



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

NEJISTOTA MĚŘENÍ PARAMETRŮ FOTOVOLTAICKÝCH MODULŮ RŮZNÝCH TECHNOLOGIÍ

UNCERTAINTY IN THE MEASUREMENT OF PARAMETERS OF PHOTOVOLTAIC
MODULES OF DIFFERENT TECHNOLOGIES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Antonín Telíšek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.

BRNO 2023

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav elektrotechnologie

Student: Antonín Telíšek

ID: 220844

Ročník: 3

Akademický rok: 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Nejistota měření parametrů fotovoltaických modulů různých technologií

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte problematiku měření vlastností fotovoltaických parametrů při podmínkách STC. Zaměřte se na stanovování parametrů fotovoltaických modulů pomocí flash solárního simulátoru. Vyberte fotovoltaické moduly vyrobené různými technologiemi a pomocí flash solárního simulátoru proměřte VA charakteristiky. Z naměřených parametrů stanovte celkovou nejistotu měření v různých měřicích režimech flash solárního simulátoru pro vybrané vzorky fotovoltaických modulů. Výsledné hodnoty porovnejte a vyhodnoťte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle doporučení vedoucího práce

Termín zadání: 6.2.2023

Termín odevzdání: 1.6.2023

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.

doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Bakalářská práce se věnuje stanovení nejistot měření parametrů fotovoltaických panelů vyrobených různými technologiemi výroby. Jsou zde uvedeny technologie výroby jednotlivých typů fotovoltaických panelů, seznámení s problematikou nejistot měření a měření voltampérových charakteristik fotovoltaických panelů. Toto měření bude realizováno metodou flash na solárním simulátoru Pasan Sun Sim 3c. Z naměřených průběhů budou stanoveny základní parametry fotovoltaických článků a jejich nejistoty.

Klíčová slova

Fotovoltaický článek, fotovoltaický panel, nejistota měření, měření voltampérových charakteristik, standartní testovací podmínky, solární simulátor

Abstract

The bachelor's thesis is devoted to the determination of uncertainties in the measurement of parameters of photovoltaic panels produced by different manufacturing technologies. The production technologies of different types of photovoltaic panels, introduction to the issue of uncertainties and measurement of volt-ampere characteristics of photovoltaic panels are presented. This measurement by flash method will be realized on solar simulator Pasan Sun Sim 3c. From the measured characteristics the basic parameters of the PV cells and their uncertainties will be determined.

Keywords

Photovoltaic cell, photovoltaic panel, measurement uncertainty, measurement of voltampere characteristics, standard test conditions, solar simulator

Bibliografická citace

TELÍŠEK, Antonín. *Nejistota měření parametrů fotovoltaických modulů různých technologií* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/152459>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Jiří Vaněk.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: *Antonín Telíšek*

VUT ID studenta: *220844*

Typ práce: *Bakalářská práce*

Akademický rok: *2022/23*

Téma závěrečné práce: *Nejistota měření parametrů
fotovoltaických modulů různých
technologií*

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 1. června 2023

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Jiřímu Vaňkovi, Ph.D. za aktivní vedení práce a časté konzultace. Dále děkuji Martinu Šturmovi za vysvětlení postupu v oblasti měření VA charakteristik, Bc. Adamovi Lapčákovi za cenné rady a připomínky při zpracovávání textu práce a taky mé rodině za psychickou podporu.

V Brně dne: 1. června 2023

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK.....	10
ÚVOD	11
1. ČINNOST FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ.....	12
2. ROZDĚLENÍ FOTOVOLTAICKÝCH PANELŮ A JEJICH TECHNOLOGIE VÝROBY .	14
2.1 FOTOVOLTAICKÉ ČLÁNKY Z KRYSTALICKÉHO KŘEMÍKU	14
2.1.1 Monokrystalické články.....	14
2.1.2 Polykrystalické články.....	14
2.1.3 PERC články.....	15
2.1.4 Heterojunkční a bifaciální články	16
2.2 TENKOVRSŤVÉ FOTOVOLTAICKÉ ČLÁNKY	17
2.2.1 Články z amorfního křemíku	17
2.2.2 Články z telluridu cadmia (CdTe).....	18
2.2.3 CIS/CIGS články	19
2.3 NOVÉ TYPY FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ	19
2.3.1 Organické články	20
2.3.2 Perovskitové články	20
2.4 POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH TECHNOLOGIÍ VÝROBY FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ A JEJICH VÝHODY A NEVÝHODY	21
3. NEJISTOTY MĚŘENÍ.....	23
3.1 ZDROJE NEJISTOT	23
3.2 STANDARTNÍ NEJISTOTA TYPU A	23
3.3 STANDARTNÍ NEJISTOTA TYPU B	24
3.4 KOMBINOVANÁ STANDARTNÍ NEJISTOTA	24
3.5 ROZŠÍŘENÁ STANDARTNÍ NEJISTOTA	25
4. MĚŘENÍ VA CHARAKTERISTIK FV PANELŮ	26
4.1 ZÁKLADNÍ PARAMETRY FOTOVOLTAICKÝCH PANELŮ PŘI MĚŘENÍ VOLTAMPÉROVÝCH CHARAKTERISTIK	26
4.1.1 Proud nakrátko – I_{SC}	26
4.1.2 Napětí naprázdno – U_{OC}	26
4.1.3 Proud při maximálním výkonu panelu – I_{MP}	26
4.1.4 Napětí při maximálním výkonu panelu – U_{MP}	26
4.1.5 Maximální výkon panelu – P_{MP}	26
4.1.6 Činitel plnění – FF	26
4.1.7 Účinnost panelu - η	26
4.2 STANDARTNÍ A REVERZNÍ METODA MĚŘENÍ VOLTAMPÉROVÉ CHARAKTERISTIKY	27
4.3 STANDARDNÍ TESTOVACÍ PODMÍNKY (STC).....	29
4.4 SOLÁRNÍ SIMULÁTOR PASAN SUNSIM 3C	29
5. STANOVENÍ NEJISTOT MĚŘENÍ PARAMETRŮ TESTOVANÝCH FOTOVOLTAICKÝCH PANELŮ	35

5.1	VÝSLEDKY MĚŘENÍ	35
5.1.1	<i>Polykrystalický panel KYOCERA KD140GH-2PU</i>	35
5.1.2	<i>Monokrystalický panel ATERSA A-130</i>	36
5.1.3	<i>Tenkvrstvý panel z amorfního křemíku EPV-50</i>	37
5.1.4	<i>Monokrystalický panel R-TG 120n/340 s technologií PERC</i>	38
5.2	STANOVENÍ NEJISTOT MĚŘENÍ PARAMETRŮ TESTOVANÝCH PANELŮ	39
5.2.1	<i>Standartní nejistota typu A</i>	39
5.2.2	<i>Standartní nejistota typu B</i>	39
5.2.3	<i>Kombinovaná standartní nejistota</i>	40
5.2.4	<i>Kombinovaná standartní nejistota s funkcí</i>	40
5.2.5	<i>Rozšířená standartní nejistota</i>	41
5.3	VÝSLEDKY VÝPOČTŮ	42
5.3.1	<i>Polykrystalický panel KYOCERA KD140GH-2PU</i>	42
5.3.2	<i>Monokrystalický panel ATERSA A-130</i>	44
5.3.3	<i>Tenkvrstvý panel z amorfního křemíku EPV-50</i>	46
5.3.4	<i>Monokrystalický panel R-TG 120n/340 s technologií PERC</i>	48
5.3.5	<i>Přehled vypočtených nejistot</i>	50
6.	ZÁVĚR	52
	LITERATURA	54
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	58
	SEZNAM PŘÍLOH	59

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Vznik difúzního elektrického pole v depleční oblasti [1].....	12
2.1	Porovnání monokrystalického a polykrystalického článku + struktura článků	15
2.2	Struktura PERC článku [10].....	16
2.3	Struktura CdTe článku [21].....	18
2.4	Struktura CIS/CIGS článku	19
2.5	Struktura perovskitového článku.....	21
4.1	Teoretický průběh VA charakteristiky a výkonové charakteristiky fotovoltaických článků s vyznačenými parametry.....	27
4.2	Voltampérová charakteristika FV panelu ovlivněná vnitřní kapacitou	28
4.3	Charakteristika změny výkonu při určitých dobách záblesku [37].....	28
4.4	Zapojení solárního analyzátoru PASAN SunSim 3c	29
4.5	Zábleskový generátor a lampa za zadní části temné komory	30
4.6	Záblesková lampa s hvězdicovou maskou [40].....	31
4.7	Temná komora	31
4.8	Elektronická zátěž	32
4.9	Vykreslená VA charakteristika v prostředí programu SPROD	33
4.10	Nabídka režimů měření v programu SPROD	33
4.11	Nabídka pro nastavení parametrů panelu pro jednotlivé metody měření	34

SEZNAM TABULEK

2.1	Porovnání technologií fotovoltaických článků	22
3.1	Hodnoty koeficientů k_s pro určitý počet měření [33]	23
3.2	Hodnoty koeficientů χ podle zvoleného rozložení [33].....	24
3.3	Hodnoty koeficientů k_n pro určitou pravděpodobnost výskytu [33].....	25
5.1	Výsledky měření parametrů z VA charakteristik standardní metodou.....	35
5.2	Výsledky měření parametrů z VA charakteristik reverzní metodou	35
5.3	Výsledky měření parametrů z VA charakteristik standardní metodou.....	36
5.4	Výsledky měření parametrů z VA charakteristik reverzní metodou	36
5.5	Výsledky měření parametrů z VA charakteristik standardní metodou.....	37
5.6	Výsledky měření parametrů z VA charakteristik reverzní metodou	37
5.7	Výsledky měření parametrů z VA charakteristik standardní metodou.....	38
5.8	Výsledky měření parametrů z VA charakteristik reverzní metodou	38
5.9	Nejistoty výstupních parametrů solárního analyzátoru Pasan	40
5.10	Výsledky výpočtů nejistot parametrů panelu standardní metodou.....	42
5.11	Výsledky výpočtů nejistot parametrů panelu reverzní metodou	42
5.12	Výsledky výpočtů nejistot parametrů panelu pro obě metody	43
5.13	Porovnání výsledků nejistot mezi metodami měření a katalogovými údaji	43
5.14	Výsledky výpočtů nejistot parametrů panelu standardní metodou.....	44
5.15	Výsledky výpočtů nejistot parametrů panelu reverzní metodou	44
5.16	Výsledky výpočtů nejistot parametrů panelu pro obě metody	45
5.17	Porovnání výsledků nejistot mezi metodami měření a katalogovými údaji	45
5.18	Výsledky výpočtů nejistot parametrů panelu standardní metodou.....	46
5.19	Výsledky výpočtů nejistot parametrů panelu reverzní metodou	46
5.20	Výsledky výpočtů nejistot parametrů panelu pro obě metody	47
5.21	Porovnání výsledků nejistot mezi metodami měření a katalogovými údaji	47
5.22	Výsledky výpočtů nejistot parametrů panelu standardní metodou.....	48
5.23	Výsledky výpočtů nejistot parametrů panelu reverzní metodou	48
5.24	Výsledky výpočtů nejistot parametrů panelu pro obě metody	49
5.25	Porovnání výsledků nejistot mezi metodami měření a katalogovými údaji	49
5.26	Výsledky vypočtených rozšířených nejistot v absolutních hodnotách	50
5.27	Výsledky vypočtených rozšířených nejistot v relativních hodnotách	51

ÚVOD

Výroba elektrické energie je dnes možná z několika různých zdrojů. Ne všechny jsou ovšem ekologické a mnohé zdroje mají omezené množství materiálu. Společnost se tedy snaží objevovat a zdokonalovat obnovitelné zdroje energie, kdy mezi nejvíce podporovaný obnovitelný zdroj patří sluneční energie. Elektrická energie se z ní získává pomocí fotovoltaického článku.

Dnes existuje mnoho typů fotovoltaických článků, které se odlišují strukturou, technologií výroby, účinností přeměny energie a parametry. Parametry fotovoltaických článků, jako například maximální výkon, lze odečíst z voltampérových charakteristik. Solární simulátor PASAN dokáže proměřit celou voltampérovou charakteristiku fotovoltaických článků při změnách elektronické zátěže pomocí krátkého světelného záblesku. Metoda měření se nazývá FLASH. Rozlišuje se standardní a reverzní způsob měření VA charakteristiky, které určují směr měření. Měření probíhá při standardních testovacích podmínkách (STC), které jsou definované normou ČSN EN IEC 60904. Byly testovány tyto panely: polykrystalický panel (Kyocera KD140GH-2PU), monokrystalický panel (Atersa A 130), tenkovrstvý panel z článků z amorfního křemíku (EPV-50) a monokrystalický panel s technologií PERC (R-TG 120n/340).

Jelikož je sluneční záření simulováno, tak se musí počítat s jistými odchylkami. Tyto odchylky jsou známé jako nejistoty měření. Výpočet nejistot měření se provádí statistickým výpočtem. Nejistoty při standardních a reverzních metodách mohou být vlivem vnitřních kapacit článků odlišné, a proto je třeba se jim věnovat zvlášť.

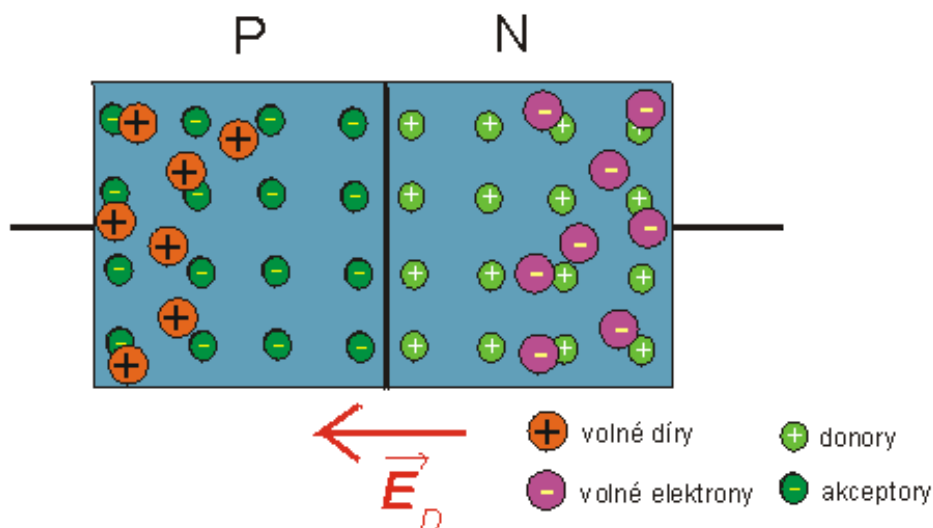
1. ČINNOST FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ

Fotovoltaický článek funguje jako polovodičová dioda, která se skládá z kontaktů a polovodičů s vodivostí typu P a typu N.

Základní složkou polovodiče s vodivostí typu P je čtyřmocný křemík (Si), což znamená že má na sobě vázané čtyři valenční elektrony. Přidáním příměsí třímocného prvku (např. boru – B) do polovodiče typu P dojde k absenci jednoho elektronu ve vazbě příměsí (tři valenční elektrony ze čtyř), tedy vazba je prázdná. Prázdné místo ve vazbě popisujeme jako díru. Díru lze zaplnit přijmutím volného elektronu. Atomy příměsí označujeme jako akceptory.

Základní složkou polovodiče s vodivostí typu N je opět čtyřmocný křemík a příměsí je pětímocný prvek (např. fosforu – P). To znamená, že příměsí obsahují pět valenčních elektronů, tedy jeden elektron je nadbytečný. Nadbytečný elektron je slabě vázán k atomům příměsí, a i při pokojových teplotách dojde k jeho uvolnění. Stává se z něj volný záporný elektron, který se volně pohybuje ve struktuře. Atomy těchto příměsí označujeme jako donory.

Na přechodu mezi polovodičem s vodivostí typu P a N dojde k přechodu volných elektronů z N oblasti do P oblasti, kde volné záporné elektrony zrekombinují (zánik páru) s kladnými dírami. V okolí přechodu vznikne tzv. depletiční oblast, kde se nevyskytují žádné volné nositelé náboje (elektrony a díry). Zůstanou zde jenom kladné a záporné ionty příměsí, které vytvoří tzv. difúzní elektrické pole (E_D) odpuzující volné nositelé náboje od přechodu.



Obrázek 1.1 Vznik difúzního elektrického pole v depletiční oblasti [1]

Dopadem záření na polovodič může dojít k absorpci fotonu. Absorpce fotonu je podmíněna jeho energií, která musí překonat zakázané pásmo daného materiálu. U křemíku šířka zakázaného pásma činí přibližně 1,1 eV, tedy potřebuje alespoň IR (infračervené) záření k zaručené absorpci fotonu. [2]

Po absorpci nadbytečná energie fotonu vytváří teplo, které u fotovoltaických článků je nežádoucí. Při nedostatku energie fotonu nedojde k jeho absorpci a záření projde skrz materiál.

Při úspěšné absorpci fotonu v depleční oblasti dochází k předání energie fotonu atomům křemíku a tím dojde k vytvoření volných nosičů náboje (elektronu a díry). Předtím, než dojde k rekombinaci nosičů náboje, dojde k jejich odpuzení vlivem elektrického pole. V polovodiči typu N se akumulují volné záporné elektrony a v polovodiči typu P se akumulují volné kladné díry. Tento rozdíl potenciálů vytváří napětí na svorkách diody. Připojením zátěže do obvodu dojde k průchodu elektrického proudu, tedy průchod elektronů skrz zátěž z oblasti N do oblasti P, kde nakonec zrekombinují.

2. ROZDĚLENÍ FOTOVOLTAICKÝCH PANELŮ A JEJICH TECHNOLOGIE VÝROBY

S ohledem na použitý typ materiálu a technologii výroby při výrobě fotovoltaických panelů se fotovoltaické panely řadí do tzv. generací. Hlavními cíli jednotlivých generací bylo snížit náklady na výrobu, zvýšit účinnost přeměny energie a zlepšit cenovou dostupnost oproti předešlým generacím. [3] Dnes se řazení do generací již nevyužívá, řadí se následovně:

2.1 Fotovoltaické články z krystalického křemíku

Tato nejstarší skupina fotovoltaických článků používá jako hlavní materiál krystalický křemík (Si). Až 90 % všech vyrobených solárních článků je sestavena z destiček krystalického křemíku. [4] Fotovoltaické články na bázi křemíku jsou výhodné kvůli hojnosti křemíku v zemské kůře, vhodnosti jakožto polovodiče a relativně vysoké účinnosti přeměny energie. Jejich nevýhoda je v náročnosti na výrobu a ceně výsledného článku. Do této skupiny článků řadíme monokrystalické články, polykrystalické články, PERC články, Heterojunkční a bifaciální články. [3][4]

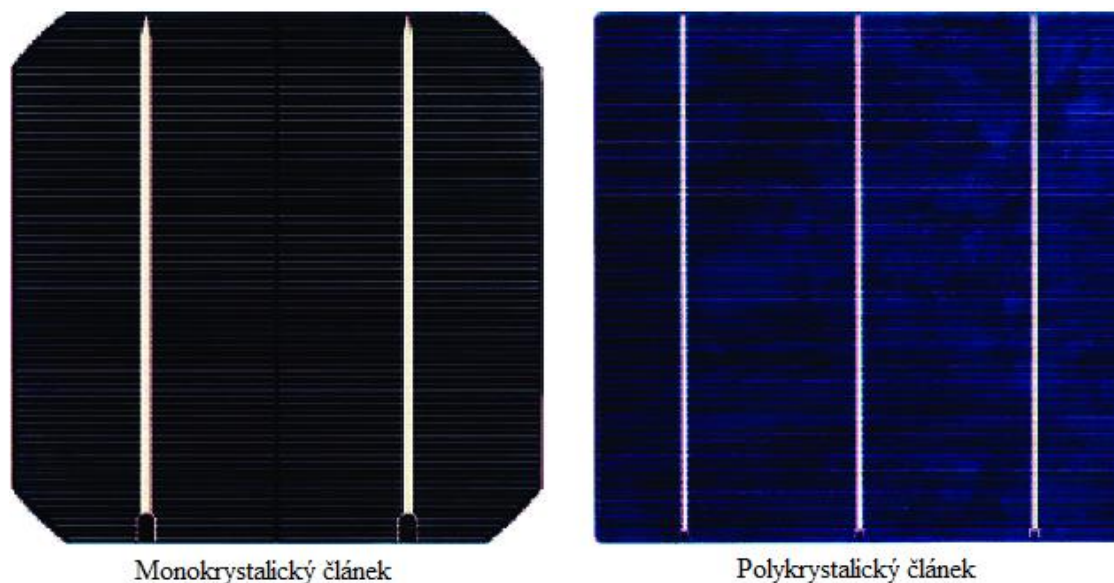
2.1.1 Monokrystalické články

Z názvu již vyplývá, že články tohoto typu jsou tvořeny z monokrystalu křemíku (krystaly jednotné orientace). Monokrystal křemíku vzniká Czochralského metodou růstu krystalu. V kelímku, který odolává vysokým teplotám (přes 1500 °C), je roztaven za těchto teplot křemík o velmi vysoké čistotě (obsah nečistot je v řádu jednotek částic na milion - ppm). [5] Následně se do taveniny velmi čistého křemíku lehce ponoří krystalický zárodek, na kterém za konstantní rychlosti otáčení a táhnutí zárodka, uchyceného na hřídeli, začne růst krystalová struktura jedné orientace. Takhle vznikne váleček monokrystalu křemíku, jehož průměr je ovlivněný rychlostí tažení zárodka z taveniny. Váleček monokrystalu se následně rozdělí pomocí laseru na destičky „čtvercového“ tvaru o tloušťkách desetin milimetrů. Destičky následně projdou procesem chemického leptání, difuzí pro vytvoření vrstvy polovodiče typu N a nanesením antireflexní vrstvy a kovových kontaktů. [6] Účinnost přeměny energie u tohoto typu článku se pohybuje v rozmezích mezi 15-24 %. [4]

2.1.2 Polykrystalické články

Tyto články oproti předešlému typu jsou tvořeny z více menších monokrystalů křemíku. Vznikají metodou blokového lití, kdy velmi čistý křemík je roztaven za teploty 1500 °C. Následně se tavenina křemíku odlévá do čtvercových forem, které díky svému tvaru ušetří více materiálu při řezání odlitku na destičky v porovnání s válcovým monokrystalem.

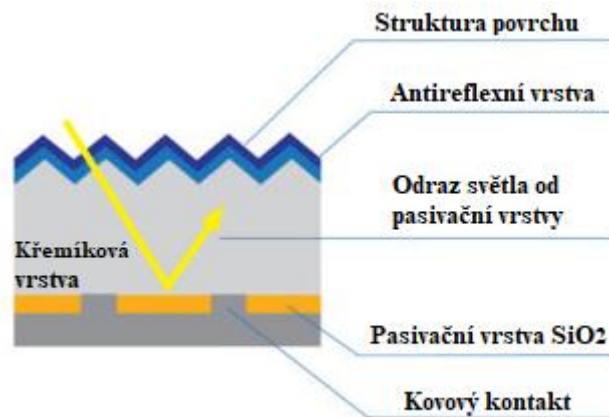
Z tohoto důvodu je polykrystalický článek cenově dostupnější, ale na úkor menší účinnosti přeměny energie, která se pohybuje mezi 10-18 %. Menší účinnost přeměny energie je způsobena náhodným uspořádáním krystalů v struktuře. [4] [7] [8]



Obrázek 2.1 Porovnání monokrystalického a polykrystalického článku + struktura článků

2.1.3 PERC články

Technologie PERC (passivated emitter rear cell) vylepšuje účinnost monokrystalických článků. Jedná se o klasický monokrystalický článek, u kterého na zadní straně buněk byla nanášena tenká dielektrická pasivační vrstva oxidu křemičitého (SiO_2) anebo oxidu hlinitého (Al_2O_3). [9] Nanesením této vrstvy se zvýší účinnost klasického monokrystalického panelu, protože pasivační vrstva odráží světlo, které prošlo křemíkovou vrstvou (nedošlo k absorpci fotonu). Odraz umožní druhý pokus absorpce fotonu. [7] [9]



Obrázek 2.2 Struktura PERC článku [10]

Další výhodou pasivační vrstvy je snížení elektronové rekombinace, tedy zvýšení pohybu volných elektronů články, což má pozitivní vliv na účinnost článků. [11]

Poslední výhodou pasivační vrstvy je snížení absorpce tepla. Vrstva odráží IR (infračervené) záření nad určitou vlnovou délkou (1180 nm). [11] U klasických monokrystalických článků bez pasivační vrstvy by zadní kovová vrstva akumulovala teplo, které má negativní vliv na účinnost článku.

Výroba PERC článků rozšiřuje technologický postup klasických monokrystalických článků přidáním dvou výrobních kroků, a to aplikace pasivační vrstvy na zadní plochu a chemické leptání pasivační vrstvy za účelem vzniku malých kapes. Implementace výrobních kroků není cenově náročná vzhledem k zvýšení účinnosti přeměny energie, která se pohybuje okolo 20 %. [7] [9]

2.1.4 Heterojunkční a bifaciální články

Jedná se o další technologii, která vylepšuje účinnost solárních článků z krystalického křemíku. Technologie HJT (heterojunction technology) byla vyvinuta společností SANYO Electric v osmdesátých letech dvacátého století. [12]

Heterojunkční články využívají dvě technologie fotovoltaických článků, kdy se nanáší vrstva amorfního křemíku na přední a zadní povrch článku z krystalického křemíku. Přední vrstva amorfního křemíku část slunečního světla o určité vlnové délce absorbuje, ale jelikož je vrstva velmi tenká, projde velká část světla skrz a dostane se k článku z krystalického křemíku. Zde dochází k další absorpci fotonů a také k odrazu části světla z krystalického křemíku zpět do přední vrstvy (další pokus o absorpci fotonů). Zadní vrstva amorfního křemíku dále absorbuje další část slunečního světla, které prošlo přes dvě výše zmíněné vrstvy. [12] [13]

Heterojunkční články mají vyšší účinnost než klasické články z krystalického křemíku, protože vrstvy amorfního křemíku absorbují další fotony, které neabsorbuje vrstva krystalického křemíku. Hlavní předností vrstev amorfního křemíku ale je, že odolávají vyšším teplotám (nízký teplotní koeficient), což zabraňuje snížení účinnosti článku. V porovnání s PERC technologií je nanesení amorfních vrstev levnější. Účinnost přeměny energie u heterojunkčních článků se pohybuje v rozmezí 19,9-21,7 %. [12] [13]

Technologii je možno ještě vylepšit změnou konstrukce fotovoltaického panelu tak, aby zadní vrstva byla průhledná (skelná konstrukce). Následně by zadní strana heterojunkčního článku mohla zachytávat světlo, které se odrazí od země. Vylepšení konstrukce panelu je známé také jako bifaciální technologie. [7] [13]

2.2 Tenkovrstvé fotovoltaické články

Tato skupina fotovoltaických panelů cílí na snížení nákladnosti ve směru zmenšení tloušťky polovodičových destiček z desetin milimetrů na jednotky mikrometrů. Při výrobě tenkovrstvých článků se využívá až o 99 % méně polovodičového materiálu než u předešlé skupiny. [4] Z tohoto důvodu jsou náklady na výrobu a ceny finálních produktů nižší, ale články jsou méně účinné než články z předešlé skupiny. Do této skupiny řadíme články z amorfního křemíku, Cadmium Telluridové články (CdTe) a CIS/CIGS články (Cu+In+Se/Cu+In+Ga+Se). [3] [7]

2.2.1 Články z amorfního křemíku

Články z amorfního křemíku (a-Si) mají menší účinnost než články z krystalického křemíku. Amorfní křemík má totiž náhodně orientovanou strukturu krystalů v celém objemu látky. [7]

Tenká vrstva amorfního křemíku se nanáší na nosnou podložku (substrát), který je zhotoven z materiálů jako sklo, kov, anebo plast. Nanáší se tzv. metodou chemické depozice z plynné fáze. Jedná se o čistě chemický proces, kdy při vysokých teplotách (150–300 °C) a ve vakuu reaguje teplá plynná polovodičová složka na povrchu studené pevné substrátové složky za účelem vzniku tenké polovodičové vrstvy na substrátu. [7] [8] [14]

Velkou nevýhodou těchto článků je pokles účinnosti přeměny energie článku po prvních hodinách vystavení se slunečnímu záření. Jedná se o Staeblerovo-Wronského jev, který souvisí s nedokonalou náhodnou strukturou amorfního křemíku. [15]

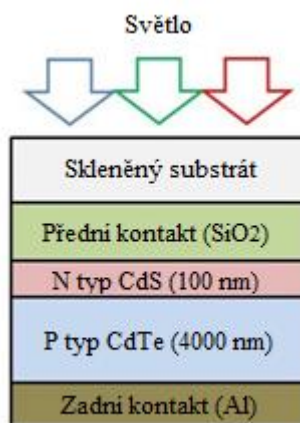
Tento jev je vratný, pokud článek dostatečně zahřejeme (nad 150 °C na určitou dobu) nebo vystavíme článek dlouhodobému provozu (stovky hodin). Samotný amorfní křemík má ve své struktuře tzv. visící vazby, na které se nic neváže. Jedná se o defekty, které zhoršují fotovodivost panelů. Snížení koncentrace těchto defektů lze dosáhnout tzv. hydrogenizací amorfního křemíku (a-Si:H) vodíkem. [7] [16] [17]

Články z amorfního křemíku disponují účinností přeměny energie v rozmezích 5-12 %. Nejčastěji se používají u kalkulaček a hodinek. [3] [7]

2.2.2 Články z telluridu cadmia (CdTe)

Články z telluridu cadmia (CdTe) jsou tvořeny z polovodičových vrstev hlavního materiálu kadmia a telluru. Oba materiály jsou vedlejším produktem těžení zinku a zpracování mědi. Články CdTe jsou druhým nejvíce rozšířeným typem (5 %) hned za články z krystalického křemíku. [4] [18]

Vznikají metodou sublimace v uzavřeném prostoru, kdy se ve vakuu zahřívá substrát (sklo) a CdTe prášek (prášek se zahřívá na vyšší teplotu než substrát). Při dostatečné teplotě se na substrát začnou napařovat vrstvy. Nejprve se nanese vrstva N typu ze sulfidu kadmatého (CdS), následně vrstva P typu z telluridu cadmia (CdTe). Vrstva CdS je mnohem tenčí než vrstva CdTe. Mezi substrát a vrstvu N typu se nanáší přední kontakt z oxidu cínitého (SnO_2) a na vrstvu P typu se nanáší zadní kontakt z hliníku (Al). [18] [19] [20]



Obrázek 2.3 Struktura CdTe článku [21]

Výroba těchto článků probíhá za nízkých teplot a je rychlá a levná. Dalšími výhodami těchto článků jsou vysoká absorpce fotonů (okolo 1,4 eV), která je optimální pro přeměnu energie a nízký teplotní koeficient, který snižuje účinnost článku při vyšších teplotách. [18]

Nevýhody těchto článků jsou nedostatek telluru (špatně se získává) a také fakt, že cadmium je toxický prvek. Při špatné recyklaci po konci životnosti panelu znečišťuje prostředí, je proto potřeba ho recyklovat podle předpisů výrobce. [4] [7] [19]

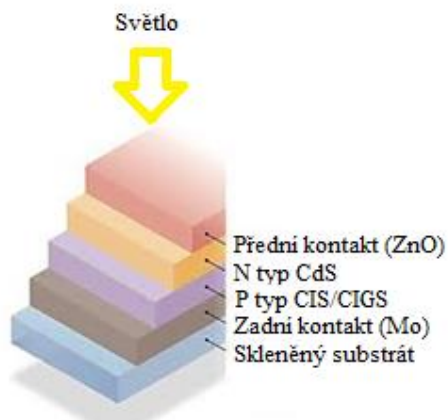
Účinnost přeměny energie u CdTe článků se pohybuje v rozmezích 15-16 %. [3]

2.2.3 CIS/CIGS články

Jedná se o články, u kterých je v případě CIS (Copper-Indium-diSelenid) článků vrstva P typu složena z mědi (Cu), india (In) a selenu (Se). U CIGS (Copper-Indium-Gallium-diSelenid) článku se nanáší navíc vrstva galia (Ga). Možností více prvků ve vrstvě P typu umožňuje článku mít větší rozptyl zakázaného pásma (1–2,4 eV), tedy článek dokáže zachytit větší spektrum světla (možnost zachycení UV a IR záření), což zvyšuje účinnost přeměny energie. [7] [8]

Články tohoto typu mají podíl 2 % z celku všech vyrobených fotovoltaických panelů. [7]

Vyrábí se depozicí mědi a india (CIS) anebo mědi, india a galia (CIGS) na kontaktní vrstvu molybdenu (Mo), přičemž jsou žíhány selenidovými parami. Molybdenová vrstva byla předtím nanášena na substrát (v tomto případě sklo). V případě substrátu z kovové fólie nemusí být vrstva molybdenu nanášena. Následně dojde k depozici N vrstvy ze sulfidu kadmnatého (CdS). Nakonec se nanese vrstva transparentního oxidu zinečnatého (ZnO) zastupující přední kontakt. Proces depozice probíhá ve vakuu metodou napařování nebo naprašování. CIS/CIGS články mohou být vyrobeny na flexibilních substrátech, tedy mají větší rozsah aplikací než články z krystalického křemíku. Mezi nevýhody těchto článků patří nedostatek india a kratší životnost panelů. [3] [22] [23]



Obrázek 2.4 Struktura CIS/CIGS článku

Účinnost přeměny energie u CIS/CIGS článků se pohybuje okolo 20 %. [3]

2.3 Nové typy fotovoltaických článků

Do této skupiny patří fotovoltaické články, které jsou stále ve vývoji. Komerční využití najdou, jakmile jejich účinnost přeměny energie, nákladnost, ekonomičnost a praktičnost bude konkurovat článkům předešlých skupin. Patří zde (např.) články z organických materiálů, perovskitových krystalů a další.

2.3.1 Organické články

Články jsou tvořeny z organických materiálů jako jsou například polymery, pentaceny, polyphenylenvinyleny a fullereny carbonu. Struktura organických článků je tvořena na substrátu (nejčastěji sklo), transparentní kontaktní vrstvy indium cínového oxidu (ITO), fotoaktivní vrstvy (organické materiály) a zadní kontaktní vrstvy. Struktury se vytvářejí metodou „roll-to-roll“. Jedná se o tisk vrstev na rotačních tiskárnách, kdy se jednotlivé vrstvy tisknou na sebe pomocí válců. Tímto způsobem lze velmi rychle natisknout velké množství vrstev. Skleněný substrát může být nahrazen papírovým nebo plastovým substrátem anebo kovovou fólií. [4] [24]

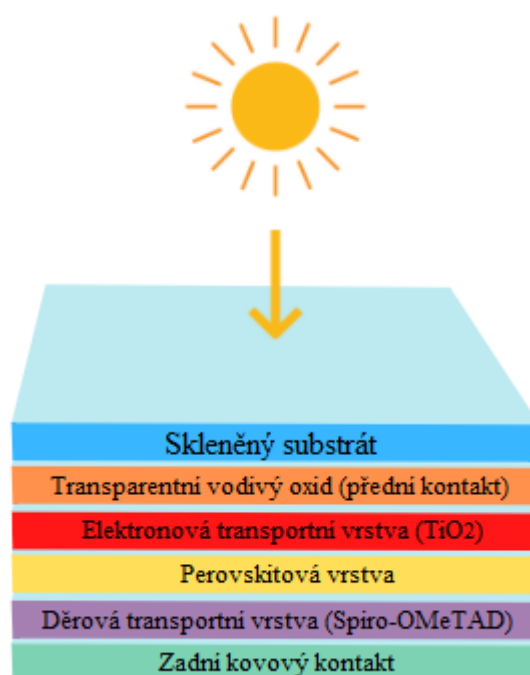
Mezi výhody organických článků patří jejich flexibilita, nízká hmotnost vyrobeného článku, nízké výrobní náklady a prodejní cena. Nevýhody článku jsou především relativně malá životnost a nízká účinnost přeměny energie, která se aktuálně pohybuje maximálně v rozmezí 9-11 %. [3] [7] [8]

2.3.2 Perovskitové články

Aktivní absorpční vrstva perovskitových článků je tvořena z halogenidových perovskitů jako methylamonného olova ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$). Perovskit je kvalitní polovodič, který má stejnou krystalovou strukturu jako minerál titanát vápenatý (CaTiO_3). Byl objeven roku 1839 v Rusku Gustavem Rose a popsán mineralogem Levem Perovskitem, po kterém materiál získal jméno. Šířka zakázaného pásma u perovskitových článků se pohybuje v rozmezích 1,2-2,4 eV, tedy disponují excelentní absorpcí fotonů v širším spektru záření a zvyšuje se účinnost přeměny energie. [7] [8] [25]

Struktura perovskitových článků je tvořena na substrátu (nejčastěji sklo nebo plast), transparentního vodivého oxidu (TCO), elektronové transportní vrstvy (ETL – TiO_2), absorpční perovskitové vrstvy, děrové transportní vrstvy (HTL – Spiro-OMeTAD) a kovových kontaktů. Perovskitová vrstva se vytváří metodou odstředivého potahování, kdy se na substrát s TCO a ETL nanese roztok halogenidu kovu (PbI_2) a rotací podložky, na které je substrát osazen, se využije odstředivé síly, která rozprostře roztok po celém substrátu. Následně se nanese roztok organické složky ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$) a opět dojde k rotaci podložky za účelem rozprostření roztoku po celém povrchu. Nastavením rychlosti a doby otáčení podložky se optimalizuje tloušťka a kvalita rozprostřeného filmu.

Nakonec se vrstva vypálí za určitých teplot (60–90 °C), čímž vznikne krystalická struktura perovskitu s konečnou tloušťkou v řádech stovek nanometrů. Články tak lze vytvořit tisknutím na rotačních tiskárnách. [25] [26] [27]



Obrázek 2.5 Struktura perovskitového článku

Mezi výhody perovskitových článků patří levná a jednoduchá výroba, nízká hmotnost finálního článku, flexibilita a vysoká účinnost přeměny energie, která se pohybuje okolo 21 %. Nevýhody těchto článků jsou jejich nestabilita způsobena vnějšími degračními faktory (počasí) a přítomnost toxického olova v perovskitových sloučeninách. [3][26]

2.4 Porovnání jednotlivých technologií výroby fotovoltaických článků a jejich výhody a nevýhody

Uvedené údaje účinností v tabulce 2.1 jsou přibližné odhady. [3] Přesné hodnoty účinností jednotlivých typů panelů jsou stanoveny výrobcem. Uvedené údaje účinností dle NREL jsou převzaté z grafu nejvyšších účinností článků jednotlivých technologií od roku 1976 do současnosti. [28] Uvedené údaje životností panelů jsou opět přibližné odhady. [3] Je třeba rozlišovat záruku panelu od životnosti panelu, protože životnost panelů může být i dvojnásobná. Záruka, kterou výrobci udávají, je doba, za kterou nesmí maximální výkon článku poklesnout pod předepsanou úroveň (např 20 let při 80 % maximálního výkonu). [29]

Tabulka 2.1 Porovnání technologií fotovoltaických článků

Technologie	Účinnost	Účinnost dle NREL	Životnost
Monokrystalické články	15 - 24 %	26,1 %	25 let
Polykrystalické články	10 - 18 %	23,3 %	14 let
PERC články	20 %	27,6 %	-
Heterojunkční články	19 - 22 %	26,8 %	-
Amorfní Si články	5 - 12 %	14,0 %	15 let
CdTe články	15 - 16 %	22,1 %	20 let
CIS/CIGS články	20 %	23,6 %	12 let
Organické články	9 - 11 %	19,2 %	-
Perovskitové články	21 %	25,8 %	-

Mezi výhody monokrystalických článků patří vysoká účinnost přeměny energie a životnost, nevýhodou jsou velké výrobní náklady, ztráty na materiálu při řezání kulatého waferu na jednotlivé destičky, větší citlivost na teplotu a problém s absorpcí fotonu způsobený šířkou zakázaného pásma materiálu (1,1 eV). [3]

Mezi výhody polykrystalických článků patří jednoduchost výrobního procesu, cenová efektivita, snížení materiálových ztrát oproti výrobě monokrystalických článků a lepší absorpce fotonu (1,7 eV). Nevýhodou je menší účinnost přeměny energie než u monokrystalických článků a větší citlivost na teplotu. [3]

Výhody a nevýhody PERC článků a Heterojunkčních článků jsou uvedeny v kapitolách 2.1.3 a 2.1.4.

Mezi výhody článků z amorfního křemíku patří jejich cenová dostupnost díky menší spotřebě výrobního materiálu a výborný absorpční koeficient (1,7 eV). Nevýhodou je nízká účinnost přeměny energie. [3]

Mezi výhody článků z CdTe patří menší spotřeba výrobního materiálu a dobrý absorpční koeficient (1,45 eV). Nevýhodou je menší účinnost přeměny energie, větší citlivost na teplotu, toxicita cadmia a nedostatek telluru. [3] [4] [7]

Mezi výhody CIS/CIGS článků patří menší spotřeba výrobního materiálu a výborný absorpční činitel (1,7 eV). Nevýhodou je cenová nedostupnost, větší citlivost na teplotu, nespolehlivost a životnost článků. [3] [22] [23]

Mezi výhody organických článků patří nízká hmotnost článků, flexibilita, malé výrobní náklady a nízká prodejní cena. Nevýhodou je malá účinnost přeměny energie. [3] [7] [8]

Mezi výhody perovskitových článků patří levná a jednoduchá výroba, nízká hmotnost článku, flexibilita, vysoká účinnost přeměny energie. Nevýhodou je nestabilita způsobena vnějšími degradačními faktory (počasí) a přítomnost toxického olova v perovskitových sloučeninách. [3] [26]

3. NEJISTOTY MĚŘENÍ

V praxi nejsou žádná měření absolutně přesná. Různé zdroje mají za následek odchýlení naměřené hodnoty od skutečné hodnoty. Z tohoto důvodu je definován pojem nejistota měření a udává rozsah hodnot blízkých skutečné hodnotě s určitou pravděpodobností. Stanovování anebo odhadování nejistot měření je požadováno normou ČSN EN ISO/IEC 17 025. [30] [31]

3.1 Zdroje nejistot

Jevy, které přispívají k nejistotám anebo je způsobují, nazýváme zdroje nejistot. Řadíme zde např. neúplné definování měřené veličiny, výběr nereprezentativních vzorků, nedostatečná znalost vlivů okolního prostředí, lidský faktor při odečítání z analogových měřidel, omezená rozlišovací schopnost měřicího přístroje, nepřesnost měřících etalonů, nepřesné hodnoty konstant a dalších parametrů použitých v algoritmu výpočtu a další. [32]

3.2 Standartní nejistota typu A

Nejistota typu A (u_A) se určuje pouze u opakovaných měření a s rostoucím počtem měření její hodnota klesá. Počítá se jako součin koeficientu k_s (zastupující počet opakování měření) a směrodatné odchyly naměřených dat $s_{\bar{x}}$. [32] [33]

Odhad hodnoty měřené veličiny je dán vztahem

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i. \quad (3.1)$$

Směrodatná odchyly je dána vztahem

$$s_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n-1)}}. \quad (3.2)$$

Nejistota typu A je definovaná následovně:

$$u_A = k_s \cdot s_{\bar{x}}. \quad (3.3)$$

U těchto vztahů n představuje počet opakovaných měření, x_i hodnotu opakovaného měření a k_s koeficient, který je závislý na n počtu opakovaných měření. [33]

Tabulka 3.1 Hodnoty koeficientů k_s pro určitý počet měření [33]

Počet měření n	2	3	4	5	6	7	8	9	> 9
Koeficient k_s	7,0	2,3	1,7	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2	1,0

3.3 Standartní nejistota typu B

Nejistotu typu B (u_B) neurčujeme pomocí statistických výpočtů, ale pomocí známých údajů o měřicích přístrojích, zkušeností z předešlých měření a dalších zdrojů nejistot. V praxi jsou hlavním zdrojem nejistoty jednotlivé tolerance měřicích přístrojů. Výsledná nejistota typu B je dána rovnicí (3.5). [30] [32]

Zdroj nejistoty je dán vztahem

$$u_{Bz} = \frac{Z_{max}}{\chi}. \quad (3.4)$$

Nejistota typu B je definována následovně

$$u_B = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_{Bz}^2}. \quad (3.5)$$

U těchto vztahů Z_{max} představuje maximální odchylku od nominální hodnoty zdroje a χ koeficient zvoleného rozložení.

Tabulka 3.2 Hodnoty koeficientů χ podle zvoleného rozložení [33]

Rozložení	Normální	Rovnoměrné	Trojúhelníkové
X	2	$\sqrt{3}$	2,45

3.4 Kombinovaná standartní nejistota

Kombinovaná standartní nejistota (u_C) určuje interval, ve kterém se nachází skutečná hodnota měřené veličiny s pravděpodobností 68 %. Je dána rovnicí (3.6). [33]

Kombinovaná nejistota je dána vztahem

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}. \quad (3.6)$$

Kombinovaná nejistota s funkcí je dána vztahem [34]

$$u_C = \sqrt{A^2 \cdot u_A^2 + B^2 \cdot u_B^2}. \quad (3.7)$$

U těchto vztahů u_A představuje nejistotu typu A, u_B nejistotu typu B; A , B představuje koeficienty funkcí.

3.5 Rozšířená standartní nejistota

Rozšířená standartní nejistota (U) zvyšuje pravděpodobnost kombinované standartní nejistoty, kdy pravděpodobnost výskytu skutečné hodnoty měřené veličiny na daném intervalu může dosahovat až 99,7 %. [33] Je dána vztahem (3.8).

Rozšířená nejistota je dána vztahem

$$U = k_u \cdot u_C. \quad (3.8)$$

U tohoto vztahu k_u představuje koeficient pravděpodobnosti výskytu skutečné hodnoty měřené veličiny na daném intervalu. [33]

Tabulka 3.3 Hodnoty koeficientů k_u pro určitou pravděpodobnost výskytu [33]

Koeficient k_u	1	2	3
Pravděpodobnost výskytu	68 %	95 %	99,7 %

4. MĚŘENÍ VA CHARAKTERISTIK FV PANELŮ

Měření bylo zrealizováno v akreditované zkušební laboratoři CVVOZE v Brně. Bylo provedeno deset měření voltampérové charakteristiky vybraných fotovoltaických panelů standartní a reverzní metodou měření na solárním simulátoru PASAN SunSim 3c.

4.1 Základní parametry fotovoltaických panelů při měření voltampérových charakteristik

Pro vyhodnocování parametrů fotovoltaických panelů se využívá měření voltampérové charakteristiky měřeného panelu. Z charakteristiky můžeme odečíst tyto parametry:

4.1.1 Proud nakrátko – I_{SC}

Proud nakrátko neboli zkratový proud představuje maximální proud, který panel při určité intenzitě slunečního záření může dodávat. Označuje se I_{SC} a udává se v ampérech. [35]

4.1.2 Napětí naprázdno – U_{OC}

Napětí naprázdno představuje maximální napětí panelu, které lze změřit při odpojení spotřebiče z obvodu při určité intenzitě slunečního záření. Označuje se U_{OC} a udává se ve voltech. [35]

4.1.3 Proud při maximálním výkonu panelu – I_{MP}

Jedná se o proud, při kterém panel dosahuje maximálního výkonu P_{MP} . Označuje se I_{MP} a udává se v ampérech. [35]

4.1.4 Napětí při maximálním výkonu panelu – U_{MP}

Jedná se o napětí, při kterém panel dosahuje maximálního výkonu P_{MP} . Označuje se U_{MP} a udává se ve voltech. [35]

4.1.5 Maximální výkon panelu – P_{MP}

Je dán součinem napětí U_{MP} a proudu I_{MP} . Udává se ve wattech. [35]

4.1.6 Činitel plnění – FF

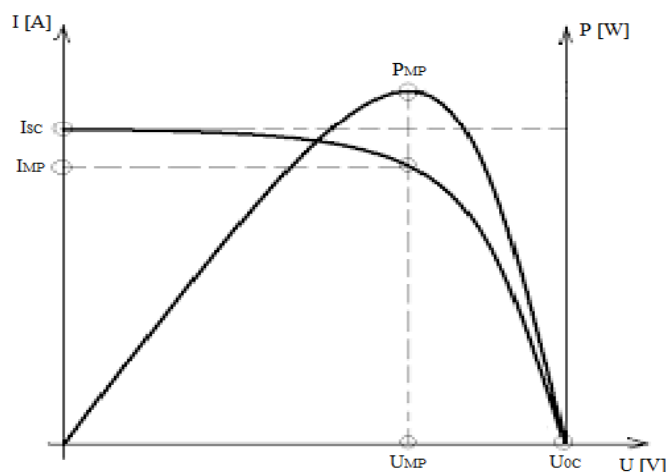
Činitel plnění udává podíl mezi maximálním výkonem panelu P_{MP} a součinem proudu nakrátko I_{SC} s napětím naprázdno U_{OC} . Maximální hodnota činitele plnění je 1. Čím větší je činitel plnění, tím větší je maximální výkon panelu. Označuje se FF a je bezrozměrný. [35]

4.1.7 Účinnost panelu - η

Účinnost panelu je definována jako podíl maximálního výkonu článku P_{MP} a výkonu

dopadajícího slunečního záření. Udává se v procentech. [35]

Všechny tyto parametry se uvádějí v katalogových listech solárních panelů od daného výrobce.



Obrázek 4.1 Teoretický průběh VA charakteristiky a výkonové charakteristiky fotovoltaických článků s vyznačenými parametry

4.2 Standartní a reverzní metoda měření voltampérové charakteristiky

Standartní a reverzní metoda měření voltampérové charakteristiky určuje, jakým směrem daná voltampérová charakteristika byla změřena. Standartní (vpřed – forward) metodou je voltampérová charakteristika měřena od bodu proudu nakrátko (I_{sc}) po bod napětí naprázdno (U_{oc}). Naopak reverzní (dozadu – backward) metodou je voltampérová charakteristika měřena od bodu napětí naprázdno po bod proudu nakrátko. Tyto průchody jsou řízeny změnou elektronické zátěže připojené do obvodu. [36]

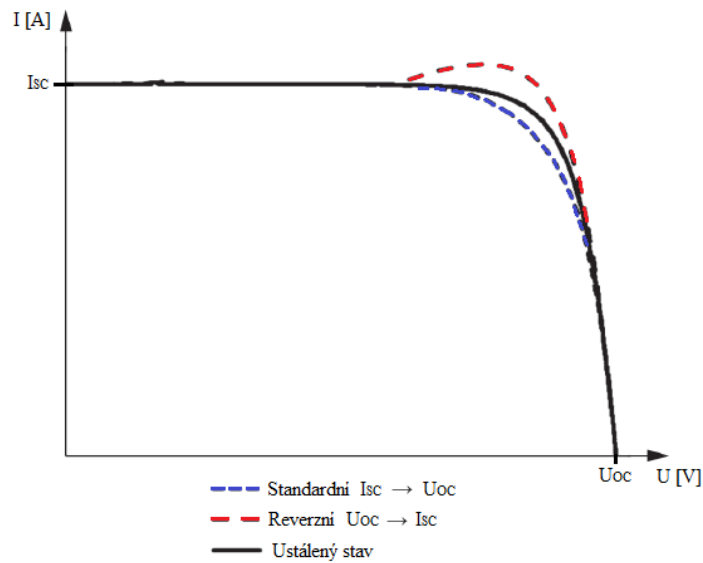
Při měření standartní a reverzní metodou může dojít k ovlivnění VA charakteristiky vnitřní kapacitou článku. Kapacita článku je složena z následujících příspěvků:

Bariérová kapacita – Zastupuje náboj uchovaný v depletiční oblasti PN přechodu (dominantní pro reverzní směr a slabší vliv v standartním směru). [37]

Difúzní kapacita – Zastupuje minoritní nosiče, které se pokoušejí dostat do rekombinační oblasti, uchované v blízkosti depletiční oblasti před rekombinací s majoritními nosiči (významné hlavně v standartním směru). Tato kapacita je významná u solárních článků s dlouhou dobu života minoritních nosičů. [37][38]

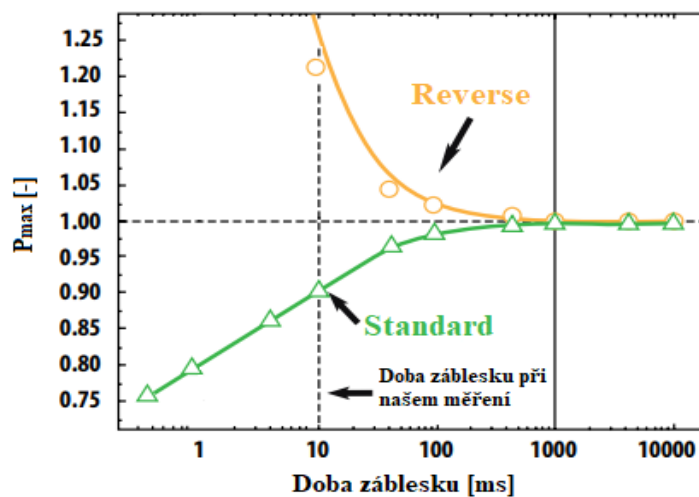
Příspěvek kapacity, který je připisován k existenci defektů. [37]

Vliv kapacity na měřený proud lze vidět na obrázku 4.2, kde v blízkém okolí maximálního výkonu článku dochází k zásadním změnám chování voltampérové charakteristiky pro jednotlivé metody měření.



Obrázek 4.2 Voltampérová charakteristika FV panelu ovlivněná vnitřní kapacitou

Vliv kapacity článku na měřený proud je výraznější u kratší doby vyvolaného záblesku, který osvítlí článek při měření VA charakteristik, a s vyšším výkonem fotovoltaického článku. Použitím solárního simulátoru s větší délkou vyvolaného záblesku ($> 100\text{ms}$) se výrazně snižuje vliv kapacity na měřené průběhy VA charakteristik pro oba směry měření, viz obrázek 4.3. [36][37]



Obrázek 4.3 Charakteristika změny výkonu při určitých dobách záblesku [37]

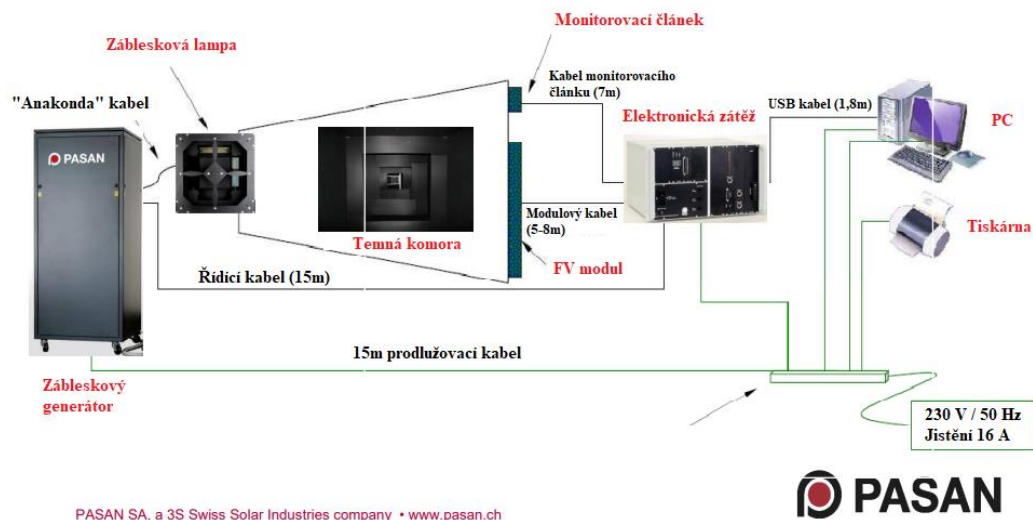
4.3 Standardní testovací podmínky (STC)

Pro měření parametrů fotovoltaických panelů byly vytvořeny standardní testovací podmínky (STC). Jsou dány normou ČSN EN IEC 60904. Podmínky definují intenzitu dopadajícího slunečního záření (1000 W/m^2), teplotu panelu ($25 \text{ }^\circ\text{C}$) a koeficient atmosférické masy ($AM = 1,5$), který definuje sluneční spektrum po průchodu zemskou atmosférou. [35][36]

4.4 Solární simulátor PASAN SunSim 3c

Jedná se o solární analyzátor, švýcarské firmy PASAN, PASAN Sun Sim 3c nejvyšší třídy A+/A+/A+ dle normy ČSN EN IEC 60904-9. Přístroje dané třídy splňují podmínky nehomogenity záření $< 1 \%$, dlouhodobé nestability záření $< 1 \%$ a spektra záření $\leq 12,5 \%$. Je určen k měření voltampérových charakteristik a základních parametrů fotovoltaických panelů. [39]

Solární analyzátor se skládá ze zábleskového generátoru, zábleskové lampy, temné komory, monitorovacího článku, elektronické zátěže, PC a kabelů spojující jednotlivé prvky.



Obrázek 4.4 Zapojení solárního analyzátoru PASAN SunSim 3c

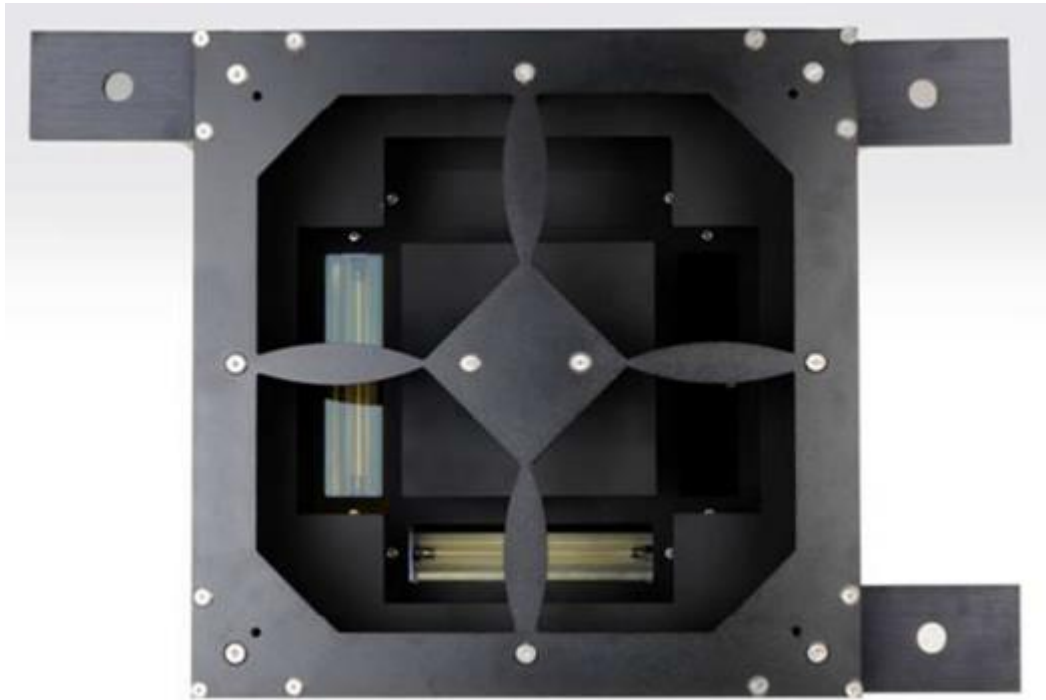
Zábleskový generátor slouží jako zdroj energie pro zábleskovou lampu. Je složen z několika vysokonapěťových kondenzátorů, které akumulují energii potřebnou k vytvoření záblesku. Chod zábleskového generátoru obstarávají elektronické karty (moduly). Každý modul je označen písmeny „BV“ a následně číslem. [40] Zábleskový generátor obsahuje tyto moduly:

- BV 77-1 a BV 77-4: Jedná se o napájecí moduly. První modul obsahuje zapínací/vypínací přepínač a indikátor napájení zábleskové lampy [40]
- BV 85-1: Řídící modul nabíjení obsahuje displej aktuálního napětí na kondenzátorech, indikátor alarmu a indikátor pro stav nabití kondenzátorů. Tento modul je připojen na elektronickou zátěž pomocí řídicího kabelu. [40]
- BV 85-4: Řídící modul pro vybíjení kondenzátorů a řízení teploty. [40]
- BV 85-81: Řídící modul pro regulaci intenzity záblesku. Tento modul je připojen k zábleskové lampě pomocí řídicího kabelu (používá se při měřeních se spektrálními filtry). [40]

Záblesková lampa je složena ze dvou xenonových výbojek, které rovnoměrně osvěcují fotovoltaický panel v krátkém časovém intervalu (při našem měření pro proměření celé voltampérové charakteristiky stačilo deset milisekund) zářením odpovídající podmínkám STC. Metoda osvětlování panelu je nazývána FLASH. Rovnoměrné ozáření testovaného modulu obstarává maska hvězdicového tvaru. [40]



Obrázek 4.5 Zábleskový generátor a lampa za zadní části temné komory



Obrázek 4.6 Záblesková lampa s hvězdicovou maskou [40]

Temná komora je prostor, ve kterém samotné měření probíhá. Na jednom konci komory je umístěna záblesková lampa a na druhém konci je umístěn testovaný fotovoltaický panel a monitorovací článek. Hlavní účel temné komory je izolovat záblesk, který má negativní vliv na lidské oko a izolovat vliv vnějšího světla.



Obrázek 4.7 Temná komora

Monitorovací článek slouží k měření intenzity záření v daném bodě, proto se umísťuje vedle měřeného fotovoltaického panelu. Společně s moduly BV 66-9 a BV 85-81 tvoří tzv. řídicí smyčku. [40]

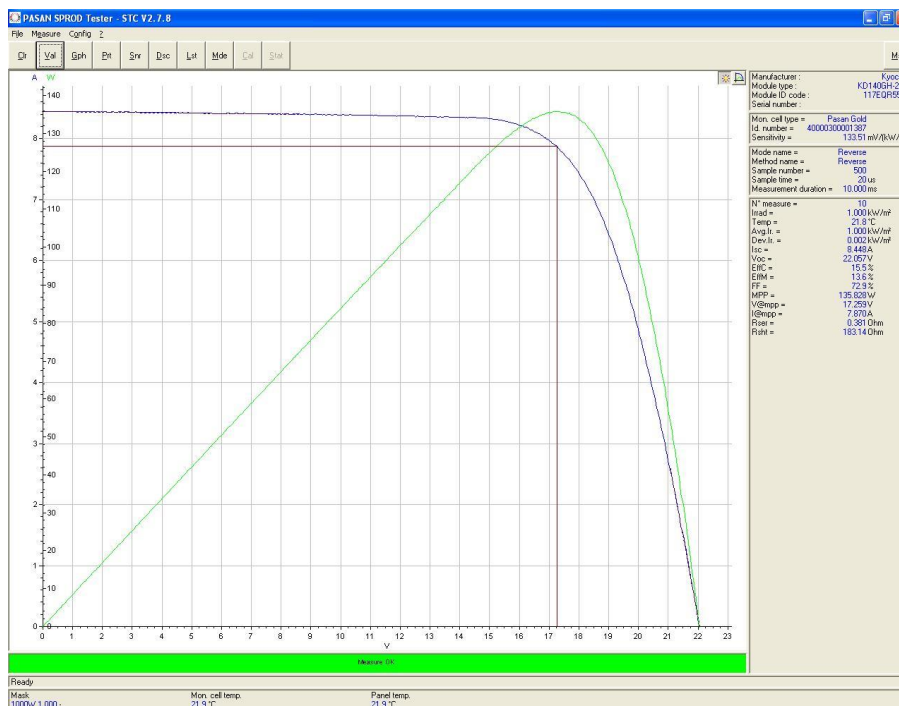
Elektronická zátěž je měřicí zařízení simulátoru SunSim. K elektronické zátěži je připojen zábleskový generátor pomocí řídicího kabelu, PC pomocí USB kabelu, monitorovací článek a testovaný modul. Elektronická zátěž obsahuje několik elektronických karet (modulů), které jsou označeny písmeny „BV“ a následně číslem. [40] Obsahuje tyto moduly:

- BV 66-9: Modul řízení záblesku obstarává komunikaci se zábleskovým generátorem pomocí řídicího kabelu. Je vybaven čítačem záblesků a třemi stavovými indikátory (ready, charge a alarm). [40]
- BV 67-2: USB modul, který hromadí měřená data a komunikuje s PC pomocí USB kabelu. Jedná se o logický modul pro řízení měření. [40]
- BV 67-3: Modul měření napětí obstarává měření napětí na testovaném modulu a na monitorovacím článku při vyvolaném záblesku. Dále zaznamenává teplotu změřenou na monitorovacím článku. Monitorovací článek je připojen k tomuto modulu. [40]
- BV 66-4: Modul měření proudu zajišťuje měření proudu testovacího modulu, který je generován při záblesku. [40]



Obrázek 4.8 Elektronická zátěž

K inicializaci a vyhodnocování měření se využívá počítačový software SPROD od firmy PASAN.



Obrázek 4.9 Vykreslená VA charakteristika v prostředí programu SPROD

Program nabízí měření několika režimy (standardní, reverzní a další).

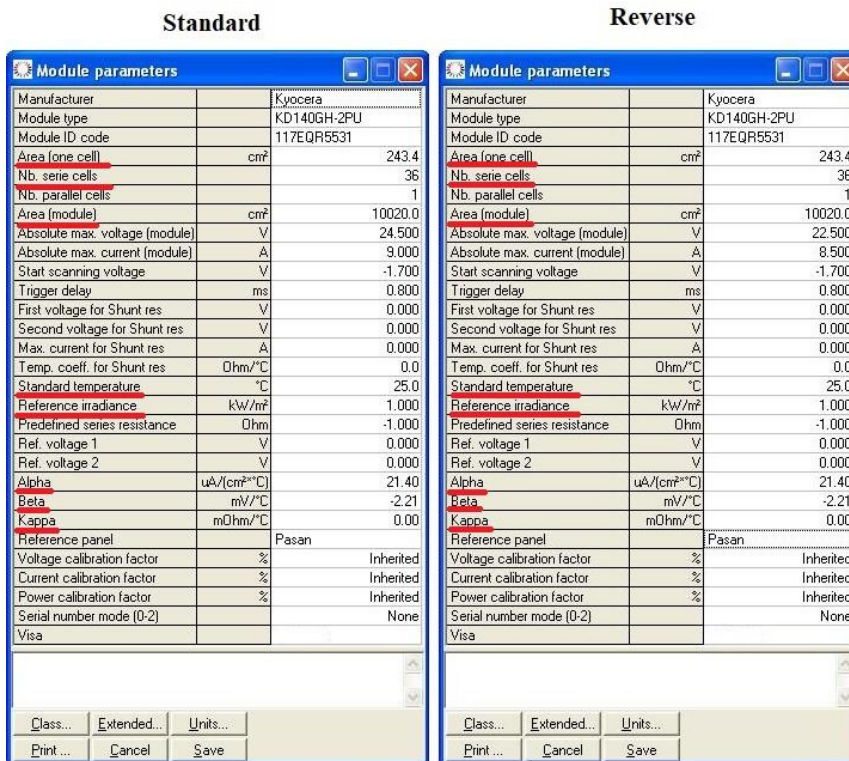
The screenshot shows the 'Modes list' dialog box in the SPROD software. It contains a table with the following data:

Mode name	Method	Created	Modified	Visa
Standard-SunSim	Direct	05-06-09	23-02-13	PASAN
Reverse	Reverse	21-09-12	05-09-22	PASAN
Split	Direct	21-09-12		PASAN
Riser	Direct	21-09-12		PASAN
Partial Power	Direct	21-09-12		PASAN
Stationary custom	Custom Stationary	21-09-12		PASAN
Standard-for Amorph	Direct	21-09-12	05-12-12	PASAN
Custom Ramp	Custom	21-09-12	21-09-12	PASAN

At the bottom of the dialog box, there are buttons for 'New ...', 'Copy ...', 'Modify ...', 'Delete', 'Import ...', 'Export ...', 'Use', and 'Exit'.

Obrázek 4.10 Nabídka režimů měření v programu SPROD

Před samotným měřením je třeba nastavit parametry testovaného fotovoltaického panelu z katalogového listu do nově vytvořeného/existujícího profilu daného panelu. Pro dodržení teplotní STC podmínky má program SPROD definované teplotní koeficienty (Alpha, Beta, Kappa), které upravují výsledky měření při nesprávné pracovní teplotě.



Obrázek 4.11 Nabídka pro nastavení parametrů panelu pro jednotlivé metody měření

5. STANOVENÍ NEJISTOT MĚŘENÍ PARAMETRŮ TESTOVANÝCH FOTOVOLTAICKÝCH PANELŮ

Nejistoty měření parametrů testovaných panelů byly stanoveny z měření VA charakteristiky daných modulů standardní a reverzní metodou měření na solárním simulátoru PASAN SunSim 3c při STC podmínkách. Každou metodou měření bylo proměřeno deset VA charakteristik panelu.

5.1 Výsledky měření

5.1.1 Polykrystalický panel KYOCERA KD140GH-2PU

Tabulka 5.1 Výsledky měření parametrů z VA charakteristik standardní metodou

Číslo měření	I_{SC} [A]	U_{OC} [V]	FF [%]	η [%]	I_{MP} [A]	U_{MP} [V]	P_{MP} [W]
1	8,45	22,08	72,8	13,5	7,83	17,34	135,73
2	8,45	22,09	72,7	13,5	7,85	17,28	135,69
3	8,44	22,09	72,8	13,5	7,80	17,40	135,71
4	8,44	22,09	72,7	13,5	7,88	17,21	135,65
5	8,44	22,09	72,7	13,5	7,86	17,26	135,66
6	8,44	22,09	72,7	13,5	7,84	17,30	135,58
7	8,44	22,09	72,7	13,5	7,81	17,36	135,62
8	8,44	22,09	72,7	13,5	7,88	17,21	135,65
9	8,44	22,09	72,7	13,5	7,88	17,21	135,65
10	8,44	22,09	72,7	13,5	7,83	17,32	135,61

Tabulka 5.2 Výsledky měření parametrů z VA charakteristik reverzní metodou

Číslo měření	I_{SC} [A]	U_{OC} [V]	FF [%]	η [%]	I_{MP} [A]	U_{MP} [V]	P_{MP} [W]
1	8,45	22,06	72,9	13,6	7,83	17,36	135,85
2	8,45	22,06	72,9	13,6	7,85	17,31	135,93
3	8,45	22,05	72,9	13,6	7,86	17,28	135,86
4	8,45	22,06	72,9	13,6	7,84	17,33	135,87
5	8,45	22,06	72,9	13,6	7,83	17,36	135,87
6	8,45	22,05	72,9	13,6	7,83	17,35	135,84
7	8,45	22,05	72,9	13,6	7,83	17,36	135,85
8	8,45	22,06	72,9	13,6	7,85	17,30	135,84
9	8,45	22,06	72,9	13,6	7,85	17,32	135,87
10	8,45	22,06	72,9	13,6	7,87	17,26	135,83

5.1.2 Monokrystalický panel ATERSA A-130

Tabulka 5.3 Výsledky měření parametrů z VA charakteristik standardní metodou

Číslo měření	I_{sc} [A]	U_{oc} [V]	FF [%]	η [%]	I_{MP} [A]	U_{MP} [V]	P_{MP} [W]
1	7,21	21,15	59,7	9,3	6,24	14,60	91,09
2	7,22	21,15	60,3	9,4	6,20	14,84	92,07
3	7,22	21,15	60,7	9,5	6,22	14,89	92,56
4	7,21	21,14	60,6	9,5	6,33	14,60	92,45
5	7,21	21,15	60,8	9,5	6,23	14,89	92,78
6	7,21	21,15	60,6	9,5	6,25	14,80	92,45
7	7,21	21,14	60,8	9,5	6,31	14,70	92,67
8	7,22	21,14	60,7	9,5	6,20	14,93	92,61
9	7,22	21,14	60,9	9,5	6,22	14,93	92,91
10	7,22	21,14	60,7	9,5	6,26	14,79	92,57

Tabulka 5.4 Výsledky měření parametrů z VA charakteristik reverzní metodou

Číslo měření	I_{sc} [A]	U_{oc} [V]	FF [%]	η [%]	I_{MP} [A]	U_{MP} [V]	P_{MP} [W]
1	7,2	20,60	63,2	9,6	6,28	14,94	93,78
2	7,2	20,14	64,5	9,6	6,26	14,95	93,56
3	7,2	19,91	65,2	9,6	6,21	15,05	93,46
4	7,2	20,62	63,1	9,6	6,26	14,94	93,56
5	7,2	20,10	64,6	9,6	6,26	14,94	93,49
6	7,2	20,47	63,4	9,6	6,28	14,89	93,49
7	7,2	20,34	63,8	9,6	6,23	15,00	93,42
8	7,2	19,73	65,8	9,6	6,28	14,88	93,48
9	7,2	19,51	66,5	9,6	6,24	14,99	93,46
10	7,2	20,50	63,4	9,6	6,22	15,05	93,56

5.1.3 Tenkovrstvý panel z amorfního křemíku EPV-50

Tabulka 5.5 Výsledky měření parametrů z VA charakteristik standardní metodou

Číslo měření	I_{SC} [A]	U_{OC} [V]	FF [%]	η [%]	I_{MP} [A]	U_{MP} [V]	P_{MP} [W]
1	1,39	63,18	61,6	6	1,14	47,69	54,13
2	1,39	63,18	61,6	6	1,15	47,30	54,17
3	1,39	63,19	61,7	6	1,14	47,69	54,20
4	1,39	63,19	61,6	6	1,14	47,60	54,18
5	1,39	63,19	61,6	6	1,14	47,69	54,20
6	1,39	63,17	61,6	6	1,13	47,98	54,19
7	1,39	63,18	61,6	6	1,14	47,54	54,17
8	1,39	63,19	61,6	6	1,14	47,70	54,15
9	1,39	63,18	61,6	6	1,14	47,49	54,19
10	1,39	63,19	61,6	6	1,14	47,69	54,20

Tabulka 5.6 Výsledky měření parametrů z VA charakteristik reverzní metodou

Číslo měření	I_{SC} [A]	U_{OC} [V]	FF [%]	η [%]	I_{MP} [A]	U_{MP} [V]	P_{MP} [W]
1	1,39	63,27	62	6,1	1,15	47,34	54,57
2	1,39	63,28	62	6,1	1,15	47,49	54,60
3	1,39	63,30	62	6,1	1,15	47,59	54,58
4	1,39	63,29	62	6,1	1,13	48,13	54,56
5	1,39	63,28	62	6,1	1,13	48,13	54,56
6	1,39	63,28	62	6,1	1,15	47,59	54,58
7	1,39	63,29	62	6,1	1,13	48,27	54,59
8	1,39	63,30	62	6,1	1,15	47,49	54,60
9	1,39	63,28	62	6,1	1,15	47,49	54,60
10	1,39	63,30	62	6,1	1,16	47,20	54,54

5.1.4 Monokrystalický panel R-TG 120n/340 s technologií PERC

Tabulka 5.7 Výsledky měření parametrů z VA charakteristik standardní metodou

Číslo měření	I_{SC} [A]	U_{OC} [V]	FF [%]	η [%]	I_{MP} [A]	U_{MP} [V]	P_{MP} [W]
1	9,88	40,96	78,9	18,6	9,54	33,49	319,48
2	9,88	40,96	79,0	18,6	9,51	33,59	319,43
3	9,87	40,94	79,0	18,6	9,51	33,59	319,43
4	9,87	40,95	79,0	18,6	9,41	33,93	319,20
5	9,87	40,95	79,0	18,6	9,41	33,93	319,20
6	9,87	40,96	78,9	18,6	9,40	33,94	318,96
7	9,87	40,96	78,9	18,6	9,40	33,94	318,96
8	9,87	40,96	79,0	18,6	9,41	33,93	319,20
9	9,87	40,95	78,9	18,6	9,39	33,94	318,75
10	9,87	40,96	78,9	18,6	9,50	33,60	318,99

Tabulka 5.8 Výsledky měření parametrů z VA charakteristik reverzní metodou

Číslo měření	I_{SC} [A]	U_{OC} [V]	FF [%]	η [%]	I_{MP} [A]	U_{MP} [V]	P_{MP} [W]
1	9,87	41,28	89,1	21,1	9,79	37,08	362,97
2	9,86	41,25	89,1	21,1	9,79	37,04	362,47
3	9,87	41,30	89,1	21,1	9,80	37,04	363,01
4	9,87	41,31	89,1	21,1	9,81	37,04	363,19
5	9,87	41,30	89,1	21,1	9,79	37,08	363,13
6	9,86	41,29	89,1	21,1	9,78	37,08	362,77
7	9,87	41,28	89,1	21,1	9,80	37,04	363,01
8	9,87	41,30	89,0	21,1	9,77	37,13	362,88
9	9,87	41,30	89,0	21,1	9,86	36,80	362,83
10	9,87	41,28	89,1	21,1	9,87	36,80	363,01

5.2 Stanovení nejistot měření parametrů testovaných panelů

Teoretický postup výpočtu nejistot je uveden v třetí kapitole. Příklad výpočtu nejistot parametrů panelů je aplikován na výpočtu nejistoty proudu nakrátko I_{SC} panelu KYOCERA KD140GH-2PU. Nejistoty dalších parametrů u dalších panelů byly vypočteny obdobným způsobem.

5.2.1 Standartní nejistota typu A

Byla stanovena statistickým výpočtem:

Odhad hodnoty proudu nakrátko je dán vztahem (3.1). Dosazením naměřených hodnot do vztahu definujeme odhad hodnoty I_{SC} .

$$\bar{x} = \frac{1}{10} \cdot \sum_1^{10} x_i = \frac{1}{10} \cdot (8,447 + 8,446 + 8,444 + 8,444 + 8,444 + 8,442 + 8,441 + 8,442 + 8,444 + 8,442) = 8,444 \text{ A} \quad (5.1)$$

Směrodatná odchylka je dána vztahem (3.2). Dosazením vypočtených a naměřených hodnot do vztahu definujeme směrodatnou odchylku.

$$s_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_1^{10} (x_i - \bar{x})^2}{10 \cdot (10-1)}} = \sqrt{\frac{(8,447-8,444)^2 + (8,446-8,444)^2 + \dots + (8,442-8,444)^2}{10 \cdot 9}} = 0,0006 \text{ A} \quad (5.2)$$

Nejistota typu A je definována vztahem (3.3). Bylo provedeno deset měření VA charakteristiky, tedy hodnota koeficientu k_S činí 1. Dosazením do vztahu definujeme nejistotu typu A.

$$u_A = k_S \cdot s_{\bar{x}} = 1 \cdot 0,0006 = 0,0006 \text{ A} \quad (5.3)$$

5.2.2 Standartní nejistota typu B

Byla stanovena pomocí dostupných nejistot výstupních parametrů, které jsou závislé na nejistotách jednotlivých komponentů solárního simulátoru Pasan SunSim 3c. Výpočet je uveden v Příloha B - Výpočet nejistot solárního simulátoru Pasan.

Tabulka 5.9 Nejistoty výstupních parametrů solárního analyzátoru Pasan

Parametr	Nejistota $u_B\%$ [%]	Nejistota [-]	Nejistota u_B pro výpočet
I_{SC}	2,9	0,029	0,1224 A
U_{OC}	1,7	0,017	0,1877 V
FF	4,2	0,042	1,5271 %
η	3,5	0,035	0,2363 %
I_{MP}	3,1	0,031	0,1216 A
U_{MP}	2,0	0,020	0,1729 V
P_{MP}	3,2	0,032	2,1705 W

Uvedená procentuální hodnota odpovídá rozšířené nejistotě daného parametru při 95 % pravděpodobnosti výskytu hodnoty na určitém intervalu. Pro správné definování nejistoty typu B je potřeba procentuální hodnotu vynásobit s vypočteným odhadem měřeného parametru a následně podělit hodnotou 2, aby nejistota byla pouze s pravděpodobností 68 % výskytu hodnoty na určitém intervalu. Dosazením do vztahu definujeme příklad výpočtu nejistoty typu B.

$$u_B = \frac{u_{B\%} \cdot \bar{x}}{2} = \frac{0,029 \cdot 8,444}{2} = 0,1224 \text{ A} \quad (5.4)$$

5.2.3 Kombinovaná standartní nejistota

Je dána vztahem (3.6). Dosazení jednotlivých nejistot do vztahu:

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{(0,0006)^2 + (0,1224)^2} = 0,1224 \text{ A} \quad (5.5)$$

5.2.4 Kombinovaná standartní nejistota s funkcí

Z charakteristiky v 4.3 vychází, že skutečná hodnota maximálního výkonu není určena průměrnou hodnotou maximálního výkonu metod standard a reverz, ale skutečná hodnota náleží v třetině intervalu mezi těmito metodami. Charakteristika je platná pro metody měření, které byly výrazně ovlivněny vnitřní kapacitou článků (v našem případě panel R-TG 120n/340). Odhad maximálního výkonu lze zohlednit zavedením váhy jednotlivých metod. Obdobně je upraveno i napětí v bodě maximálního výkonu.

Odhad hodnoty maximálního výkonu je dán vztahem:

$$P_{Sk} = \bar{x}_{St} + \frac{1}{3} \cdot (\bar{x}_{Re} - \bar{x}_{St}) = 319,16 + \frac{1}{3} \cdot (362,93 - 319,16) = 333,75 \text{ W} \quad (5.6)$$

U tohoto vztahu \bar{x}_{St} představuje odhad hodnoty maximálního výkonu standartní metody a \bar{x}_{Re} metody reverzní.

Odhad hodnoty napětí v bodě maximálního výkonu lze určit dosazením odhadu hodnoty maximálního výkonu do směrnice spojnice ($y = 13,935x - 153,65$) bodů maximálního výkonu (viz graf C.16). Osu Y zastupuje výkon (P) a osu X napětí (U).

Odhad hodnoty napětí v bodě maximálního výkonu je dána vztahem:

$$\begin{aligned} y &= 13,935 \cdot x - 153,65 \rightarrow P_{Sk} = 13,935 \cdot U_{Sk} - 153,65 \\ \rightarrow U_{Sk} &= \frac{P_{Sk} + 153,65}{13,935} = \frac{333,75 + 153,65}{13,935} = 34,98 \text{ V} \end{aligned} \quad (5.7)$$

Váhy jednotlivých metod jsou dány vztahem:

$$\begin{aligned} V_{Pmp-St} &= \frac{\bar{x}_{St}}{P_{Sk}} = \frac{319,16}{333,75} = 0,96 \text{ (-)} \\ V_{Pmp-Re} &= \frac{\bar{x}_{Re}}{P_{Sk}} = \frac{362,93}{333,75} = 1,09 \text{ (-)} \end{aligned} \quad (5.8)$$

U tohoto vztahu \bar{x}_{St} představuje odhad hodnoty maximálního výkonu standartní metody, \bar{x}_{Re} metody reverzní a P_{Sk} odhad hodnoty maximálního výkonu. Příklad výpočtu váhy je uveden pro maximální výkon P_{MP} , stejný postup byl následně proveden analogicky pro napětí v bodě maximálního výkonu U_{MP} .

U kombinované nejistoty maximálního výkonu (P_{MP}) a napětí v bodě maximálního výkonu (U_{MP}) panelu R-TG 120n/340 je potřeba vzorec upravit následovně:

$$\begin{aligned} u_C &= \sqrt{V_{Pmp-St}^2 \cdot u_{A-St}^2 + V_{Pmp-St}^2 \cdot u_{B-St}^2 +} \\ &= \sqrt{+V_{Pmp-Re}^2 \cdot u_{A-Re}^2 + V_{Pmp-Re}^2 \cdot u_{B-Re}^2} = \\ &= \sqrt{(0,96)^2 \cdot (0,08)^2 + (0,96)^2 \cdot (5,11)^2 +} \\ &= \sqrt{+(1,09)^2 \cdot (0,06)^2 + (1,09)^2 \cdot (5,81)^2} = 7,98 \text{ W} \end{aligned} \quad (5.9)$$

U tohoto vztahu V_{St} představuje váhu standartní metody, V_{Re} váhu reverzní metody, u_{A-St} nejistotu typu A pro standartní metodu, u_{B-St} nejistotu typu B pro standartní metodu, u_{A-Re} nejistotu typu A pro reverzní metodu a u_{B-Re} nejistotu typu B pro reverzní metodu. Příklad výpočtu kombinované nejistoty s funkcí je uveden pro maximální výkon P_{MP} , stejný postup byl následně proveden analogicky pro napětí v bodě maximálního výkonu U_{MP} .

5.2.5 Rozšířená standartní nejistota

Je dána vztahem (3.8). Pro 95 % pravděpodobnost výskytu skutečné hodnoty měřené veličiny (proudu nakrátko) na daném intervalu hodnota koeficientu k_u činí 2. Dosazení hodnot do vztahu:

$$U = k_u \cdot u_C = 2 \cdot 0,1224 = 0,2449 \text{ A} \quad (5.10)$$

5.3 Výsledky výpočtů

5.3.1 Polykrystalický panel KYOCERA KD140GH-2PU

Tabulka 5.10 Výsledky výpočtů nejistot parametrů panelu standardní metodou

Parametr	I_{SC} [A]	U_{OC} [V]	FF [%]	η [%]	I_{MP} [A]	U_{MP} [V]	P_{MP} [W]
Odhad hodnoty měřené veličiny	8,44	22,09	72,72	13,5	7,85	17,29	135,65
Směrodatná odchylka	0	0	0,01	0	0,01	0,02	0,01
Nejistota typu A	0	0	0,01	0	0,01	0,02	0,01
Nejistota typu B	0,12	0,19	1,53	0,24	0,12	0,17	2,17
Kombinovaná nejistota	0,12	0,19	1,53	0,24	0,12	0,17	2,17
Rozšířená nejistota (95 %)	0,24	0,38	3,05	0,47	0,24	0,35	4,34

Tabulka 5.11 Výsledky výpočtů nejistot parametrů panelu reverzní metodou

Parametr	I_{SC} [A]	U_{OC} [V]	FF [%]	η [%]	I_{MP} [A]	U_{MP} [V]	P_{MP} [W]
Odhad hodnoty měřené veličiny	8,45	22,06	72,9	13,6	7,84	17,32	135,86
Směrodatná odchylka	0	0	0	0	0	0,01	0,01
Nejistota typu A	0	0	0	0	0	0,01	0,01
Nejistota typu B	0,12	0,19	1,53	0,24	0,12	0,17	2,17
Kombinovaná nejistota	0,12	0,19	1,53	0,24	0,12	0,17	2,17
Rozšířená nejistota (95 %)	0,25	0,37	3,06	0,48	0,24	0,35	4,35

Tabulka 5.12 Výsledky výpočtů nejistot parametrů panelu pro obě metody

Parametry	I_{SC} [A]	U_{OC} [V]	FF [%]	η [%]	I_{MP} [A]	U_{MP} [V]	P_{MP} [W]
Odhad hodnoty měřené veličiny	8,45	22,07	72,81	13,55	7,84	17,31	135,76
Směrodatná odchylka	0	0	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02
Nejistota typu A	0	0	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02
Nejistota typu B	0,12	0,19	1,53	0,24	0,12	0,17	2,17
Kombinovaná nejistota	0,12	0,19	1,53	0,24	0,12	0,17	2,17
Rozšířená nejistota (95 %)	0,24	0,38	3,06	0,47	0,24	0,35	4,34

Tabulka 5.13 Porovnání výsledků nejistot mezi metodami měření a katalogovými údaji

Parametry	Standard	Reverse	Standard + Reverse	Katalogový list
I_{SC} [A]	8,44 ± 0,24	8,45 ± 0,25	8,45 ± 0,24	8,68
U_{OC} [V]	22,09 ± 0,38	22,06 ± 0,37	22,07 ± 0,38	22,1
FF [%]	72,72 ± 3,05	72,9 ± 3,06	72,81 ± 3,06	/
η [%]	13,5 ± 0,47	13,6 ± 0,48	13,55 ± 0,47	13,9
I_{MP} [A]	7,85 ± 0,24	7,84 ± 0,24	7,84 ± 0,24	7,91
U_{MP} [V]	17,29 ± 0,35	17,32 ± 0,35	17,31 ± 0,35	17,7
P_{MP} [W]	135,65 ± 4,34	135,86 ± 4,35	135,76 ± 4,34	140

Zápis výsledku nejistot měření je definován jako odhad hodnoty měřené veličiny ± rozšířená nejistota, kdy odhad hodnoty měřené veličiny reprezentuje průměrnou hodnotu a rozšířená nejistota hodnotu odchylky od průměrné hodnoty. Rozšířená nejistota garantuje výskyt naměřených hodnot v tomto intervalu s pravděpodobností 95 %.

Z naměřených (podkapitola 5.1.1) a vypočtených (podkapitola 5.3.1) hodnot měření byla vynesena VA charakteristika (příloha C.3) a výkonová charakteristika (příloha C.4), ve kterých jsou znázorněny i limity nejistot kolem průměrných odhadů daných parametrů. V grafech (příloha C.1 a C.2) jsou vyneseny změřené hodnoty maximálního výkonu v okolí průměrného odhadu maximálního výkonu i s definovanými limity vypočtené nejistoty. Vliv kapacit článků na VA charakteristiku panelu Kyocera KD140GH-2PU je zanedbatelný. Vynesené charakteristiky odpovídají teoretickým předpokladům z obrázku 4.1. Zápisy výsledků nejistot jsou uvedeny v tabulce 5.13 a výsledek nejistot obou metod (Standard + Reverse) odpovídá údajům z katalogového listu výrobce panelu zde uvedených.

5.3.2 Monokrystalický panel ATERSA A-130

Tabulka 5.14 Výsledky výpočtů nejistot parametrů panelu standardní metodou

Parametr	I_{SC} [A]	U_{OC} [V]	FF [%]	η [%]	I_{MP} [A]	U_{MP} [V]	P_{MP} [W]
Odhad hodnoty měřené veličiny	7,21	21,15	60,58	9,47	6,25	14,8	92,41
Směrodatná odchylka	0	0	0,11	0,02	0,01	0,04	0,16
Nejistota typu A	0	0	0,11	0,02	0,01	0,04	0,16
Nejistota typu B	0,1	0,18	1,27	0,17	0,1	0,15	1,48
Kombinovaná nejistota	0,1	0,18	1,28	0,17	0,1	0,15	1,49
Rozšířená nejistota (95 %)	0,21	0,36	2,55	0,33	0,2	0,31	2,98

Tabulka 5.15 Výsledky výpočtů nejistot parametrů panelu reverzní metodou

Parametr	I_{SC} [A]	U_{OC} [V]	FF [%]	η [%]	I_{MP} [A]	U_{MP} [V]	P_{MP} [W]
Odhad hodnoty měřené veličiny	7,2	20,19	64,35	9,6	6,25	14,96	93,53
Směrodatná odchylka	0	0,12	0,37	0	0,01	0,02	0,03
Nejistota typu A	0	0,12	0,37	0	0,01	0,02	0,03
Nejistota typu B	0,1	0,17	1,35	0,17	0,1	0,15	1,5
Kombinovaná nejistota	0,1	0,21	1,4	0,17	0,1	0,15	1,5
Rozšířená nejistota (95 %)	0,21	0,42	2,8	0,34	0,19	0,3	2,99

Tabulka 5.16 Výsledky výpočtů nejistot parametrů panelu pro obě metody

Parametry	I_{SC} [A]	U_{OC} [V]	FF [%]	η [%]	I_{MP} [A]	U_{MP} [V]	P_{MP} [W]
Odhad hodnoty měřené veličiny	7,21	20,67	62,47	9,54	6,25	14,88	92,97
Směrodatná odchylka	0	0,12	0,47	0,02	0,01	0,03	0,15
Nejistota typu A	0	0,12	0,47	0,02	0,01	0,03	0,15
Nejistota typu B	0,1	0,18	1,31	0,17	0,1	0,15	1,49
Kombinovaná nejistota	0,1	0,22	1,39	0,17	0,1	0,15	1,5
Rozšířená nejistota (95 %)	0,21	0,43	2,79	0,34	0,19	0,3	2,99

Tabulka 5.17 Porovnání výsledků nejistot mezi metodami měření a katalogovými údaji

Parametry	Standard	Reverse	Standard + Reverse	Katalogový list
I_{SC} [A]	7,21 ± 0,21	7,2 ± 0,21	7,21 ± 0,21	8,1
U_{OC} [V]	21,15 ± 0,36	20,19 ± 0,42	20,67 ± 0,43	21,3
FF [%]	60,58 ± 2,55	64,35 ± 2,8	62,47 ± 2,79	75,3
η [%]	9,47 ± 0,33	9,6 ± 0,34	9,54 ± 0,34	13,3
I_{MP} [A]	6,25 ± 0,2	6,25 ± 0,19	6,25 ± 0,19	7,54
U_{MP} [V]	14,8 ± 0,31	14,96 ± 0,3	14,88 ± 0,3	17,2
P_{MP} [W]	92,41 ± 2,98	93,53 ± 2,99	92,97 ± 2,99	130

Z naměřených (podkapitola 5.1.2) a vypočtených (podkapitola 5.3.2) hodnot měření byla vynesena VA charakteristika (příloha C.7) a výkonová charakteristika (příloha C.8), ve kterých jsou znázorněny i limity nejistot kolem průměrných odhadů daných parametrů. V grafech (příloha C.5 a C.6) jsou vyneseny změřené hodnoty maximálního výkonu v okolí průměrného odhadu maximálního výkonu i s definovanými limity vypočtené nejistoty. Vliv kapacit článků na VA charakteristiku panelu Atersa A-130 je zanedbatelný. Vynesené charakteristiky odpovídají teoretickým předpokladům z obrázku 4.1. Zápisy výsledků nejistot jsou uvedeny v tabulce 5.17 a výsledky nejistot obou metod (Standard + Reverse) neodpovídají údajům z katalogového listu výrobce panelu zde uvedených. Neshoda s katalogovými údaji je nejpravděpodobněji způsobena stářím či poškozením panelu.

Rozptyl nejistot u napětí naprázdno U_{OC} panelu Atersa A 130 není způsoben vlivem vnitřních kapacit článků, ale neoptimálním nastavením parametrů panelu pro reverzní metodu měření, které způsobilo změření nedostačujícího množství bodů v blízkém okolí napětí naprázdno U_{OC} .

5.3.3 Tenkovrstvý panel z amorfního křemíku EPV-50

Tabulka 5.18 Výsledky výpočtů nejistot parametrů panelu standardní metodou

Parametr	I_{sc} [A]	U_{oc} [V]	FF [%]	η [%]	I_{MP} [A]	U_{MP} [V]	P_{MP} [W]
Odhad hodnoty měřené veličiny	1,39	63,18	61,61	6	1,14	47,64	54,18
Směrodatná odchylka	0	0	0,01	0	0	0,06	0,01
Nejistota typu A	0	0	0,01	0	0	0,06	0,01
Nejistota typu B	0,02	0,54	1,29	0,11	0,02	0,48	0,87
Kombinovaná nejistota	0,02	0,54	1,29	0,11	0,02	0,48	0,87
Rozšířená nejistota (95 %)	0,04	1,07	2,59	0,21	0,04	0,96	1,73

Tabulka 5.19 Výsledky výpočtů nejistot parametrů panelu reverzní metodou

Parametr	I_{sc} [A]	U_{oc} [V]	FF [%]	η [%]	I_{MP} [A]	U_{MP} [V]	P_{MP} [W]
Odhad hodnoty měřené veličiny	1,39	63,29	62,02	6,10	1,15	47,67	54,58
Směrodatná odchylka	0	0	0,01	0	0	0,12	0,01
Nejistota typu A	0	0	0,01	0	0	0,12	0,01
Nejistota typu B	0,02	0,54	1,3	0,11	0,02	0,48	0,87
Kombinovaná nejistota	0,02	0,54	1,3	0,11	0,02	0,49	0,87
Rozšířená nejistota (95 %)	0,04	1,08	2,6	0,21	0,04	0,98	1,75

Tabulka 5.20 Výsledky výpočtů nejistot parametrů panelu pro obě metody

Parametry	I_{SC} [A]	U_{OC} [V]	FF [%]	η [%]	I_{MP} [A]	U_{MP} [V]	P_{MP} [W]
Odhad hodnoty měřené veličiny	1,39	63,24	61,82	6,05	1,14	47,65	54,38
Směrodatná odchylka	0	0,01	0,05	0,01	0	0,06	0,05
Nejistota typu A	0	0,01	0,05	0,01	0	0,06	0,05
Nejistota typu B	0,02	0,54	1,3	0,11	0,02	0,48	0,87
Kombinovaná nejistota	0,02	0,54	1,3	0,11	0,02	0,48	0,87
Rozšířená nejistota (95 %)	0,04	1,08	2,6	0,21	0,04	0,96	1,74

Tabulka 5.21 Porovnání výsledků nejistot mezi metodami měření a katalogovými údaji

Parametry	Standard	Reverse	Standard + Reverse	Katalogový list
I_{SC} [A]	$1,39 \pm 0,04$	$1,39 \pm 0,04$	$1,39 \pm 0,04$	1,41
U_{OC} [V]	$63,18 \pm 1,07$	$63,29 \pm 1,08$	$63,24 \pm 1,08$	60
FF [%]	$61,61 \pm 2,59$	$62,02 \pm 2,6$	$61,82 \pm 2,6$	/
η [%]	$6 \pm 0,21$	$6,1 \pm 0,21$	$6,05 \pm 0,21$	/
I_{MP} [A]	$1,14 \pm 0,04$	$1,15 \pm 0,04$	$1,14 \pm 0,04$	1,12
U_{MP} [V]	$47,64 \pm 0,96$	$47,67 \pm 0,98$	$47,65 \pm 0,96$	45
P_{MP} [W]	$54,18 \pm 1,73$	$54,58 \pm 1,75$	$54,38 \pm 1,74$	$50 \pm 2,5$

Z naměřených (podkapitola 5.1.3) a vypočtených (podkapitola 5.3.3) hodnot měření byla vynesena VA charakteristika (příloha C.11) a výkonová charakteristika (příloha C.12), ve kterých jsou znázorněny i limity nejistot kolem průměrných odhadů daných parametrů. V grafech (příloha C.9 a C.10) jsou vyneseny změřené hodnoty maximálního výkonu v okolí průměrného odhadu maximálního výkonu i s definovanými limity vypočtené nejistoty. Vliv kapacit článků na VA charakteristiku panelu EPV-50 je zanedbatelný. Vynesené charakteristiky odpovídají teoretickým předpokladům z obrázku 4.1. Zápisy výsledků nejistot jsou uvedeny v tabulce 5.21 a výsledek nejistot obou metod (Standard + Reverse) odpovídá údajům z katalogového listu výrobce panelu zde uvedených.

5.3.4 Monokrystalický panel R-TG 120n/340 s technologií PERC

Tabulka 5.22 Výsledky výpočtů nejistot parametrů panelu standardní metodou

Parametr	I_{SC} [A]	U_{OC} [V]	FF [%]	η [%]	I_{MP} [A]	U_{MP} [V]	P_{MP} [W]
Odhad hodnoty měřené veličiny	9,87	40,95	78,95	18,6	9,45	33,79	319,16
Směrodatná odchylka	0	0	0,02	0	0,02	0,06	0,08
Nejistota typu A	0	0	0,02	0	0,02	0,06	0,08
Nejistota typu B	0,14	0,35	1,66	0,33	0,15	0,34	5,11
Kombinovaná nejistota	0,14	0,35	1,66	0,33	0,15	0,34	5,11
Rozšířená nejistota (95 %)	0,29	0,7	3,32	0,65	0,3	0,69	10,21

Tabulka 5.23 Výsledky výpočtů nejistot parametrů panelu reverzní metodou

Parametr	I_{SC} [A]	U_{OC} [V]	FF [%]	η [%]	I_{MP} [A]	U_{MP} [V]	P_{MP} [W]
Odhad hodnoty měřené veličiny	9,87	41,29	89,08	21,1	9,81	37,01	362,93
Směrodatná odchylka	0	0,01	0,01	0	0,01	0,04	0,06
Nejistota typu A	0	0,01	0,01	0	0,01	0,04	0,06
Nejistota typu B	0,14	0,35	1,87	0,37	0,15	0,37	5,81
Kombinovaná nejistota	0,14	0,35	1,87	0,37	0,15	0,37	5,81
Rozšířená nejistota (95 %)	0,29	0,7	3,74	0,74	0,3	0,74	11,61

Tabulka 5.24 Výsledky výpočtů nejistot parametrů panelu pro obě metody

Parametry	I_{SC} [A]	U_{OC} [V]	FF [%]	η [%]	I_{MP} [A]	U_{MP} [V]	P_{MP} [W]
Odhad hodnoty měřené veličiny	9,87	41,12	84,02	19,85	9,63	34,98	333,75
Směrodatná odchylka	0	0,04	1,16	0,29	0,04	-	-
Nejistota typu A	0	0,04	1,16	0,29	0,04	-	-
Nejistota typu B	0,14	0,35	1,76	0,35	0,15	-	-
Kombinovaná nejistota	0,14	0,35	2,11	0,45	0,16	0,51	7,98
Rozšířená nejistota (95 %)	0,29	0,7	4,23	0,9	0,31	1,03	15,97

Tabulka 5.25 Porovnání výsledků nejistot mezi metodami měření a katalogovými údaji

Parametry	Standard	Reverse	Standard + Reverse	Katalogový list
I_{SC} [A]	$9,87 \pm 0,29$	$9,87 \pm 0,29$	$9,87 \pm 0,29$	10,4
U_{OC} [V]	$40,95 \pm 0,7$	$41,29 \pm 0,7$	$41,12 \pm 0,7$	41,35
FF [%]	$78,95 \pm 3,32$	$89,08 \pm 3,74$	$84,02 \pm 4,23$	/
η [%]	$18,6 \pm 0,65$	$21,1 \pm 0,74$	$19,85 \pm 0,9$	19,8
I_{MP} [A]	$9,45 \pm 0,3$	$9,81 \pm 0,3$	$9,63 \pm 0,31$	9,96
U_{MP} [V]	$33,79 \pm 0,69$	$37,01 \pm 0,74$	$34,98 \pm 1,03$	34,13
P_{MP} [W]	$319,16 \pm 10,21$	$362,93 \pm 11,61$	$333,75 \pm 15,97$	340

Z naměřených (podkapitola 5.1.4) a vypočtených (podkapitola 5.3.4) hodnot měření byla vynesena VA charakteristika (příloha C.15) a výkonová charakteristika (příloha C.16), ve kterých jsou znázorněny i limity nejistot kolem průměrných odhadů daných parametrů. V grafech (příloha C.13 a C.14) jsou vyneseny změřené hodnoty maximálního výkonu v okolí průměrného odhadu maximálního výkonu i s definovanými limity vypočtené nejistoty. Vliv vnitřní kapacity článků se projevil u tohoto panelu výrazně. Z grafu (příloha C.15) lze vidět průběhy jednotlivých metod a jejich rozdílnosti, které odpovídají teorii z kapitoly 4.2. Zápisy výsledků nejistot jsou uvedeny v tabulce 5.25 a výsledek nejistot obou metod (Standard + Reverse) odpovídá údajům z katalogového listu výrobce panelu zde uvedených.

5.3.5 Přehled vypočtených nejistot

Tabulka 5.26 Výsledky vypočtených rozšířených nejistot v absolutních hodnotách

	Kyocera KD140GH-2PU			Atersa A 130		
Parametry	Standard	Reverse	Standard+Reverse	Standard	Reverse	Standard+Reverse
I_{SC} [A]	0,24	0,25	0,24	0,21	0,21	0,21
U_{OC} [V]	0,38	0,37	0,38	0,36	0,42	0,43
FF [%]	3,05	3,06	3,06	2,55	2,8	2,79
η [%]	0,47	0,48	0,47	0,33	0,34	0,34
I_{MP} [A]	0,24	0,24	0,24	0,2	0,19	0,19
U_{MP} [V]	0,35	0,35	0,35	0,31	0,3	0,30
P_{MP} [W]	4,34	4,35	4,34	2,98	2,99	2,99
	EPV 50			R-TG 120n/340		
Parametry	Standard	Reverse	Standard+Reverse	Standard	Reverse	Standard+Reverse
I_{SC} [A]	0,04	0,04	0,04	0,29	0,29	0,29
U_{OC} [V]	1,07	1,08	1,08	0,7	0,7	0,70
FF [%]	2,59	2,6	2,60	3,32	3,74	4,23
η [%]	0,21	0,21	0,21	0,65	0,74	0,90
I_{MP} [A]	0,04	0,04	0,04	0,3	0,3	0,31
U_{MP} [V]	0,96	0,98	0,96	0,69	0,74	1,03
P_{MP} [W]	1,73	1,75	1,74	10,21	11,61	15,97

Přepočítání absolutní hodnoty rozšířené nejistoty na relativní hodnotu je dán vztahem:

$$I_{SC} [\%] = \frac{U_{Isc} [A]}{\bar{x}_{Isc}} \cdot 100 = \frac{0,24}{8,44} \cdot 100 = 2,84 \% \quad (5.11)$$

U tohoto vztahu $I_{SC} [\%]$ reprezentuje relativní rozšířenou nejistotu proudu nakrátko, $U_{Isc} [A]$ absolutní rozšířenou nejistotu proudu nakrátko a \bar{x}_{Isc} odhad hodnoty proudu nakrátko.

Tabulka 5.27 Výsledky vypočtených rozšířených nejistot v relativních hodnotách

	Kyocera KD140GH-2PU			Atersa A 130		
Parametry	Standard	Reverse	Standard+Reverse	Standard	Reverse	Standard+Reverse
I _{SC} [%]	2,84	2,96	2,84	2,91	2,92	2,90
U _{OC} [%]	1,72	1,68	1,72	1,70	2,08	2,08
FF [%]	4,19	4,20	4,20	4,21	4,35	4,46
η [%]	3,48	3,53	3,47	3,48	3,54	3,52
I _{MP} [%]	3,06	3,06	3,06	3,20	3,04	3,11
U _{MP} [%]	2,02	2,02	2,02	2,10	2,00	2,04
P _{MP} [%]	3,20	3,20	3,20	3,22	3,20	3,22
	EPV 50			R-TG 120n/340		
Parametry	Standard	Reverse	Standard+Reverse	Standard	Reverse	Standard+Reverse
I _{SC} [%]	2,87	2,88	2,90	2,94	2,94	2,90
U _{OC} [%]	1,69	1,71	1,70	1,71	1,70	1,71
FF [%]	4,20	4,19	4,20	4,21	4,20	5,03
η [%]	3,50	3,44	3,52	3,49	3,51	4,54
I _{MP} [%]	3,52	3,49	3,12	3,18	3,06	3,22
U _{MP} [%]	2,02	2,06	2,02	2,04	2,00	2,91
P _{MP} [%]	3,19	3,21	3,20	3,20	3,20	4,68

6. ZÁVĚR

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo stanovení nejistot měření parametrů fotovoltaických panelů Kyocera KD140GH-2PU, Atersa A 130, EPV-50 a R-TG 120n/340 na solárním simulátoru PASAN SunSim 3c. Dalšími cíli bylo seznámit se s technologiemi výroby starších, používaných a nově vznikajících fotovoltaických panelů, problematikou samotných nejistot měření a měření VA charakteristik fotovoltaických článků při podmínkách STC.

Naměřené voltampérové a výkonové charakteristiky všech panelů souhlasí s teoretickými předpoklady uvedené v obrázku 4.1. Měření byly prováděny za standardních testovacích podmínek, tedy při teplotě panelu 25 °C, intenzitě dopadajícího slunečního záření 1000 W/m² a koeficientu atmosférické masy $AM = 1,5$. Podmínky byly ošetřeny monitorovacím článkem umístěného v blízkosti panelu pro podmínku intenzity dopadajícího slunečního záření, teplotními koeficienty programu SPROD pro teplotní podmínku a vlastnostmi xenonových výbojek pro podmínku spektra záření.

Nejlepšího výkonu a účinnosti dosahoval monokrystalický panel R-TG s technologií PERC, kdy výkon dosahoval hodnoty 333,75 W a účinnosti 19,85 %. Dále následuje polykrystalický panel Kyocera, kdy výkon dosahoval hodnoty 135,76 W a účinnosti 13,55 %. Následuje monokrystalický panel Atersa, kdy výkon dosahoval hodnoty 92,97 W a účinnosti 9,54 %. Nejhoršího výkonu a účinnosti dosahoval tenkovrstvý panel z článků z amorfního křemíku EPV-50, kdy výkon dosahoval hodnoty 54,38 W a účinnosti 6,05 %.

U všech panelů lze vidět na grafech výskytu naměřených hodnot maximálního výkonu okolo průměrných odhadů maximálního výkonu (příloha C) vliv vnitřních kapacit článků na měřený maximální výkon. Při standardní metodě průchodu VA charakteristikou (číslo měření 1-10) jsou hodnoty maximálního výkonu menší než průměrná hodnota maximálního výkonu a při reverzní metodě průchodu VA charakteristikou (číslo měření 11-20) jsou hodnoty maximálního výkonu větší než průměrná hodnota maximálního výkonu. Vlivem vnitřních kapacit článků byly ovlivněny i VA a výkonové charakteristiky, které byly pro jednotlivé metody měření navzájem posunuty. Čím větší byl vliv vnitřních kapacit článků, tím větší posun nastal.

Vliv vnitřních kapacit článků byl znatelný u panelu R-TG, u ostatních panelů je vliv téměř zanedbatelný. Zde je důležité poznamenat, že nejistota při metodě reverz má větší podíl na výsledné nejistotě než nejistota při metodě standard, je proto potřeba upravit vzorec zavedením váhy jednotlivých metod pro výpočet rozšířené nejistoty.

Vypočtené výsledky nejistot parametrů jednotlivých panelů byly stanoveny výpočtem a porovnány s katalogovými hodnotami od výrobců daných panelů. Výsledná nejistota je z velké části ovlivněna nejistotou typu B, která reprezentuje nejistoty jednotlivých částí simulátoru PASAN. Všechny parametry panelů až na parametry panelu Atersa A 130

vyhovovaly katalogovým hodnotám. U panelu Atersa A 130 to nejspíš bylo způsobeno stářím panelu anebo viditelným poškozením článků na panelu.

Vliv vnitřních kapacit článků na měřené hodnoty lze potlačit použitím solárního simulátoru, který dokáže vytvářet delší světelné impulsy, ale u takových simulátorů nastává problém s přehříváním a optimalizací teplotních koeficientů. Proto je lepší upravit metodu měření, kdy se využívá metody „multiflash bod po bodu“, kdy při záblesku pro určitou hodnotu napětí je změřen proud. Charakteristika se následně sestaví z více záblesků měřených pro různé hodnoty napětí.

LITERATURA

- [1] PN přechod – dioda. *Elektross.gjn.cz* [online]. [cit. 09-12-2022]. Dostupné z: http://elektross.gjn.cz/soucastky/jeden_prechod/dioda.html
- [2] Polovodivé materiály. *ePubli webová knihovna* [online]. [cit. 09-12-2022]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/353/05.html>
- [3] SUMAN, Sharma PREETIKA, Parveen GOYAL. Evolution of PV technology from conventional to nano-materials. *Materials Today: Proceedings*. [online]. 2020 [cit. 09-12-2022] Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320335008?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=776eca7eac4b377
- [4] ALLOUHI, Amine, Shafiqur REHMAN, Mahmut Sami BUKER a Zafar SAID. Up-to-date literature review on Solar PV systems: Technology progress, market status and R&D. *Journal of Cleaner Production*. [online]. 2022, 15 August 2022 [cit. 09-12-2022]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622019436>
- [5] Czochralského metoda – Czochralski method. *Encyclopedia wikijii.com* [online]. [cit. 09-12-2022]. Dostupné z: https://wikijii.com/wiki/Czochralski_method#Production_of_Czochralski_silicon
- [6] Výroba fotovoltaických článků a panelů. *Cez.cz* [online]. [cit. 09-12-2022]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k41.htm>
- [7] KUMARI, Neha, Sanjay Kumar SINGH, Sanjay KUMA. A comparative study of different materials used for solar photovoltaics technology. *Materials Today: Proceedings*. [online]. 2022 [cit. 09-12-2022]. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785322044212?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=776edc26cc15411f
- [8] KANT, Neeraj, Pushendra SINGH. Review of next generation photovoltaic solar cell technology and comparative materialistic development. *Materials Today: Proceedings*. [online]. 2022 [cit. 09-12-2022]. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321071236?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=776ee3fe6f96411f
- [9] Silikonové solární články s technologií PERC. *DS New Energy* [online]. 2019, Feb 23, 2019 [cit 09-12-2022]. Dostupné z: <https://cz.dsnsolar.com/info/silicon-solar-cells-with-perc-technology-32946753.html>
- [10] PICKEREL, Kelly. What is PERC? Why should you care? *Solar Power World* [online]. 2016, July 5, 2016 [cit. 09-12-2022]. Dostupné z: <https://www.solarpowerworldonline.com/2016/07/what-is-perc-why-should-you-care/>
- [11] Proč PERC dominuje technologie Silicon Solar Cell. *DS New Energy* [online]. 2019, Jul 03, 2019 [cit 09-12-2022]. Dostupné z: <https://cz.dsnsolar.com/info/why-will-perc-dominate-silicon-solar-cell-tech-36984943.html>

- [12] What is Heterojunction Solar Panels. *AE Solar* [online]. [cit. 09-12-2022]. Dostupné z: <https://ae-solar.com/heterojunction-modules/>
- [13] Co je to Heterojunkční sluneční článek. *DS New Energy* [online]. 2020, Mar 14, 2020 [cit. 09-12-2022]. Dostupné z: <https://cz.dsnsolar.com/info/what-is-a-heterojunction-solar-cell-43962424.html>
- [14] Chemické metody depozice z plynné fáze. *Muni.cz* [online]. [cit. 09-12-2022]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/sci/jaro2010/F4280/um/slides_07_plyn.pdf
- [15] STIELER Daniel. What is the Staebler-Wronski effect? *PowerFilm SOLAR*. [online]. 2019, 05/10/2019 [cit. 09-12-2022]. Dostupné z: <https://blog.powerfilmsolar.com/education/the-horizon-blog/2019/05/10/what-is-the-staebler-wronski-effect>
- [16] Staebler-Wronski Effect. *Handbook of Thin Film Deposition (Third Edition)* [online]. 2012 [cit. 09-12-2022]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/staebler-wronski-effect>
- [17] Amorfní křemík – Amorphous silicon. *Encyclopedia wikijii.com* [online]. [cit. 09-12-2022]. Dostupné z: https://wikijii.com/wiki/amorphous_silicon#Hydrogenated_amorphous_silicon
- [18] Cadmium Telluride. *Energy efficiency & Renewable energy*. [online]. [cit. 09-12-2022]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/solar/cadmium-telluride>
- [19] Fotovoltaika z teluridu kadmia – Cadmium telluride photovoltaics. *Encyclopedia wikijii.com* [online]. [cit. 09-12-2022]. Dostupné z: https://wikijii.com/wiki/cadmium_telluride_photovoltaics#Cell_efficiency
- [20] Cadmium Telluride (CdTe) wafers for Research & Production. *UniversityWafer, Inc.* [online]. [cit. 09-12-2022]. Dostupné z: https://www.universitywafer.com/cadmium-telluride-cdte.html?gclid=CjwKCAiAvK2bBhB8EiwAZUbP1LgQ_Ht_tPQL_a_kUtHQwP-ryXr81JlpBAUTZgzp5DXGY1NlnEPxxoCgFwQAvD_BwE
- [21] KHAN, Naveed Aziz. CdTe Solar Cell Structure. *ResearchGate* [online]. 2014 [cit. 09-12-2022]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/a-Conventional-CdTe-Solar-Cell-Structure-b-Modified-CdTe-Solar-Cell-Structure_fig1_271909137
- [22] HARPER, Gavin D. J. CIGS solar cell technology. *Britannica* [online]. [cit. 09-12-2022]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/CIGS-solar-cell>
- [23] Technologie solárních článků CIGS. *DS New Energy* [online]. 2019, Feb 25, 2019 [cit. 09-12-2022]. Dostupné z: <https://cz.dsnsolar.com/info/cigs-solar-cell-technology-32913863.html>
- [24] KLAUZ, Milan. Jak se vyrábí tištěná elektronika. *DPS Elektronika od A do Z* [online]. 2013 [cit. 09-12-2022]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:3140/jak-se-vyrabi-tistena-elektronika>

- [25] Perovskite solar cell. *Clean Energy Institute University of Washington* [online]. [cit. 09-12-2022]. Dostupné z: https://www.cei.washington.edu/education/science-of-solar/perovskite-solar-cell/Halogenidové_perovskity:_Když_defekty_nevadí.
- Grantová agentura ČR* [online]. 2021, 22.09.2021 [cit. 09-12-2022]. Dostupné z: <https://gacr.cz/halogenidove-perovskity-kdyz-defekty-nevadi/>
- [26] Úvod do perovskitů a solárních článků perovskitů. *DS New Energy* [online]. 2019, May 21, 2019 [cit. 09-12-2022]. Dostupné z: <https://cz.dsnsolar.com/info/an-introduction-to-perovskites-and-perovskite-36048864.html>
- [27] Halogenidové perovskity: Když defekty nevadí. *Grantová agentura ČR* [online]. 2021, 22.09.2021 [cit. 09-12-2022]. Dostupné z: <https://gacr.cz/halogenidove-perovskity-kdyz-defekty-nevadi/>
- [28] Best Research-Cell Efficiency Chart. *National Renewable Energy Laboratory (NREL)* [online]. [cit. 26-04-2023]. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- [29] Životnost fotovoltaiky roste a návratnost se zrychluje. Dlouhé roky tak vyrábí zadarmo. *Domy sobě* [online]. [cit. 26-04-2023]. Dostupné z: <https://www.domysobe.cz/post/zivotnost-fotovoltaiky-roste-a-navratnost-se-zrychluje-dlouhe-roky-tak-vyrabi-zadarmo>
- [30] ŠAFARČÍK, Kristián, Vladimír BARTOŠ a Marie KARLÍKOVÁ. Principy imunoanalytických metod: Nejistota měření. *POSTUDIUM* [online]. [cit. 09-12-2022]. Dostupné z: <https://postudium.cz/mod/book/view.php?id=5374&chapterid=2194>
- [31] BRADÍK, Josef. Metodika vyjadřování nejistoty měření. *Elektrorevue* [online]. [cit. 09-12-2022]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/02011/index.html>
- [32] Chyby a nejistoty měření. *Muni.cz* [online]. [cit. 09-12-2022]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/ped/podzim2009/FY2BP_FM3/CHYBY_A_NEJISTOTY.pdf
- [33] Nejistota měření – postup stanovení. *Homel.vsb.cz* [online]. [cit. 09-12-2022]. Dostupné z: https://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=nejistota_postup
- [34] Uncertainty of Measurement: A Review of the Rules for Calculating Uncertainty Components through Functional Relationships - PMC. *National Center for Biotechnology Information* [online]. 2012 May; 33(2): 49-75 [cit. 17-05-2023]. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3387884/>
- [35] MASTNÝ, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jan MACHÁČEK, Michal PTÁČEK, Lukáš RADIL, Tomáš BARTOŠÍK a Tomáš PAVELKA. Obnovitelné zdroje elektrické energie. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 256 s. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [36] ČSN EN IEC 60904-1 ed.3: Fotovoltaické součástky – Měření fotovoltaických voltampérových charakteristik. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.

- [37] TAYLOR, N. Guidelines for PV Power Measurement in Industry. *Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport* [online]. 2010 [cit. 26-04-2023]. Dostupné z: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/b8d58e51-7d17-4706-8766-ef16c588891f/language-en>
- [38] Diode junction capacitance. *Electronics Tutorial, Basic Physics, Online Tests, Computer Basics, Concepts of Physics* [online]. [cit. 26-04-2023]. Dostupné z: <https://www.physics-and-radio-electronics.com/electronic-devices-and-circuits/semiconductor-diodes/junctioncapacitance-transitioncapacitance-diffusioncapacitance.html>
- [39] Fotovoltaická laboratoř CVVOZE. *CVVOZE – Výzkumné centrum FEKT VUT v Brně* [online]. [cit. 09-12-2022]. Dostupné z: <http://www.cvvoze.cz/vyzkumne-programy/chemicke-a-fotovoltaiicke-zdroje-energie/laboratore-chemie/fotovoltaiicka-laborator/>
- [40] Training Manual Module: Basic Operation SunSim 3b/3c. *PASAN S.A.* [online]. Part-No.: osc010104, Version (Date): 01_16.12.2011 [cit. 26-04-2023].

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

Ppm	Parts per million (částic na milión)
VA	Voltampérová
Si	Křemík
IR	Infračervené záření
PERC	Passivated Emitter and Rear Contact (pasivace zadní strany)
HJT	Heterojunction technology (heterojunkční technologie)
CdTe	Tellurid cadmia
CdS	Sulfid cademnatý
CIS	Měď + Indium + Selen
CIGS	Měď + Indium + Galium + Selen
UV	Ultrafialové záření
CVVOZE	Centrum výzkumu a využití obnovitelných zdrojů energie
STC	Standardní testovací podmínky

Symboly:

E_D	difúzní elektrické pole	$(N \cdot C^{-1})$
u_A	nejistota typu A	(-)
s_x	směrodatná odchylka	(-)
k_s	koeficient pro určitý počet měření při výpočtu u_A	(-)
n	počet měření	(-)
u_B	nejistota typu B	(-)
χ	koeficient zvoleného rozložení pro výpočet u_B	(-)
u_C	kombinovaná nejistota	(-)
U	rozšířená nejistota	(-)
k_u	koeficient pravděpodobnosti výskytu	(-)
I_{SC}	proud nakrátko	(A)
U_{OC}	napětí naprázdno	(V)
I_{MP}	proud v bodě maximálního výkonu	(A)
U_{MP}	napětí v bodě maximálního výkonu	(V)
P_{MP}	maximální výkon	(W)
FF	činitel plnění	(%)
η	účinnost panelu	(%)
AM	koeficient atmosférické masy	(-)
P_{Sk}	skutečná hodnota výkonu	(W)
U_{Sk}	skutečná hodnota napětí v bodě max. výkonu	(V)
\bar{x}	odhad měřené veličiny	(-)

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - KATALOGOVÉ LISTY MĚŘENÝCH PANELŮ	60
PŘÍLOHA B - VÝPOČET NEJISTOT SOLÁRNÍHO SIMULÁTORU PASAN	66
PŘÍLOHA C - GRAFY	73

Příloha A - Katalogové listy měřených panelů

A.1 Panel Kyocera KD140GH-2PU

We care! Since 1975.

SOLAR

KD140GH-2PU

Vysokovýkonné polykrystalické fotovoltaické moduly



Obytný dům, Německo

ŠPIČKOVÁ TECHNOLOGIE

► Článek:

- 156 mm × 156 mm
- polykrystalický, se 3 přípojnými
- účinnost > 16 %
- uložený v EVA fólii
- patentovaná metoda RIE: nejmenší odraz světla, homogenní tmavé zbarvení

► Rám:

- hliník, černě eloxovaný a s povlakem
- sešroubovaný a navíc lepený
- zatížitelnost: 5.400 N/m²
- vnitřní odvodňovací otvory proti poškození mrazem
- schválený pro vkládací systémy
- flexibilní montáž (na šifku i a na výšku)

► Přípojná krabice:

- včetně obtokových diod
- plně uzavřená
- nejvyšší třída nehořlavosti 5V-A podle UL94
- obtokové diody Si-p/n odolné proti přepětí

- předkonfekcionovaná s přípojným vedením a originálními konektory Multi-Contact

► Párování:

- Způsob třídění: je dosahováno jmenovitého výkonu dvou spárovaných modulů (≥ 280 Wp při 2 × KD140GH-2PU)

► Produkce:

- plně automatizované a plně integrované výrobní procesy ve vlastních výrobních závodech
- bez nákupu polotovarů
- 100 % výstupní kontrola

► Servis:

- profesionální servis pro zákazníky po celé Evropě v Esslingenu/Německo

FIRMA

Kyocera Solar jako jeden z průkopníků v oboru fotovoltaiky má za sebou již více než 35 let zkušeností. Od té doby jsme se podíleli na mnoha revolučních řešeních po celém světě. Inovace a kvalita jsou přitom rozhodující.

Naše vize: Zpřístupnit solární energii všem a zajistit tak celoplošné a trvalé zásobování energií.



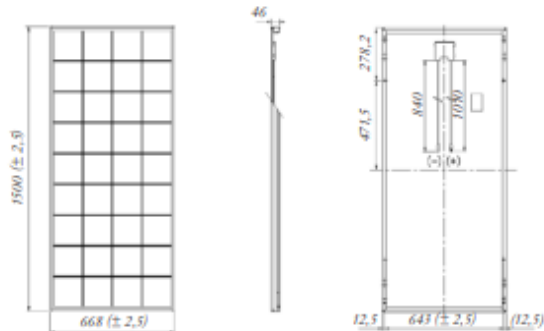
TUVdotCOM Service: Internetová platforma pro ověření kvalitu a bezpečnost
TUVdotCOM-ID: 0000023299
IEC 61215 ed. 2, IEC 61730 a třída ochrany II

Kyocera je společnost certifikovaná a registrovaná podle ISO 9001, ISO 14001 a OHSAS18001.



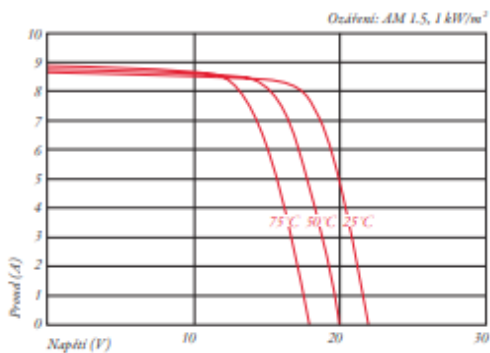
SPECIFIKACE

0 0070

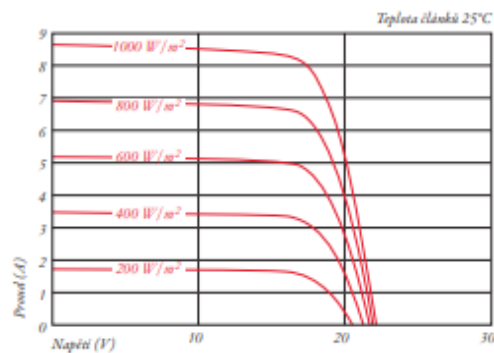


ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI

Charakteristika proud-napětí při různých teplotách článků



Charakteristika proud-napětí při různém ozaření



ELEKTRICKÉ ÚDAJE

Typ fotovoltaického modulu	KD140GH-2PU
Při 1000 W/m² (STC)*	
Jmenovitý výkon P	[W] 140
Max. napětí systému	[V] 1000
Napětí při jmenovitém výkonu	[V] 17,7
Proud při jmenovitém výkonu	[A] 7,91
Napětí naprázdno (V _{oc})	[V] 22,1
Zkratový proud (I _{sc})	[A] 8,68
Účinnost	[%] 13,9

Při 800 W/m² (NOCT)**

Jmenovitý výkon P	[W] 101
Napětí při jmenovitém výkonu	[V] 16,0
Proud při jmenovitém výkonu	[A] 6,33
Napětí naprázdno (V _{oc})	[V] 20,2
Zkratový proud (I _{sc})	[A] 7,03
NOCT	[°C] 45

Tolerance výkonu	[%] +5/-5
Zatížitelnost zpětným proudem I _r	[A] 15
Max. jistění větve	[A] 15
Teplotní koeficient napětí naprázdno V _{oc}	[%/K] -0,36
Teplotní koeficient zkratového proudu I _{sc}	[%/K] 0,06
Teplotní koeficient maximálního výkonu	[%/K] -0,46
Snížení účinnosti (z 1000 W/m ² na 200 W/m ²)	[%] 5,3

ROZMĚRY

Délka	[mm] 1500 (± 2,5)
Šířka	[mm] 668 (± 2,5)
Výška/vč. přípojovací krabičky	[mm] 46
Hmotnost	[kg] 12,5
Kabel	[mm] (+)1010 / (-)840
Typ připojení	MC PV-KBT3 / MC PV-KST3
Přípojovací krabička	[mm] 113 ■ 82 ■ 15
Počet obtokových diod	2
IP kód	IP65

ČLÁNKY

Počet na modul	36
Technologie článku	polykrystalický
Velikost článku (čtvercový)	[mm] 156 × 156
Kontaktní články	se 3 přípojnými

VŠEOBECNÉ ÚDAJE

Garance výkonu	10*** / 20 let****
Záruka	10 let*****

* Elektrické hodnoty za standardních testovacích podmínek (STC): ozaření 1000 W/m², molární ozařování AM 1,5 a teplota článků 25°C.

** Elektrické hodnoty při běžné provozní teplotě článků (NOCT): ozaření 800 W/m², molární ozařování AM 1,5, rychlost větru 1 m/s a teplota okolí 20°C.

*** 10 let na 90% minimální specifikovaného výkonu P za standardních testovacích podmínek (STC).

**** 20 let na 80% minimální specifikovaného výkonu P za standardních testovacích podmínek (STC).

***** Záruka platná v Evropě.

Váš místní prodejce Kyocera:

European Headquarter:

KYOCERA Fineceramics GmbH
Solar Division
Fritz-Mueller-Straße 27
73730 Esslingen / Německo
Tel: +49 (0)711-93 93 49 99
Fax: +49 (0)711-93 93 49 50
E-Mail: solar@kyocera.de
www.kyocerasolar.de

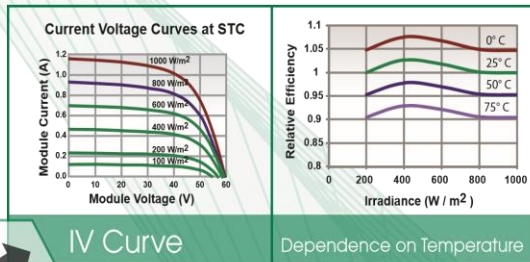
Sales Office Czech Republic:

KYOCERA Solar
Europe, s.r.o.
Na Pankraci 129/1724
140 00 Praha 4 / Czech Republic
Tel: +42 (0)225-992 282
Fax: +42 (0)474-352 101
E-Mail: solar@kyocera.de
www.kyocerasolar.de

A.2 Panel Atersa A 130

Electrical Characteristics	
STC Power Rating P_{mp} (W)	130
Open Circuit Voltage V_{oc} (V)	21.3
Short Circuit Current I_{sc} (A)	8.10
Voltage at Maximim Power V_{mp} (V)	17.2
Current at Maximim Power I_{mp} (A)	7.54
Panel Efficiency (%)	13.3
Fill Factor (%)	75.3
Power Tolerance	
Maximum System Voltage V_{max} (V)	600
Maximum Series Fuse Rating (A)	
Temperature Coefficients	
Temperature Coefficiency of I_{sc}	
Temperature Coefficiency of V_{oc}	-0.38 %/°C
Temperature Coefficiency of P_{mp}	
Mechanical Characteristics	
Cell Type	Monocrystalline Cell
Cell Size(mm)	
Cells	36
Dimensions	
Weight	
Junction Box (Safety Rating, Bypass Diodes)	
Positive Cable (Length, Cable Cross-Section)	
Negative Cable (Length, Cable Cross-Section)	
Plug Connector (Type, Safety)	
Front Cover (Thickness,Material)	
Backsheet Cover (Color, Thickness, Material)	
Encapsulation Materials	
Frame Material	

A.3 Panel EPV 50



EPVSOLAR
EPV-50
Solar Module
 Advanced Thin-film Photovoltaic Technology

Electrical Specifications

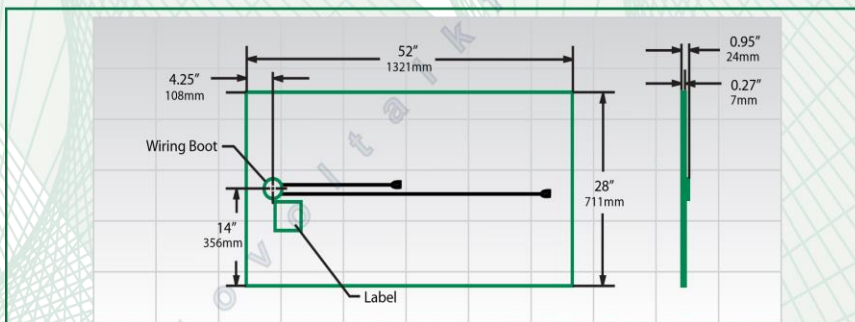
		Model 50W
Rated Power (+/- 5%)	Pmax (W)	50
Voltage at Maximum Power	Vmp (V)	45
Current at Maximum Power	Imp (A)	1.12
Open Circuit Voltage	Voc (V)	60
Short Circuit Current	Isc (A)	1.41
Maximum System Voltage	Vsys (V) IEC / UL	1000V / 600V
Temperature Coefficient of Pmax	Tk (Pmax)	-0.19 %/°C
Temperature Coefficient of Voc	Tk (Voc)	-0.28 %/°C
Temperature Coefficient of Isc	Tk (Isc)	+0.09 %/°C

Warranty

25 year limited power output warranty
 2 year limited workmanship or materials warranty

Contact

8 Marlen Drive
 Robbinsville, NJ 08691 USA
 Ph: 1.609.587.3000
 Fax: 1.609.587.5355



Mechanical Specifications

Length	52" / 1321 mm
Width	28" / 711 mm
Thickness (including wiring boot)	.95" / 24 mm
Weight	32 lbs / 14.5 kg
Module Area	10.11 ft² / 0.94 m²
Bypass Diode	None
Module Type	a-Si (amorphous silicon)
Frame Material	Frameless
Glass Type	0.125 in / 3 mm annealed glass on front and back
Encapsulation	EVA (ethylene vinyl acetate)
Output Cable / Connectors	14 AWG single insulated or 2.5mm double insulated with quick connect connector

Certifications

	Model 50W
VDE 61646	Yes
Safety Class II	Yes
Intertek ETL	Yes



CAUTION: READ USER'S GUIDE BEFORE USING THIS PRODUCT
 Electrical specifications are rated at Standard Test Conditions STC (Irradiance of 1000W/m², AM 1.5, cell temperature 25°C). During the stabilization process that occurs during the first few months in service, module power output will exceed specified ratings. Power output may be higher by 20%; operating voltage may be up to 10% higher; operating current may be up to 14% higher; and short circuit current may be up to 10% higher.

A.4 Panel R-TG 120n/340

R-TG 120n/340



Hightech mit n-TOPCon Technologie.
Bifaziales Doppelglas-Modul.



Sicherheit

Elektrische Sicherheit und mechanische Robustheit bei allen Witterungsbedingungen sind wichtige Aspekte bei der Auswahl des richtigen Solarmoduls.

Elektrische Sicherheit – Das R-TG ist für eine Systemspannung bis 1.500V zugelassen. Für höchste elektrische Sicherheit ist es mit voll vergossenen Anschlussdosen der Schutzart IP68 und original STÄUBLI MCA-Evo2 Steckern ausgerüstet.

Widerstandsfähig – Das speziell gehärtete Glas ist beständig gegen härteste Wetterbedingungen. Das Modul ist zertifiziert für Beständigkeit gegen salzhaltige Luft (Klasse 5) und ist somit für den Einsatz in Küstennähe zugelassen.

Brandschutz – Das R-TG hat entsprechend DIN EN 13501-5:2016 die Klassifizierung B₁ (I) erreicht für alle Dachneigungen. Dies bedeutet eine nach deutscher Norm nachgewiesene besonders hohe Feuerfestigkeit und Resistenz gegen Brandausbreitung.

Garantie

- 20 (30*) Jahre Produktgarantie
 - 30 Jahre lineare Leistungszusage
 - Garantierte Plusoleranz
- *bei Anlagenregistrierung

Zuverlässigkeit

Eine Solaranlage ist ein langlebiges Investitionsgut. Die Beständigkeit der Module ist somit ein zentrales Qualitätskriterium.

Zertifizierte Produktionsstätten – Alle SOLYCO Solarmodule werden in modernsten, hochautomatisierten Fabriken bei höchsten Fertigungsstandards produziert, um eine gleichbleibende Qualität zu gewährleisten.

Doppelglas-Verbund – Glas ist ein besonders langlebiger Werkstoff und gegenüber allen Witterungseinflüssen (Kälte, Hitze, UV, Gase, Säuren) resistent. Bei den R-TG Modulen sind die Solarzellen zwischen zwei Glasscheiben eingebettet und so besonders wirkungsvoll und dauerhaft vor Witterungseinflüssen geschützt.

Einbettmaterial POE – Als Einbettmaterial wird das besonders hochwertige POE verwendet. Beim üblichen EVA kann sich unter Einfluss von UV-Licht Essigsäure bilden, die die Lötverbindungen im Modul angreift und zu schleichendem Leistungsverlust führt. Dies ist bei POE ausgeschlossen.

Performance

Eine hohe Stromproduktion bei allen Betriebsbedingungen bildet - neben der Langlebigkeit - die Basis für die Wirtschaftlichkeit der Solaranlage.

Hoher spezifischer Ertrag – Hohe Leistungsausbeute auch bei ungünstigen Witterungsbedingungen - durch ein hervorragendes Schwachlichtverhalten und einen guten Temperaturkoeffizienten.

Hocheffiziente Solarzellen – Moderne Halbzellentechnologie mit Multi-Busbar-Verschaltung bildet die Grundlage für die überragende Performance unserer Module. Die Halbzellen-Verschaltung minimiert interne Leistungsverluste und das Risiko von Hot-Spots bei Teilverschattung.

3x PID-stabil – Das Modul ist zertifiziert gegen die Potenzial-induzierte Degradation (PID). Der Prüfzyklus nach IEC TS 62804-1:2015 wurde sogar 3mal durchlaufen (288h bei T=85°C und RH von 85%) und belegt die Spitzenleistung des R-TG über einen langen Zeitraum.

Zertifizierungen

- IEC 61215:2016 (Modul-Zuverlässigkeit)
- IEC 61730:2016 (Modul-Sicherheit)
- IEC TS 62804-1:2015 (PID-Beständigkeit)
- IEC 61701:2020 (Salznebel-Beständigkeit)

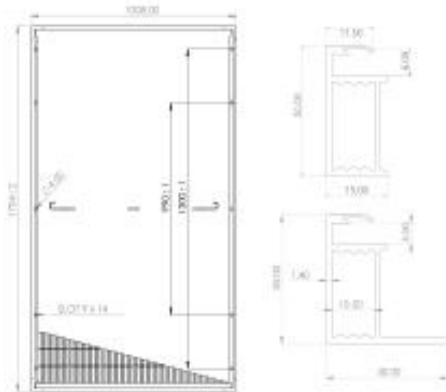
SOLYCO Solar AG
Baseler Straße 60
12205 Berlin, Deutschland

T: +49 30 403 619 42
M: info@solyco.com
W: www.solyco.com

R-TG 120n/340

Bifaziales Doppelglas-Modul.

Technische Daten



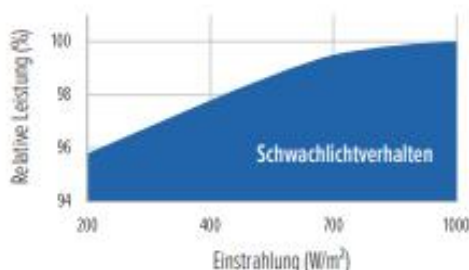
Anschluss- und Betriebsbedingungen

Maximale Systemspannung	1.500V
Zulässiger Temperaturbereich	-40°C ... +85°C
Mechanische Belastbarkeit ¹	Druckbelastbarkeit getestet bei 5.400Pa Windsogbelastbarkeit getestet bei 2.400Pa
Schutzklasse	II
Rückstrombelastung	20A
Brandklasse ²	C (UL 790) E _{max} (IT) nach DIN EN 13501-5:2016
Hagelbeständigkeit	Hagelkörner bis 25mm Größe und Geschwindigkeit von 23m/s

¹Spezifizierte Drucklastbeständigkeit: 3.600Pa und
Soglastbeständigkeit: 1.600 Pa; ²Für alle Dachneigungen

Temperaturverhalten

Tk der Maximalleistung (P _{max})	-0,35% / °C
Tk der Leerlaufspannung (V _{oc})	-0,30% / °C
Tk des Kurzschlussstromes (I _{sc})	+0,048% / °C



Dieses Datenblatt entspricht den Vorgaben der DIN EN 50380
Entwickelt und designt in Deutschland

Allgemeiner Produktaufbau

Zelltechnologie	n-TOPCon; bifazial; mono-kristallin
Zellgröße und -anzahl	158,75mm x 79,375mm; 120 Stk.
Modulabmessung	1.704mm x 1.008mm x 30mm
Modulgewicht	21,9kg
Frontglas	2,0mm gehärtetes Solarglas mit Anti-Reflex-Beschichtung
Rückseitenglas	2,0mm gehärtetes Glas
Anschlussdose; Schutzart	3 Stk. mit je einer Bypass-Diode, IP68 voll vergossen
Kabel mit Stecker	4mm ² Solarkabel mit 100cm Länge; original STÄUBLI MC4-Evo2 Stecker
Verpackungseinheit	36 Module vertikal auf Palette

Elektrische Daten (STC)

Nennwerten bei Standard-Testbedingungen (STC): Einstrahlung 1.000W/m²;
Spektrum AM 1.5; Modultemperatur 25°C; Sortierung nach P_{max} 0 bis +5W

Modulbezeichnung	R-TG 120n/340
STC Nennleistung P _{max} (Wp)	340
Spannung im Arbeitspunkt V _{mp} (V)	34,13
Strom im Arbeitspunkt I _{mp} (A)	9,96
Leerlaufspannung V _{oc} (V)	41,35
Kurzschlussstrom I _{sc} (A)	10,40
Bifazial-Koeffizient	>70%
Modul-Wirkungsgrad	19,8

Toleranz P_{max}: ± 3,0%; Toleranz V_{oc}, V_{mp}, I_{sc}, I_{mp}: ± 5,0%

Elektrische Daten (NMOT)

Nennwerten bei nominalen Betriebsbedingungen (NMOT): Einstrahlung 800W/m²;
Spektrum AM 1.5; Umgebungstemperatur 20°C; Windgeschwindigkeit 1m/s

Solarzellen-Temperatur (°C)	45 +/- 2
Modulleistung P _{max} (Wp)	250
Spannung im Arbeitspunkt V _{mp} (V)	31,37
Strom im Arbeitspunkt I _{mp} (A)	7,97
Leerlaufspannung V _{oc} (V)	38,25
Kurzschlussstrom I _{sc} (A)	8,38

Toleranz P_{max}: ± 3,0%; Toleranz V_{oc}, V_{mp}, I_{sc}, I_{mp}: ± 5,0%



DS R-TG 120n/2021/12

Příloha B - Výpočet nejistot solárního simulátoru Pasan

 Zkušební laboratoř CVVOZE	VÝPOČET NEJISTOT
	Vysoké učení technické v Brně, FEKT Zkušební laboratoř CVVOZE Technická 3082/12, 61600 Brno

Pracoviště: ZL2 CVVOZE

Seznam všech stupujících nejistot:

Nejistota název	Zdroj nejistoty	Nejistota			
		Rozsah měření / hodnota	Hodnota nejistoty / %	k	reference
U _{M-DMM}	Měřicí karta – intenzita + Monitor Cell 20035 Mono+Th 0°C<T<50°C Sensitivity 136,74mV	0,05 V	0,18	2	Ord. 001027987-1228
		0,1 V	0,18	2	
		0,15 V	0,12	2	
U _{Mi}	Měřicí karta - proudZ	0,1 A	0,04	2	Ord. 001027987-1228
		0,3 A	0,04	2	
		1 A	0,06	2	
		3 A	0,08	2	
		10 A	0,12	2	
		30 A	0,12	2	
U _{MV}	Měřicí karta - napětí	0,7 V	0,04	2	Ord. 001027987-1228
		1 V	0,04	2	
		3 V	0,04	2	
		10 V	0,04	2	
		30 V	0,04	2	
		100 V	0,04	2	
		300 V	0,04	2	
U _{MT}	Měřicí karta – teplota + Monitor Cell 20035 Mono+Th 0°C<T<50°C Sensitivity 136,74mV	0-50°C pro 25°C	0,2	2	Ord. 001027987-1228
U _{MISCR}	Referenční modul - I _{sc}	6.9 A	1,3	2	Protokoll-Nr: PAS091092PAS1013- V01
U _{MUOCR}	Referenční modul - U _{oc}	0,598 V	0,7	2	Protokoll-Nr: PAS091092PAS1013- V01
U _{MIMPPR}	Referenční modul - I _{mpp}	6,279 W	1,7	2	Protokoll-Nr: PAS091092PAS1013- V01
U _{MUMPPR}	Referenční modul - U _{mpp}	0,434 V	1,2	2	Protokoll-Nr: PAS091092PAS1013- V01



VÝPOČET NEJISTOT

Vysoké učení technické v Brně, FEKT
Zkušební laboratoř CVVOZE
Technická 3082/12, 61600 Brno

Nejistota název	Zdroj nejistoty	Nejistota			
		Rozsah měření / hodnota	Hodnota nejistoty / %	k	reference
U _{MMPPR}	Referenční modul - Wmpp	2,723	1,8	2	Protokoll-Nr: PAS091092PAS1013- V01
U _{MFF}	Referenční modul - FF	65,984 %	2,2	2	Protokoll-Nr: PAS091092PAS1013- V01
U _{MEFF}	Referenční modul - EFF	5,810 %	2,3	2	Protokoll-Nr: PAS091092PAS1013- V01
U _{MISCO}	Nejistota A I _{sc}	2,848 A	0,03	2	Repetability measurement
U _{MVOCO}	Nejistota A V _{oc}	20,904	0,02	2	Repetability measurement
U _{MMPP0}	Nejistota A M _{pp}	41,991	0,06	2	Repetability measurement
U _{MA}	Plocha	1.6 m ²	0,63	2	KL_P08696/2013
U _S	Plošná nejednotnost záření	4 m ²	0,281	2	Site Acceptance Test report 2012
U _M	Spektrální nezhoda	0,99865			SMM_Calculation_02

Stanovení výsledné nejistoty

Výsledné nejistoty jsou určovány na základě statistického přístupu. Výsledná hodnota nejistoty je stanovena ve shodě s dokumentem S 5.4.6 Odhad nejistoty měření. Při výpočtu nejistoty se vychází z kombinace nejistoty měření elektrických veličin, nejistot parametrů referenčního panelu/článku, teploty a optických vlastností ozáření slunečního simulátoru.

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m A_i^2 u_i^2(x_i)}$$

$$A_i = \frac{\partial f(X_i)}{\partial X_i}$$

Hodnoty nejistoty proudu, napětí, ozáření a teploty jsou uvedeny v kalibračním protokolu elektronické zátěže BV66 slunečního simulátoru (zpráva číslo: Ord.0001027987-1228; ze dne 10.7.2012). Uvedená rozšířená nejistota je založena na standardní nejistotě násobené koeficientem rozšíření k = 2 a poskytuje úroveň spolehlivosti přibližně 95%. Případná chyba způsobená spektrálním nepřizpůsobením

 Zkušební laboratoř CVOZE	VÝPOČET NEJISTOT
	Vysoké učení technické v Brně, FEKT Zkušební laboratoř CVOZE Technická 3082/12, 61600 Brno

referenčního FV vzorku a zkušební vzorku je u monokrystalických a multikrystalických FV modulů zanedbatelná a je obsažena ve stanovené nejistotě měření. U tenkovrstvých technologií je tato chyba individuální a je taktéž obsažena ve stanovené nejistotě měření.

Nejistota I_{sc}

Nejistota proudu na krátko je dána kombinací nejistoty proudu na krátko referenčního modulu a kombinovanou nejistotou jednotlivých veličit ovlivňující velikost měřené veličiny. Výsledná hodnota měřené veličiny proudu je dána vztahem používaným ve výpočtu zařízení PASAN:

$$I_m = I_{mr} + I_{scr} \left[\frac{G_{std} + \theta(t_{st} - t)}{G} - 1 \right] + \alpha S_{cl} N_{ep} (t_{st} - t)$$

Kde

I_{mr} – naměřená hodnota proudu
 I_{scr} – vypočtená kalibrovaná hodnota proudu na krátko.
 G_{std} – referenční hodnota intenzity osvětlení
 G – naměřená hodnota intenzity osvětlení
 θ – korekční faktor monitorovacího článku osvětlení
 α – korekční faktor I_{sc} a vlivu teploty
 S_{cl} – plocha článku
 N_{ep} – počet článků zapojených paralelně
 t_{st} – referenční hodnota teploty
 t – naměřená hodnota teploty

Po roznásobení:

$$I_m = I_{mr} + \frac{G_{std}}{G} I_{scr} + \frac{\theta}{G} t_{st} I_{scr} - \frac{\theta}{G} t I_{scr} - I_{scr} + \alpha S_{cl} N_{ep} t_{st} - \alpha S_{cl} N_{ep} t$$

$$I_m = I_{mr} - I_{scr} + k_1 \frac{I_{scr}}{G} + k_2 \frac{I_{scr}}{G} + k_3 \frac{t I_{scr}}{G} + k_4 S_{cl} - k_5 S_{cl} t$$

Nejistoty jednotlivých členů:

$$U_{Im} = 2 \sqrt{\left(\frac{U_{MISCO}}{2}\right)^2 + \left(\frac{U_{MI}}{2}\right)^2 + 2 \left(\frac{U_{MT}}{2}\right)^2 + \left(\frac{U_{MA}}{2}\right)^2 + 3 \left(\frac{U_{MDMN}}{2\sqrt{3}}\right)^2 + 4 \left(\frac{U_{MISCR}}{2}\right)^2}$$

$$U_{Im} = 2 \sqrt{\frac{0,03^2}{4} + \frac{0,12^2}{4} + \frac{0,2^2}{2} + \frac{0,63^2}{4} + \frac{0,18^2}{4} + 1,3^2}$$

Procentní nejistota měření proudu I_m

$$U_{Im} = 2,68 \%$$

Vliv nejistoty hodnoty I_{sc} referenčního modulu tuto nejistotu zvýší na:

$$U_{Isc} = 2 \sqrt{\left(\frac{U_{MISCR}}{2}\right)^2 + \left(\frac{U_{Im}}{2}\right)^2}$$

$$U_{Isc} = 2,9 \%$$

Strana 3/7

Příloha k S 5.4.6, p.č.1
Vydání 01 – 09/2013

	VÝPOČET NEJISTOT
	Vysoké učení technické v Brně, FEKT Zkušební laboratoř CVOZE Technická 3082/12, 61600 Brno

Nejistota Voc

Nejistota napětí na prázdko je dána kombinací nejistoty napětí na prázdko referenčního modulu a kombinovanou nejistotou jednotlivých veličit ovlivňující velikost měřené veličiny. Výsledná hodnota měřené veličiny napětí je dána vztahem používanou ve výpočtu zařízení PASAN:

$$V_m = V_{rde} + \left(\beta - \frac{\alpha I_m}{N_{ep}} \right) N_{cs} (t_{st} - t)$$

Kde

V_{rde} – naměřená hodnota napětí
 I_m – vypočtená kalibrovaná hodnota proudu.
 α - korekční faktor I_{sc} a vlivu teploty
 β - korekční faktor U_{oc} a vlivu teploty
 N_{ep} – počet článků zapojených paralelně
 N_{cs} – počet článků zapojených sériově
 t_{st} – referenční hodnota teploty
 t – naměřená hodnota teploty

Po roznásobení:

$$V_m = V_{rde} + \beta N_{cs} t_s - \beta N_{cs} t + \frac{\alpha I_m N_{cs} t_s}{N_{ep}} - \frac{\alpha I_m N_{cs} t}{N_{ep}}$$

$$V_m = V_{mde} + k_1 - k_2 t + k_3 I_m + k_4 I_m t$$

Nejistoty jednotlivých členů:

$$U_{V_m} = 2 \sqrt{\left(\frac{U_{MV}}{2} \right)^2 + 2 \left(\frac{U_{MT}}{2} \right)^2 + \left(\frac{U_{MI}}{2\sqrt{3}} \right)^2}$$

$$U_{V_m} = 2 \sqrt{\frac{0,03^2}{4} + \frac{0,2^2}{2} + \frac{2,68^2}{12}}$$

Procentní nejistota měření proudu I_{sc}

$$U_{V_m} = 1,58 \%$$

Vliv nejistoty hodnoty I_{sc} referenčního modulu tuto nejistotu zviší na:

$$U_{V_{oc}} = 2 \sqrt{\left(\frac{U_{MVOCR}}{2} \right)^2 + \left(\frac{U_{V_m}}{2} \right)^2}$$

$$U_{I_{sc}} = 1,7 \%$$

	VÝPOČET NEJISTOT
	Vysoké učení technické v Brně, FEKT Zkušební laboratoř CVOZE Technická 3082/12, 61600 Brno

Nejistota napětí v bodě maximálního výkonu V_{PM}

Nejistota napětí na v bodě maximálního výkonu je dána kombinací nejistoty napětí v bodě maximálního výkonu referenčního modulu a kombinovanou nejistotou jednotlivých veličit ovlivňující velikost měřené veličiny.

Nejistota měření napětí byla stanovena

$$U_{Vm} = 1,58 \%$$

Pak

$$U_{Voc} = 2 \sqrt{\left(\frac{U_{MUPPMR}}{2}\right)^2 + \left(\frac{U_{Vm}}{2}\right)^2}$$

$$U_{Voc} = 2 \sqrt{\left(\frac{1,2}{2}\right)^2 + \left(\frac{1,58}{2}\right)^2}$$

$$U_{Voc} = 2,0 \%$$

Nejistota proudu v bodě maximálního výkonu I_{PM}

Nejistota hodnoty proudu v bodě maximálního výkonu je dána kombinací nejistoty proudu v bodě maximálního výkonu referenčního modulu a kombinovanou nejistotou jednotlivých veličit ovlivňující velikost měřené veličiny.

Nejistota měření proudu byla stanovena

$$U_{Im} = 2,68 \%$$

Pak

$$U_{Voc} = 2 \sqrt{\left(\frac{U_{MIPPMR}}{2}\right)^2 + \left(\frac{U_{Im}}{2}\right)^2}$$

$$U_{Voc} = 2 \sqrt{\left(\frac{1,7}{2}\right)^2 + \left(\frac{2,68}{2}\right)^2}$$

$$U_{Voc} = 3,1 \%$$

	VÝPOČET NEJISTOT
	Vysoké učení technické v Brně, FEKT Zkušební laboratoř CVVOZE Technická 3082/12, 61600 Brno

Nejistota výkonu v bodě maximálního výkonu W_{MPP}

Nejistota hodnoty výkonu v bodě maximálního výkonu je dána kombinací nejistoty výkonu v bodě maximálního výkonu referenčního modulu a kombinovanou nejistotou jednotlivých veličit ovlivňující velikost měřené veličiny.

$$W_{MPP} = \max(I_m, V_m)$$

Nejistota měření proudu byla stanovena

$$U_{I_m} = 2,68 \%$$

Nejistota měření napětí byla stanovena

$$U_{V_m} = 1,58 \%$$

Pak

$$U_{MPP} = 2 \sqrt{\left(\frac{U_{MMPPR}}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{U_{I_m}}{2}\right)^2 + \left(\frac{U_{V_m}}{2}\right)^2}$$

$$U_{MPP} = 2 \sqrt{\left(\frac{1,8}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{2,68}{2}\right)^2 + \left(\frac{1,58}{2}\right)^2}$$

$$U_{MPP} = 3,1 \%$$

Nejistota činitele plnění FF

Nejistota hodnoty činitele plnění je dána kombinací nejistoty činitele plnění referenčního modulu a kombinovanou nejistotou jednotlivých veličit ovlivňující velikost měřené veličiny.

$$FF = \frac{MPP}{I_{sc} V_{oc}}$$

Pak

$$U_{FF} = 2 \sqrt{\left(\frac{U_{MPP}}{2}\right)^2 + \left(\frac{U_{I_{sc}}}{2}\right)^2 + \left(\frac{U_{V_{oc}}}{2}\right)^2}$$

$$U_{FF} = 2 \sqrt{\left(\frac{3,1}{2}\right)^2 + \left(\frac{1,7}{2}\right)^2 + \left(\frac{2,0}{2}\right)^2}$$

$$U_{FF} = 4,2 \%$$

	VÝPOČET NEJISTOT
	Vysoké učení technické v Brně, FEKT Zkušební laboratoř CVVOZE Technická 3082/12, 61600 Brno

Nejistota účinnosti EFF

Nejistota hodnoty účinnosti je dána kombinací nejistot kombinovaných nejistot jednotlivých veličin ovlivňující velikost měřené veličiny.

$$EFF = \frac{MPP}{G_{STD} A_m}$$

Pak

$$U_{EFF} = 2 \sqrt{\left(\frac{U_{MPP}}{2}\right)^2 + \left(\frac{U_{M-DMM}}{2}\right)^2 + \left(\frac{U_{MA}}{2}\right)^2}$$

$$U_{EFF} = 2 \sqrt{\left(\frac{3,1}{2}\right)^2 + \left(\frac{0,18}{2}\right)^2 + \left(\frac{0,63}{2}\right)^2}$$

$$U_{EFF} = 3,5 \%$$

Tabulka vypočtených nejistot:

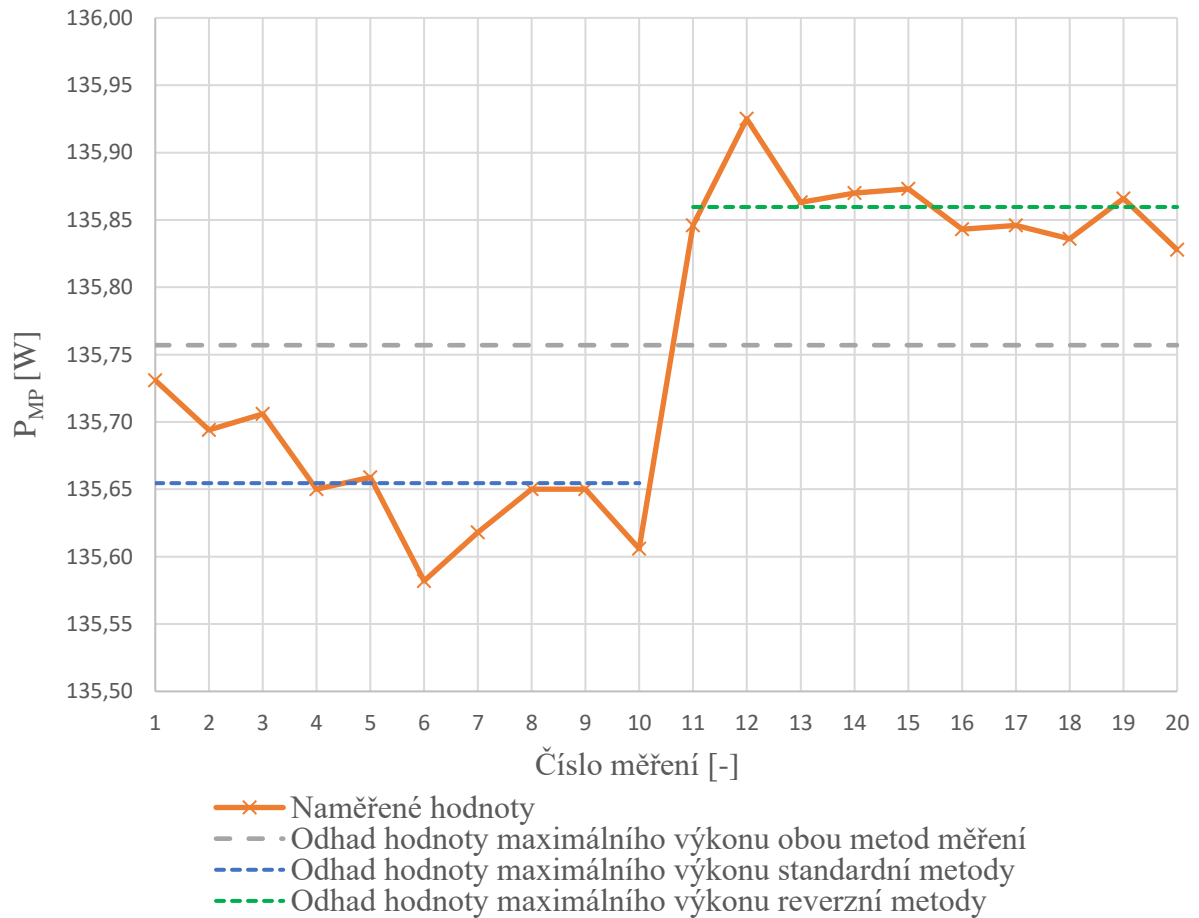
Veličina	nejistota
I _{sc}	2.9%
U _{oc}	1.7%
Eff	3.5%
FF	4.2%
P _{mpp}	3.2%
U _{mpp}	2.0%
I _{mpp}	3.1%

Zpracoval: doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.

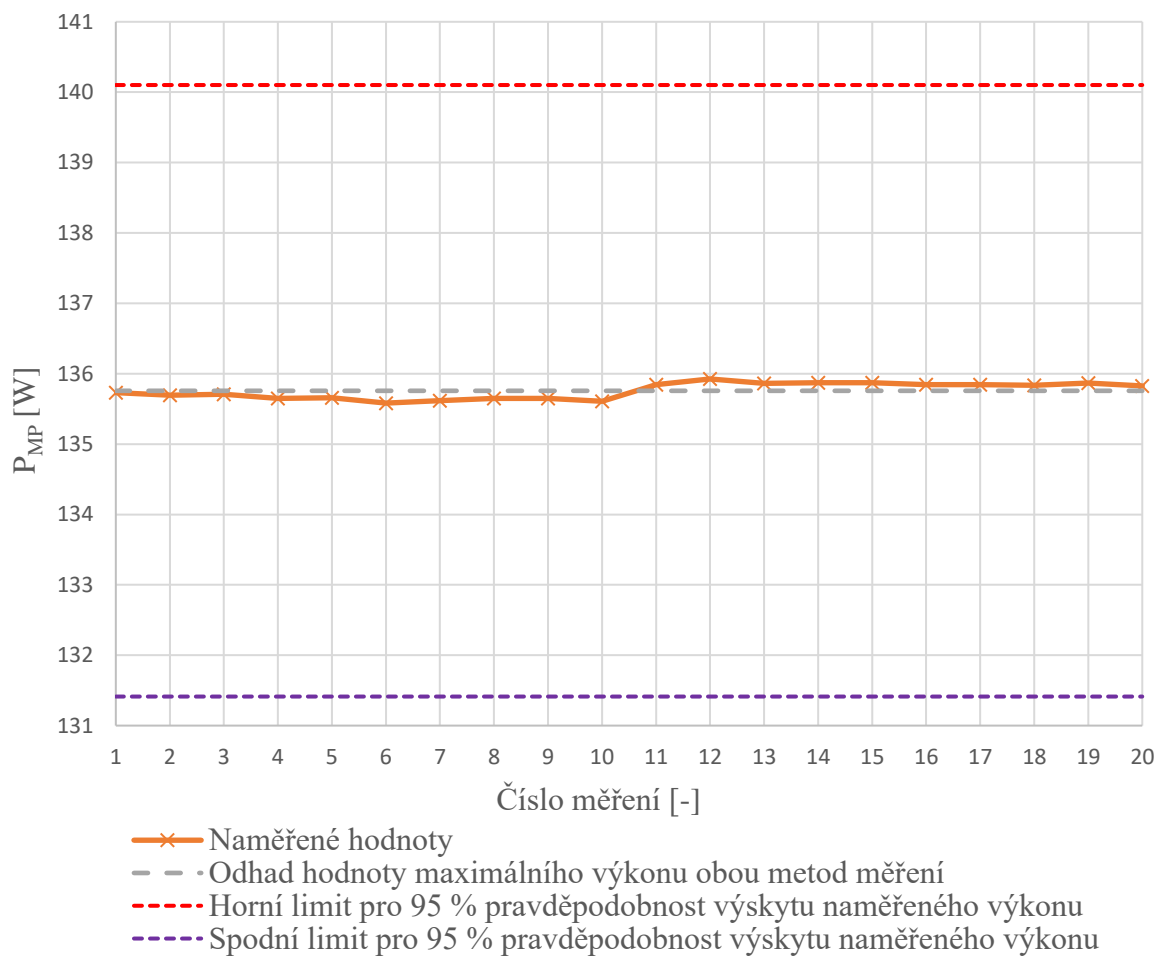
Datum: 8. 9. 2013

Příloha C - Grafy

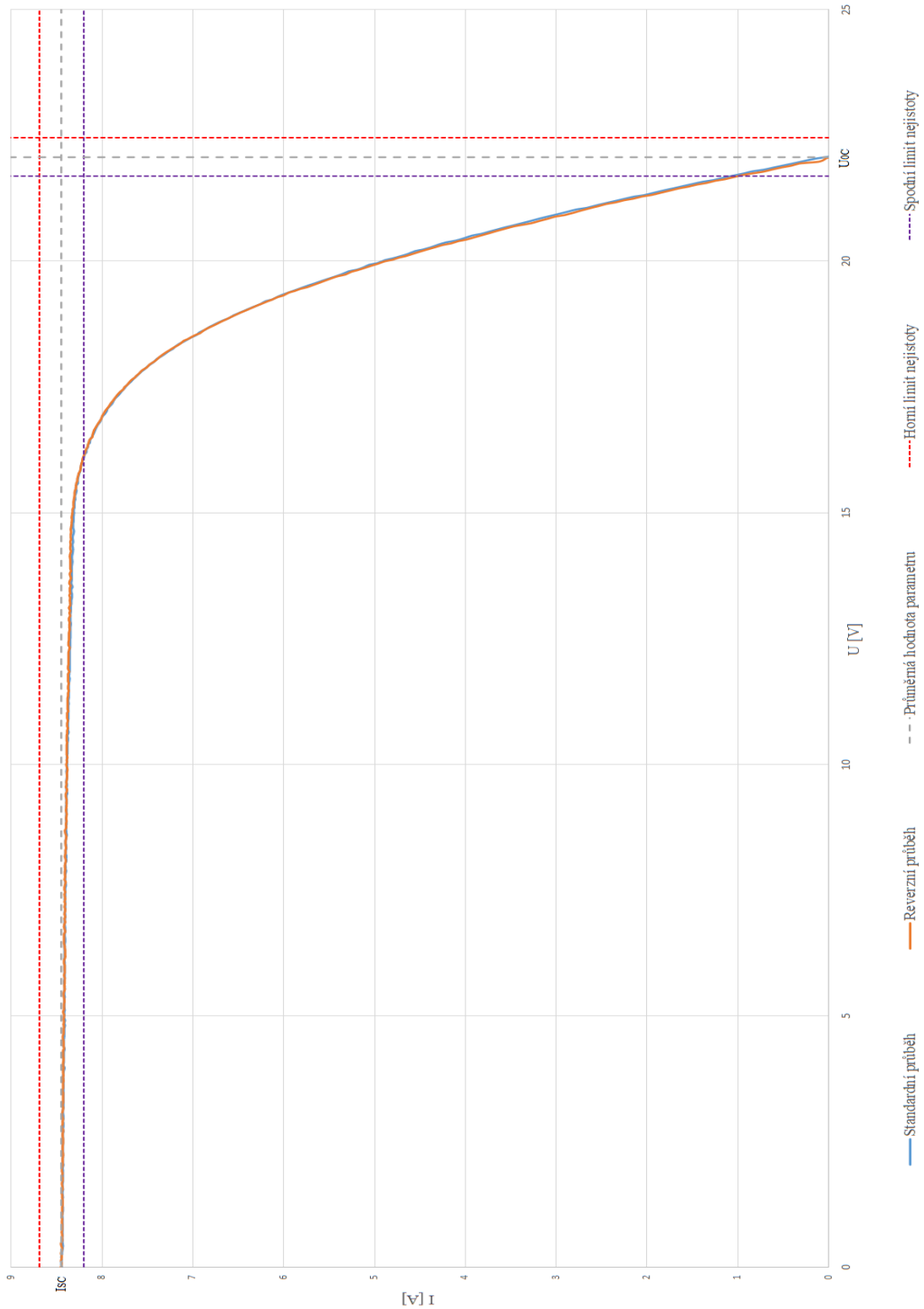
C.1 Graf výskytu naměřených hodnot maximálního výkonu okolo průměrného odhadu maximálního výkonu panelu Kyocera



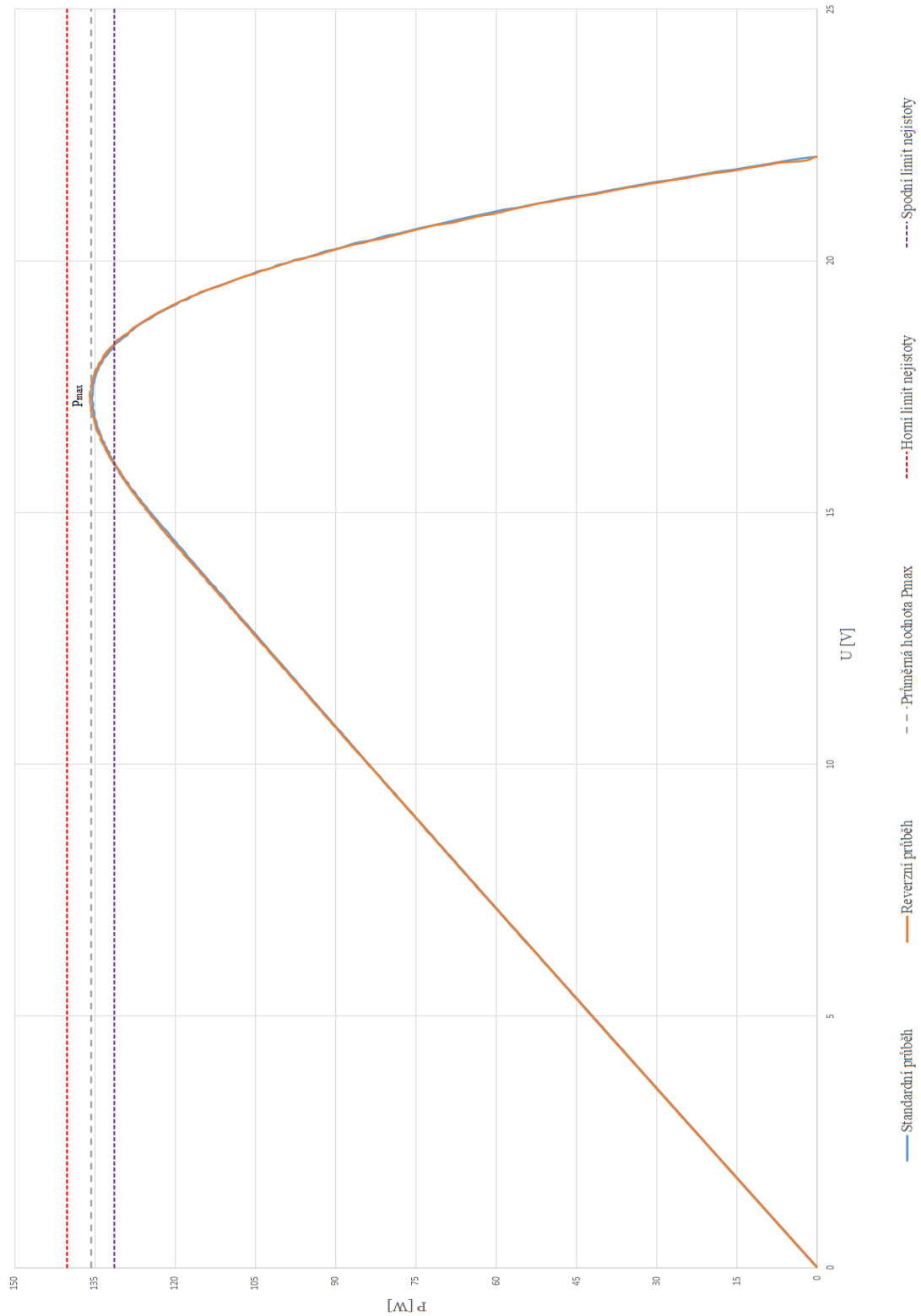
C.2 Graf výskytu naměřených hodnot maximálního výkonu okolo průměrného odhadu maximálního výkonu panelu Kyocera s definovanými limity pro pravděpodobnost 95 % výskytu naměřeného výkonu



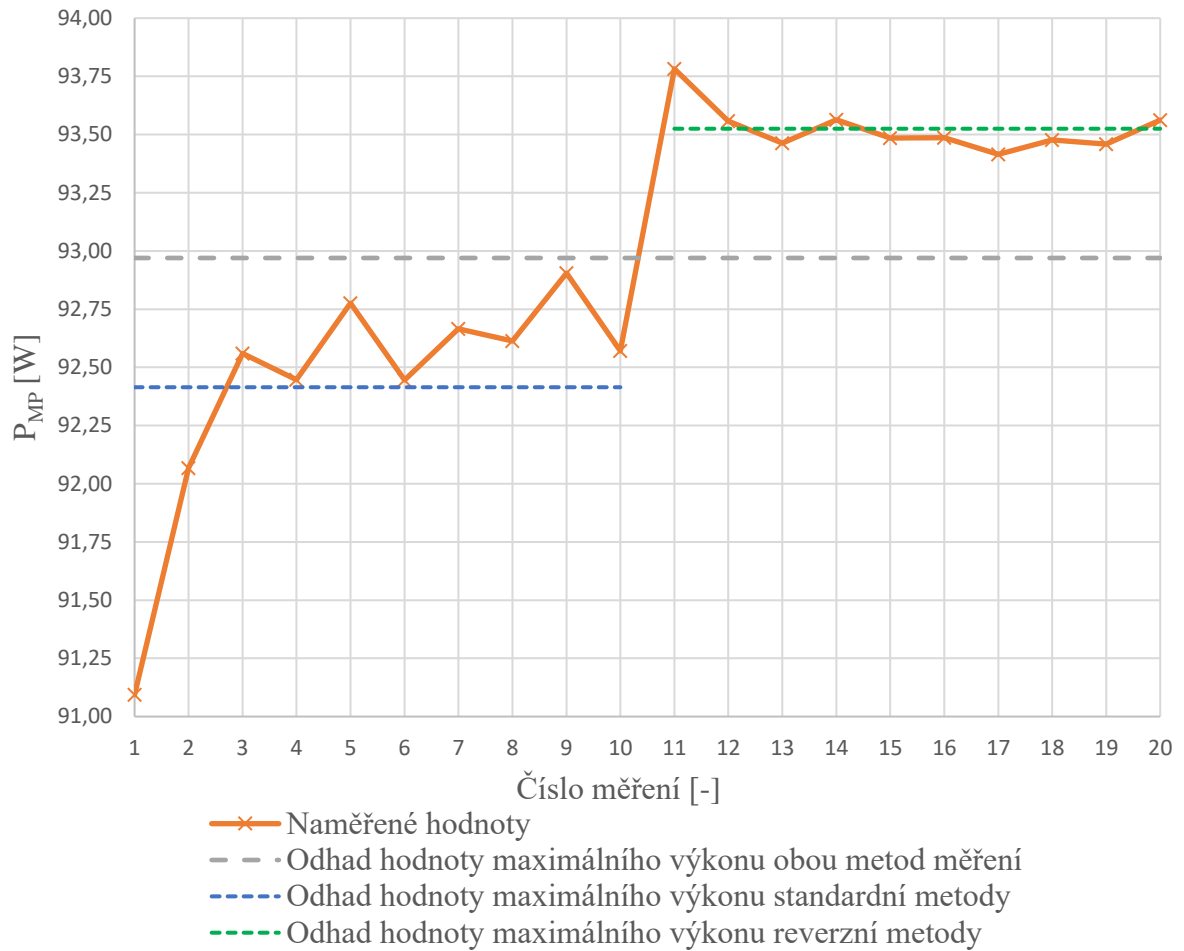
C.3 VA charakteristika panelu Kyocera s definovanými limity nejistot určitých parametrů



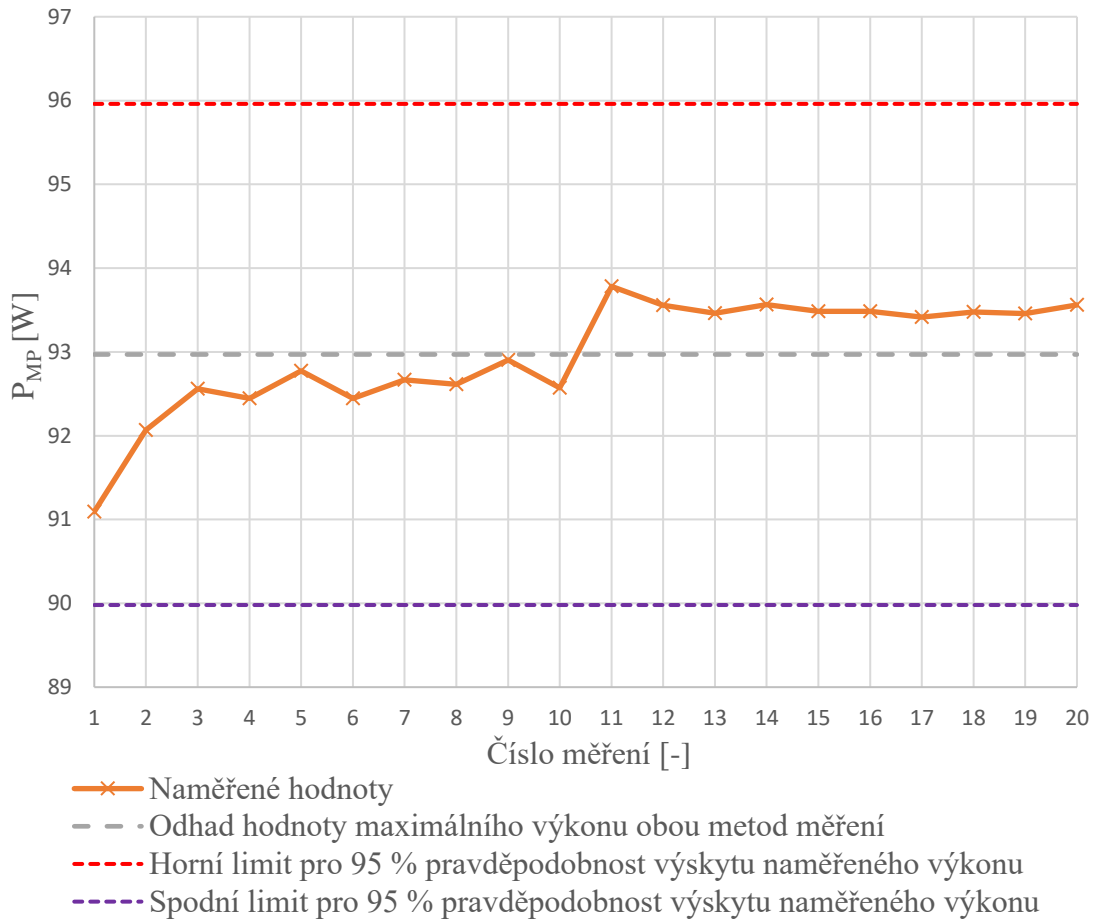
C.4 Výkonová charakteristika panelu Kyocera s definovanými limity nejistot maximálního výkonu



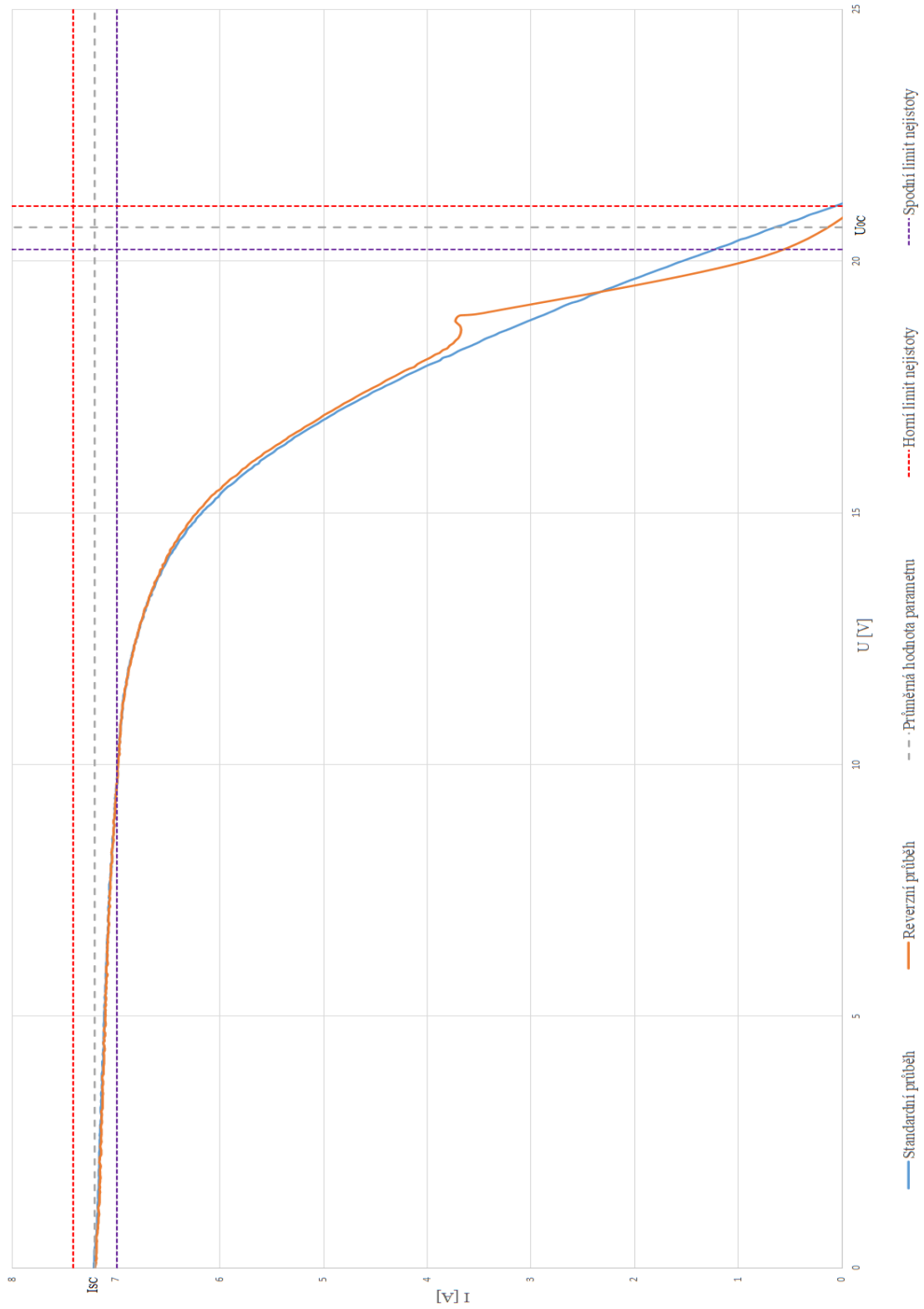
C.5 Graf výskytu naměřených hodnot maximálního výkonu okolo průměrného odhadu maximálního výkonu panelu Atersa



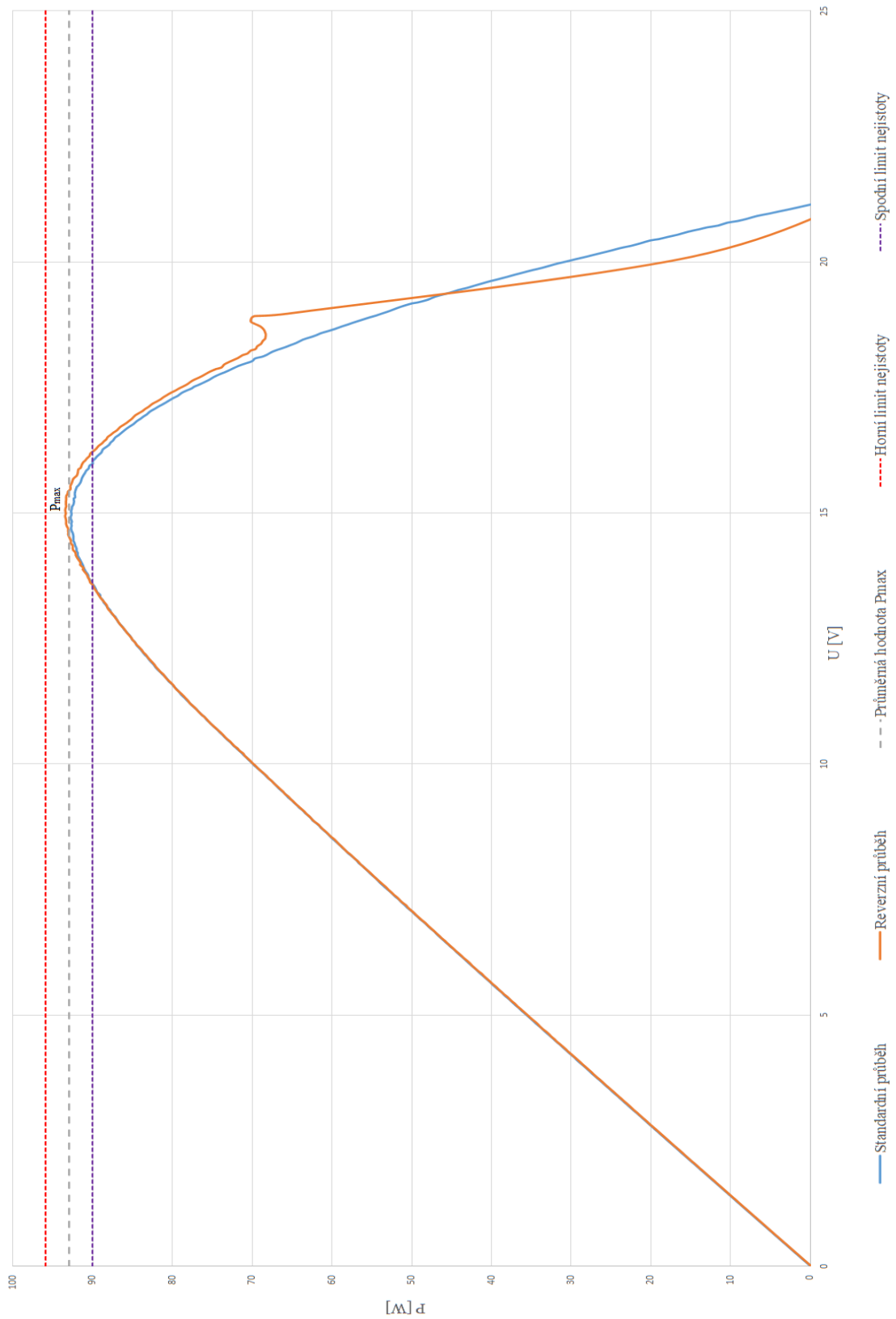
C.6 Graf výskytu naměřených hodnot maximálního výkonu okolo průměrného odhadu maximálního výkonu panelu Atersa s definovanými limity pro pravděpodobnost 95 % výskytu naměřeného výkonu



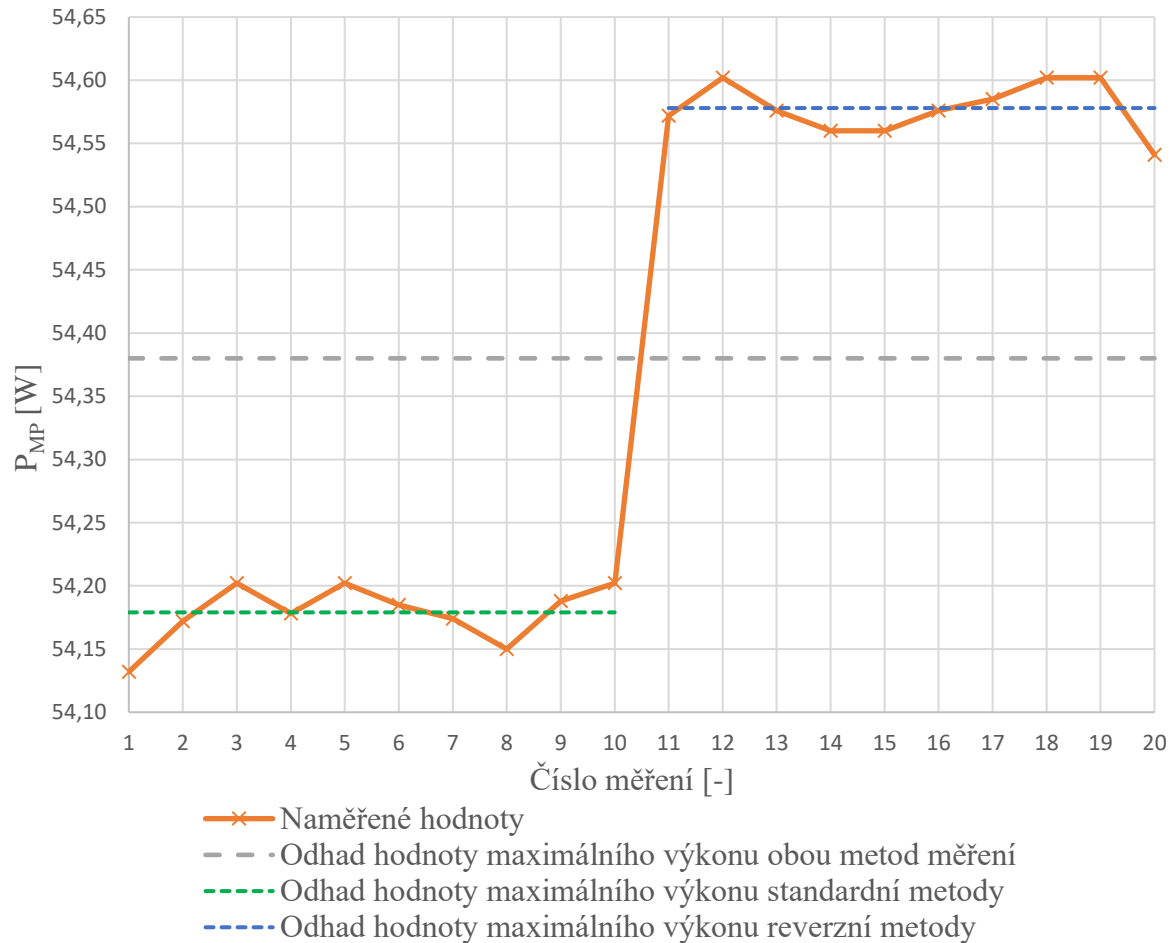
C.7 VA charakteristika panelu Atersa s definovanými limity nejistoty určitých parametrů



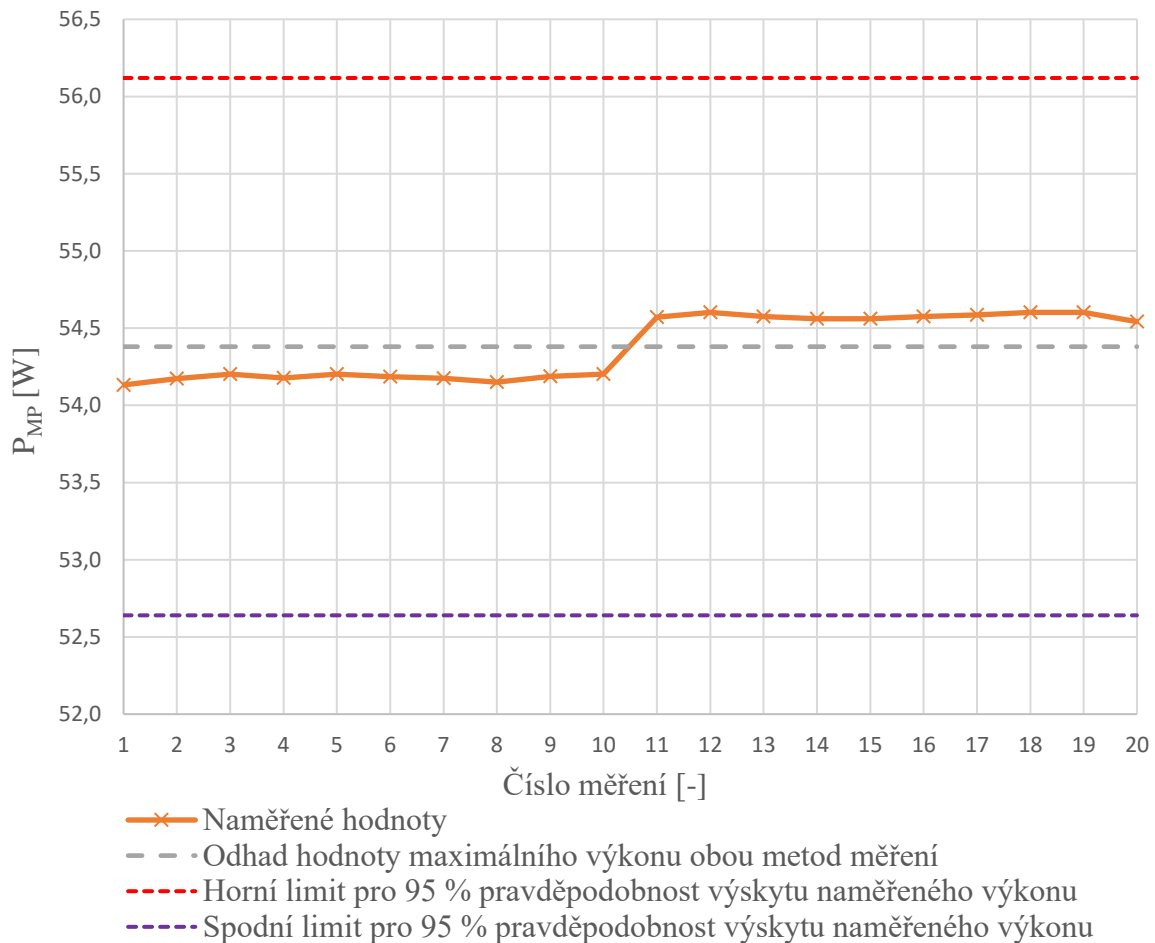
C.8 Výkonová charakteristika panelu Atersa s definovanými limity maximálního výkon



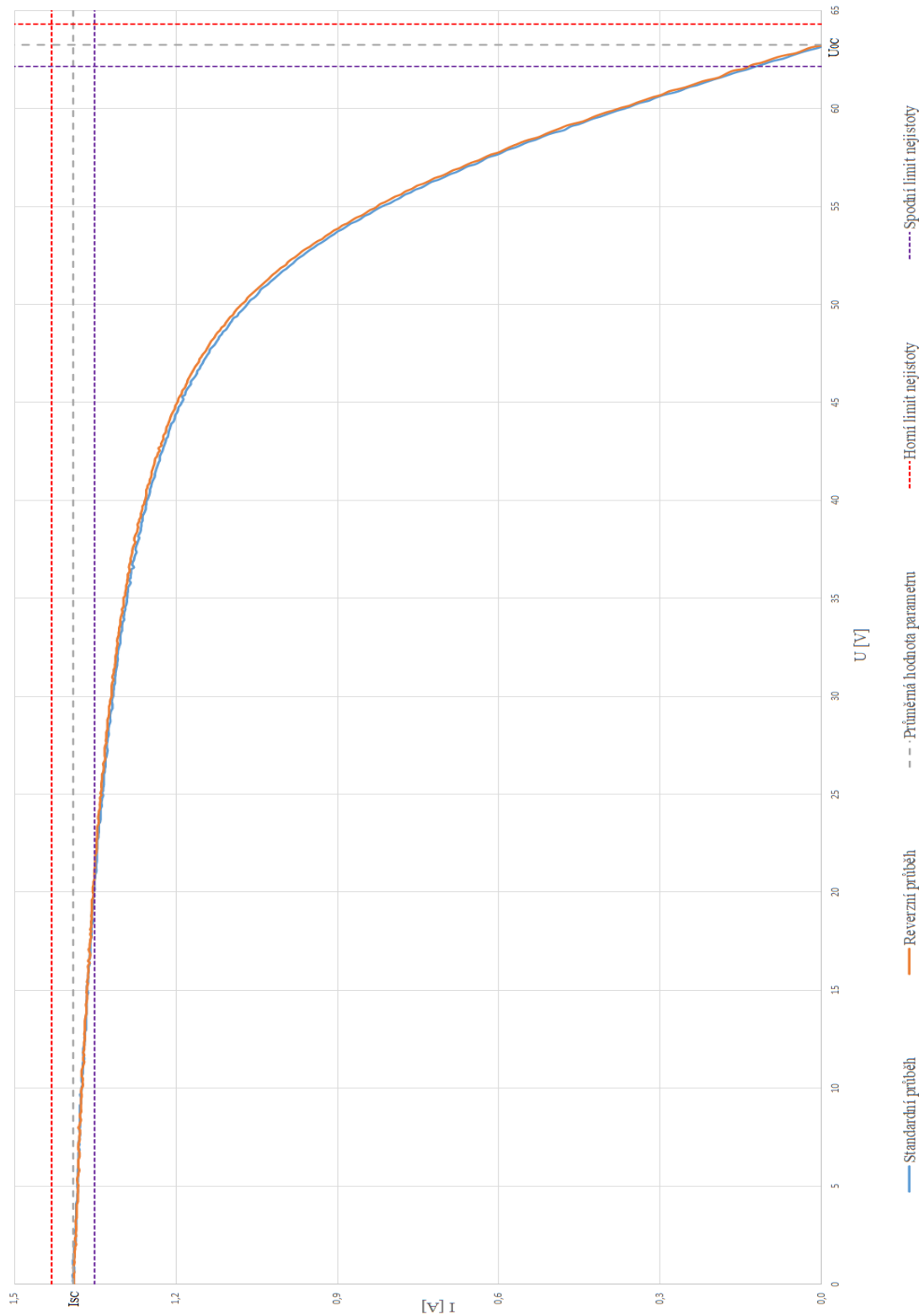
C.9 Graf výskytu naměřených hodnot maximálního výkonu okolo průměrného odhadu maximálního výkonu panelu EPV



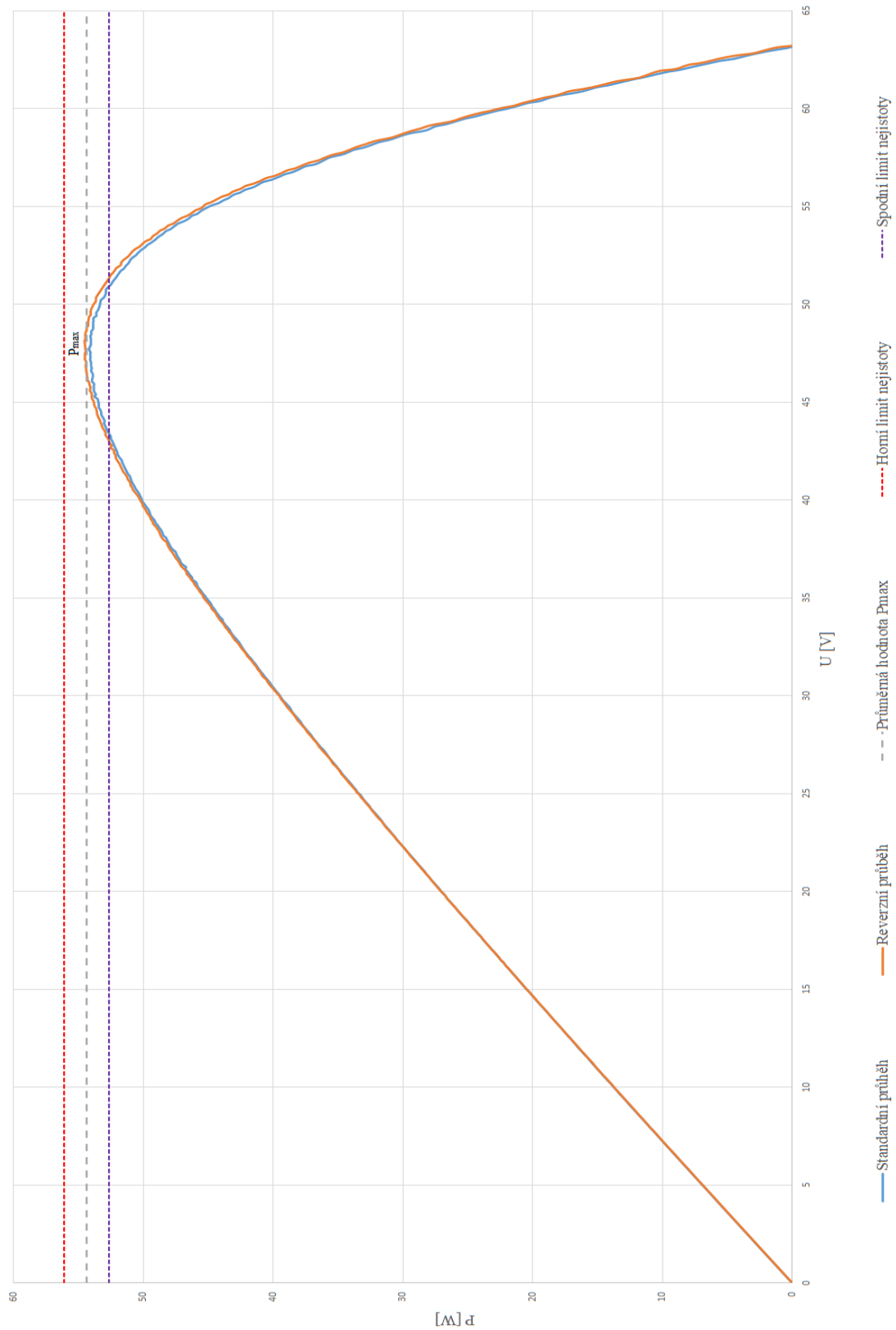
C.10 Graf výskytu naměřených hodnot maximálního výkonu okolo průměrného odhadu maximálního výkonu panelu EPV s definovanými limity pro pravděpodobnost 95 % výskytu naměřeného výkonu



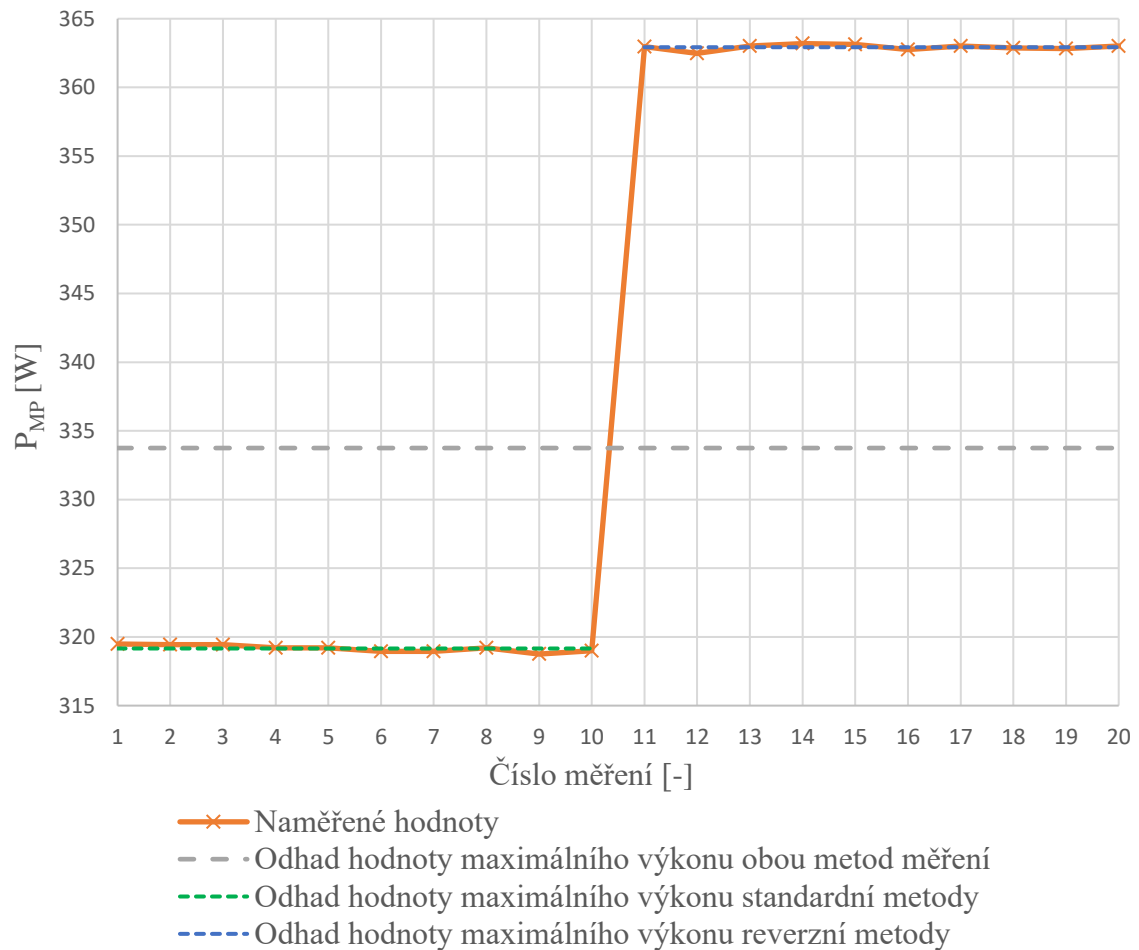
C.11 VA charakteristika panelu EPV s definovanými limity nejistot určitých parametrů



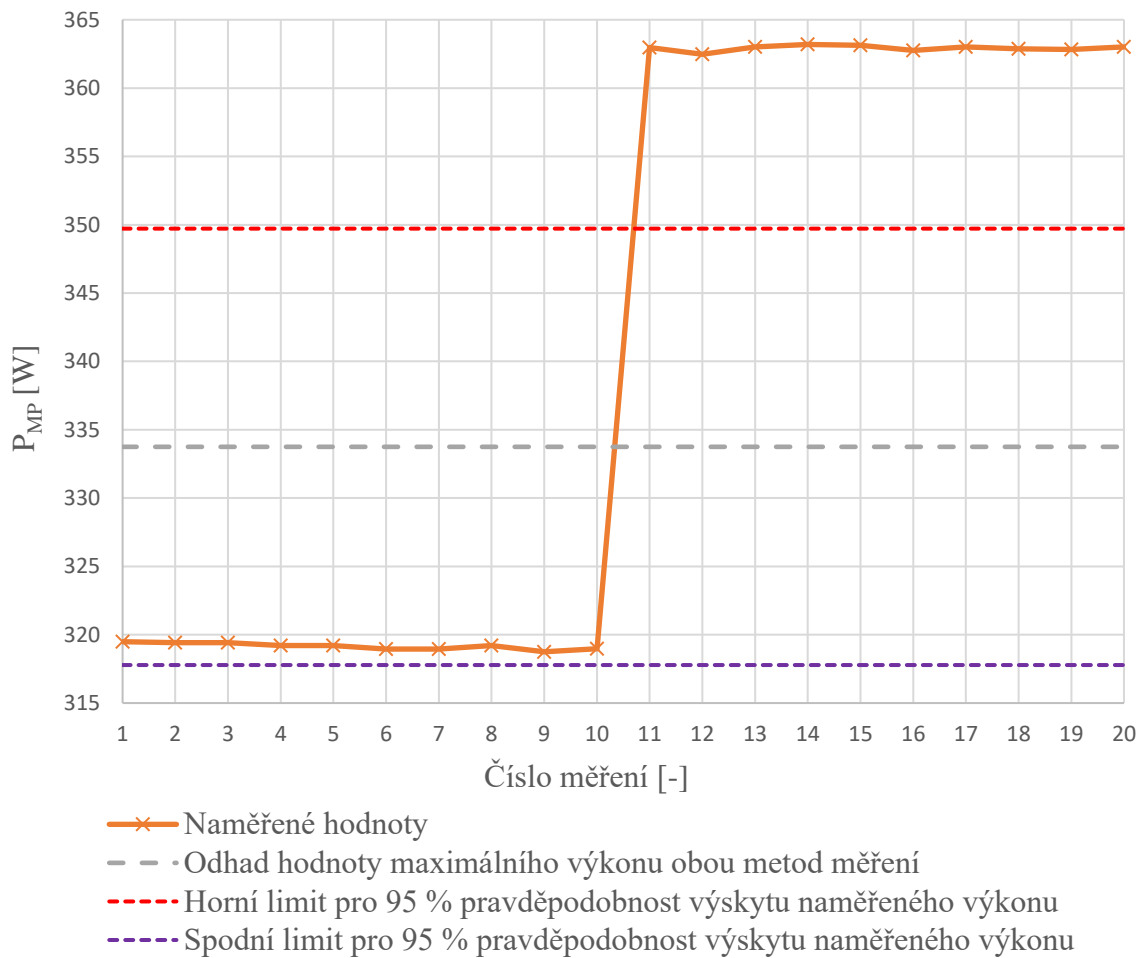
C.12 Výkonová charakteristika panelu EPV s definovanými limity maximálního výkonu



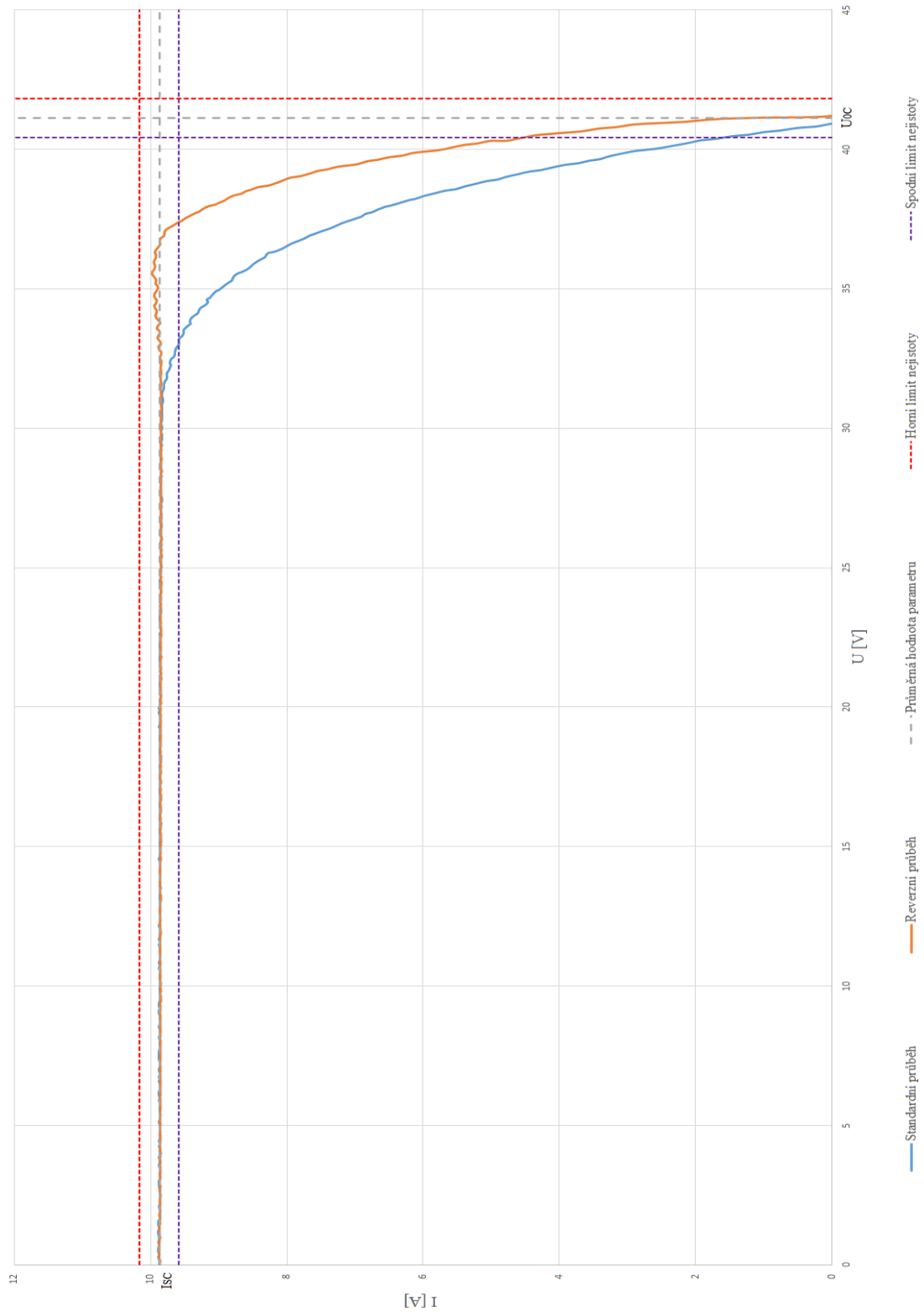
C.13 Graf výskytu naměřených hodnot maximálního výkonu okolo průměrného odhadu maximálního výkonu panelu R-TG



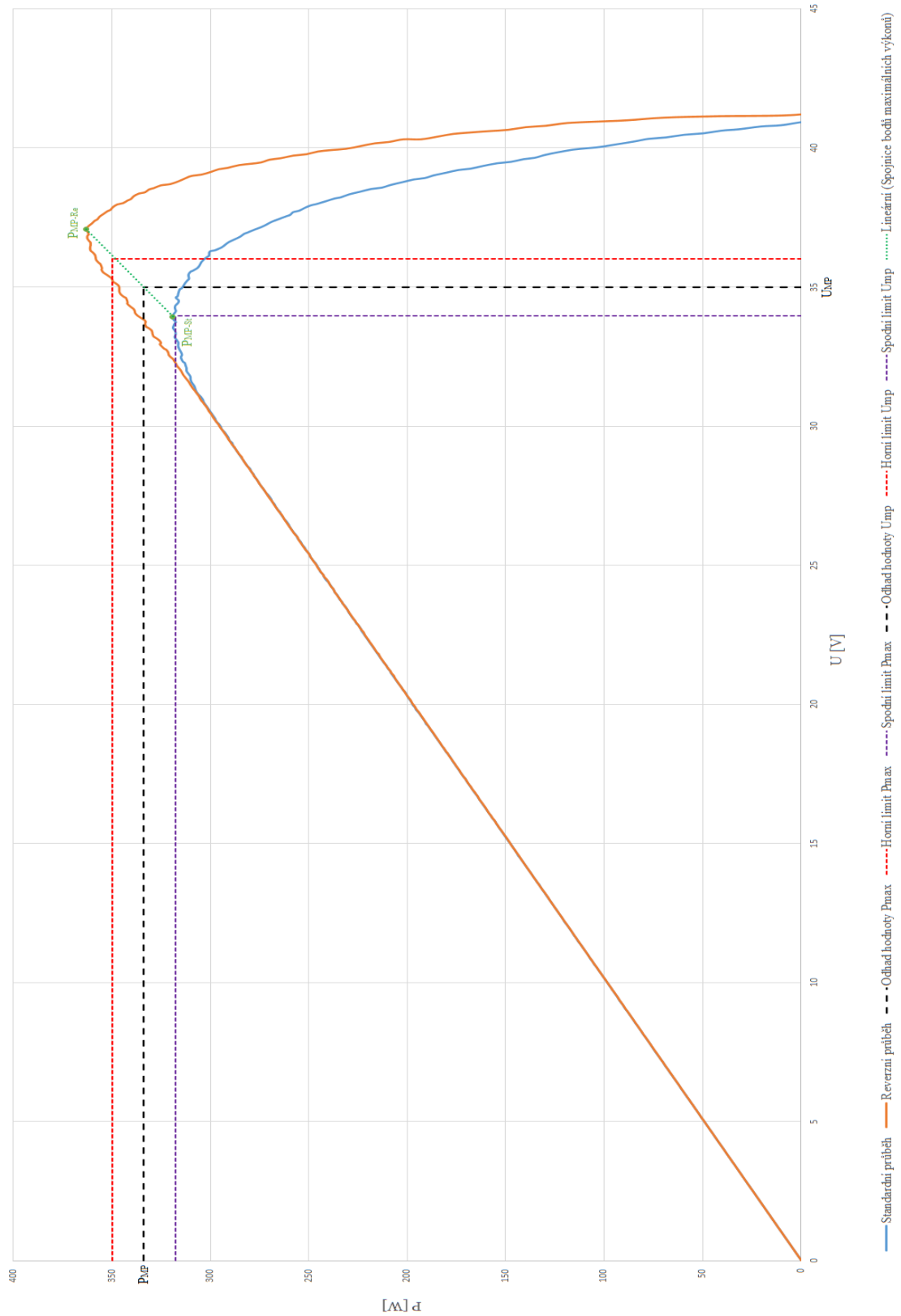
C.14 Graf výskytu naměřených hodnot maximálního výkonu okolo průměrného odhadu maximálního výkonu panelu R-TG s definovanými limity pro pravděpodobnost 95 % výskytu naměřeného výkonu



C.15 VA charakteristika panelu R-TG s definovanými limity nejistot určitých parametrů



C.16 Výkonová charakteristika panelu R-TG s definovanými limity maximálního výkonu



C.17 Poměrový graf naměřených hodnot maximálního výkonu okolo průměrného odhadu maximálního výkonu

