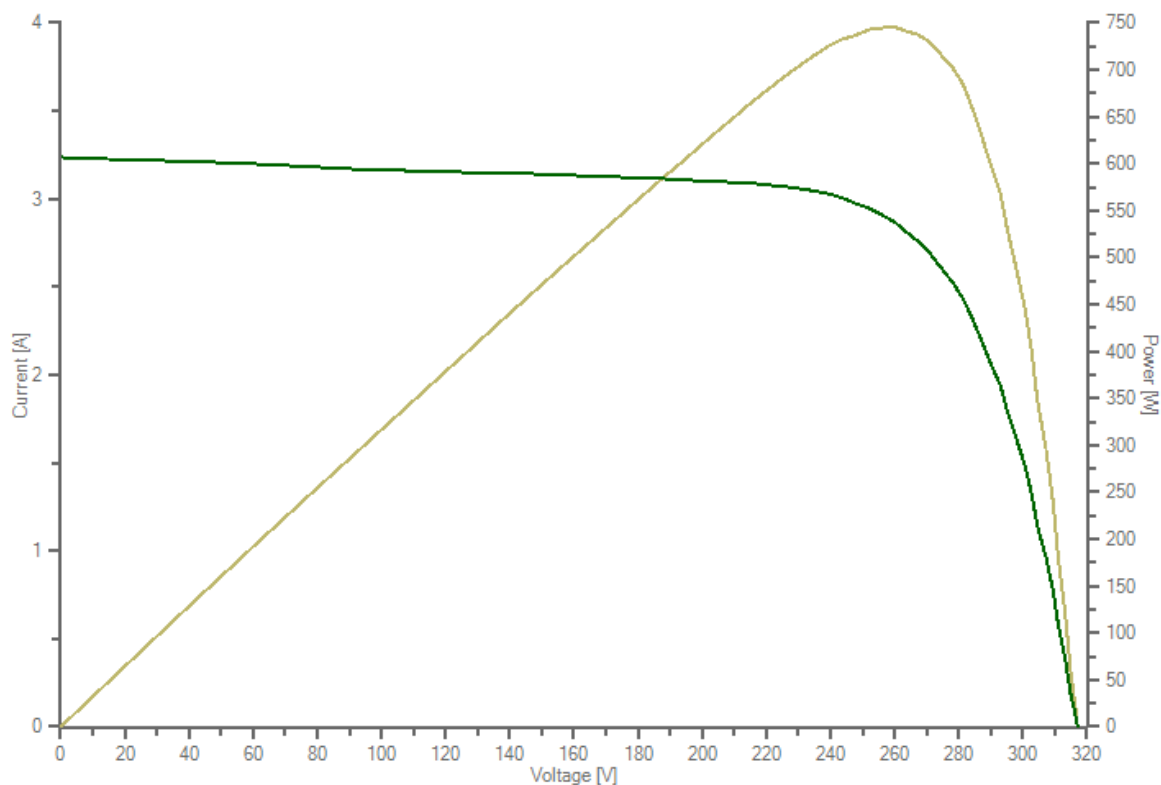
Obr. 6.16: V-A charakteristika panelů 121-128.



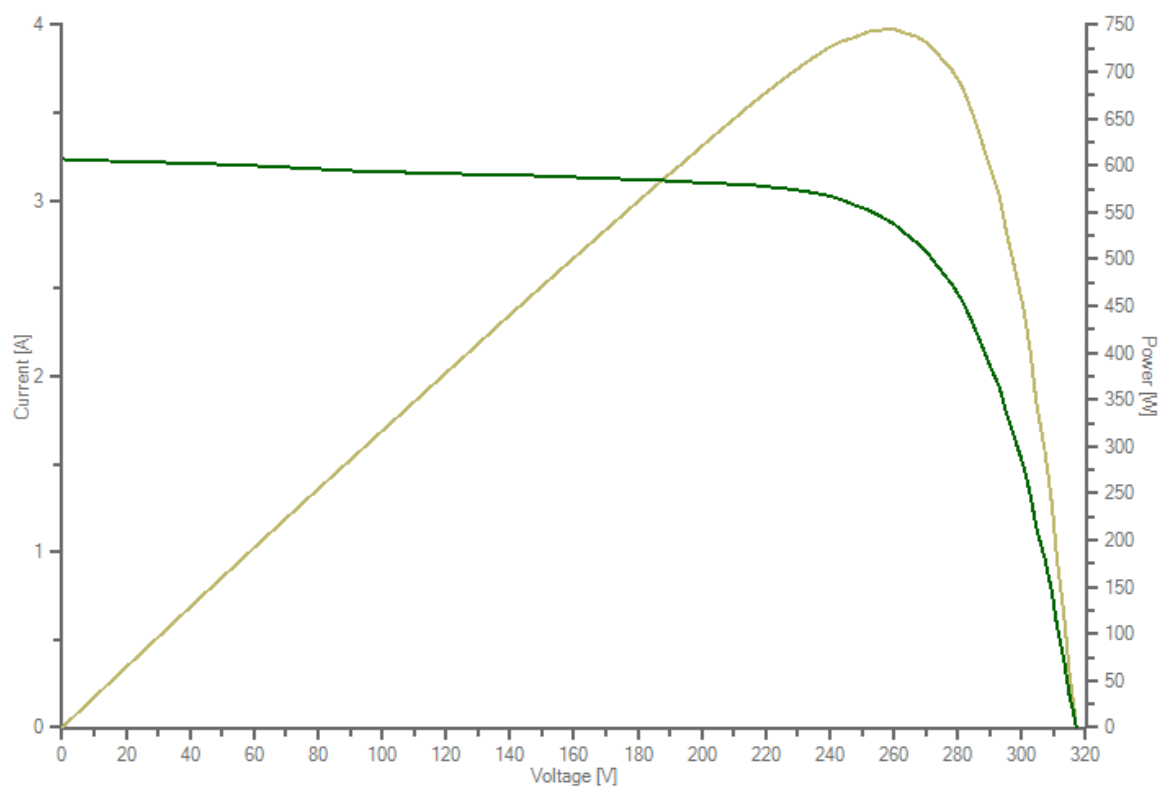
Obr. 6.17: V-A charakteristika panelů 129-136.



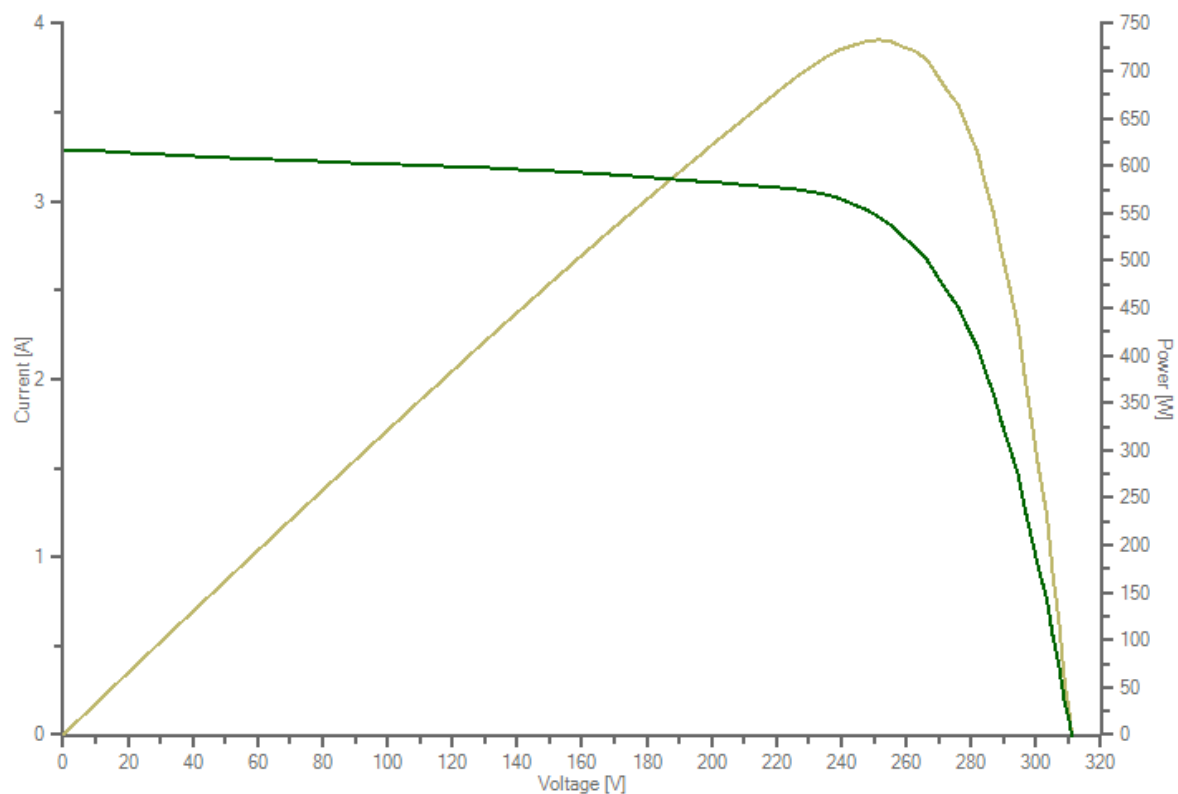
Obr. 6.18: V-A charakteristika panelů 137-144.



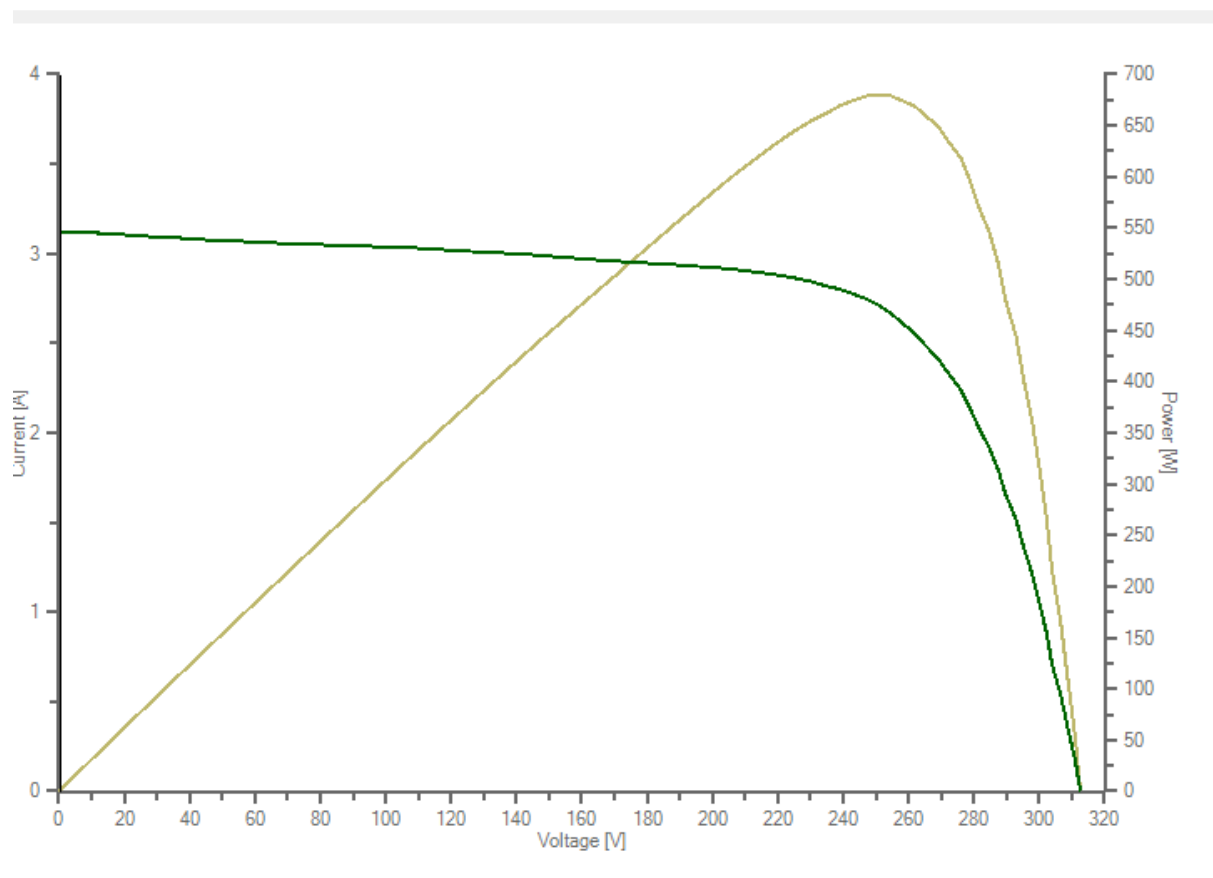
Obr. 6.19: V-A charakteristika panelů 145-152.



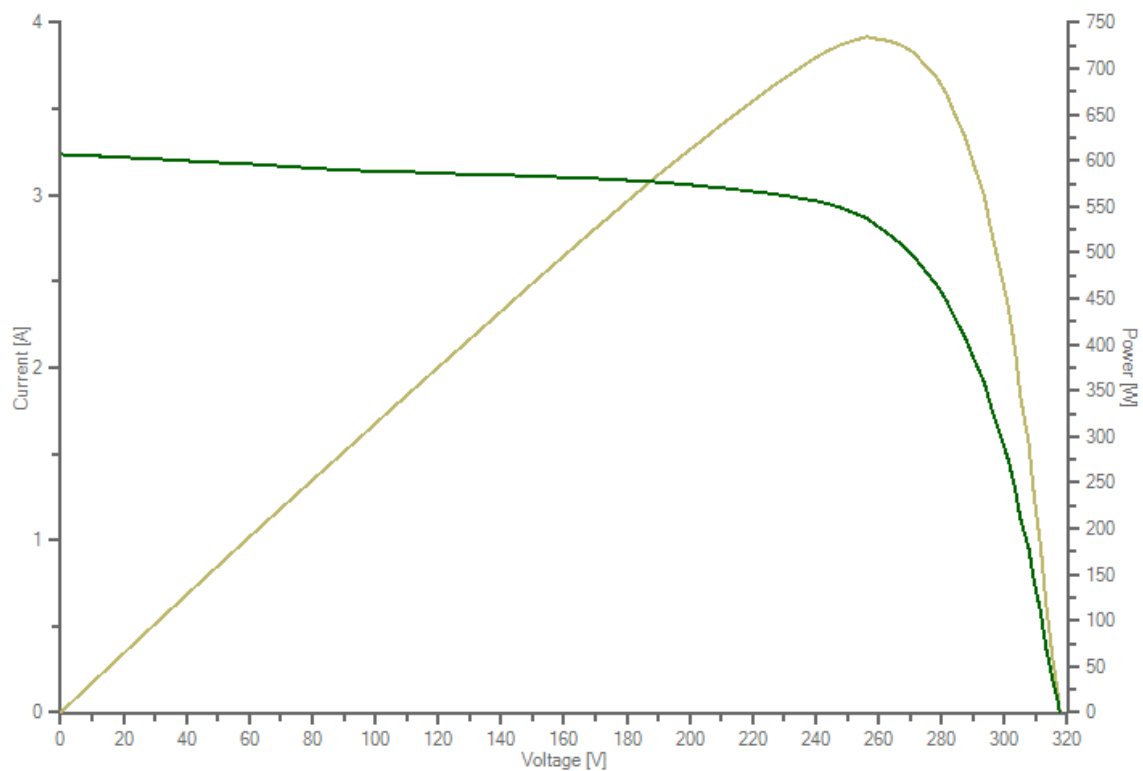
Obr. 6.20: V-A charakteristika panelů 153-160.



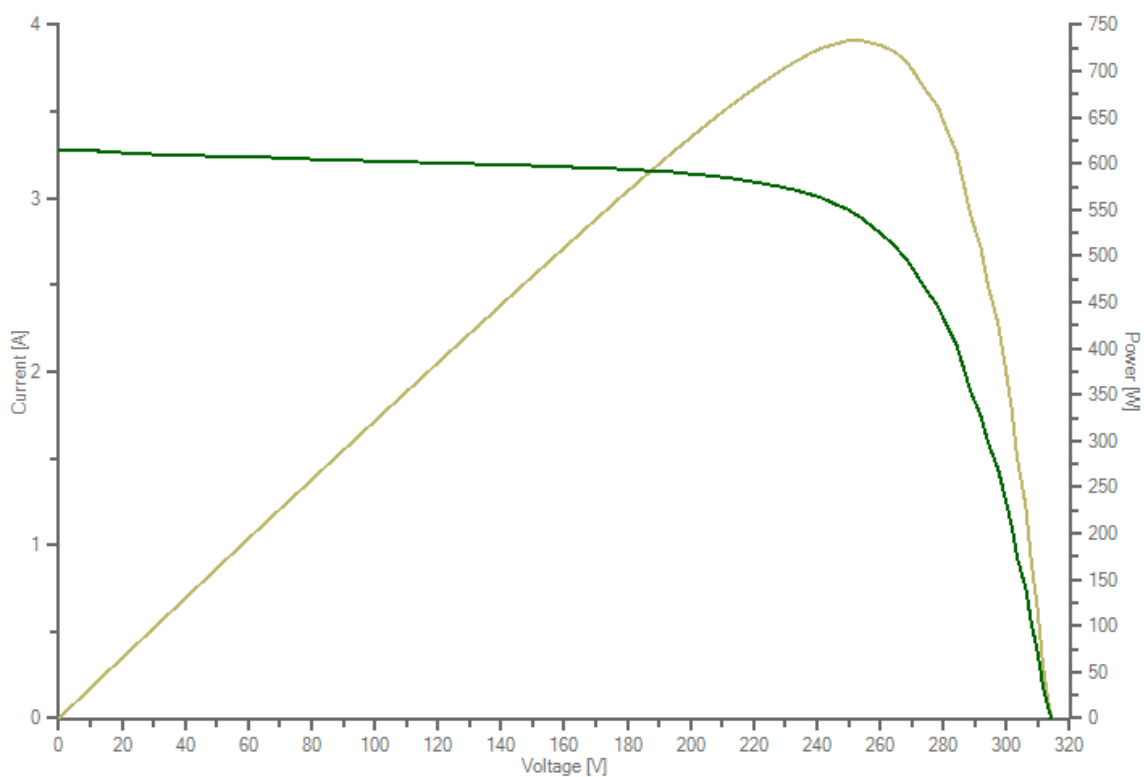
Obr. 6.21: V-A charakteristika panelů 161-168.



Obr. 6.22: V-A charakteristika panelů 169-176.



Obr. 6.23: V-A charakteristika panelů 177-184.



Obr. 6.24: V-A charakteristika panelů 185-192.