

Bakalářská práce



**České
vysoké
učení technické
v Praze**

F3

**Fakulta elektrotechnická
Katedra radioelektroniky**

Charakterizace malých solárních panelů a odvození jejich SPICE modelu

Daniil Kotrikov

Vedoucí: Ing. Adam Bouřa, Ph.D.

Studijní program: Otevřené elektronické systémy

Květen 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kotrikov** Jméno: **Daniil** Osobní číslo: **498989**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**
Studijní program: **Otevřené elektronické systémy**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Charakterizace malých solárních panelů a odvození jejich SPICE modelu

Název bakalářské práce anglicky:

Characterization of Small Solar Panels and Derivation of their SPICE Model

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou charakterizace malých solárních panelů [1] a se způsoby, jakými se odvozuje jejich SPICE model [1, 2, 3].
2. Provedte měření zatěžovacích charakteristik sady vybraných solárních panelů, odvoďte jejich SPICE model a porovnejte přesnost těchto modelů s reálnými vlastnostmi.
3. Sestavte testovací pracoviště a proveďte měření panelů s vybraným obvodem pro sběr energie [4] při různých hodnotách osvětlení. Výsledky měření porovnejte se simulací a kriticky je zhodnoťte.

Seznam doporučené literatury:

- [1] BOUŘA, A. Characterization of a small amorphous photovoltaic panel and derivation of its SPICE model. Solar Energy. 2023, Volume 262 ISSN 1471-1257. DOI 10.1016/j.solener.2023.111854.
[2] Guo, S., Ma, F.-J., Hoex, B., Aberle, A.G., Peters, M., 2012. Analysing Solar Cells by Circuit Modelling. Energy Procedia 25, 28–33. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.07.004>
[3] Hosseini, S., Taheri, S., Farzaneh, M., Taheri, H., Narimani, M., 2018. Determination of Photovoltaic Characteristics in Real Field Conditions. IEEE J. Photovoltaics 8, 572–580. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2018.2797974>
[4] Advanced Linear Devices, Inc.: EH300/301 EPAD ENERGY HARVESTINGTM MODULES, datasheet, 2015, Vers. 2.2, URL: <http://www.aldinc.com/pdf/EH300.pdf>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Adam Bouřa, Ph.D. katedra mikroelektroniky FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **05.02.2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: **21.09.2025**

Ing. Adam Bouřa, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Stanislav Vítek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Především bych rád poděkoval vedoucímu své bakalářské práce Ing. Adamovi Bouřovi, Ph.D za konzultace a nasměrování na správnou cestu k cíli. Svým 5 spolužákům, za spolupráci při obtížném studiu. A svojí mamince, která mě podporovala ve všem.

Prohlášení

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

V Praze, 23. května 2024

Abstrakt

Tato práce se hlavně soustředí na metodu charakterizace malých amorfních fotovoltaických panelů, kde ukazují, jak lze odvodit parametry modelu solárního panelu s jednou diodou přímo z naměřených dat pomocí standardních matematických rovnic. Pak následně pomocí odvozených parametrů z měření, porovnávám V-A charakteristiky naměřených dat a simulované V-A křivky z programu LTspice. Důraz je kladen na předpověď celkového výkonu panelu a odvození kvality zkoumaných vzorků solárních panelů. Také porovnávám mnou vybranou metodu s jinými již existujícími metodami. Popisují různé druhy solárních panelů a ve zjednodušené formě je porovnávám mezi sebou.

Klíčová slova: panel, modul, fotovoltaický, FV, V-A charakteristika, amorfní, tenkovrství.

Vedoucí: Ing. Adam Bouřa, Ph.D.
Katedra mikroelektroniky FEL,
Technická 1902/2,
166 27 Praha 6

Abstract

This work mainly focuses on the characterization method of small amorphous photovoltaic panels, where I show how the parameters of a single diode solar panel model can be derived directly from measured data using standard mathematical equations. Then subsequently using the derived parameter from the measurements, I compare the V-A characteristics of the measured data and the simulated V-A curves from LTspice. The focus is on predicting the overall panel performance and deriving the quality of the solar panel samples under investigation. I also compare my chosen method with other existing methods. I describe different types of solar panels and compare them with each other in a simplified form.

Keywords: panel, module, photovoltaic, PV, amorphous, V-A characteristic.

Title translation: Characterization of small solar panels and derivation of their SPICE model

Obsah

1 Úvod	1
2 Cíle práce	3
3 Teoretický rozbor	5
3.1 Princip fungování solárního panelu	5
3.2 Technologie výroby	6
3.3 Popis možných defektů	10
3.4 Metody pro diagnostiku modulů a článků.....	11
4 Návrh a realizace vlastního řešení	17
4.1 Princip charakterizace fotovoltaických článku.	17
4.2 Zdroj světla pro testování.	19
4.3 Testovací pracoviště.	21
4.4 Ekvivalentní elektrický model. . .	22
5 Charakterizace vybraných článku.	29
6 Závěr	41
Literatura	43
A AM-5706CAR	49
B AM-5815CAR	57
C AM-5907CAR	67
D AT-7802A	77

Obrázky

3.1	Monokrystalický a polykrystalický křemíkový článek.[21]	6
3.2	Monokrystalický a polykrystalický křemíkový článek.[39]	7
3.3	Struktura tenkovrstvého FV modulu [39]	9
3.4	[1]	14
4.1	Vnitřní zapojení FV článku.[25]	17
4.2	V-A charakteristika a výkon.[25]	18
4.3	Spektrální charakteristika světelných zdrojů, žárovka 60 W (a), LED 10 W WHITE 800LM/120 OVAL GT-P10WW539910900(b),LED BLUE 6 čipů, V_F 14-18 V, 550 mA (c). Měřeno pomocí Ocean Optics USB2000+ spektrometr (USB2 + HO1550) a vlákno P600-1-SR. [25]	19
4.4	fotodetektor s vlnovou délkou kolem 450 nm	20
4.5	Voltmetr, Ampérmetr	21
4.6	dekádové odporové zatížení	22
4.7	elektrický model FV panelu [25]	23
5.1	Foto panelu AM-5706CAR-AS.[9]	30
5.2	Zapojení měřicích přístrojů	31
5.3	Náhradní model panelu AM-5706CAR-AS v LTspice	32
5.4	Panel AM-5706CAR-AS naměřené hodnoty a hodnoty náhradního modelu pro 10 lx	33
5.5	Panel AM-5706CAR-AS naměřené hodnoty a hodnoty náhradního modelu pro 100 lx	34
5.6	Panel AM-5706CAR-AS naměřené hodnoty a hodnoty náhradního modelu pro 1000 lx	34
5.7	Náhradní obvod v programu LT Spice panel AM-5706CAR-AS	36
5.8	Naměřená data pomocí multimetru pro hodnotu 100 lx panel AM-5706CAR-AS	36
5.9	Simulace v LT Spice pro 100 lx panel AM-5706CAR-AS	37
5.10	Naměřená data pomocí multimetru pro hodnotu 500 lx panel AM-5706CAR-AS	37
5.11	Simulace v LT Spice pro 500 lx panel AM-5706CAR-AS	38

Tabulky

5.1	Hodnoty hlavních parametrů podle Datasheetu výrobce [9][10][11][13]	29
5.2	Tabulka hodnot R_{pv} a R_s pro panel AM-5706CAR-AS.	31
5.3	Přepočítané hodnoty z křivky V-A charakteristiky pro panel AM-5706CAR-AS.	32
5.4	Hodnoty pro náhradní model LTspice pro panel AM-5706CAR-AS.	32
5.5	Porovnání naměřených a simulovaných hodnot pro 10 lx panel AM-5706CAR-AS	34
5.6	Porovnání naměřených a simulovaných hodnot pro 100 lx panel AM-5706CAR-AS	35
5.7	Porovnání naměřených a simulovaných hodnot pro 1000 lx panel AM-5706CAR-AS	35
5.8	Porovnání naměřených a simulovaných hodnot panel AM-5706CAR-AS	38

Kapitola 1

Úvod

Tato práce se zaměřuje na metodu charakterizace malých amorfních fotovoltaických panelů, která umožňuje odvodit parametry modelu solárního panelu s jednou diodou přímo z naměřených dat, bez potřeby iterativních metod, či Lambertovy W funkce. Simulace a modelování obvodu nám umožňuje předvídat chování systému. Možným příkladem je předpověď energetické bilance autonomních zařízení, které získávají energii pouze ze solárních panelů. Klíčovým prvkem je charakterizace panelu při různých úrovních osvětlení od 10 lx do 1000 lx, což umožňuje přesné nastavení parametrů modelu na základě reálných podmínek osvětlení. Metoda zahrnuje zohlednění rekombinačních účinků a přizpůsobení vstupního proudu v empirické závislosti na intenzitě osvětlení. Tento přístup umožňuje jednotnou charakterizaci panelu bez ohledu na jeho konkrétní strukturu. Tato metoda je vhodná na předpověď celkového výkonu panelu, avšak není vhodná pro detailní analýzu výrobní technologie.

V rámci širšího kontextu se zkoumá, jak vzorky solárních panelů absorbují světlo za použití modrého světla o různých intenzitách. Na rozdíl od standardních elektronických prvků může být obtížné najít vhodnou fotovoltaickou součástku, protože parametry a charakteristiky se liší v závislosti na technologii výroby. Simulace slouží k optimalizaci fotovoltaických systémů pro dosažení maximální účinnosti a spolehlivosti v různých klimatických podmínkách. Prostřednictvím analýzy sériových a paralelních kombinací PN přechodů se snažíme porozumět chování panelu v různých prostředích. Komplexní modelování vyžaduje sofistikované přístupy k přesnému předpovídání výkonu fotovoltaického systému. Porovnání měření VA charakteristik a výkonu s ideálním SPICE modelem nám umožňuje zhodnotit vhodnost použití daného článku a odhalit případné chyby při měření nebo výpočtech.

Motivací pro tento projekt je snaha přispět k pokroku v oblasti solárních technologií. Věřím, že hlubší pochopení toho, jak se solární panely chovají a jaký mají výkon za různých podmínek, může vést k větší efektivitě využití sluneční energie. Mým cílem je najít způsoby, kterými lépe modelovat tyto panely, abychom mohli optimalizovat jejich design a využití. Věřím, že to může přinést inovace v oblasti obnovitelných zdrojů energie a pomoci podpořit udržitelný rozvoj, což považuji za klíčové pro budoucnost naší společnosti.

Kapitola 2

Cíle práce

Solární energie se stává jedním z nejdůležitějších a nejoblíbenějších obnovitelných zdrojů energie a může hrát klíčovou roli v budoucím energetickém mixu. Jak zájem o tuto technologii neustále roste, roste i potřeba porozumět chování solárních panelů a optimalizovat jejich výkon. Tato bakalářská práce se zaměřuje na charakterizaci a modelování solárních panelů pro lepší pochopení jejich vlastností a účinnosti. Důležitým aspektem této práce je také praktická aplikace teoretických poznatků prostřednictvím experimentů a měření.

Prvním cílem této práce je představit základní principy fungování solárních panelů a popsat jejich vlastnosti. Bude provedena rešerše v literatuře a studium existujících charakterizačních metod.

Dalším cílem je získání praktických dovedností v oblasti modelování obvodů pomocí fotovoltaiických modulů a programu LTSpice. Model SPICE bude odvozen na základě získaných znalostí při měření zátěžových charakteristik solárních panelů. Tato část práce se zaměří na matematické modelování chování panelu za různých světelných podmínek.

Třetím cílem je sestavení testovacího pracoviště a provádění měření na vybraných panelech pro získávání energie při různých hodnotách osvětlení. V tomto experimentu budou vybrané solární panely vystaveny různým úrovním osvětlení. Zásadním účelem této studie je porovnat naměřené výsledky s výsledky simulace získanými pomocí modelu SPICE. Budou tak získány důležité poznatky o tom, jak se chování solárních panelů mění za různých podmínek a jak přesně simulace odpovídají skutečné situaci.

Na konci práce budou vyhodnoceny a kriticky zhodnoceny výsledky experimentů a simulací. Bude se diskutovat o tom, jak modely SPICE odpovídají skutečným charakteristikám solárních panelů a jejich potenciálu pro budoucí vývoj a aplikaci. Získané poznatky by měly pomoci lépe porozumět chování solárních panelů a zlepšit jejich účinnost.

Kapitola 3

Teoretický rozbor

Fotovoltaické moduly, které přeměňují sluneční světlo na elektřinu, jsou základními stavebními kameny solárních panelů. Jejich vývoj se datuje od roku 1876, kdy byl poprvé pozorován fotovoltaický jev. O sedm let později již vznikl první skutečný fotovoltaický článek, jehož základem byl polovodičový materiál selen a tenká vrstva zlata. Přestože účinnost byla pouze 1 %, představovalo to důležitý krok vpřed. Průlom v oblasti fotovoltaických technologií přišel až v roce 1954, kdy Bell Laboratories vyvinuly první fotovoltaický článek podobný těm, které známe dnes. Jeho účinnost byla sice jen 6%, ale i přesto představoval důležitý pokrok ve vývoji FV součástek. Původně byly solární panely využívány převážně v kosmickém průmyslu jako zdroj energie pro satelity. Teprve na začátku 70. let se fotovoltaické technologie začaly rozšiřovat na zemském povrchu. Jedním z prvních velkých využití bylo osvětlení na ropných vrtech v Mexiku. Nicméně skutečný průlom nastal až v roce 2008, kdy došlo k rapidnímu poklesu cen krystalického křemíku, hlavního materiálu pro výrobu fotovoltaických článků. To mělo za následek postupné vylepšení metod výroby, zlevněním materiálů a současně se výroba přesunula převážně do Číny, což vedlo k masivní expanzi fotovoltaických technologií po celém světě.[17]

3.1 Princip fungování solárního panelu

Fotony (ne nezbytně) slunečního záření dopadají na FV součástku, která je tvořena dvěma polovodičovými vrstvami materiálu s různým typem vodivosti N a P, tím foton „vyrazí“ z krystalické mřížky elektrony. Ty se uvolní z valenční sféry atomových jader, vyzáří, stanou se z nich volné elektrony, které jsou součástí toku elektrického proudu. Tento proud vytvořený pomocí světla lze pomocí převodníku rovnou odvádět pro spotřebu nebo uskladnění v akumulátoru/baterce. Dostaneme však stejnosměrný proud, který pro využití je nutné přivést na střídavý proud pomocí střídače DC/AC.

3.2 Technologie výroby

I. generace

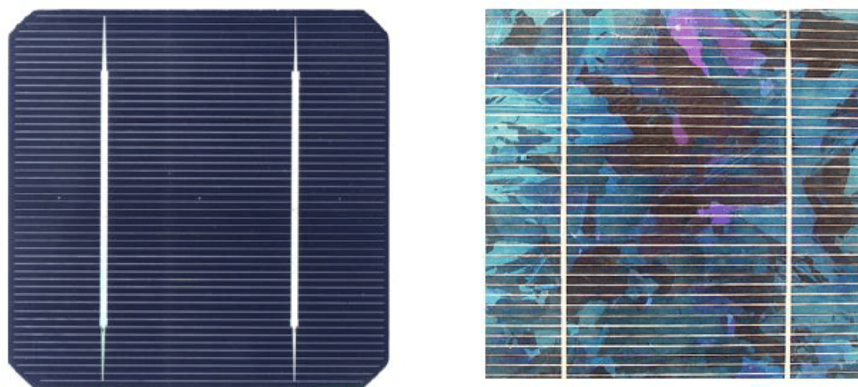
Krystalické technologie.

Fotovoltaické články jsou tvořeny pomocí křemíkových krystalů, často typu P, na které je pomocí difúze vytvořen PN přechod. Tyto články mohou být vytvořeny pomocí monokrystalického nebo polykrystalického křemíku. Křemík je ideálním materiálem pro výrobu fotovoltaických článků. Díky jeho vysoké účinnosti při generaci elektrické energie ze slunečního záření. Své uplatnění nachází jak v monokrystalické, tak v polykrystalické formě, přičemž monokrystalický křemík se považuje za kvalitnější, ale nákladnější variantu.

Fotovoltaické články, které jsou klíčovou součástí solárních panelů jsou vytvářené pomocí křemíkových destiček.[21] Ve většině případů zpracovaných do podoby destiček čtvercového tvaru (až 200x200mm), na které je poté difúzně vytvořen PN přechod. Tyto články mohou být vytvořeny pomocí monokrystalického nebo polykrystalického křemíku, a to pomocí různých technologií. Krystalické články jsou tvořené na tenkých deskách polovodičového materiálu. Jako hlavní materiál se používá právě křemík, a to pro oba krystalické typy. Jiné materiály, než křemík jsou v této oblasti využívány minimálně, a to především pro speciální aplikace.

Při výrobě se polykrystalické ingoty křemíku řezou na tenké destičky (řádově stovky μm), oproti nimž monokrystalické ingoty jsou kulatého průřezu a často se vyřezávají do mnohoúhelníkových tvarů, aby byla lépe využita plocha FV modulů. Příprava destiček ingotu je tímto způsobem relativně nákladná operace, při které je znehodnoceno téměř 50% materiálu.[39],[34]

Vznikají nám tedy 2 typy FV článků:



Obrázek 3.1: Monokrystalický a polykrystalický křemíkový článek.[21]

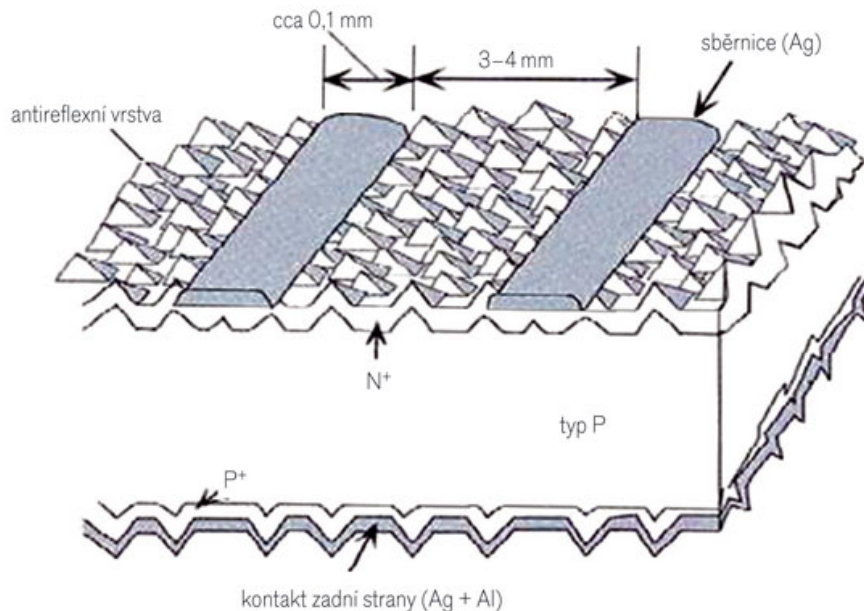
Monokrystalické: Jeden krystal je vyráběn pomalým tažením roztaveného křemíku. Účinnost monokrystalických modulů je 15-20 % (černé).

Polykrystalické články: Velké množství menších krystalů o velikosti 1-100

mm, jehož částice jsou uspořádány pravidelně, ale poloha krystalů je náhodná. Účinnost polykrystalických modulů je 12-14 % (modré). Ale díky vědeckému vývoji se účinnost polykrystalického článku značně přibližuje k hodnotám účinnosti článků monokrystalických.

Z jedné křemíkové destičky je vyroben jeden FV článek, tímto postupem:

1. Příprava podložky – zahrnuje texturaci, čištění a leptání.
2. Vytvoření jednostranného PN přechodu pomocí difuze fosforu v určené vzdálenosti (0,2 – 0,5 m) od povrchu.
3. Fosforsilikátové sklo, které vzniklo při difuzi, je potřeba odstranit
4. Nanesení antireflexní vrstvy pomocí SiN nebo TiO₂.
5. Vytvoření kontaktů pomocí vodivých past aplikovaných technikou síto-tisku – včetně sběrnice na vrstvě N⁺ a kontaktu na zadní straně.
6. Vysušení a vypálení past – pro vytvoření ohmického kontaktu. (Ohmický kontakt zajišťuje přívod proudu do struktur vstupu a výstupu signálu)
7. Odstranění případných povrchových spojů na hranách článku.
8. Měření parametrů hotového článku a třídění podle proudu v bodě maximálního výkonu. [21]



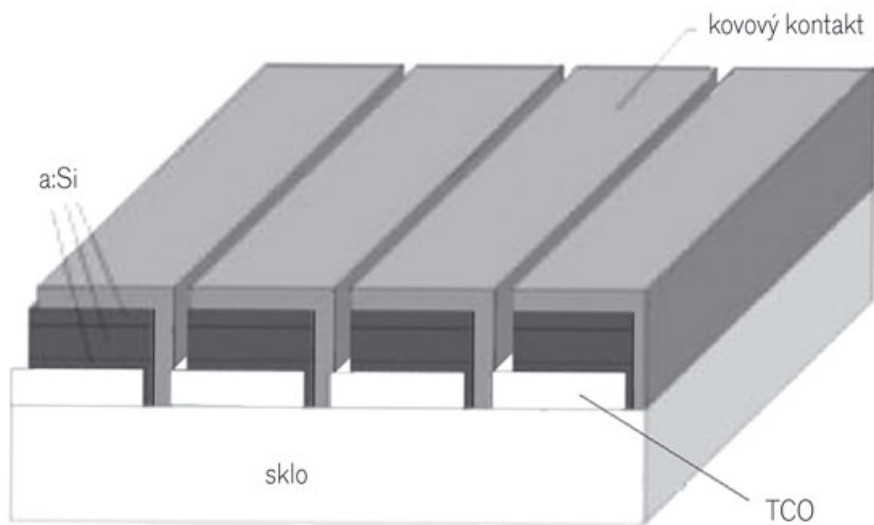
Obrázek 3.2: Monokrystalický a polykrystalický křemíkový článek. [39]

Fotovoltaické články jsou vystaveny různým nepříznivým vlivům okolního prostředí, jako jsou například teplotní změny, srážky, vlhkost a znečištění

U této technologie často nebývají vytvořené jednotlivé články, ale rovnou celý modul pomocí následujícího postupu:

1. Aplikace transparentního vodivého oxidu na nosný materiál, typicky sklo.
2. Laserem jsou odděleny oblasti jednotlivých článků.
3. Tenkovrstvý článek je upraven pomocí plazmatické depozice.
4. Laserem jsou odstraněny části článku těsně sousedící s hranicí.
5. Nanesení kovových kontaktů (obvykle naprašováním).
6. Třetím použitím laseru je odstraněn kovový kontakt tak, aby vznikla struktura modulu se sériovým zapojením článků.[21]

Na zadní stranu modulu je přilaminována krycí vrstva (sklo nebo polymer) a vývody svedeny do svorkovnice. Výroba amorfních solárních panelů je energeticky výhodnější než výroba monokrystalických a polykrystalických variant. Tato metoda spočívá v nanášení tenké vrstvy amorfního křemíku na sklo či plast, což vyžaduje jen zlomek množství křemíku v porovnání s klasickými panely. V srovnání s monokrystalickými a polykrystalickými články, v případě amorfních článků je používán laser, což zvyšuje náklady, ale zároveň se snižuje množství potřebného materiálu. Tímto se eliminuje nadbytečný odpad a výroba článků se zjednodušuje. Jejich životnost je sice nižší a výkon menší, ale to je vyváženo nižšími náklady a schopností absorbovat širší spektrum světla, což je činí ideálními pro použití v interiérech.



Obrázek 3.3: Struktura tenkovrstvého FV modulu [39]

■ III. generace

CPV, organické polovodiče, ostatní technologie.

Do této skupiny patří ostatní technologie, zejména koncentrátorová fotovoltaika (CPV) tvořená vícepřechodovými články, na které je soustředěno

mono/polykrystalických součástí. Ale u amorfních článků mohou způsobit velké snížení výkonu. Kvalitní výrobce modulu uvádí na štítek hodnoty, které již zahrnují ztráty výkonu způsobené při výrobě. Příklady takových defektů mohou být hnědé skvrny na okrajích jednotlivých článků a mohou vzniknout při nanášení antireflexní vrstvy. Je patrné, že s tím se můžeme setkat jedině u modulů, které využívají krystalický křemík. U všech druhů fotovoltaických modulů a hlavně u amorfních článků, může být degradace způsobena světlem. Jedná se o pokles výkonu vlivem působení světla u krystalických křemíkových modulů, a to v důsledku vzniku bor-oxidových komplexů, které působí jako rekombinační centra, která vedou ke snížení doby životnosti nosičů nábojů a následným poklesem výkonu v důsledku zvýšené rekombinace. Ke snížení výkonu rovněž dochází dlouhodobým působením UV záření. Podobné situace nastávají i u tenkovrstvých modulů, které používají jako aktivní materiál amorfni křemík. Takové články mohou mít poměrně velký pokles výkonu, 10 – 30 %, a ty se projeví během prvních měsíců používání. Do jisté míry jsou tyto problémy způsobené UV zářením zanedbatelné, k takovým typům poruch dochází hlavně za teplého počasí v létě, kde se modul přehřeje a dochází k sezonním kolísání výkonu.[16],[19]

3.4 Metody pro diagnostiku modulů a článků

Než se modul dostane do provozu, je třeba ověřit, zda použité komponenty splňují parametry předepsané výrobcem. K ověření těchto vlastností, lze použít mnoho metod, z nichž je většina popsána níže.

Vizuální kontrola:

Diagnostika, která nám na první pohled může ukázat vady, které jsou na povrchu. Tato kontrola se provádí podle normy (ČSN EN 61215-2 čl. 10.1) a je poměrně snadná. Kontroluje se přední a zadní strana na defekty typu bubliny, změna barvy, špatně přilepená krycí folie. Jednotlivé články se ověřují na zlomeniny a změnu barvy antireflexní vrstvy. Kontrola je podrobená možná koroze metalických kontaktů, taktéž i možné špatné napájení kontaktů. [16]

Termografie:

Jedná se o jednu ze základních kontrol během činnosti FVE, při které se dají odhalit následující defekty: nezapojené panely, moduly ve zkratu, nevyrábějící stringy, panely zapojené v obrácené polaritě, panely s vysokými přechodovými odpory, panely poškozené přepětím, vadné diody, poškození článku a další. Během této metody na FV článek působí elektromagnetické záření, mimo viditelné spektrum v oblasti infračerveného záření. Díky termokamerám lze určit místa článku s rozdílnými teplotami, které poukazují na některou vadu u součástky. Výhodou této metody je jednoduchost a rychlost. Nevýhodou je, že nepoukazuje na to, v čem spočívá problém a co konkrétně nám způsobuje

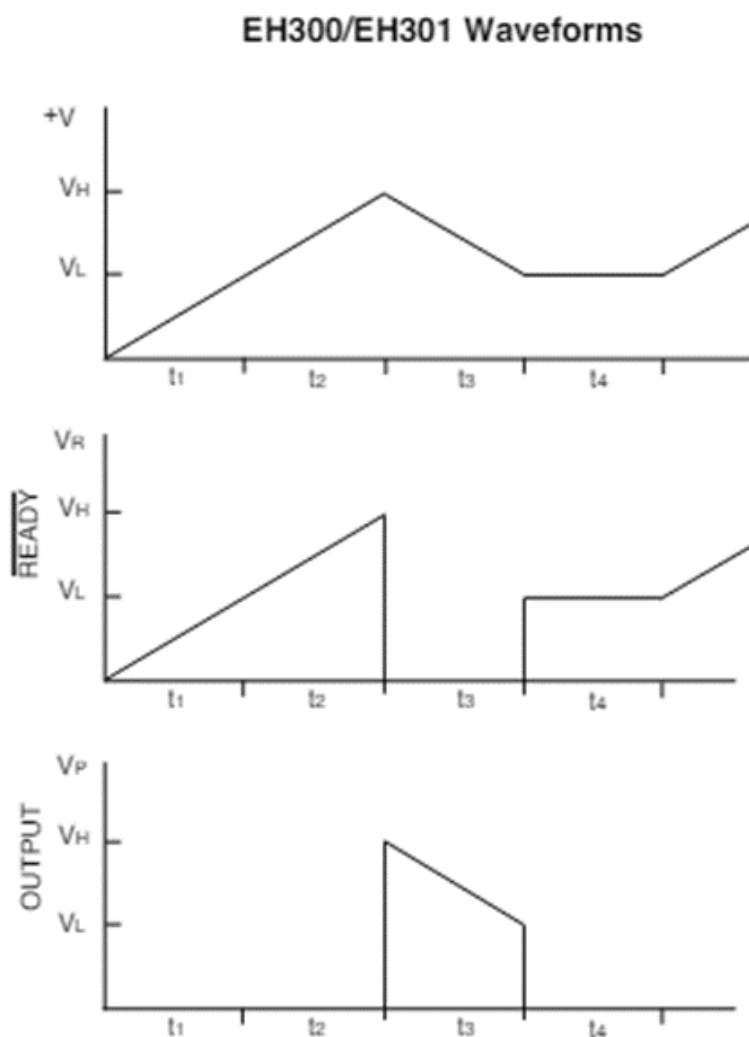
■ Impedanční spektroskopie:

Impedanční spektroskopie je další užitečnou technikou pro diagnostiku fotovoltaických (FV) modulů. Tato technika zkoumá odezvu elektrických systémů na změny v proudu a napětí při aplikaci různých frekvencí signálu. Metoda poskytuje komplexní informace o elektrických vlastnostech FV modulů a může být využita k optimalizaci výrobního procesu, diagnostice defektů a monitorování stavu modulů v průběhu jejich životnosti. Impedanční spektroskopie umožňuje charakterizovat elektrické vlastnosti FV modulů, včetně odporu, kapacity a indukčnosti, při různých frekvencích. Změny v impedančním spektru mohou signalizovat degradaci materiálů, jako je snížená účinnost konverze nebo strukturální poruchy jako jsou trhliny, škrábance nebo chyby vzniklé spojováním článků. Tyto defekty mohou vést k lokálnímu zhoršení výkonu modulu a mohou být identifikovány prostřednictvím charakteristických změn v impedančním spektru.[3]

Fotovoltaické moduly jsou primárně považovány za zařízení generující stejnosměrné napětí a proud. Nicméně, z hlediska jejich konstrukce obsahují parazitní kapacity, které mohou reagovat na střídavé signály, zejména na nízké úrovni střídavého napětí. Pro analýzu střídavých parametrů fotovoltaických systémů se využívají dvě hlavní techniky: frekvenční domény a časové domény. V technice frekvenční domény se kolem pracovního bodu (určeného stejnosměrným napětím) aplikuje malý střídavý signál a měří se ustálené hodnoty střídavých parametrů. Naopak v technice časové domény se mění napětí na fotovoltaickém článku nebo modulu od zkratu k otevřenému obvodu nebo obráceně. Obě tyto techniky mají svá omezení a nevýhody při měření fotovoltaických článků a modulů, a proto je důležité vybrat vhodnou techniku v závislosti na konkrétních parametrech zařízení.[16],

■ Moduly pro sběr energie jako metoda diagnostiky:

Modul EH300 Energy Harvesting Modules 1.8V to 3.6V 4.6mJ 68msec@25mA poskytuje flexibilní a účinný nástroj pro testování amorfních solárních panelů. Moduly EH300 je navrženy k získávání energie z různých zdrojů a jejímu následnému ukládání a použití pro napájení elektronických zařízení. Díky schopnosti přijímat a efektivně ukládat energii z proměnlivých zdrojů jsou ideální pro hodnocení výkonu amorfních panelů v reálných podmínkách. Testování může zahrnovat měření účinnosti, ztrát energie, doby cyklů nabíjení a vybíjení, a analýzu výkonu při různých typech zátěží, což poskytne komplexní přehled o vlastnostech a spolehlivosti amorfních solárních panelů.

**Obrázek 3.4:** [1]

Dá se to otestovat pomocí následujících bodů:

- Připojení panelu na vstupní terminál modulu EH300
- Monitorování vstupních parametru – sledování napětí a proudu generovaného solárním panelem
- Začátek nabíjení – pozorování jak se napětí $+V$ na kondenzátoru začne zvyšovat z 0,0 V
- Dosažení V_H – v momentě kdy $+V$ dosáhne úrovně V_H , výstup VP se přepne o stavu ON a značně dodává energii do zátěže
- Stav ON – měření doby, po kterou modul ve stavu ON dodává energii do připojené zátěže
- Stav OFF – sledování, kdy napětí $+V$ klesne na úroveň V_L a výstup VP se

přípne do stavu OFF

- Účinnost nabíjení a vybíjení – vyhodnocování účinnosti nabíjení a vybíjení modulu na základě doby cyklů ON/OFF a množství energie uložené a dodávané do zátěže
- Ztráty energie – změřit ztráty energie interními obvody modulu a porovnat je s celkovou dodanou energií
- Stabilita a životnost – provádění dlouhodobých testů, tak aby se zajistila stabilita a životnost amorfních panelů při dlouhodobém vystavení různým podmínkám osvětlení a prostředí. [1]

■ Měření statických charakteristik – Volt-Ampérové charakteristiky:

Tato základní diagnostika fotovoltaického modulu umožňuje identifikovat potenciální problémy, které by mohly vést k reklamaci u výrobce modulu. Měření VA charakteristiky poskytuje informace o zkratovém proudu, napětí naprázdno a dalších důležitých parametrech. I když měření lze provést přímo na venkovní instalaci, nejčastěji se provádí v laboratoři, kde je možné simulovat standardní testovací podmínky (STC) a zajistit konzistentní výsledky. Je to sluneční simulátor, lépe řečeno světelný simulátor se světlem o spektru blízkému slunečnímu záření s testerem. Takové simulátory lze rozdělit do tří hlavních skupin: kontinuální, zábleskové a impulsní.

Kontinuální solární simulátory jsou zařízení, která poskytují trvalé a stabilní osvětlení podobné slunečnímu záření bez výrazných fluktuací v intenzitě světla nebo spektrálním rozložení. Tyto simulátory jsou schopny produkovat konstantní světlo po delší dobu, což umožňuje opakované a přesné měření vlastností solárních zařízení, jako jsou fotovoltaické články nebo moduly. Kontinuální simulátory jsou často používány pro testování výkonu, účinnosti a spolehlivosti solárních technologií v laboratorních podmínkách. Jsou navrženy tak, aby poskytovaly stabilní a reprodukovatelné podmínky pro testování a výzkum solárních zařízení.

Zábleskové solární simulátory jsou zařízení, která generují intenzivní světelné pulsy, simulující krátkodobé expozice intenzivního slunečního záření. Tyto simulátory jsou schopny generovat velmi vysoké intenzity světla během krátkého časového intervalu, čímž simulují podmínky jako jsou sluneční záblesky nebo změny intenzity světla během dne. Zábleskové simulátory se často používají pro testování výkonu solárních zařízení při extrémních podmínkách, jako jsou rychlé změny intenzity světla nebo při simulaci slunečních záblesků, které mohou mít vliv na chování fotovoltaických systémů. Tyto simulátory umožňují testování reakce solárních zařízení na náhlé změny světelných podmínek a mohou být důležité pro zajištění bezpečnosti a spolehlivosti fotovoltaických systémů.

Impulsní solární simulátory jsou zařízení, která generují krátkodobé, silné světelné pulsy, aby simulovaly podmínky jako jsou sluneční záblesky či jiné přechodné jevy. Tato zařízení jsou schopna vytvářet velmi krátké, avšak velmi intenzivní světelné pulsy, které jsou charakteristické pro sluneční záření v

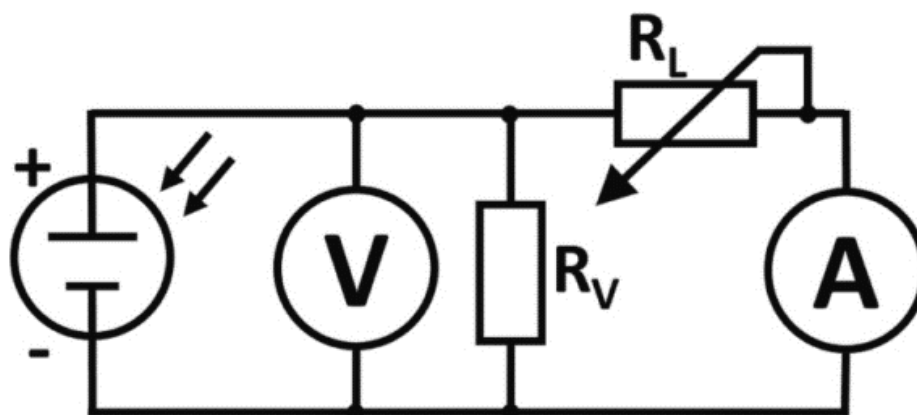
určitých situacích, například při průchodu mrakem nebo při průchodu stínem přes fotovoltaický panel. Jsou užitečné pro testování odezvy solárních zařízení na rychlé změny světelných podmínek a pro hodnocení jejich spolehlivosti v různých provozních scénářích. Tato zařízení umožňují simulovat podmínky, které by mohly mít vliv na výkon a chování fotovoltaických systémů v reálném provozu. Impulsní simulátory se také používají pro testování odolnosti solárních zařízení vůči přechodným jevům, jako jsou sluneční záblesky či změny intenzity světla v důsledku pohybu oblačnosti. [16],[19]

Kapitola 4

Návrh a realizace vlastního řešení

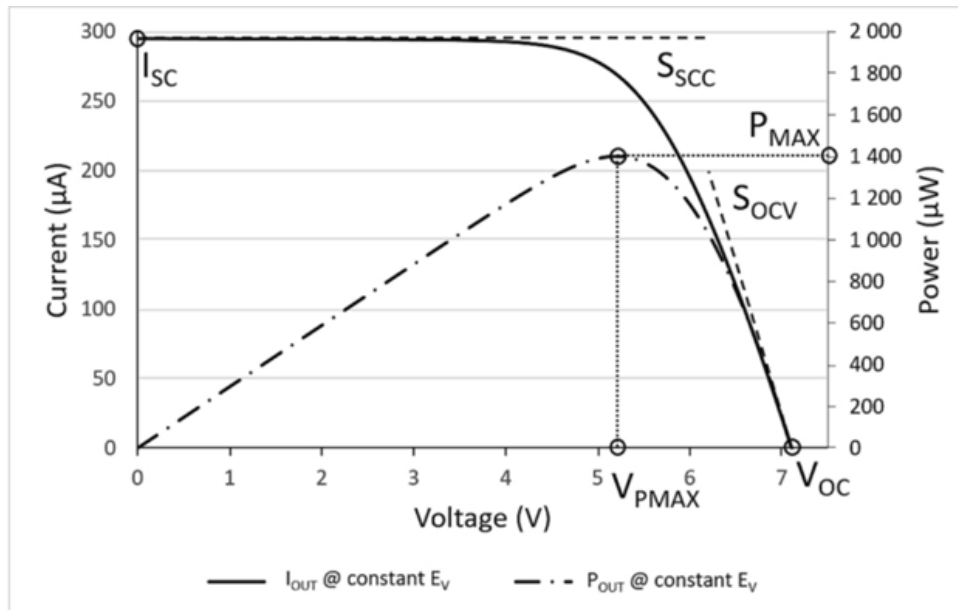
Simulace, modelování a zkoumání charakteristik obvodu se sériovou a paralelní kombinací PN přechodu, je jednou z nejdůležitějších součástí při návrhu fotovoltaického systému. Pomocí správně zvoleného postupu lze simulovat jednotlivý model nebo dokonce i chování velkých fotovoltaických polí. Jako metodu jsem zvolil měření charakteristik FV článku, měření V-A charakteristiky a následně analýzu solárního článku pomocí modelování obvodu v dostupném softwaru LTspice (Linear Technology Corp). To se dá dělat pomocí různých metod, jak bylo uvedeno výše. Tyto metody mohou mít složitý matematický aparát. Mnou zvolená metoda měření charakteristik amorfních článků ukazuje, jak z naměřených dat lze spočítat parametry diody pouze pomocí standardních matematických rovnic. Panel neboli článek je uvažován jako jeden celek bez ohledu na počet PN přechodů. Tato metoda je efektivní pro prognózu celkového výkonu solárního panelu, avšak není adekvátní pro posouzení technologie výroby panelu.

4.1 Princip charakterizace fotovoltaických článků.



Obrázek 4.1: Vnitřní zapojení FV článku.[25]

Fotovoltaický panel byl vystaven konstantnímu osvětlení v úrovních 10, 100 a 1000 lx a zatížen proměnným odporem R_L . Poté byla měřena napětí a proud pro různé hodnoty zátěže R_L a tato data byly graficky zobrazeny ve formě Voltampérové charakteristiky. Rezistor R_V představuje vstupní odpor voltmetru a jeho hodnota je obvykle $10\text{M}\Omega$. Tak velká hodnota u malých amorfních článků je nezanedbatelná, protože je skoro ekvivalentní bočnímu odporu panelu, ovlivňuje měření napětí naprázdno a proudu nakrátko.



Obrázek 4.2: V-A charakteristika a výkon.[25]

Na obrázku 4.2 je ukázaná typická V-A charakteristika fotovoltaického panelu a jsou uvedeny i hlavní parametry. Pomocí těchto několika parametrů bylo možné spočítat všechny potřebné parametry pro náhradní obvod. I_{SC} neboli proud nakrátko je určen podle efektivity přeměny panelu při použití konkrétního osvětlení s ohledem na spektrální složení světla. U amorfních článků pozorujeme nelineární závislost charakteristiky způsobenou rekombinací v oblasti s nízkou hustotou nosičů náboje. Napětí naprázdno V_{OC} je ovlivněno technologickými parametry PN přechodu, jako je saturační proud a faktor ideality, stejně jako bočníkovým proudem. Čárkovaná křivka na obrázku představuje výkon dodávaný panelem do zátěže. Jedná se o součin výstupního napětí a výstupního proudu. Pro každý typ a úroveň osvětlení existují parametry P_{MAX} a V_{MAX} , které výrobce udává jako klíčové charakteristiky panelu. Pro výpočet charakteristik fotovoltaických amorfních článků pomocí zvolené metody by stačilo mít k dispozici hodnoty osvětlení E_V , zkratového proudu (I_{SC}), napětí při osvětleném obvodu v_{OC} , maximálního výkonu P_{MAX} a napětí při maximálním výkonu. Tyto hodnoty umožňují odhadnout klíčové parametry modelu jedné diody, jako je I_{INLX} , r_P , R_S , n , I_S . Pro zjednodušení výpočtu byli parametry P_{MAX} a V_{MAX} nahrazeny sklonem Volt-ampérové křivky poblíž zkratového proudu S_{SCC} a poblíž na-

pětí naprázdno S_{OCV} . [28][25] Tento přístup umožňuje vyhnout se složitým numerickým metodám nebo Lambertově funkci W . [4]

Sklony jsou definovaný rovnicemi [25]:

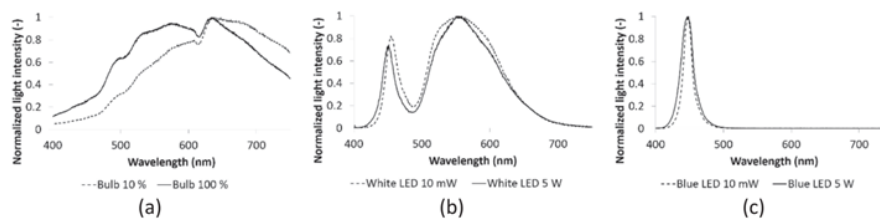
$$S_{OCV} = \frac{dI_{OUT}}{dV_{OUT}} \approx \frac{\Delta I_{OUT}}{\Delta V_{OUT}} \Big|_{@V_{OUT} \rightarrow V_{OC}} \quad (4.1)$$

$$S_{SCC} = \frac{dI_{OUT}}{dV_{OUT}} \approx \frac{\Delta I_{OUT}}{\Delta V_{OUT}} \Big|_{@I_{OUT} \rightarrow I_{SC}} \quad (4.2)$$

Pro zajištění spolehlivosti a správného návržení modelu je nezbytné provést měření Volt-ampérových charakteristik pro různé druhy osvětlení, obvykle v rozmezí od 10 lx do 1000 lx. Naměřené parametry několika křivek se poté kombinují, aby se získaly optimální parametry modelu v programu LTspice. Tento proces umožňuje vytvořit model, který lépe odpovídá reálnému chování fotovoltaických amorfních článků při různých úrovních osvětlení.

4.2 Zdroj světla pro testování.

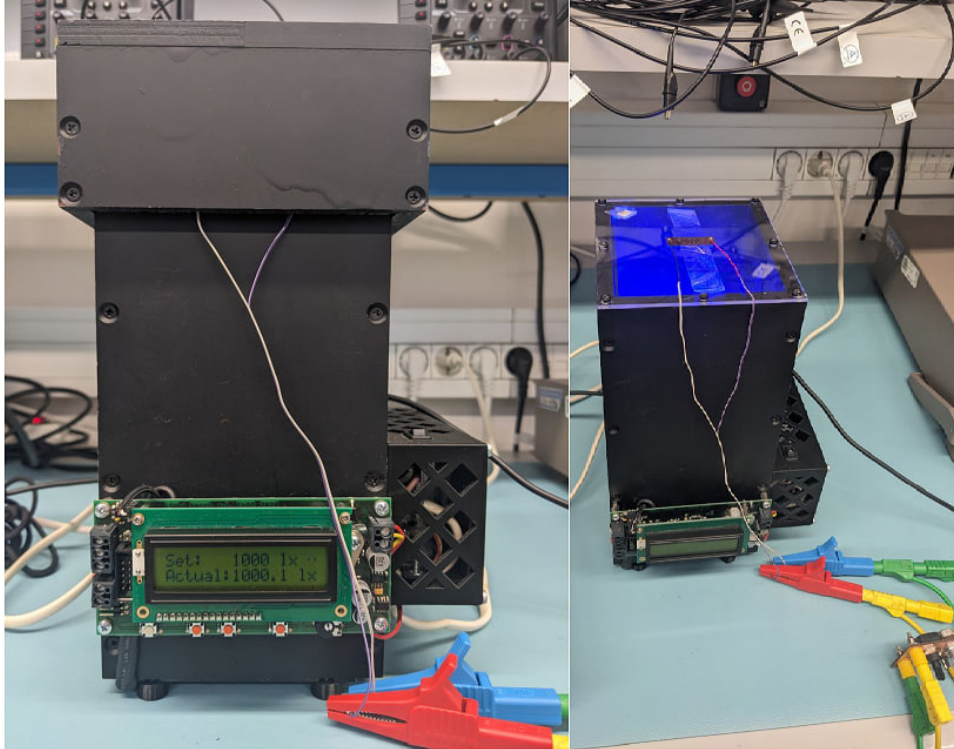
Pro charakterizaci fotovoltaických panelů je důležité zohlednit jak intenzitu osvětlení, tak i spektrální charakter světla. Intenzita osvětlení určuje množství energie, které dopadá na solární panel a ovlivňuje výkon panelu. Různé zdroje světla mají různá spektra a panely mohou být citlivější na určité vlnové délky. V případě mnou použité metody bylo nezbytné použít osvětlení s širokým rozsahem intenzity, což může být problém například s bílým světlem, které má měnící se spektrum při ztlumení. Kromě toho mohou být výsledky ovlivněny spektrálními chybami při měření osvětlení. Pro měření těchto spekter byl využit spektrometr Ocean Optics USB2000+ s 2048prvkovým lineárním CCD senzorem ILX511.



Obrázek 4.3: Spektrální charakteristika světelných zdrojů, žárovka 60 W (a), LED 10 W WHITE 800LM/120 OVAL GT-P10WW539910900(b), LED BLUE 6 čipů, V_F 14-18 V, 550 mA (c). Měřeno pomocí Ocean Optics USB2000+ spektrometr (USB2 + HO1550) a vlákno P600-1-SR. [25]

Z výsledků patrně vyplývá, že modrá LED má nejmenší spektrální závislost na celkové intenzitě světla. Proto jsem pro charakterizaci fotovoltaických článků použil fotodetektor s vlnovou délkou kolem 450 nm, který má spektrum světla v rozmezí od 1 lx do 3000 lx. Tato volba byla optimalizována pro

charakterizací amorfních článků, což umožnilo dosažení přesnějších výsledků v této práci.[25][35]

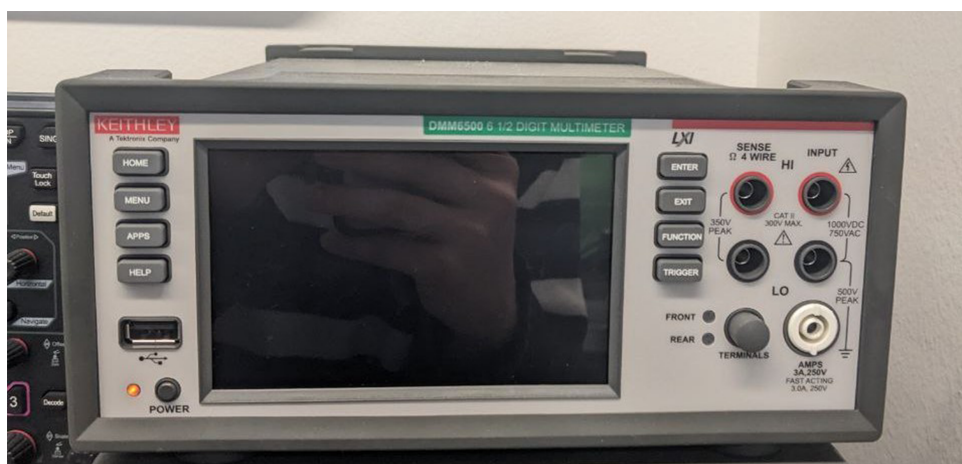


Obrázek 4.4: fotodetektor s vlnovou délkou kolem 450 nm

Obrázek 4.4 zobrazuje světelný testovací panel s modrou LED diodou umístěnou v dolní části a testovaný fotovoltaický panel v horní části, obrácený směrem k LED diodě a zakrytý krytem pro eliminaci odrazů okolního osvětlení. Prostřednictvím ovládacího panelu lze ručně nastavit program světelného testu pomocí tlačítek nebo přes rozhraní UART. Elektronika měří skutečnou intenzitu světla pomocí fotodetektoru umístěného v rohu světelného okna, který pravidelně porovnává s nastavenou hodnotou. LED dioda s výkonem 10 W je nastavena tak, aby udržovala konstantní intenzitu osvětlení s přesností minimálně 1 lx, řízená lineárním regulátorem. Rovnoměrnost světla v rámci osvětlovacího okna je vyšší než 1 %. Testovací stolice umožňuje charakterizaci fotovoltaických panelů o rozměrech až 10 x 10 cm a v rozsahu intenzity světla od 1 luxu do 3 000 luxů. Zkušební panel byl kalibrován pomocí luxmetru TESTO 545, který má senzor založený na spektrální citlivosti lidského oka. Korekce měření je potřebná, protože panel má odlišnou spektrální citlivost než lidské oko. Proto jsou naměřené charakteristiky prezentovány pro různé úrovně intenzity světla a korigovány pro citlivost panelu na modré světlo.[25]

4.3 Testovací pracoviště.

Měření bylo provedeno pomocí Voltmetru, Ampérmetru 4.5, dekadového odporového zatížení 4.6 a světelné stolice s víčkem 4.4(vlevo). Na světelnou stolicu byl umístěn zkoumaný vzorek, který byl propojený s dekadovým odporovým zatížením R_L . Panel byl též připojen k ampérmetru a voltmetru. Zátěžové charakteristiky byly měřeny pro různé intenzity osvětlení, konkrétně pro 10 lx, 100 lx a 1000 lx. Postupným zvětšováním odporu R_L se měnily hodnoty napětí a proudu na FV článku a tyto hodnoty poté byly zaneseny do grafu. Naměřená data byla analyzována a byly určeny klíčové parametry, které následně byly použity k odvození parametru ekvivalentního náhradního modelu.

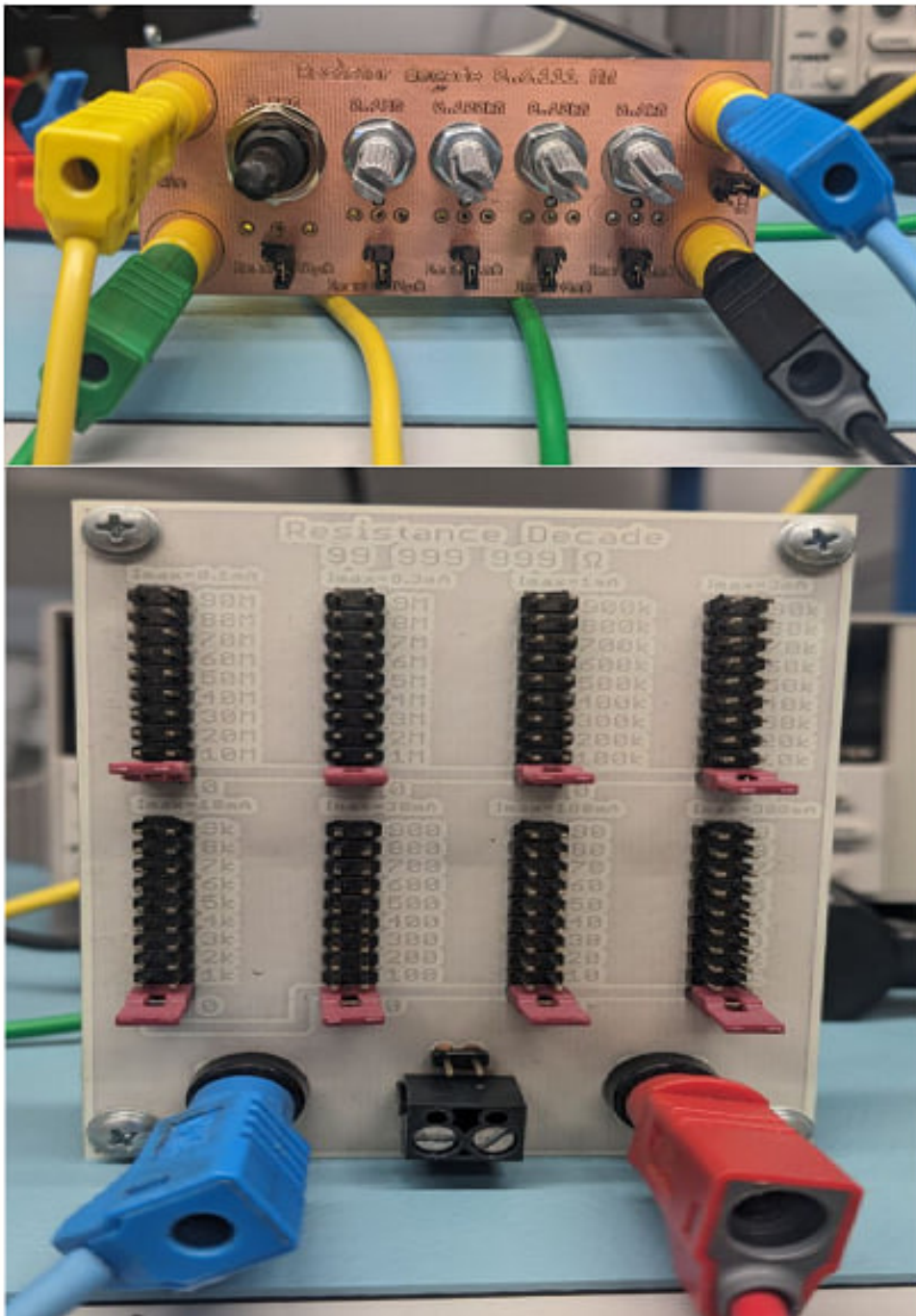


Voltmeter



Ampérmetr

Obrázek 4.5: Voltmetr, Ampérmetr

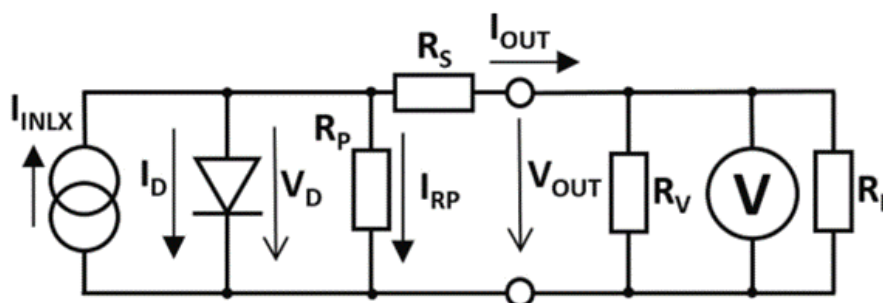


Obrázek 4.6: dekadové odporové zatížení

4.4 Ekvivalentní elektrický model.

Náhradní elektrický model s jednou diodou poskytuje popis chování fotovoltaických panelů. Skládá se ze základních parametrů: I_{INLX} , R_P , R_S , n , I_S . Kombinace těchto prvků umožňuje simulovat výstupní charakteristiky

panelu v závislosti na různých faktorech, jako je intenzita osvětlení, teplota a zatížení.



Obrázek 4.7: elektrický model FV panelu [25]

Zdroj proudu I_{INLX} představuje elektrickou energii, která je generována ze světelné energie. Hodnota tohoto proudu je ovlivněna typem a intenzitou osvětlení, jakožto i spektrální charakteristikou světla. Sériový odpor R_S představuje ztráty způsobené odporovými kontakty a vedením. Jedná se o stabilní parametr, který má významný dopad na maximální výkon amorfních fotovoltaických panelů při silném osvětlení. Bočníkový odpor R_p je mnohem větší než R_S , představuje svodové proudy a rekombinační jevy v polovodičovém materiálu. [40] představuje jednotlivý PN přechod nebo modeluje exponenciální chování celého FV modulu. Je popsána Shockleyho rovnicí.

$$I_D = I_S \cdot (e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1); V_T = \frac{k \cdot T}{q_e} \quad (4.3)$$

kde I_D je proud procházející diodou, I_S je saturační proud, V_D je napětí na diodě, V_T je tepelné napětí 25,9 mV při 25°C, k je Boltzmannova konstanta, q_e je elementární náboj, T je teplota v Kelvinech a n je faktor ideality PN přechodu. Faktor ideality je obvykle 1,6 pro jednoduchý křemíkový přechod PN. Pokud je více PN přechodů je činitel odpovídajícím způsobem vyšší. Odpor R_L spotřebovává energii z panelu a odpor R_V představuje vstupní odpor voltmetru. Hodnota odporu voltmetru je srovnatelná s hodnotou bočníkového odporu a ovlivňuje měření napětí naprázdno.[25]

■ Parametr I_{INLX}

je vstupním proudem, lze určit měřením zkratového proudu. Dioda se považuje za uzavřenou, jelikož je skoro nulový úbytek napětí na odporu R_S , $I_{OUT} = I_{SC}, V_{OUT} = 0$. Za těchto podmínek vstupní proud I_{INLX} můžeme vypočítat jako

$$I_{INLX} \approx I_{SC} \cdot \frac{R_{PV} + R_S}{R_{PV}} \approx I_{SC} \quad (4.4)$$

[25]

Kde R_{PV} je paralelní kombinace rezistoru R_P a R_V . Odpor R_S je nejčastěji mnohem menší než paralelní kombinace rezistorů. Právě proto je vstupní

proud přibližně roven zkratovému proudu I_{SC} . Rekombinační efekt má za následek, že vstupní proud I_{INLX} není lineárně závislý na intenzitě osvětlení. Při vysokých úrovních osvětlení je rekombinace významná, což vyžaduje modelování proudu pomocí empirické rovnice, aby bylo dosaženo přesnějších výsledků. [25]

$$I_{INLX} = K_{LI} \cdot E + q_{LI} \quad (4.5)$$

Parametry K_{LI} a q_{LI} se spočítají z naměřených hodnot I_{SC1} , I_{SC2} pro vysoké (E_1) a nízké (E_2) osvětlení. Podle rovnic [25]

$$K_{LI} = \frac{I_{SC1} - I_{SC2}}{E_1 - E_2}; q_{LI} = I_{SC2} - K_{LI} \cdot E_2 \quad (4.6)$$

V rovnici (4.6) $E_1 = 1000$ lx a $E_2 = 10$ lx.

■ Bočníkový odpor R_P

Pokud je zkratován výstup ($R_L \rightarrow 0$), větší část proudu I_{INLX} prochází rezistorem R_S do zátěže. V tomto případě se dioda považuje za uzavřenou, protože úbytek napětí na odporech je velice malý ($I_D \rightarrow 0$). Jakmile vstupní hodnota napětí začne stoupat, začne se projevovat vliv bočníkového odporu R_P . Což umožňuje použít sklon křivky V-A charakteristiky S_{SCC} k výpočtu výstupního napětí. Pro výpočet tohoto parametru je zapotřebí zahrnout i vstupní odpor voltmetru, protože jeho typická hodnota 10 M Ω je srovnatelná s odporem R_P . Odpor R_{PV} je kombinací paralelního spojení bočníkového odporu R_P a odporů $R_S + R_V$. Typická hodnota odporu R_S je 200 Ω , hodnota R_{PV} je větší než 400 k Ω a R_V je 10 M Ω . Rezistor R_S tak může být zanedbán v rovnici (4.7). Toto zjednodušení způsobuje chybu menší než 0,01 % při výpočtu odporu R_P . [25]

$$R_{PV} = \frac{R_P \cdot (R_S + R_V)}{R_P + R_S + R_V} \Rightarrow R_P = \frac{R_{PV} \cdot (R_S + R_V)}{R_S + R_V - R_{PV}} \approx \frac{R_{PV} \cdot R_V}{R_V - R_{PV}} \quad (4.7)$$

Tato rovnice nevypadá složitě, ale dalo by se ji upravit do ještě lepšího tvaru. použitím této rovnici [25]

$$I_{OUT} \approx \frac{I_{INLX} \cdot R_{PV} - V_{OUT}}{R_S + R_{PV}} \quad (4.8)$$

Tato rovnice platí pouze v blízkosti zkratového proudu. Odvozením této rovnice vzhledem k V_{OUT} a kombinací s rovnicí

$$S_{SCC} = \frac{dI_{OUT}}{dV_{OUT}} \approx \frac{\Delta I_{OUT}}{\Delta V_{OUT}} |_{@I_{OUT} \rightarrow I_{SC}} \quad (4.9)$$

lze odpor R_{PV} vyjádřit pomocí následujícího vzorce

$$R_{PV} \approx \frac{-1}{S_{SCC}} - R_S \approx \frac{-1}{S_{SCC}} \quad (4.10)$$

R_P je závislé na osvětlení E a není konstantní. Tuto závislost lze popsat empirickou rovnicí [25]

$$R_P = K_{RP} - E^q \quad (4.11)$$

Parametry K_{RP} a q se dají vypočítat ze dvou hodnot R_{P1} při osvětlení E_1 (10 lx) a R_{P2} při osvětlení E_2 (1000 lx)

$$q = \frac{\ln R_{P1} - \ln R_{P2}}{\ln E_1 - \ln E_2}; K_{RP} = \frac{R_{P2}}{E_2^q} \quad (4.12)$$

■ Saturační proud I_S

V Shockleyho rovnici proud I_S představuje proud, který se objevuje v důsledku průchodu PN přechodem. V běžné analýze elektronických obvodů se tento proud považuje za konstantní a pouze závisí na teplotě. Při vysokých zpětných napětích na diodě můžeme exponenciální funkci v rovnici zanedbat, a zpětný proud se pak považuje za konstantní $-I_S$, až do momentu, kdy dojde k průrazu Zenerovy diody. Nicméně, při použití přesnějšího modelu, zpětný proud není konstantní, ale závisí na zpětném napětí. Tato závislost může být popsána vztahem $V_R^{1/m}$, kde V_R je závěrné napětí na diodě a m je exponent, obvykle větší než 2. [27],[42],[43] To znamená, že parametr I_S nelze přímo měřit jako závěrný proud fotovoltaického panelu, ale musí být vypočítán z jeho zátěžové charakteristiky při otevřené diodě. Pro výpočet parametru I_S jsou potřebné hodnoty zátěžových charakteristik při dvou různých úrovních osvětlení, například minimální a maximální očekávané osvětlení (např. 10 lx a 1000 lx). Když není fotovoltaický panel zatížen, rezistor R_S nemá vliv a může být z rovnice vynechán. Napětí naprázdno (V_{OC}) je pak ovlivněno diodou a rezistorem RPV. Různá napětí V_{OC1} a V_{OC2} , odpovídající vstupním proudům I_{INLX1} a I_{INLX2} a bočnickovým rezistorům R_{PV1} a R_{PV2} , lze dosadit do rovnice, přičemž se uvažuje výstupní proud I_0 . [25]

$$0 = I_{INLX1} + I_S - \frac{V_{OC1}}{R_{PV1}} - I_S \cdot e^{\frac{V_{OC1}}{n \cdot V_T}} \approx I_{INLX1} - I_S \cdot e^{\frac{V_{OC1}}{n \cdot V_T}} \quad (4.13)$$

$$0 = I_{INLX2} + I_S - \frac{V_{OC2}}{R_{PV2}} - I_S \cdot e^{\frac{V_{OC2}}{n \cdot V_T}} \approx I_{INLX2} - I_S \cdot e^{\frac{V_{OC2}}{n \cdot V_T}} \quad (4.14)$$

I_S lze zanedbat, protože proud I_{INLX} jsou mnohem větší. Tedy úpravou rovnic dostaneme[25]:

$$I_S = \frac{\left(I_{INLX1} - \frac{V_{OC1}}{R_{PV1}}\right)^{\frac{V_{OC2}}{V_{OC2}-V_{OC1}}}}{\left(I_{INLX2} - \frac{V_{OC2}}{R_{PV2}}\right)^{\frac{V_{OC1}}{V_{OC2}-V_{OC1}}}} \quad (4.15)$$

■ Parametr n

Jak již bylo uvedeno, n je faktor ideality. A dá se snadno dopočítat dosazením rovnice (4.15) do (4.13) nebo do (4.14). Je lepší dosazovat do rovnice, kde I_{INLX} má větší hodnotu, jelikož výpočet je velmi citlivý na přesnost měřených napětí a proudu. V tomto případě byla dosazena rovnice (4.15) do rovnice (4.13), tak aby se dodržela idealita.[25] Dostaneme:

$$n = \frac{V_{OC1}}{V_T \cdot \ln\left(\frac{I_{INLX1}}{I_S} - \frac{V_{OC1}}{I_S \cdot R_{PV1}}\right)} \quad (4.16)$$

■ Parametr R_S

Rezistor R_S , jak bylo zmíněno výše nemá skoro žádný vliv na napětí V_{OC} , jelikož výstupní proud je nulový. K výpočtu tohoto odporu se používá sklon zatěžovací charakteristiky v blízkosti pracovního bodu napětí naprázdno, protože R_S začíná mít vliv s rostoucím zatěžovacím proudem. Výstupní proud můžeme vyjádřit pomocí této rovnice: [25]

$$V_D = V_{OUT} + I_{OUT} \cdot R_S \quad (4.17)$$

odvozením vzhledem k V_{OUT} pro R_S získáme

$$R_S = \frac{dV_D}{dI_{OUT}} = \frac{dV_{OUT}}{dI_{OUT}} \quad (4.18)$$

Napětí V_D lze vyjádřit pomocí Shockleyho rovnice

$$I_D = I_S \cdot e^{\frac{V_D}{n \cdot V_T}}; V_T = \frac{k \cdot T}{q_e} \quad (4.19)$$

a proud I_D v dané rovnici se dá vyjádřit pomocí rovnice [25]

$$I_{OUT} = I_{INLX} - I_{RP} - I_D = I_{INLX} - \frac{V_D}{R_P} - I_S \cdot \left(e^{\frac{V_{OC1}}{n \cdot V_T}} - 1\right) \quad (4.20)$$

Pokud jí odvodíme vzhledem k V_{OUT} , získáme rovnici

$$\frac{dV_D}{dV_{OUT}} = \frac{-n \cdot V_T}{I_{INLX} - I_{OUT} - I_{RP} + I_S} \approx \frac{-n \cdot V_T}{I_{INLX}} \quad (4.21)$$

Saturační proud se dá zanedbat, protože je minimálně 1000 krát menší než proud I_{INLX} . Proud I_{RP} můžeme odhadnout pomocí napětí naprázdno jako

$$I_{RP} = \frac{V}{R_{OCP}} \quad (4.22)$$

tento parametr dosahuje obvykle jen pár procent hodnoty proudu I_{INLX} , a proto tuto hodnotu můžeme též zanedbat. Výstupní proud I_{OUT} závisí na způsobu výpočtu sklonu S_{OCV} , který se spočítá z napětí naprázdno V_{OCV} ($I_{OUT} = 0$ A) a výstupního napětí při výstupním proudu rovném 5% proudu

nakrátko. Tím zaručíme, že výstupní proud má malý vliv a rovnici (4.21) zjednodušíme tak, že závisí pouze na parametru I_{INLX} . Kombinací (4.21) a (4.18) získáme rovnici pro výpočet R_S . [25]

$$R_S = \frac{dV_{OUT}}{dI_{OUT}} - \frac{n \cdot V_T}{I_{INLX}} = \frac{-1}{S_{OCV}} - \frac{n \cdot V_T}{I_{INLX}} \quad (4.23)$$

,kde S_{OCV} je sklon zátěžové charakteristiky v pracovním bodě naprázdno. [25]

Kapitola 5

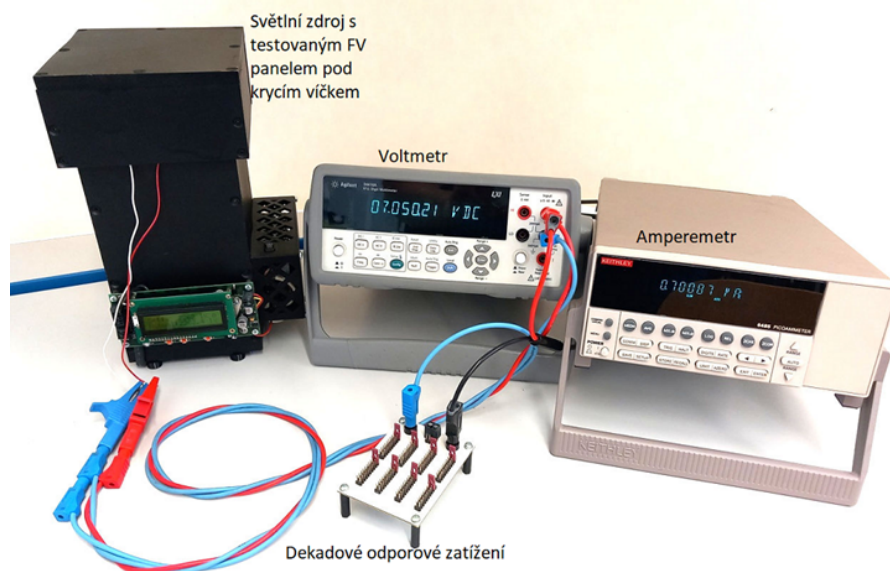
Charakterizace vybraných článků.

Mé vlastní měření probíhalo pro různé druhy amorfních fotovoltaických panelů. Byly použité panely: AM-5907CAR-AS, AT-7802A-AS, AM-5706CAR-AS a AM-5815CAR-AS. Od každého modelu bylo použito více vzorků, pro přesnější porovnání mezi ostatními a pro vzájemné srovnání. Jako příklad je použit model AM-5706CAR-AS.

Tabulka 5.1: Hodnoty hlavních parametrů podle Datasheetu výrobce [9][10][11][13]

PANASONIC	Vnější rozměry	Maximální výkon	Proud při max. výkonu	Jmenovité napětí
AM-5815CAR -AS	31,2x10,8x1,1mm	11,25mW	2,5mA	5,2V
AM-5907CAR -AS	75x55x1,8mm	228,5mW	45,7mA	5,9V
AT-7802A -AS	73x42x0,3mm	118,8mW	29,7uA	4,8V
AM-5706CAR -AS	70x50x1,8mm	179mW	45,9mA	4,6V

Fotovoltaický panel AM-5706CAR-AS:



Obrázek 5.2: Zapojení měřicích přístrojů

U toho modelu byly změřeny dva vzorky modrým světlem při různých intenzitách osvětlení. Po naměření zkratového proudu a napětí naprázdno, byl postupně zvětšován dekádový odpor tak, aby se napětí pohybovalo o $\pm 5\%$. Tím bylo dosaženo přesnějších V-A charakteristik součástky hlavně v oblastech maximálního výkonu. Následně z naměřených hodnot byly odvozeny parametry pro náhradní model. Jak bylo řečeno v předchozí kapitole, pro zjednodušení výpočtu a pro vyhnutí se numerickým metodám, nebo Lambertově funkci W , byli spočítány parametry S_{SCC} a S_{OCV} .

S_{SCC} je sklon, který pro každé osvětlení byl vypočítán zvlášť podle rovnice (4.1). Byl použit proud nakrátko ($V_{out} = 0$) a proud pro výstupní napětí rovné 5% napětí naprázdno. Tato hodnota byla využita pro výpočet paralelního odporu R_{PV} pomocí rovnice (4.10). Byl předpoklad, že vnitřní odpor voltmetru je $10\text{M}\Omega$. Následně hodnota R_{PV} byla korigována pomocí bočního odporu R_P z rovnice (4.7). Po všech přepočtech jsou hodnoty R_{PV} a R_P uvedeny v následující tabulce:

Tabulka 5.2: Tabulka hodnot R_{pv} a R_s pro panel AM-5706CAR-AS.

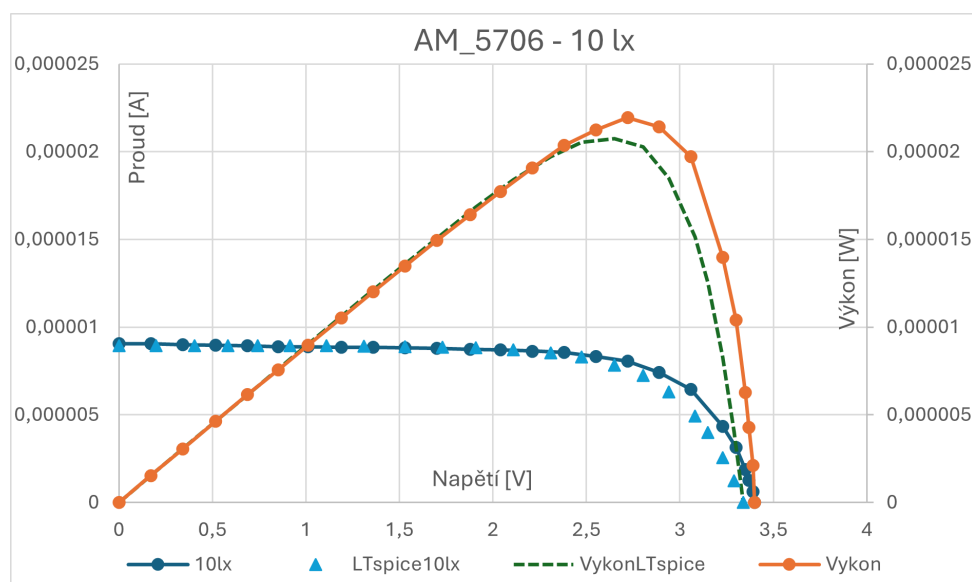
Osvětlení (lx)	R_{pv} (M Ω)	R_p (M Ω)
10	6,07	15,45
100	0,84	0,92
1000	0,075	0,075

tyto hodnoty byly následně použity pro výpočet parametru K_{LI} a q

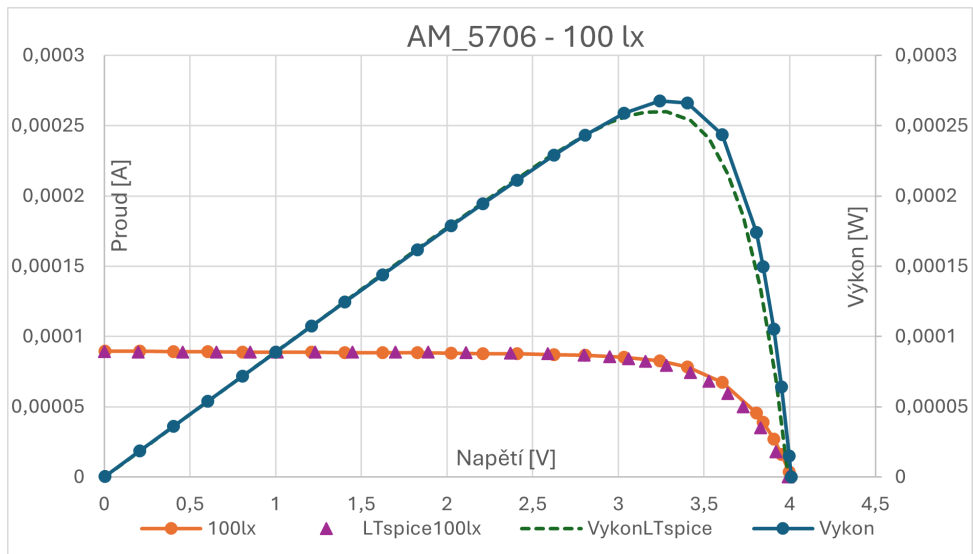
Parametr S_{OCV} neboli sklon byl spočítán pomocí rovnice (4.2) z napětí naprázdno ($I_{OUT} = 0$) a napětí při výstupním proudu rovném 5% zkratového proudu. Tato hodnota byla použita pro výpočet sériového odporu R_S s

AS, který je zatížen rezistorem R_V a zdrojem napětí V_{load} , kde V_{load} slouží pouze k zajištění zatěžovacích charakteristik, jelikož stejnosměrná analýza to vyžaduje. Nastavením napětí na výstupu, se určí proud, který prochází tímto zdrojem. Náhradní model LTSpice má parametry, které jsou odlišné pro každý FV panel. Parametr E je volitelný parametr, který uživatel může zvolit podle toho jaké osvětlení potřebuje pro vlastní účely studia FV součástek. Použité osvětlení od 10 lx do 1000 lx bylo použité pro snadnější porovnání s reálným měřením. Dále je zdroj proudu, který transformuje přiváděné osvětlení na elektrickou energii a dodává ji do obvodu. Spočítá se pomocí K_{LI} , q a osvětlení pomocí rovnice (4.5). Exponenciální chování modelu je zajištěno pomocí diody. Bočníkový odpor R_P se spočítá také pomocí K_{RP} a q pomocí rovnice (4.11) sériový odpor R_S je určen pomocí R_{SPV} .

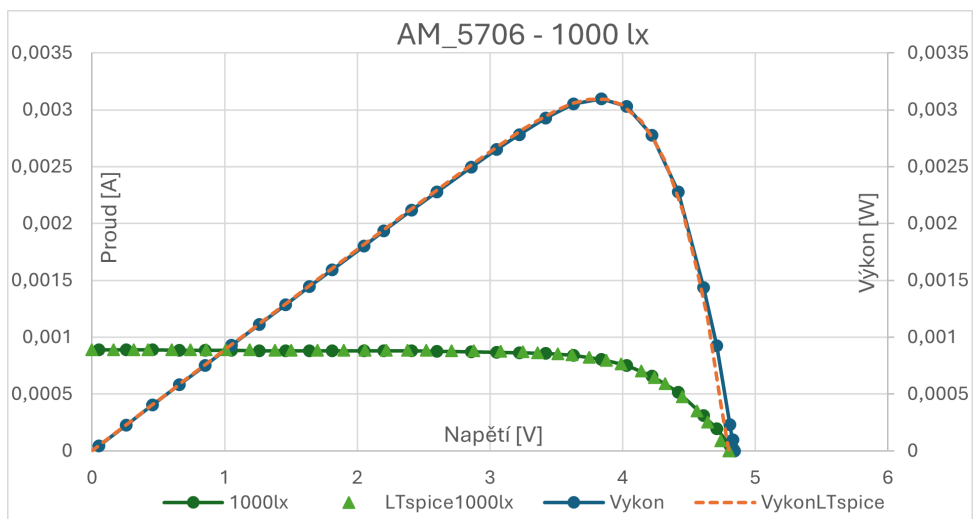
V rámci simulace byly zkoumány tři různé úrovně osvětlení, které byly porovnány s naměřenými výsledky. Na obrázcích je názorně ukázána naměřená data a výsledky simulace vynesené do grafu. Pro ověření správnosti zvolení náhradního modelu, jsou v tabulce vynesené 3 parametry, kde se porovnávají data. Konkrétně to jsou parametry V_{OC} – napětí naprázdno, I_{SC} – proud nakrátko a P_{max} – maximální výkon.



Obrázek 5.4: Panel AM-5706CAR-AS naměřené hodnoty a hodnoty náhradního modelu pro 10 lx



Obrázek 5.5: Panel AM-5706CAR-AS naměřené hodnoty a hodnoty náhradního modelu pro 100 lx



Obrázek 5.6: Panel AM-5706CAR-AS naměřené hodnoty a hodnoty náhradního modelu pro 1000 lx

Tabulka 5.5: Porovnání naměřených a simulovaných hodnot pro 10 lx panel AM-5706CAR-AS

10 lx	Naměřené	Simulace	Chyba v %
Voc [V]	3,4	3,34	1,76
Isc [A]	$9,06 \times 10^{-6}$	$8,95 \times 10^{-6}$	1,23
Pmax [W]	$2,17 \times 10^{-5}$	$2,09 \times 10^{-5}$	3,83

Tabulka 5.6: Porovnání naměřených a simulovaných hodnot pro 100 lx panel AM-5706CAR-AS

100 lx	Naměřené	Simulace	Chyba v %
Voc [V]	4,01	3,990	0,500
Isc [A]	$8,95 \times 10^{-5}$	$8,905 \times 10^{-5}$	0,505
Pmax [W]	$2,67 \times 10^{-4}$	$2,631 \times 10^{-4}$	1,520

Tabulka 5.7: Porovnání naměřených a simulovaných hodnot pro 1000 lx panel AM-5706CAR-AS

1000 lx	Naměřené	Simulace	Chyba v %
Voc [V]	4,84	4,82	0,41
Isc [A]	$8,9 \times 10^{-4}$	$8,9 \times 10^{-4}$	0
Pmax [W]	$3,09 \times 10^{-3}$	$3,09 \times 10^{-3}$	0

V průběhu provedených měření lze pozorovat zajímavý jev: téměř dokonalou shodu mezi naměřenými hodnotami proudu na krátko a napětí naprázdno. Tento jev naznačuje, že zkoumaná fotovoltaická součástka vykazuje velmi dobrou lineární závislost mezi proudem a napětím v oblasti provozu na krátko a naprázdno.

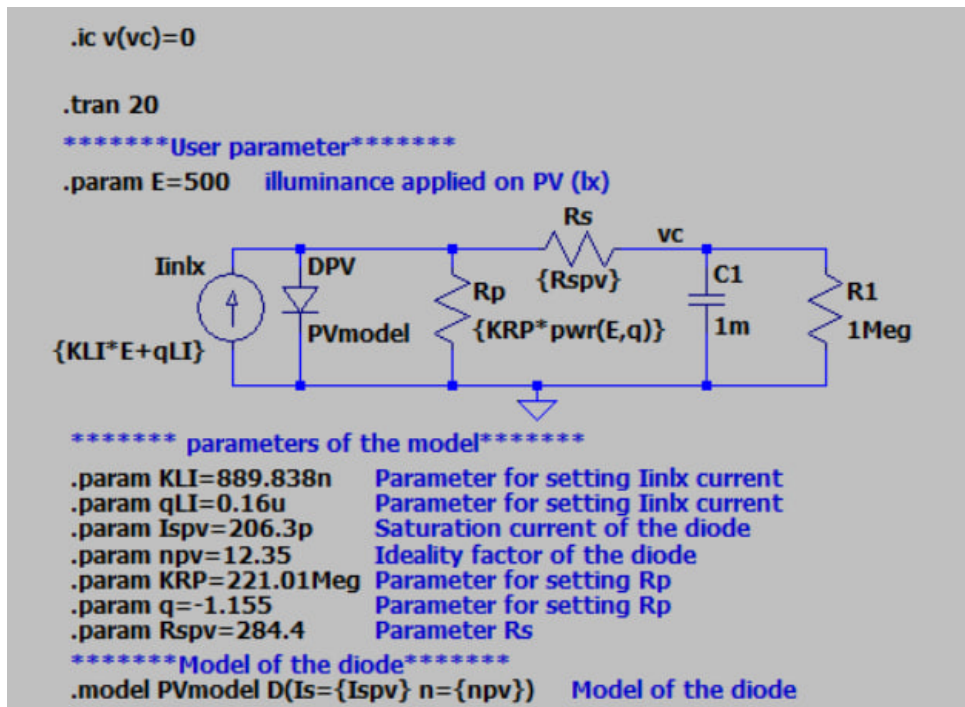
Nicméně, při nižším osvětlení (10 lx) dochází k mírnému nesouladu mezi naměřenými a modelovanými hodnotami u výkonu, což může naznačovat, že použitý jednoduchý diodový model nedokáže zcela přesně popsat rekombinační efekty v této oblasti provozu. Tento nesoulad je však v souladu s očekáváním, rozdíl je pouze 3,83 % a dále je snižován se zvyšující se intenzitou osvětlení. Při osvětlení 100 lx je rozdíl mezi naměřenými a modelovanými hodnotami výkonu je již pouze 1,52 %, což potvrzuje spolehlivost modelu a měření. Pro osvětlení 1000 lx lze dokonce shodu hodnot označovat za dokonalou.

Celkově lze tedy říct, že i přes mírný nesoulad při nižších úrovních osvětlení lze provedené měření považovat za úspěšné. Fotovoltaická součástka vykazuje validní parametry a lze ji použít pro různé aplikace s ohledem na její omezení.

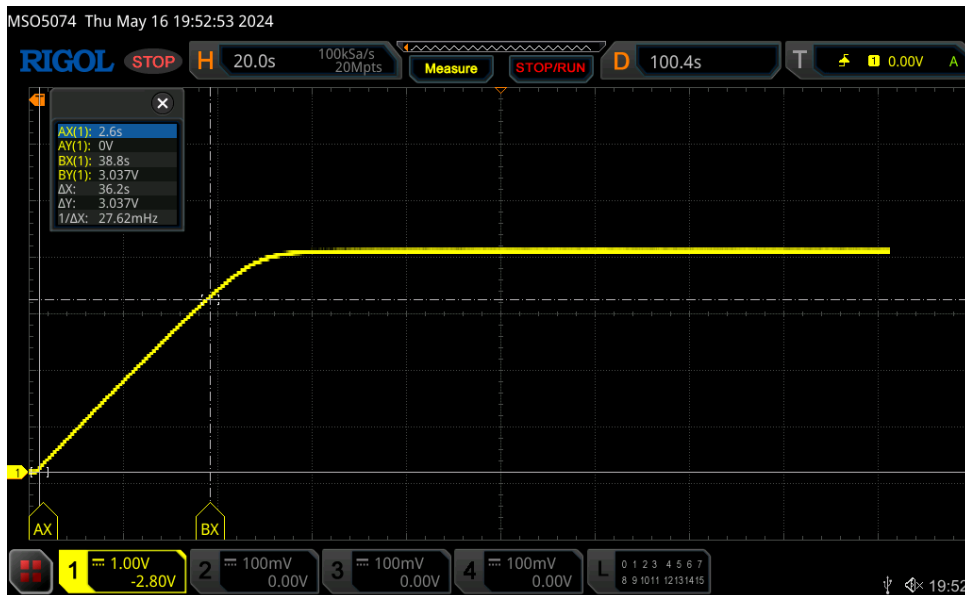
Další měření, které bylo provedeno, je sestavení testovacího pracoviště pro měření panelů s vybranými obvody pro sběr energie při různých hodnotách osvětlení. Při měření byl použit multimetr, stejný světelný zdroj, jako u předešlého měření a kondenzát.

Měření probíhalo při osvětlení 100 a 500 lx a bylo zkoumáno, jak rychle bude kondenzátor nabit na hodnotu 3 V. Následně toto měření bylo srovnáno se simulací v LTSpice a kriticky porovnáno.

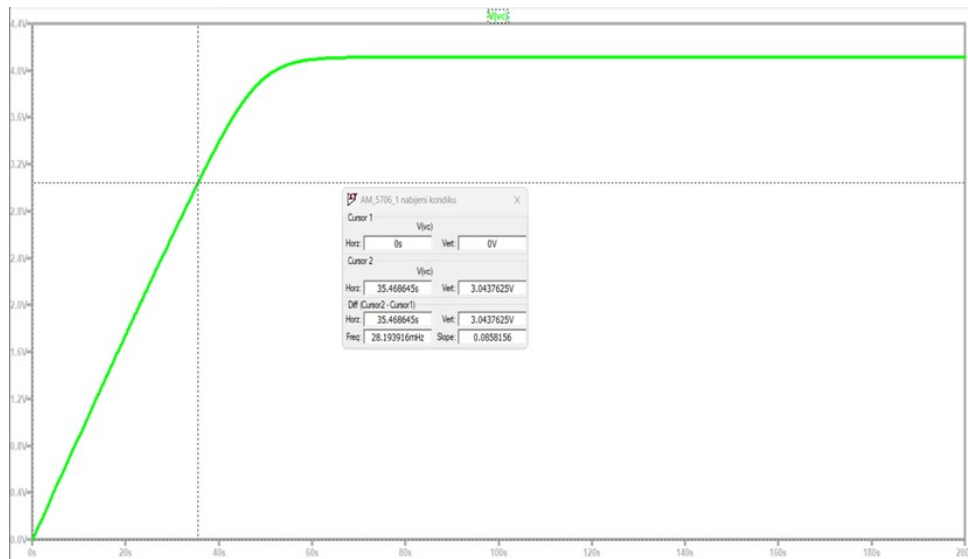
Jako ukázkou měření a srovnání se simulací byl použit stejný model AM-5706CAR.



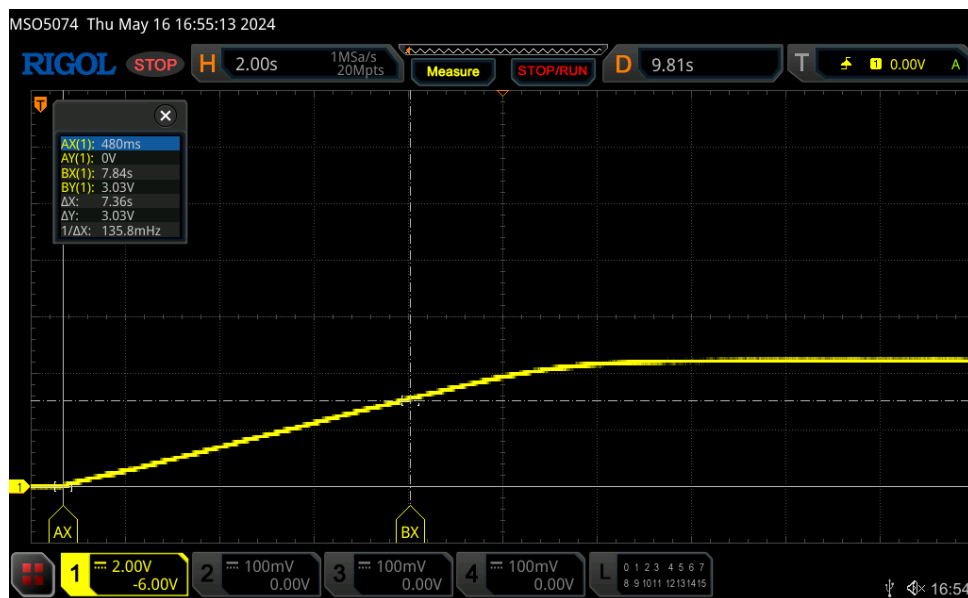
Obrázek 5.7: Náhradní obvod v programu LT Spice panel AM-5706CAR-AS



Obrázek 5.8: Naměřená data pomocí multimetru pro hodnotu 100 lx panel AM-5706CAR-AS



Obrázek 5.9: Simulace v LT Spice pro 100 lx panel AM-5706CAR-AS



Obrázek 5.10: Naměřená data pomocí multimetru pro hodnotu 500 lx panel AM-5706CAR-AS

Výsledky měření dalších panelů a jejich simulace jsou součástí přílohy.

Kapitola 6

Závěr

Bakalářská práce byla zaměřena na charakterizaci a modelování amorfních solárních panelů za účelem pochopení jejich vlastností a účinností.

Nejprve bylo nutné prostudovat a analyzovat současné charakterizační metody, které se používají k vyhodnocení charakteristik solárních panelů. Tato analýza zahrnovala teoretické principy a jejich praktickou implementaci. Na základě těchto poznatků bylo navrženo sestavení zkušební stanice, která byla realizována ve fakultní laboratoři.

Vybudovaná stanice umožnila přesné měření elektrických veličin tenkovrstvých solárních panelů v závislosti na intenzitě osvětlení. Vybrané solární panely byly podrobeny měření za různých světelných podmínek, při umělém světle 10 lx, 100 lx a 1000 lx.

Toto měření pomohlo k odvození klíčových parametrů, jako je maximální výkon, napětí naprázdno a proud nakrátko. Získaná data byla přepočítaná pomocí několika matematických vzorců, a následně použita k odvození modelu v prostředí LTSpice.

Tento model byl konstruován, tak aby maximálně odpovídal naměřeným charakteristikám, které objasňovaly elektrické zatížení solárních panelů. Za účelem ověření přesnosti měření skutečných součástí byly takto získané hodnoty porovnány s výsledky simulace v programu LTSpice.

Pomocí těchto kroků jsem docílil toho, že naměřené i simulované hodnoty napětí a proudu pro panel AM-5706CAR-AS při nízkém osvětlení 10 lx mají minimální chybu a to pouze ± 2 %. Hodnota výkonu se liší pouze o 3,83 %. Pro případ intenzity osvětlení 1000 lx chyba napětí je menší než 1 %. Pro veličiny proudu a výkonu se dá pozorovat ideální shodu. U experimentu při kterém jsem zkoumal sběr energie, se taky podařilo dosáhnout relativně předpokládaných výsledku. Kde chyba při osvětlení 100 lx i při 500 lx byla pouze ± 10 %. Mohu prohlásit, že mnou zvolena metoda charakterizací malých amorfních solárních panelů a následné odvozování jejich modelů v programu LTSpice je efektivní a přesná.

Tato metoda vedla k minimálním rozdílům mezi naměřenými a simulovanými hodnotami výkonu, proudu i napětí u většiny zkoumaných vzorků, viz přílohy. Což poukazuje na přesnost zvolené metody.

Doufám, že výsledky této práce najdou praktické uplatnění v oblasti fotovoltaické technologie a přispějí k rozvoji obnovitelné energie.

Literatura

- [1] <https://cz.mouser.com/ProductDetail/Advanced-Linear-Devices/EH300?qs=NoieiqYAh1AkX2jUqjbnpw%3D%3D>. [Accessed 20-05-2024].
- [2] <http://fu.mff.cuni.cz/semicond/media/files/courses/prednovemat3.pdf>. [Accessed 15-05-2024].
- [3] <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/80466/F3-DP-2019-Podhrazsky-Adam-Diplomova%20prace%20Adam%20Podhrazsky%208.1.2019%20V3.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. [Accessed 15-05-2024].
- [4] Weisstein, Eric W. "Lambert W-Function." "From MathWorld--A Wolfram Web Resource." <https://mathworld.wolfram.com/LambertW-Function.html>. [Accessed 15-05-2024].
- [5] https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Symbolization%20of%20the%20electric%20diagram%20of%20the%20marketed%20solar%20panels%20in%20the%20rcad-%20Pspice%20environment&author=A.%20Aziz&publication_year=2006&pages=38-41. [Accessed 14-05-2024].
- [6] https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/92480/Boura_A_SIMPLE_AND_AFFORDABLE_POWERING_CIRCUIT_FOR_IoT_SENSOR_NODES_WITH_ENERGY_HARVESTING__%282020%29_PUBV_342895.pdf. [Accessed 14-05-2024].
- [7] <https://doi.org/10.1117/12.625924>. [Accessed 14-05-2024].
- [8] <https://www.tzb-info.cz/3553-solarni-clanky-z-krystalickeho-kremiku-zakladni-te>. [Accessed 15-05-2024].
- [9] AM-5706CAR -AS PANASONIC - Fotovoltaický článek | 70x50x1,8mm; 179mW; 45,9mA; 4,6V; 3,9VDC; AM-5706CAR | TME Czech Republic s.r.o. - Elektronické součástky (WFS) — [tme.eu](https://www.tme.eu). <https://www.tme.eu/cz/details/am-5706car/fotovoltaicke-moduly/panasonic/am-5706car-as/>. [Accessed 20-05-2024].

- [10] AM-5815CAR -AS PANASONIC - Fotovoltaický článek | 31,2x10,8x1,1mm; 11,25mW; 2,5mA; 5,2V; 0,9g; AM-5815CAR | TME Czech Republic s.r.o. - Elektronické součástky (WFS) — tme.eu. <https://www.tme.eu/cz/details/am-5815car/fotovoltaicke-moduly/panasonic/am-5815car-as/>. [Accessed 20-05-2024].
- [11] AM-5907CAR -AS PANASONIC - Photovoltaic cell | 75x55x1.8mm; 228.5mW; 45.7mA; 5.9V; 5VDC; 18.3g; AM-5907CAR | TME - Electronic components (WFS) — tme.eu. <https://www.tme.eu/en/details/am-5907car/photovoltaic-modules/panasonic/am-5907car-as/>. [Accessed 20-05-2024].
- [12] Amorfni solarni panely — evolty.cz. <https://evolty.cz/solarni-panely/amorfni-solarni-panely/>. [Accessed 15-05-2024].
- [13] AT-7802A -AS PANASONIC - Fotovoltaický článek | 73x42x0,3mm; 118,8mW; 29,7uA; 4,8V; 4VDC; AT-7802A | TME Czech Republic s.r.o. - Elektronické součástky (WFS) — tme.eu. <https://www.tme.eu/cz/details/at-7802a/fotovoltaicke-moduly/panasonic/at-7802a-as/>. [Accessed 20-05-2024].
- [14] co je organické fotovoltaické solární pole opv › › Basengreen Energie — basengreen.com. <https://www.basengreen.com/cs/what-is-an-organic-photovoltaic-solar-array-opv/>. [Accessed 15-05-2024].
- [15] crr.vutbr.cz. http://www.crr.vutbr.cz/offline/SYSTEM/FILES/BROZURA_04_1104.PDF. [Accessed 15-05-2024].
- [16] Diagnostika degradace fotovoltaick&xFD;ch &x10D;l&xE1;nk&x16F; a modul&x16F; — hdl.handle.net. <http://hdl.handle.net/10467/93944>. [Accessed 15-05-2024].
- [17] Fotovoltaický článek – Wikipedie — cs.wikipedia.org. https://cs.wikipedia.org/wiki/Fotovoltaick%C3%BD_%C4%8D1%C3%A1nek. [Accessed 15-05-2024].
- [18] FOTOVOLTAIKA - Tzb-energ — tzb-energ.cz. <https://www.tzb-energ.cz/fotovoltaika.html>. [Accessed 15-05-2024].
- [19] Komplexn&xED; diagnostika fotovoltaick&xFD;ch syst&xE9;m&x16F; — hdl.handle.net. <http://hdl.handle.net/10467/61942>. [Accessed 15-05-2024].
- [20] Krystalick&xE9; a amorfni&xED; l&xE1;tky :: MEF — fyzika.jreichl.com. <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/622-krystalicke-a-amorfni-latky>. [Accessed 15-05-2024].

- [21] Polovodiče: Fotovoltaické články z krystalického křemíku a tenkovrstvé články — oenergetice.cz. <https://oenergetice.cz/elektrina/polovodice-fotovoltaicke-clanky-krystalickeho-kremiku-tenkovrstve-clanky>. [Accessed 15-05-2024].
- [22] Termografie ve FVE - Termokamery testo — termokamery-testo.cz. <https://www.termokamery-testo.cz/termografie-ve-fve/>. [Accessed 15-05-2024].
- [23] The Photometric Test Distance in Luminance Measurement of Light-Emitting Diodes in Road Lighting — doi.org. <https://doi.org/10.3390/en16031199>. [Accessed 14-05-2024].
- [24] Batzelis, E. I., Routsolias, I. A., and Papathanassiou, S. A. An explicit pv string model based on the lambert w function and simplified mpp expressions for operation under partial shading. *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 5, 1 (Jan 2014), 301–312.
- [25] Bouřa, A. Characterization of a small amorphous photovoltaic panel and derivation of its spice model. *Solar Energy* 262 (2023), 111854.
- [26] BROŽOVÁ, M. Osvitová jednotka pro měření fv článků metodou lbic [online]. Master's thesis, University of West Bohemia, Faculty of Electrical Engineering Plzeň, 2012 [cit. 2005 – 15]. SUPERVISOR : Ing. Milan Blk, Ph.D.
- [27] Clement, C. E., Singh, J. P., Birgersson, E., Wang, Y., and Khoo, Y. S. Illumination dependence of reverse leakage current in silicon solar cells. *IEEE Journal of Photovoltaics* 11, 5 (2021), 1285–1290.
- [28] de Cesare, G., Caputo, D., and Nascetti, A. Maximum power point tracker for portable photovoltaic systems with resistive-like load. *Solar Energy* 80, 8 (2006), 982–988.
- [29] Eko-Adepto. Co jsou amorfní solární panely | Eko-Adepto.cz — eko-adepto.cz. <https://www.eko-adepto.cz/post/amorfni-solarni-panely>. [Accessed 15-05-2024].
- [30] Eko-Adepto. Perovskitové solární fotovoltaické panely | Eko-Adepto — eko-adepto.cz. <https://www.eko-adepto.cz/post/perovskitove-panely>. [Accessed 15-05-2024].
- [31] Gallardo-Saavedra, S., and Karlsson, B. Simulation, validation and analysis of shading effects on a pv system. *Solar Energy* 170 (2018), 828–839.
- [32] Guerriero, P., Codecasa, L., d' Alessandro, V., and Daliento, S. Dynamic electro-thermal modeling of solar cells and modules. *Solar Energy* 179 (2019), 326 – 334.
- [33] Guo, S., Ma, F.-J., Hoex, B., Aberle, A. G., and Peters, M. Analysing solar cells by circuit modelling. *Energy Procedia* 25 (2012), 28–33. PV Asia Pacific Conference 2011.

- [34] Gururajan, M. P. Handbook of crystal growth, 2nd edition: Fundamentals IA: thermodynamics and kinetics & fundamentals IB: transport and stability (two book set), edited by t. nishinaga. *Contemp. Phys.* 58, 2 (Apr. 2017), 198–198.
- [35] Hosseini, S., Taheri, S., Farzaneh, M., Taheri, H., and Narimani, M. Determination of photovoltaic characteristics in real field conditions. *IEEE Journal of Photovoltaics* 8, 2 (2018), 572–580.
- [36] <https://www.facebook.com/tzbinfo>. Detekce vad u fotovoltaick ch panel — oze.tzb-info.cz. <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/18366-detekce-vad-u-fotovoltaickych-panelu>. [Accessed 15-05-2024].
- [37] Iero, D., Carbone, R., Carotenuto, R., Felini, C., Merenda, M., Pangallo, G., and Della Corte, F. G. Spice modelling of a complete photovoltaic system including modules, energy storage elements and a multilevel inverter. *Solar Energy* 107 (2014), 338–350.
- [38] Ishaque, K., Salam, Z., and Taheri, H. Simple, fast and accurate two-diode model for photovoltaic modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 95, 2 (2011), 586–594.
- [39] klivo. Fotovoltaické články – historie a současné trendy vývoje | ASB Portal — asb-portal.cz. <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/technicka-zarizeni-budov/fotovoltaika/fotovoltaicke-clanky-historie-asoucasne-trendy-vyvoje>. [Accessed 15-05-2024].
- [40] Lineykin, S., Averbukh, M., and Kuperman, A. Issues in modeling amorphous silicon photovoltaic modules by single-diode equivalent circuit. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 61, 12 (Dec 2014), 6785–6793.
- [41] Meyer, E. L. Extraction of saturation current and ideality factor from measuring voc and isc of photovoltaic modules. *Int. J. Photoenergy* 2017 (2017), 1–9.
- [42] Obreja, V. V. The voltage dependence of reverse current of semiconductor pn junctions and its distribution over the device area. In *2007 International Semiconductor Conference* (Oct 2007), vol. 2, pp. 485–488.
- [43] Ravindra, N., and Prasad, B. Saturation current in solar cells: an analysis. *Solar Cells* 2, 2 (1980), 109–113.
- [44] Rodrigues, E., Melicio, R., Mendes, V., and Catalão, J. Simulation of a solar cell considering single-diode equivalent circuit model.
- [45] Sarkar, M. N. I. Effect of various model parameters on solar photovoltaic cell simulation: a SPICE analysis. *Renewables* 3, 1 (Dec. 2016).
- [46] Villalva, M. G., Gazoli, J. R., and Filho, E. R. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. *IEEE Transactions on Power Electronics* 24, 5 (May 2009), 1198–1208.

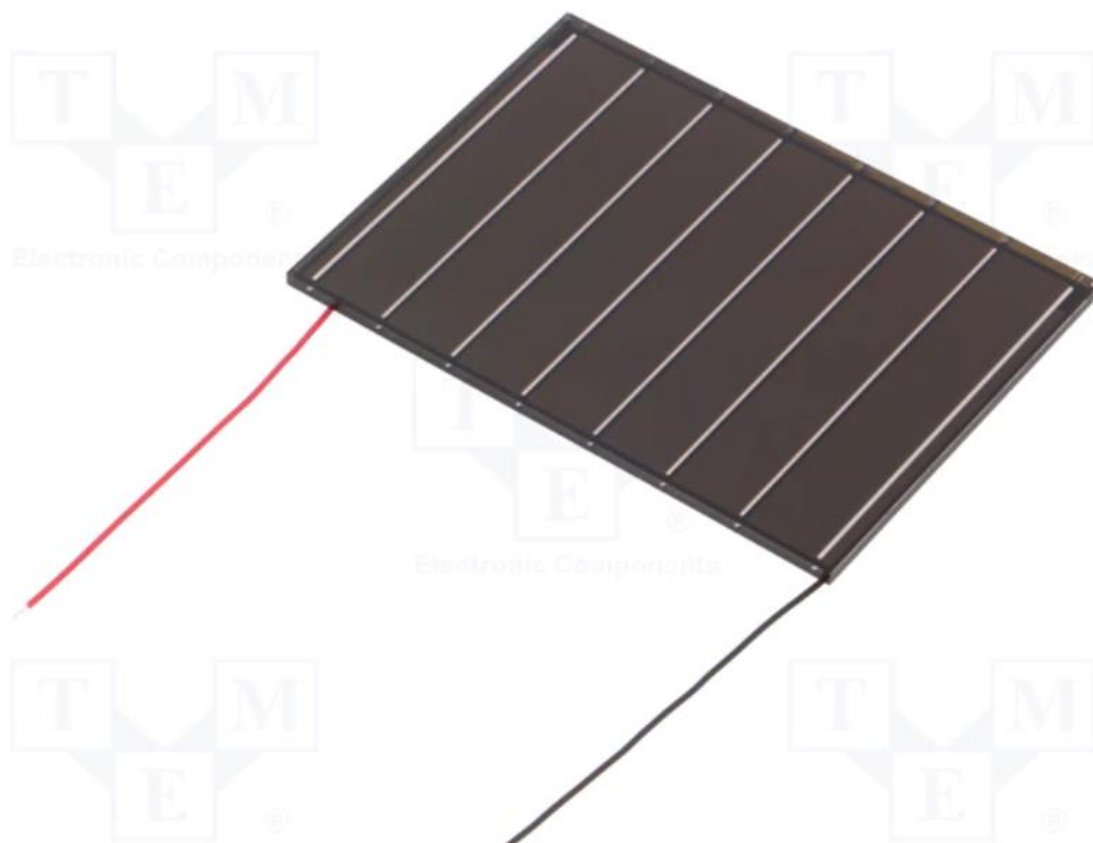
- [47] Šestáková, L. M&x11B;&x159;en&xED; termokamerou termovize — elektrorevize.cz. <https://www.elektrorevize.cz/termovize-fotovoltaickych-elektraren/>. [Accessed 15-05-2024].



Příloha A

AM-5706CAR

AM-5706CAR



SPECIFIKACE

Výrobce	PANASONIC
Typ fotovoltaického článku	fotovoltaický článek
Použití	fotovoltaika, pro vnější prostředí
Vnější rozměry	70x50x1,8mm
Maximální výkon	179mW
Proud při max. výkonu	45,9mA
Jmenovité napětí	4,6V
Pracovní napětí	3,9V DC
Řada výrobce	Amorton
Hmotnost netto	15,5g

AM_5706_1																
E (lx)	Isc (A)	Voc (V)	Sscc (A/V)	Socv (A/V)	Pmax (W)	Vpmax (V)	Rpv (Ω)	Rp (Ω)		KLl (A/lx)	qLI (A/lx)	IsPV (A)	npv (-)	KRP (Mohm)	q (-)	RsPV (Ω)
10	9.1E-06	3.4	-0.000001647	-0.00004	2.2E-05	2.72	6071429	1.5E+07		0.00000088983838	0.00000016161616	0.0000000002063	12.3539	221.0136	-1.1553627	284.488334992
100	9E-05	4.01	-1.18421E-06	-0.000246914	0.00027	3.24	844444.4	922330								
1000	0.00089	4.864	-0.000013333	-0.001552795	0.0031	3.84	75000	75566.8								

AM_5706_2																
E (lx)	Isc (A)	Voc (V)	Sscc (A/V)	Socv (A/V)	Pmax (W)	Vpmax (V)	Rpv (Ω)	Rp (Ω)		KLl (A/lx)	qLI (A/lx)	IsPV (A)	npv (-)	KRP (Mohm)	q (-)	RsPV (Ω)
10	9.2E-06	3.37	-0.0000001471	-2.29885E-05	2E-05	2.71	6800000	2.1E+07		0.00000089474747	0.00000025252525	0.0000000000521	10.8190	228.8010	-1.032059	306.912861379
100	9.1E-05	3.95	-0.0000015	-0.000235294	0.00025	3.24	666666.7	714286								
1000	0.0009	4.66	-0.000005556	-0.001612903	0.00288	3.79	180000	183299								

Řečenočítané hodnoty z křivky V-A charakteristiky pro panel AM-5706CAR-AS. (vpravo)
Hodnoty pro náhradní model LTspice pro panel AM-5706CAR-AS. (vlevo)

```

.dc Vload 0 10 0.001DC analysis for loading IV characteristics
*****User parameter*****
.param E=1000 illuminance applied on PV (lx)

Iinlx
{KLI*E+qLI}
DPV
PVmodel
Rp
{Rspv}
Rs
KRP*pwr(E,q)
Rv
10Meg
Vload
0

***** parameters of the model*****
.param KLI=889.838n Parameter for setting Iinlx current
.param qLI=0.16u Parameter for setting Iinlx current
.param Ispv=206p Saturation current of the diode
.param npv=12.3637 Ideality factor of the diode
.param KRP=221.8Meg Parameter for setting Rp
.param q=-1.155 Parameter for setting Rp
.param Rspv=284.48 Parameter Rs
*****Model of the diode*****
.model PVmodel D(Is={Ispv} n={npv})Model of the diode

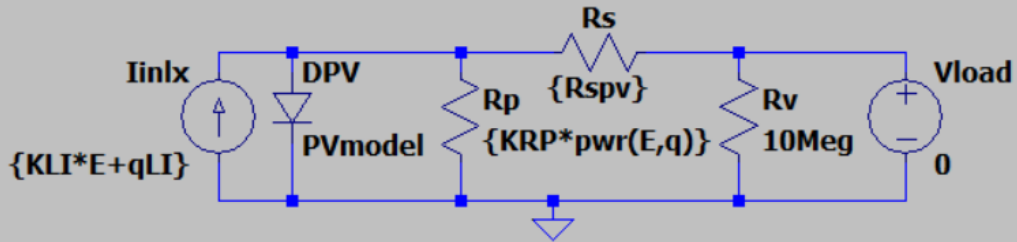
```

Náhradní model panelu AM-5706CAR-AS_1 v LTspice

.dc Vload 0 10 0.001DC analysis for loading IV characteristics

*****User parameter*****

.param E=1000 illuminance applied on PV (lx)



***** parameters of the model*****

.param KLI=0.00000089474747 Parameter for setting Inlx current

.param qLI=0.00000025252525 Parameter for setting Inlx current

.param Ispv=0.0000000000521 Saturation current of the diode

.param npv=10.8190 Ideality factor of the diode

.param KRP=228.8010Meg Parameter for setting Rp

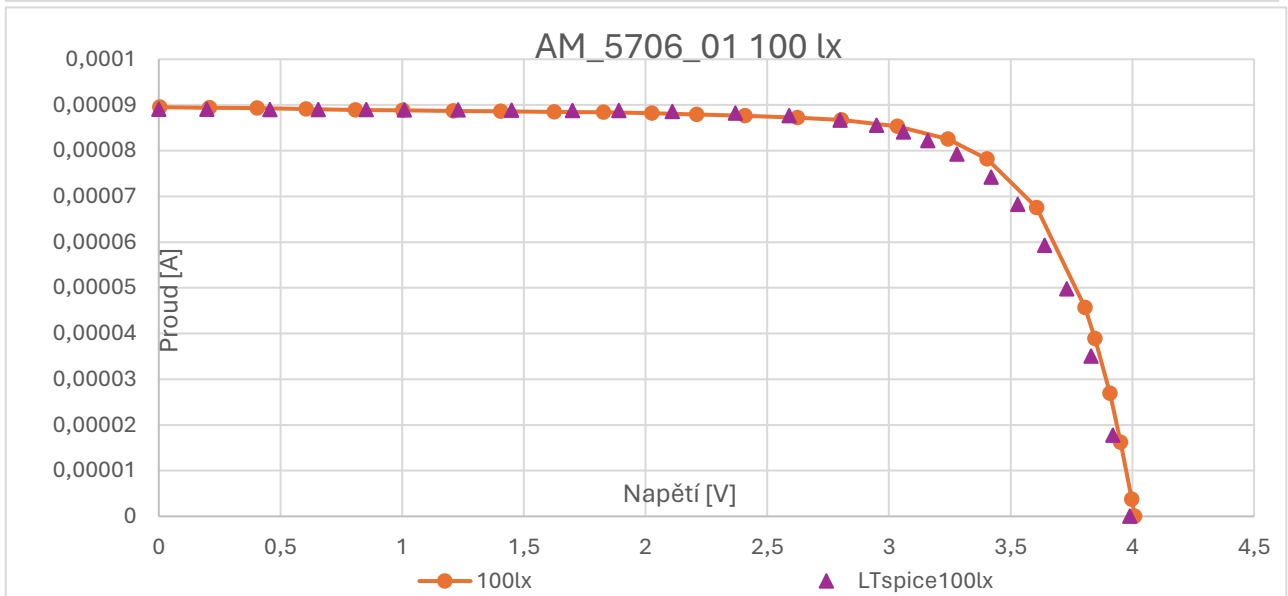
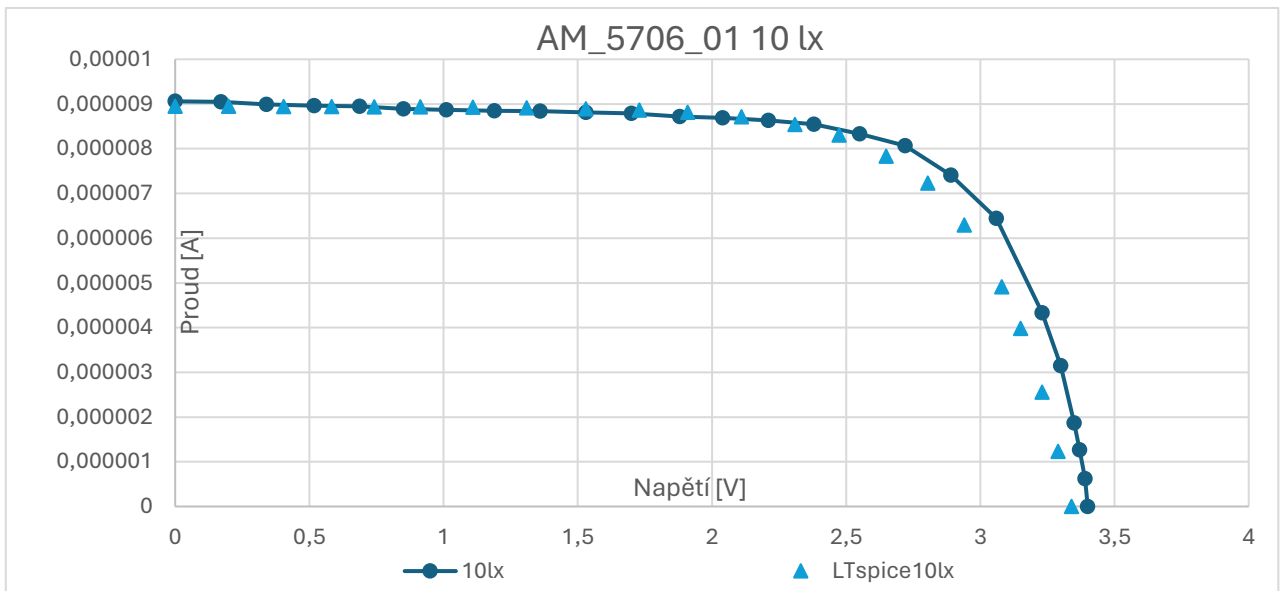
.param q=-1.032098959 Parameter for setting Rp

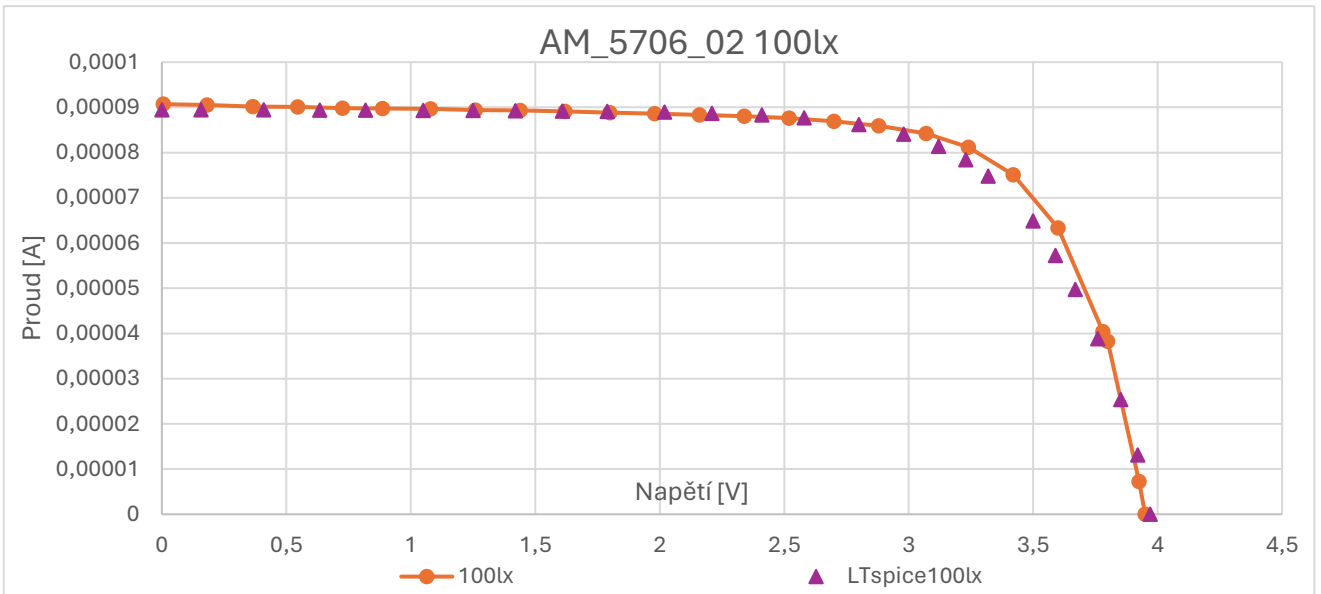
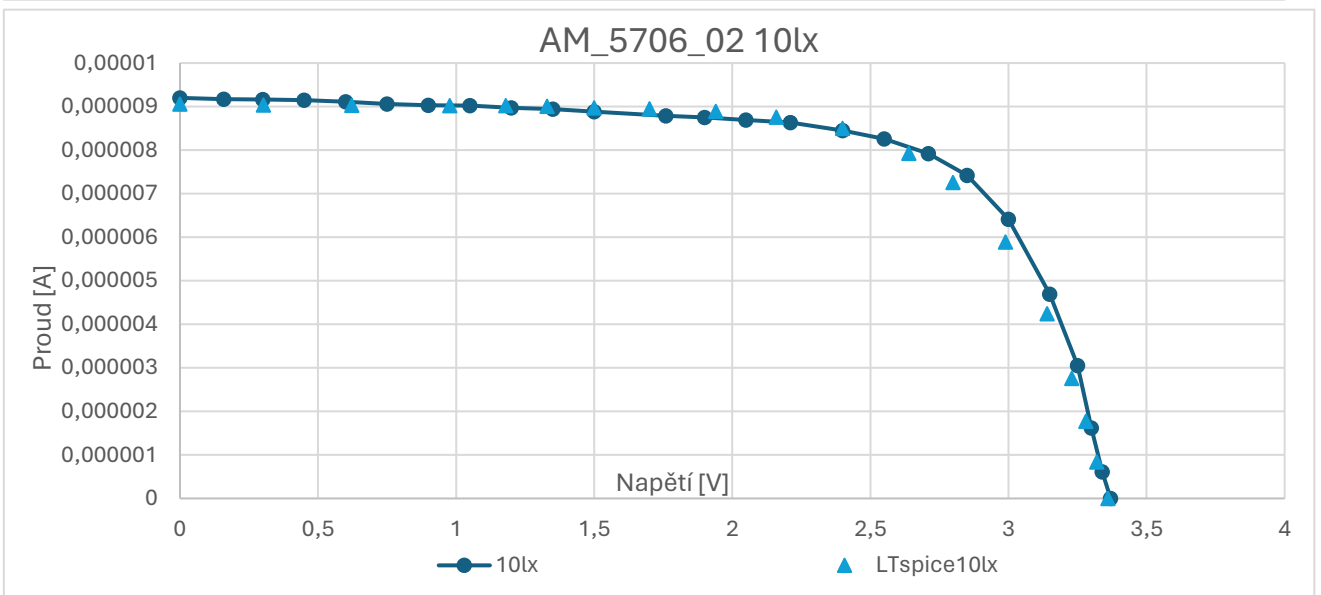
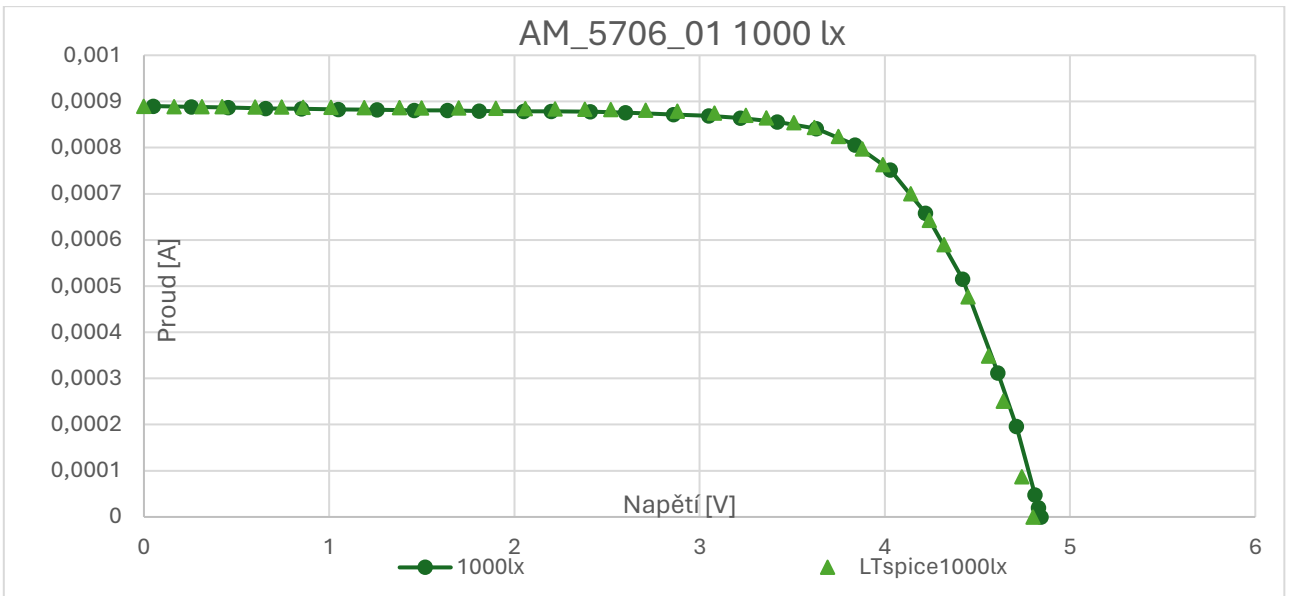
.param Rspv=306 Parameter Rs

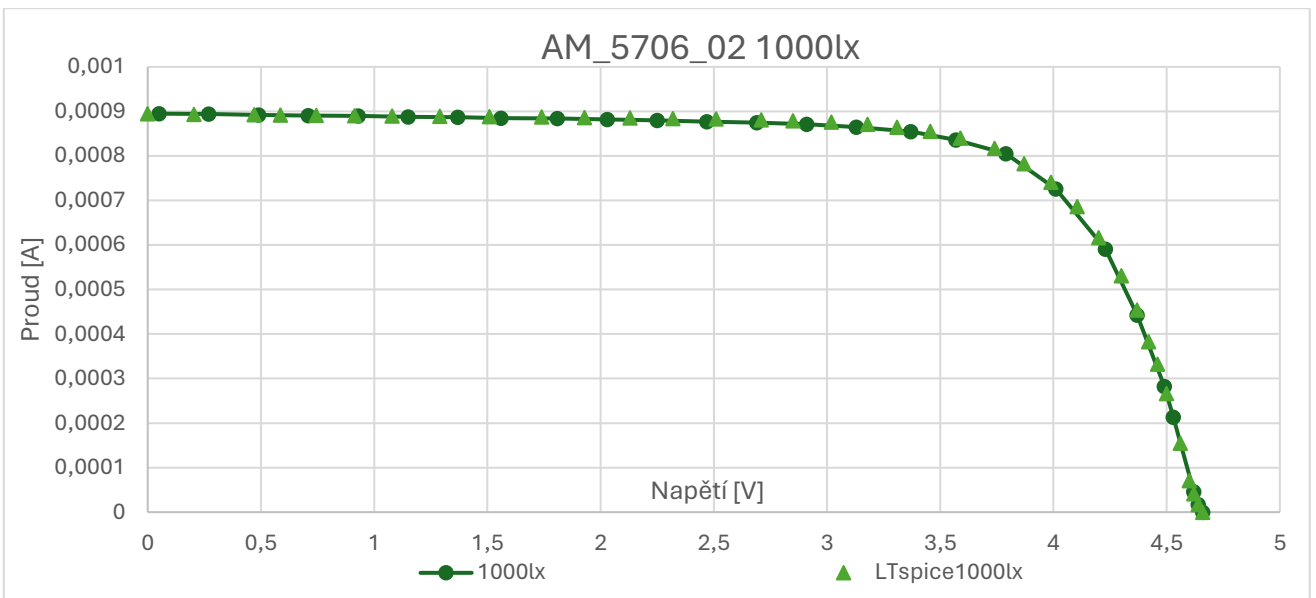
*****Model of the diode*****

.model PVmodel D(Is={Ispv} n={npv})Model of the diode

Náhradní model panelu AM-5706CAR-AS_2 v LTspice





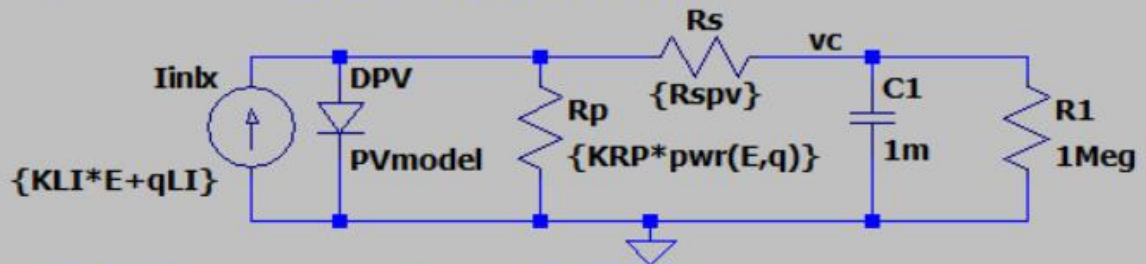


```
.ic v(vc)=0
```

```
.tran 200
```

```
*****User parameter*****
```

```
.param E=100    illuminance applied on PV (lx)
```



```
***** parameters of the model*****
```

```
.param KLI=889.838n
```

Parameter for setting Iinx current

```
.param qLI=0.16u
```

Parameter for setting Iinx current

```
.param Ispv=206.3p
```

Saturation current of the diode

```
.param npv=12.35
```

Ideality factor of the diode

```
.param KRP=221.01Meg
```

Parameter for setting Rp

```
.param q=-1.155
```

Parameter for setting Rp

```
.param Rspv=284.4
```

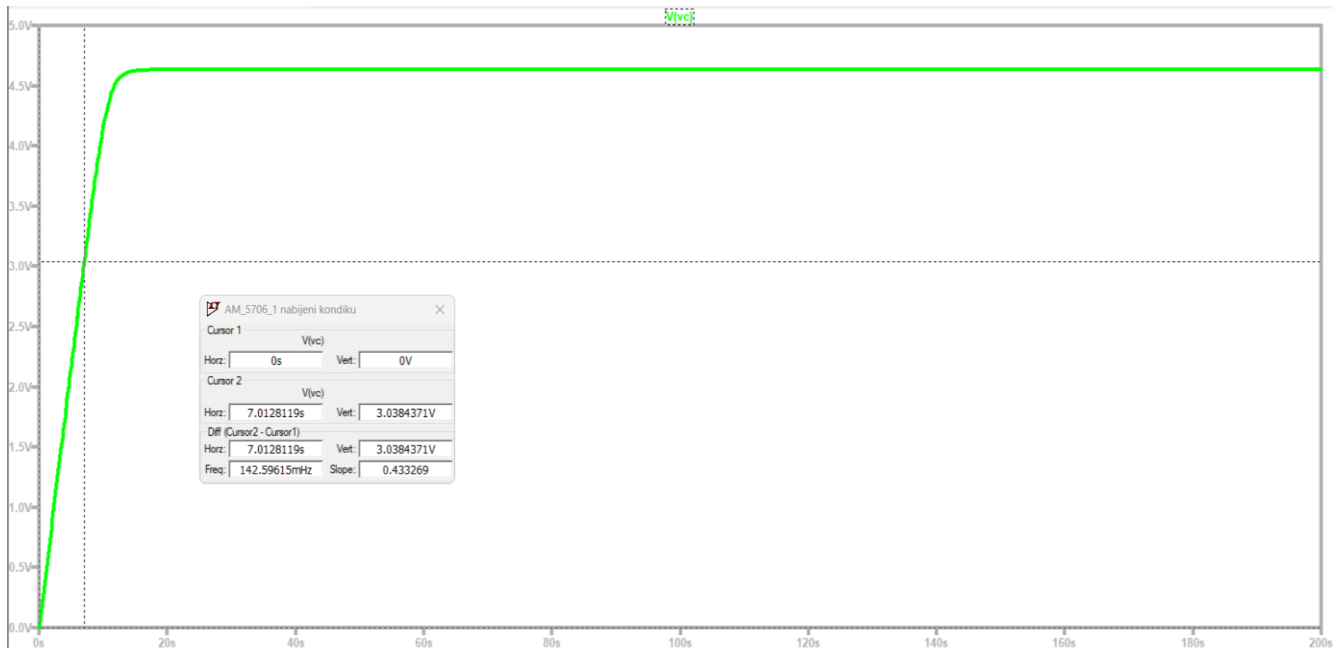
Parameter Rs

```
*****Model of the diode*****
```

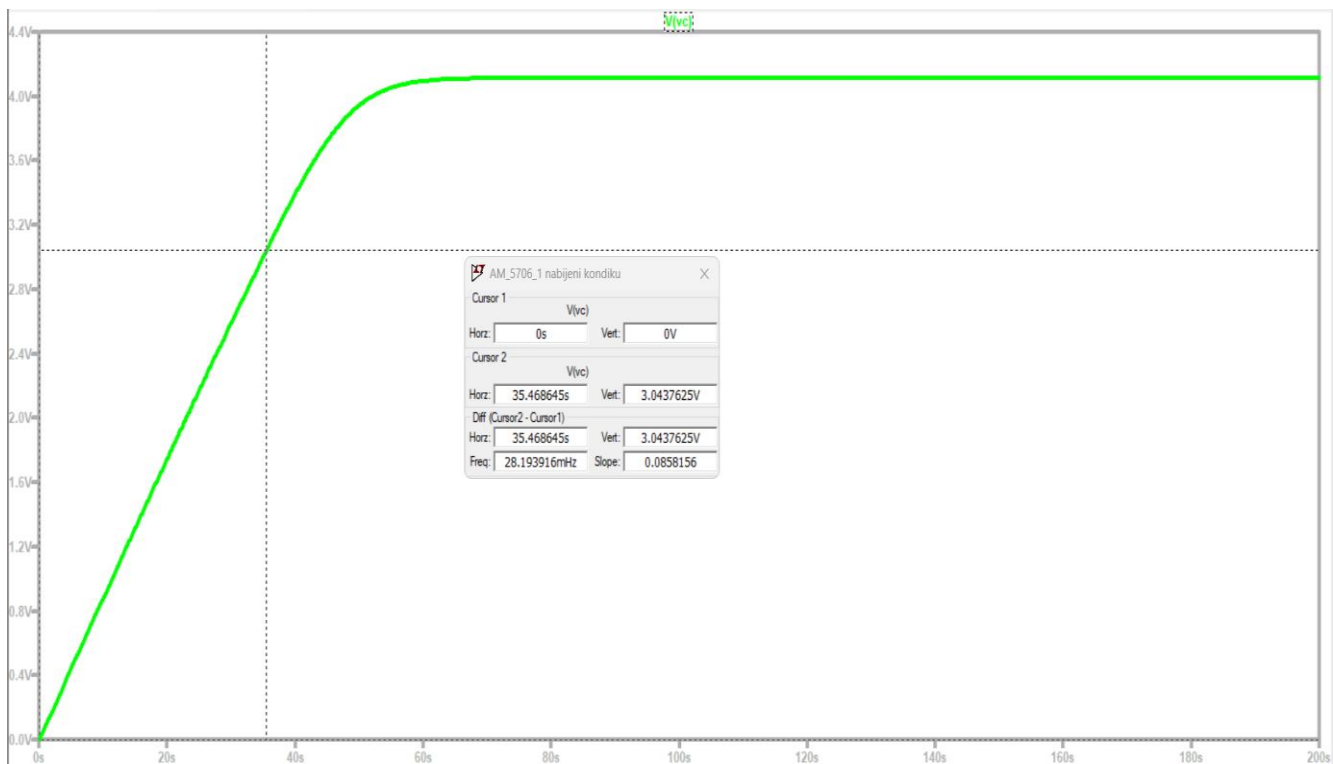
```
.model PVmodel D(Is={Ispv} n={npv})
```

Model of the diode

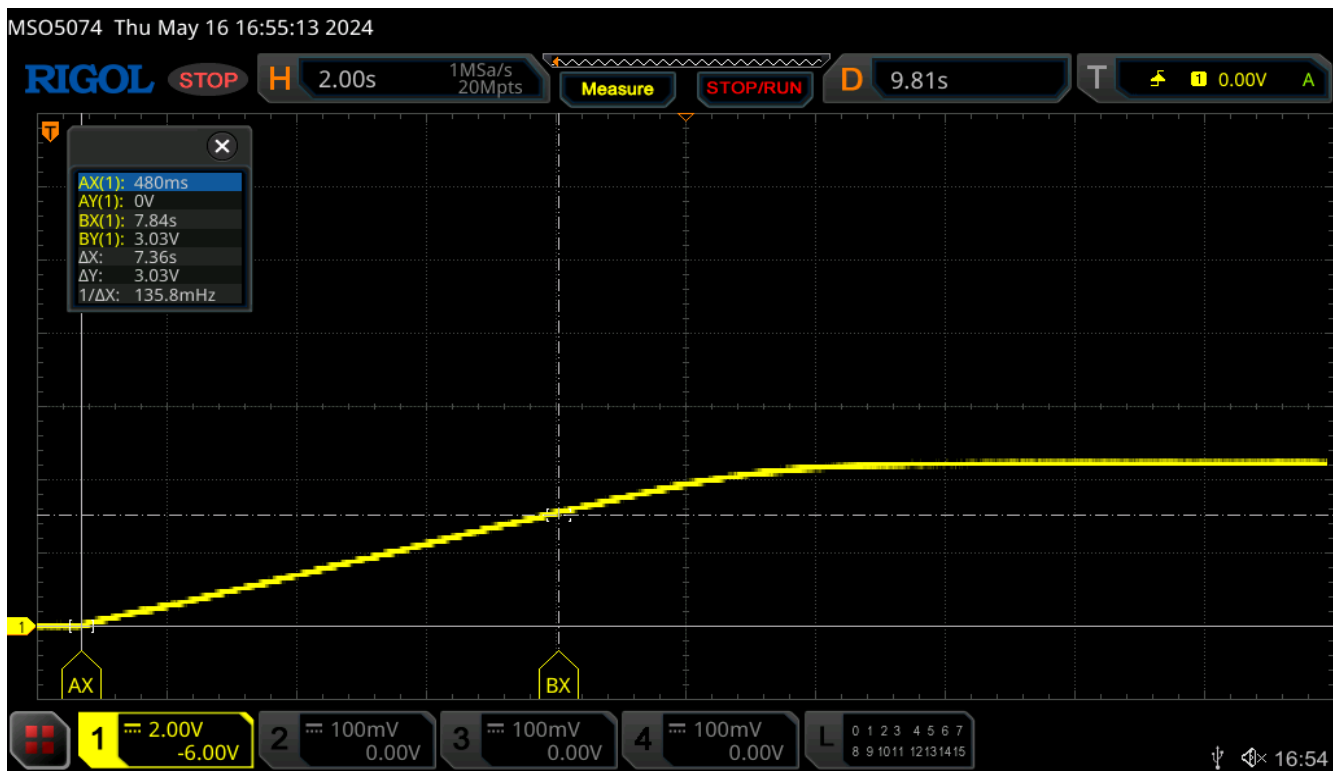
Náhradní obvod v programu LT Spice panel AM-5706CAR-AS



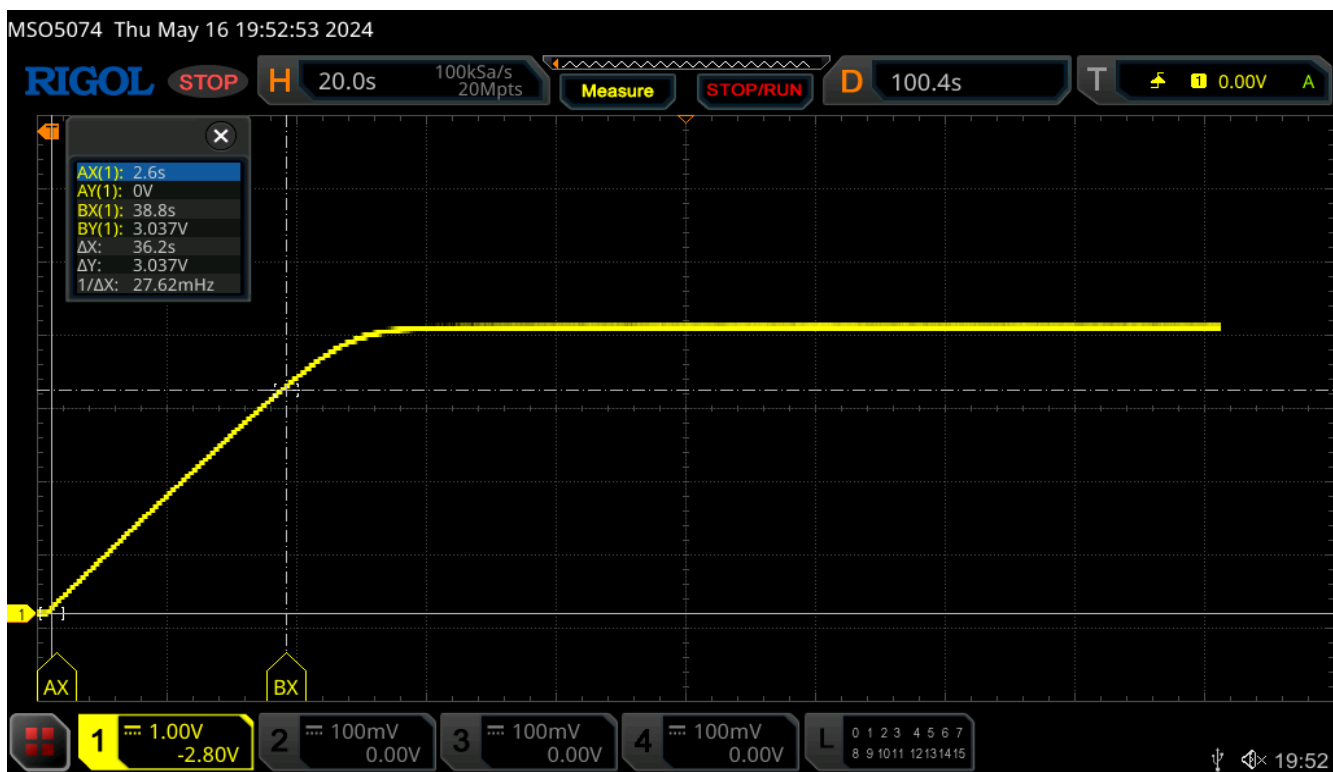
Simulace v LT Spice pro 500 lx panel AM-5706CAR-AS



Simulace v LT Spice pro 100 lx panel AM-5706CAR-AS



Naměřená data pomocí multimetru pro hodnotu 500 lx panel AM-5706CAR-AS

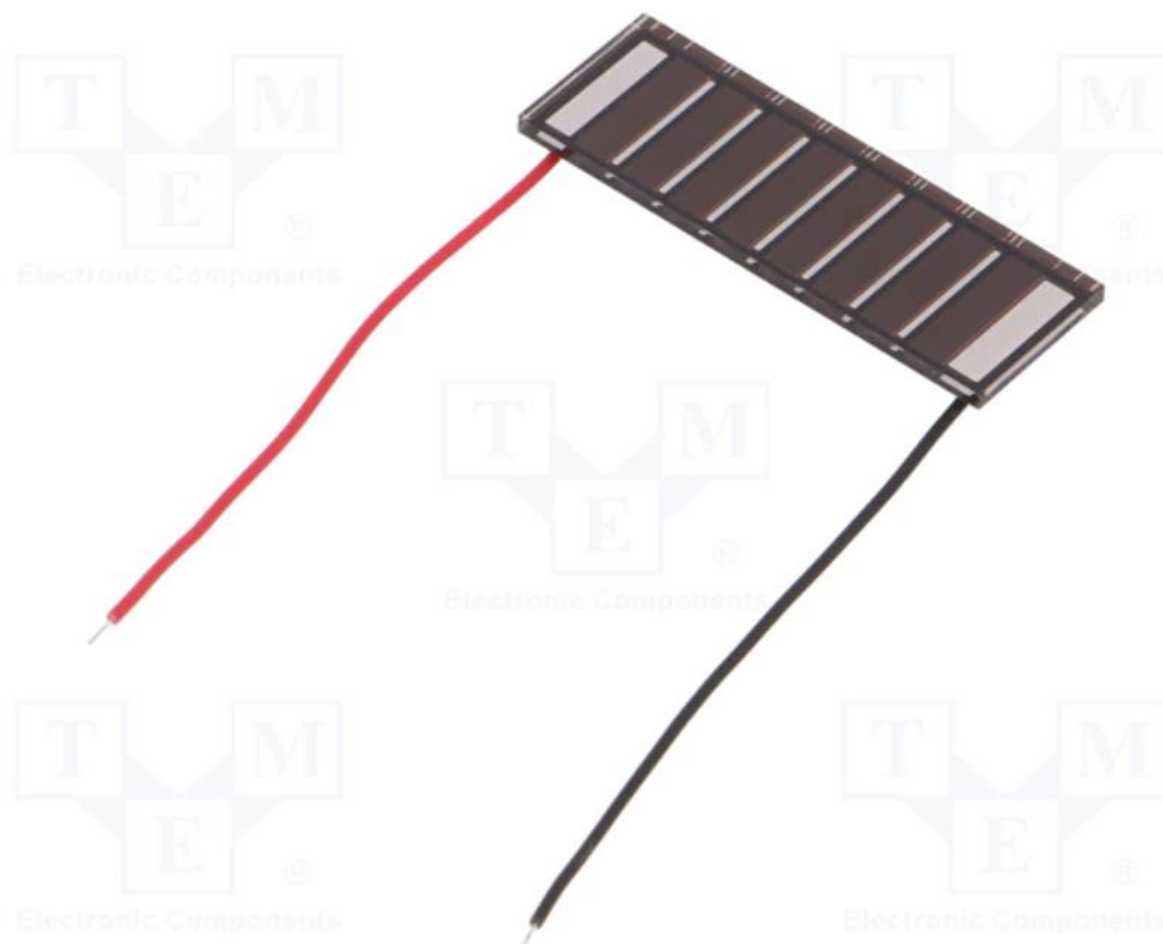


Naměřená data pomocí multimetru pro hodnotu 100 lx panel AM-5706CAR-AS



Příloha B
AM-5815CAR

AM-5815CAR



SPECIFIKACE

Výrobce	PANASONIC
Typ fotovoltaického článku	fotovoltaický článek
Použití	fotovoltaika, pro vnější prostředí
Vnější rozměry	31,2x10,8x1,1mm
Maximální výkon	11,25mW
Proud při max. výkonu	2,5mA
Jmenovité napětí	5,2V
Pracovní napětí	4,5VDC
Řada výrobce	Amorton
Hmotnost netto	0,9g

AM-5815_1										KL(A/x)	qLI(A/x)	IsPV(A)	npv(-)	KRP(Mohm)	q(-)	RsPV(Ω)
E (lx)	Isc(A)	Voc(V)	SocC(A/M)	SocV(A/M)	PMax(W)	Vpmax(V)	Rpv(Ω)	Re(Ω)		0,00000004450505	-0,00000000505051	0,0000000000026	13,6944	#CISLO!	#CISLO!	6572,341961936
10	4,6E-07	3,74	-0,0000000971	-2,57732E-07	5,3E-07	2,13	10303030	-3,4E+08								
100	4,7E-06	5,09	-9,79167E-08	-8,40336E-06	1,6E-05	4,08	10212766	-4,8E+08								
1000	4,7E-05	5,91	-0,000000417	-7,04225E-05	0,0002	4,8	2400000	3157895								

AM-5815_2										KL(A/x)	qLI(A/x)	IsPV(A)	npv(-)	KRP(Mohm)	q(-)	RsPV(Ω)
E (lx)	Isc(A)	Voc(V)	SocC(A/M)	SocV(A/M)	PMax(W)	Vpmax(V)	Rpv(Ω)	Re(Ω)		0,00000004450505	-0,00000000505051	0,0000001290987	34,7994	2,7806	-0,1733937	-4254,050011829
10	4,4E-07	0,38	-0,0000006400	-0,000002	5,3E-08	0,19005	1562500	1851852								
100	4,4E-06	1,38	-0,00000034	-6,68667E-06	2,3E-06	0,96	2941176	4166667								
1000	4,5E-05	5,12	-0,000001300	-0,0000625	0,00012	3,584	769230,8	833333								

AM-5815_3										KL(A/x)	qLI(A/x)	IsPV(A)	npv(-)	KRP(Mohm)	q(-)	RsPV(Ω)
E (lx)	Isc(A)	Voc(V)	SocC(A/M)	SocV(A/M)	PMax(W)	Vpmax(V)	Rpv(Ω)	Re(Ω)		0,00000004888889	0,00000001111111	0,0000000685298	15,7984	14,1955	-0,5323627	-8723,343040903
10	4,8E-07	0,58	-0,0000003400	-3,846153846	1,2E-07	0,45	2941176	4166667								
100	4,7E-06	1,19	-0,0000006	-1,224489796	2,3E-06	0,728	1666667	2000000								
1000	4,7E-05	2,6	-0,000002886	-0,857142857	2E-05	1,17	346534,7	358974								

Prepočítané hodnoty z křivky V-A charakteristiky pro panel AM-5815CAR-AS. (vpravo)
Hodnoty pro náhradní model LTspice pro panel AM-5815CAR-AS. (vlevo)

```

.dc Vload 0 10 0.001DC analysis for loading IV characteristics
*****User parameter*****
.param E=10    illuminance applied on PV (Ix)

{KLI*E+qLI}
IinIx
DPV
PVmodel
Rs
Rp {Rspv}
Rv 10Meg
Vload 0

***** parameters of the model*****
.param KLI=0.00000051666667  Parameter for setting IinIx current
.param qLI=0.00000033333333  Parameter for setting IinIx current
.param Ispv=0.0000001483772  Saturation current of the diode
.param npv=28.2860           Ideality factor of the diode
.param KRP=0.2679Meg         Parameter for setting Rp
.param q=-0.118213474        Parameter for setting Rp
.param Rspv=6572.341         Parameter Rs

*****Model of the diode*****
.model PVmodel D(Is={Ispv} n={npv})Model of the diode

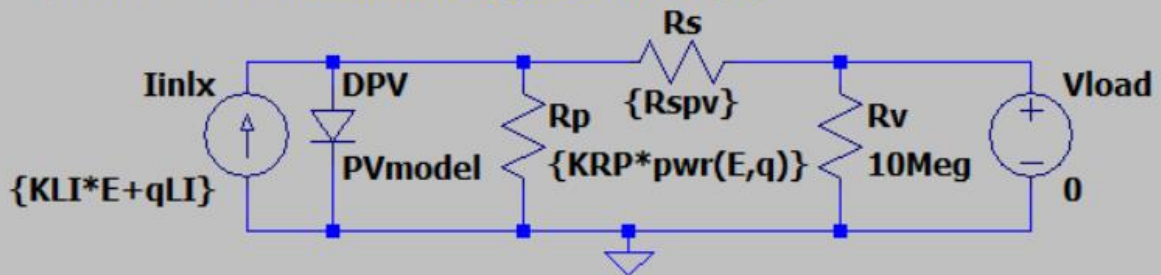
```

Náhradní model panelu AM-5815CAR-AS_1 v LTspice

```
.dc Vload 0 10 0.001DC analysis for loading IV characteristics
```

```
*****User parameter*****
```

```
.param E=1000 illuminance applied on PV (lx)
```



```
***** parameters of the model*****
```

```
.param KLI=0.00000004450505 Parameter for setting Iinlx current  
.param qLI=-0.00000000505051 Parameter for setting Iinlx current  
.param Ispv=0.0000001290987 Saturation current of the diode  
.param npv=34.7994 Ideality factor of the diode  
.param KRP=2.7606Meg Parameter for setting Rp  
.param q=-0.173393743 Parameter for setting Rp  
.param Rspv=1 Parameter Rs
```

```
*****Model of the diode*****
```

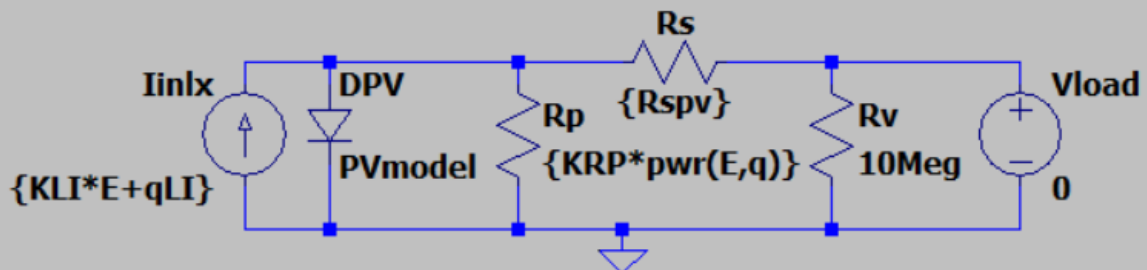
```
.model PVmodel D(Is={Ispv} n={npv})Model of the diode
```

Náhradní model panelu AM-5815CAR-AS_2 v LTspice

```
.dc Vload 0 10 0.001DC analysis for loading IV characteristics
```

```
*****User parameter*****
```

```
.param E=10 illuminance applied on PV (lx)
```



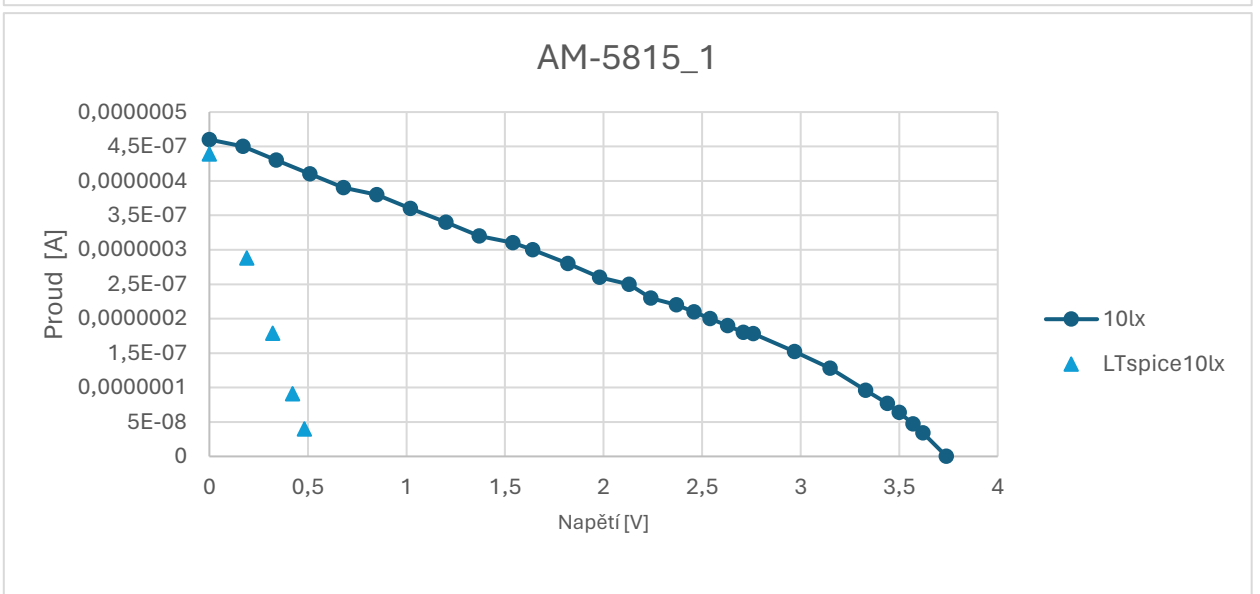
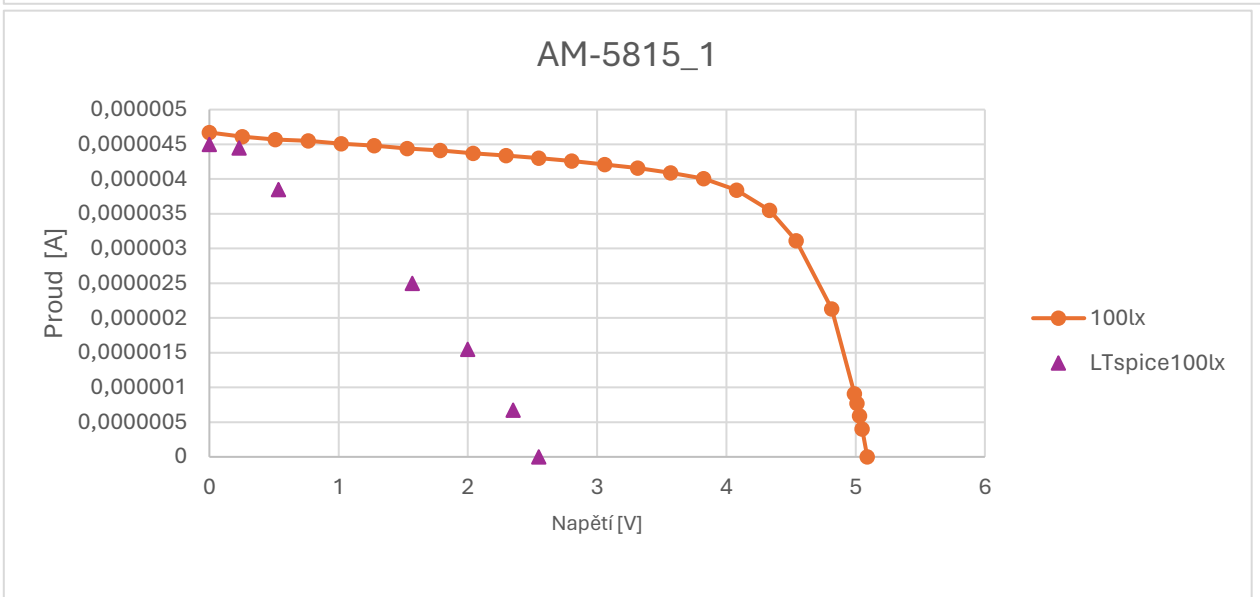
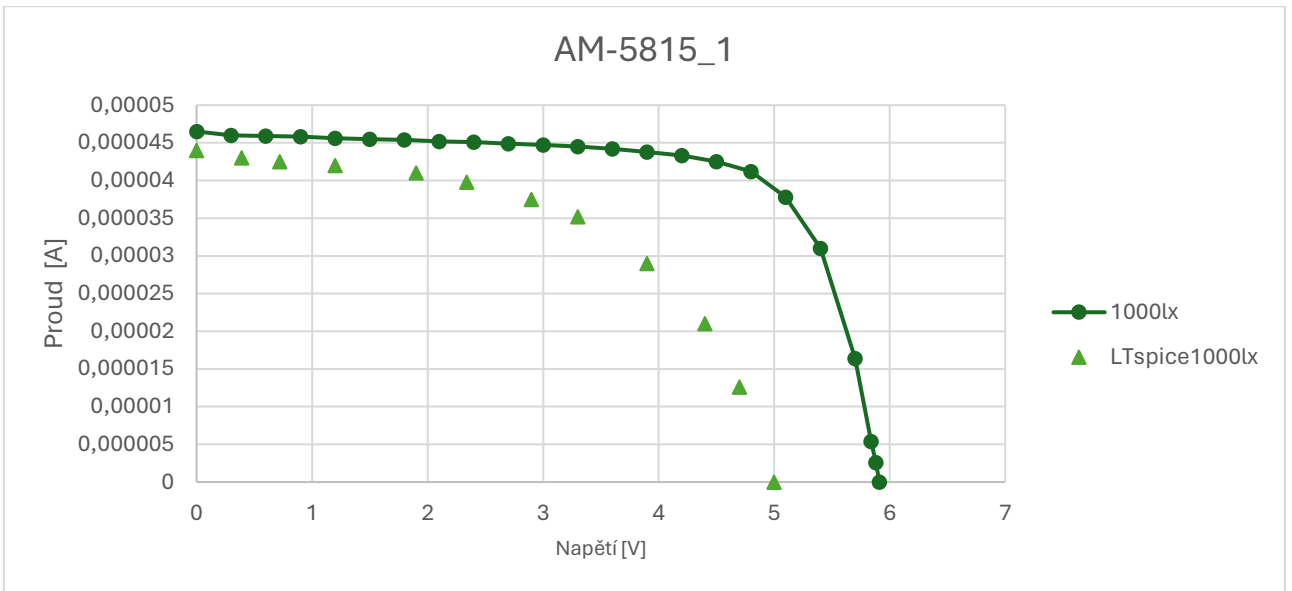
```
***** parameters of the model*****
```

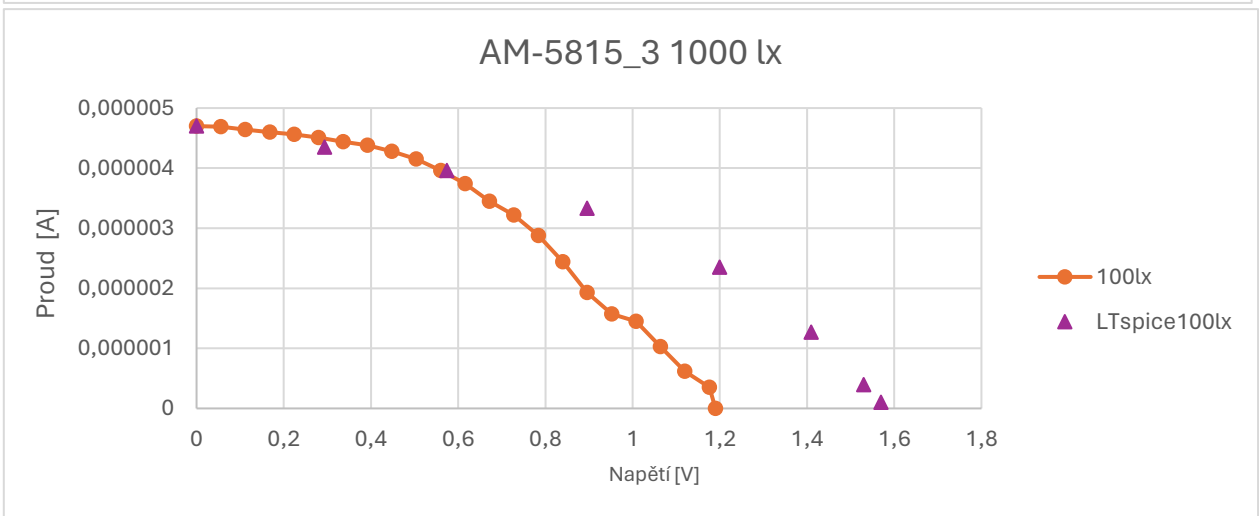
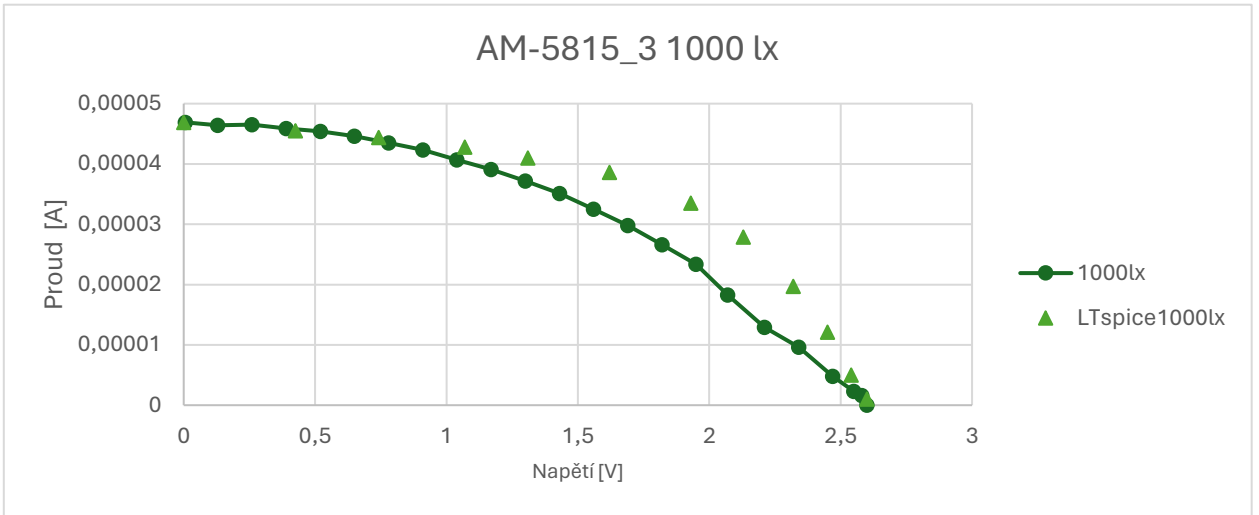
```
.param KLI=0.00000004688889 Parameter for setting Iinlx current  
.param qLI=0.00000001111111 Parameter for setting Iinlx current  
.param Ispv=0.0000000685298 Saturation current of the diode  
.param npv=15.7984 Ideality factor of the diode  
.param KRP=14.1955Meg Parameter for setting Rp  
.param q=-0.532362665 Parameter for setting Rp  
.param Rspv=1 Parameter Rs
```

```
*****Model of the diode*****
```

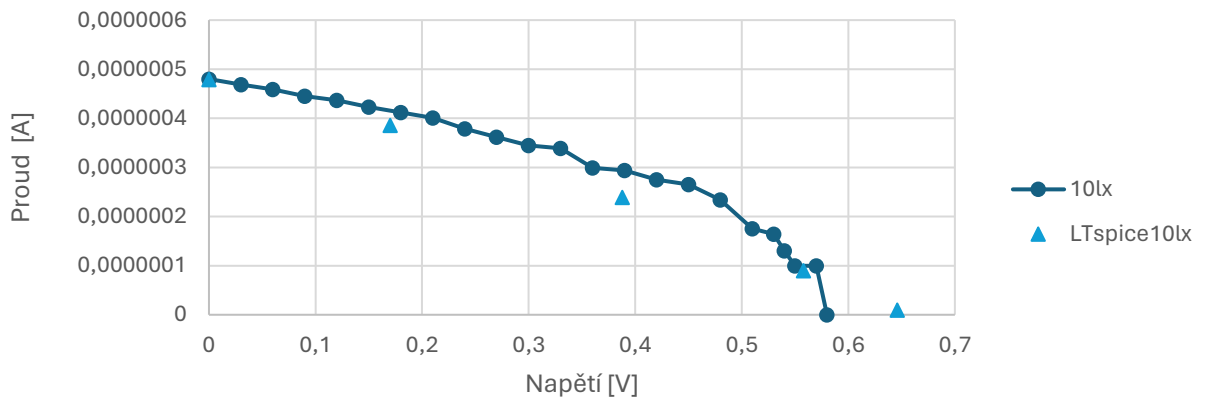
```
.model PVmodel D(Is={Ispv} n={npv})Model of the diode
```

Náhradní model panelu AM-5815CAR-AS_3 v LTspice





AM-5815_3 10 lx

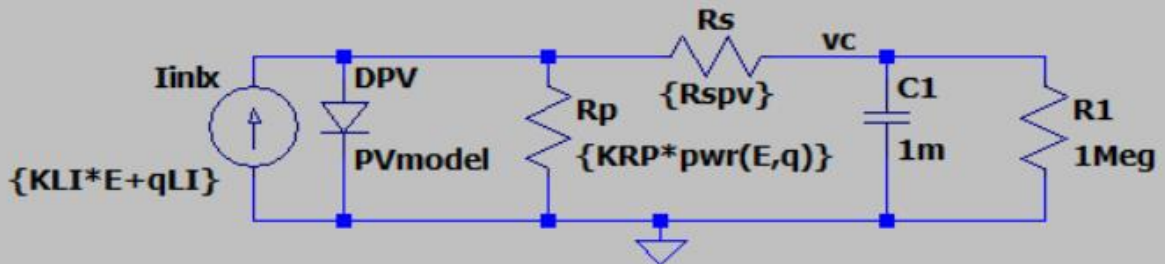


```
.ic v(vc)=0
```

```
.tran 500
```

```
*****User parameter*****
```

```
.param E=500 illuminance applied on PV (lx)
```



```
***** parameters of the model*****
```

```
.param KLI=0.00000004450505 parameter for setting Iinx current
```

```
.param qLI=-0.00000000505051 parameter for setting Iinx current
```

```
.param Ispv=0.0000001290007 saturation current of the diode
```

```
.param npv=34.7994 Ideality factor of the diode
```

```
.param KRP=27.606Meg Parameter for setting Rp
```

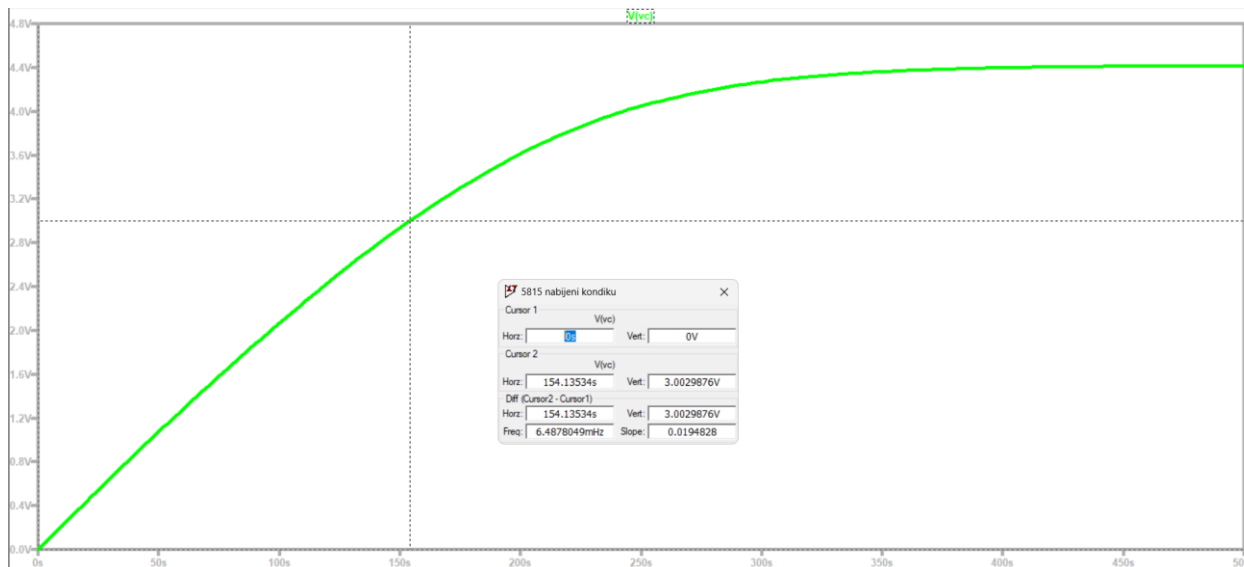
```
.param q=-0.17 Parameter for setting Rp
```

```
.param Rspv=1 Parameter Rs
```

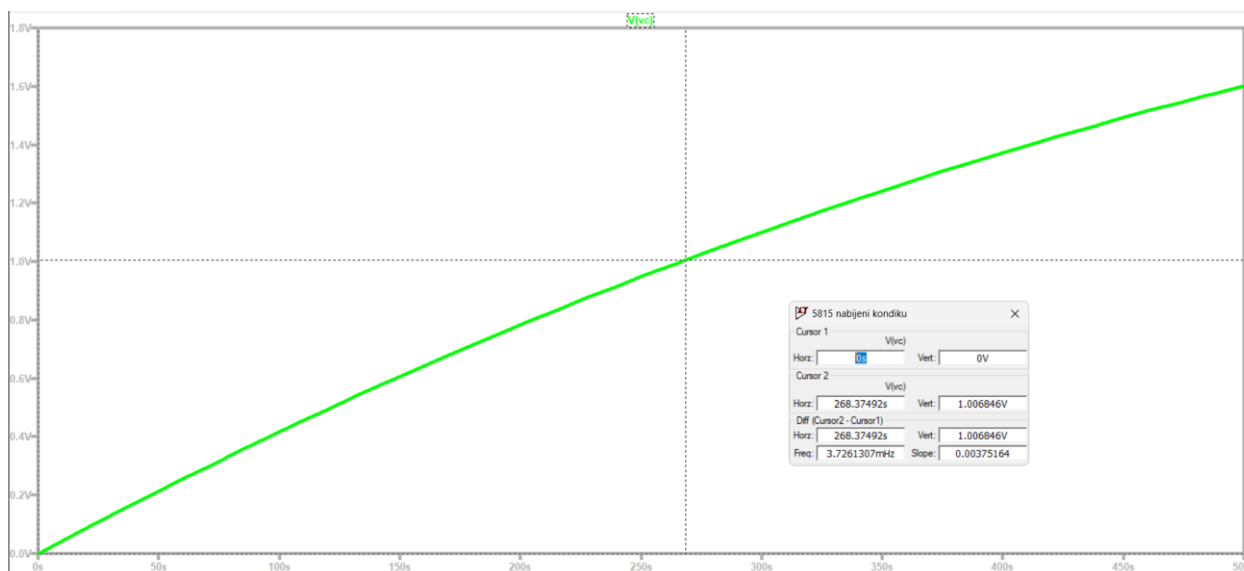
```
*****Model of the diode*****
```

```
.model PVmodel D(Is={Ispv} n={npv}) Model of the diode
```

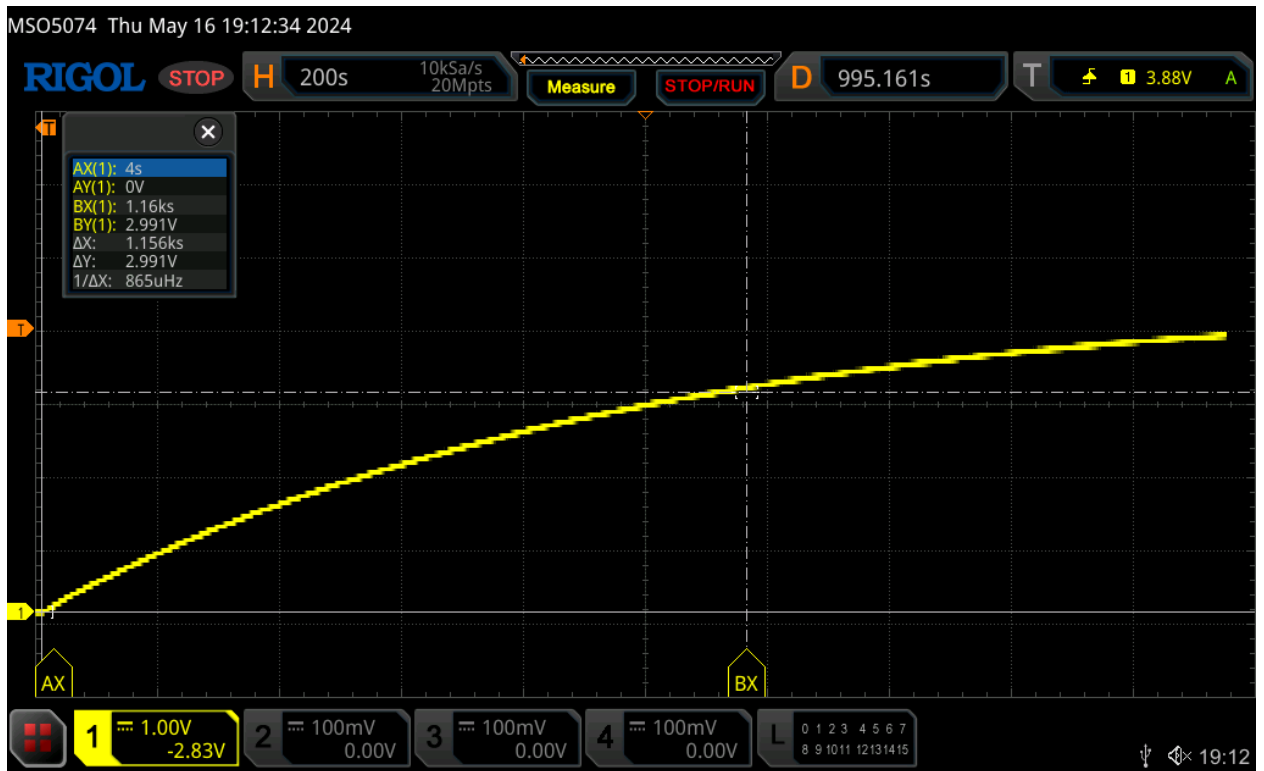
Náhradní obvod v programu LT Spice panel AM-5815CAR-AS_1



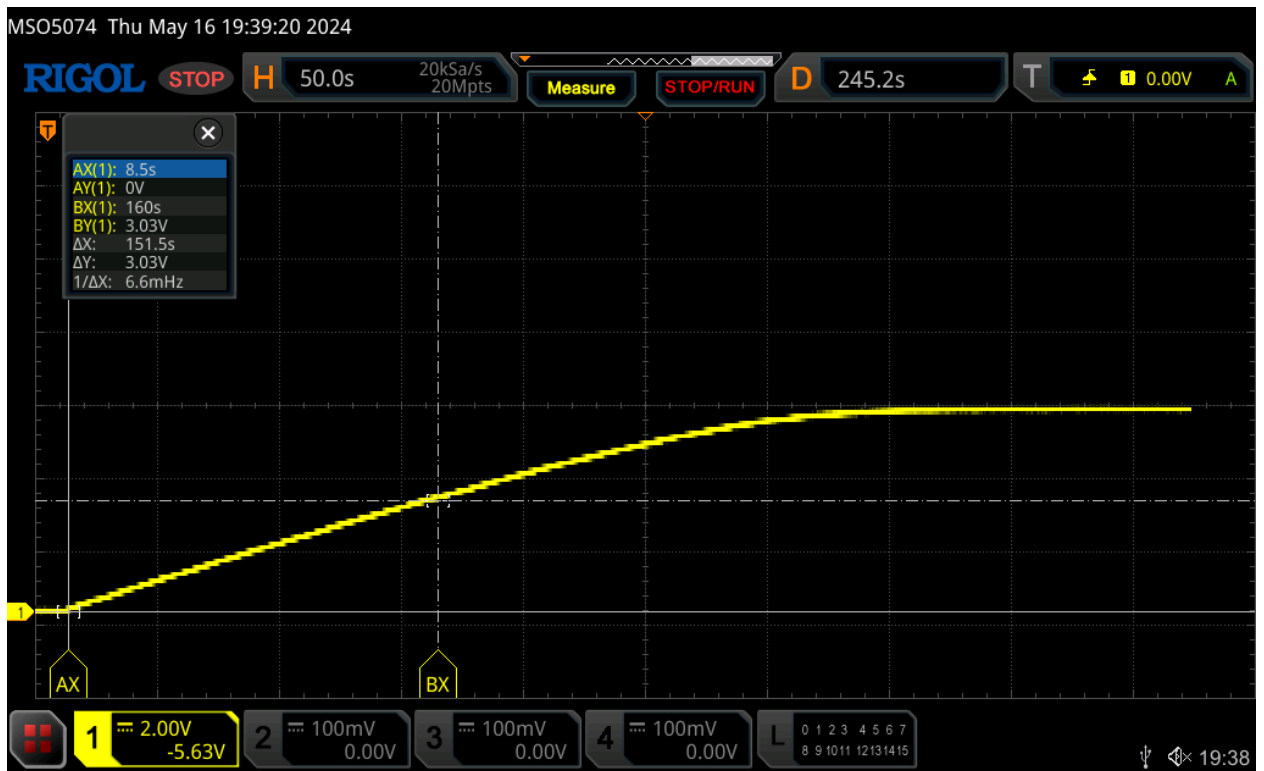
Simulace v LT Spice pro 500 lx panel AM-5706CAR-AS



Simulace v LT Spice pro 100 lx panel AM-5815CAR-AS



Naměřená data pomocí multimetru pro hodnotu 100 lx panel AM-5815CAR-AS



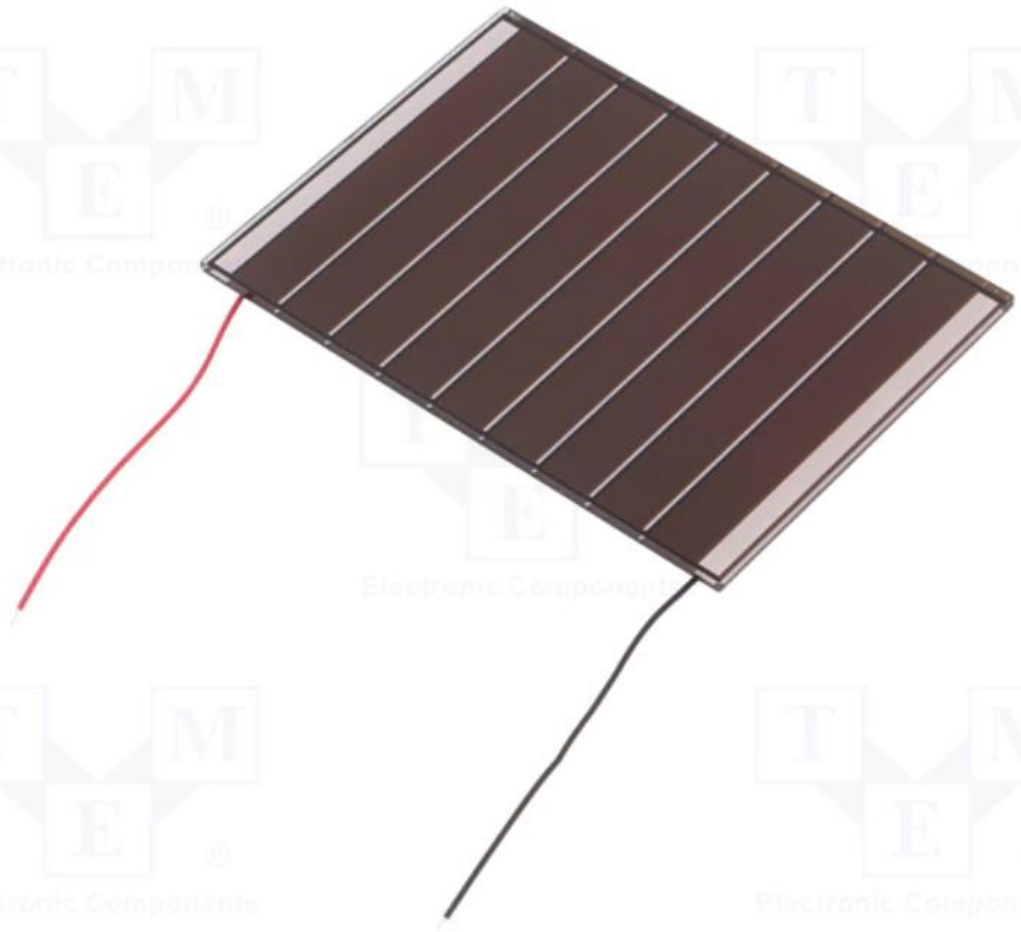
Naměřená data pomocí multimetru pro hodnotu 500 lx panel AM-5815CAR-AS



Příloha C

AM-5907CAR

AM-5907CAR

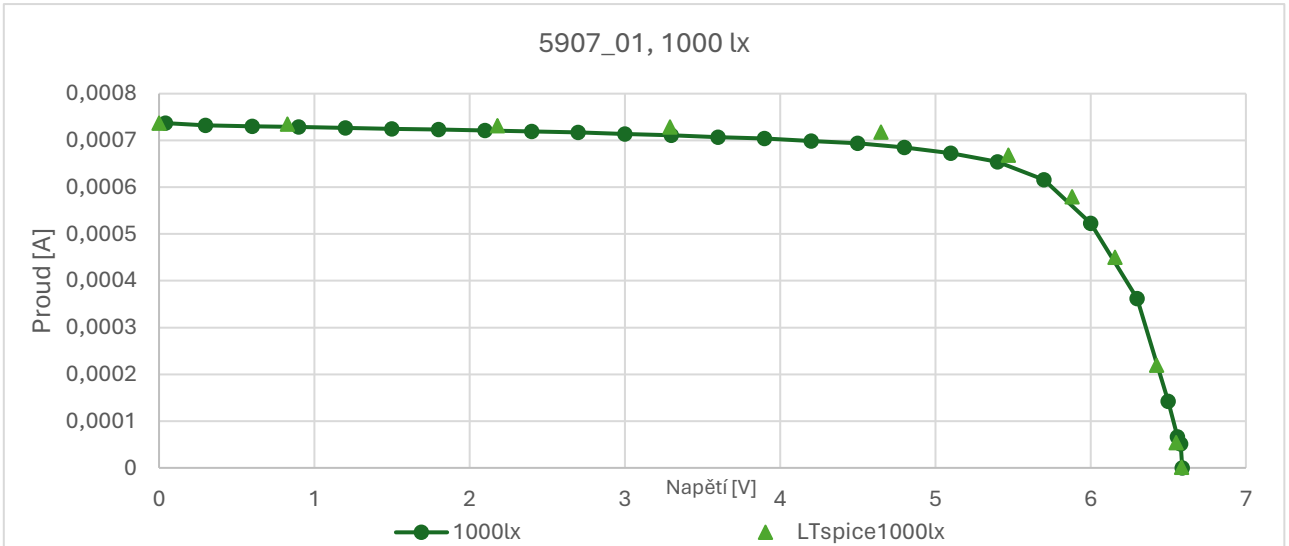
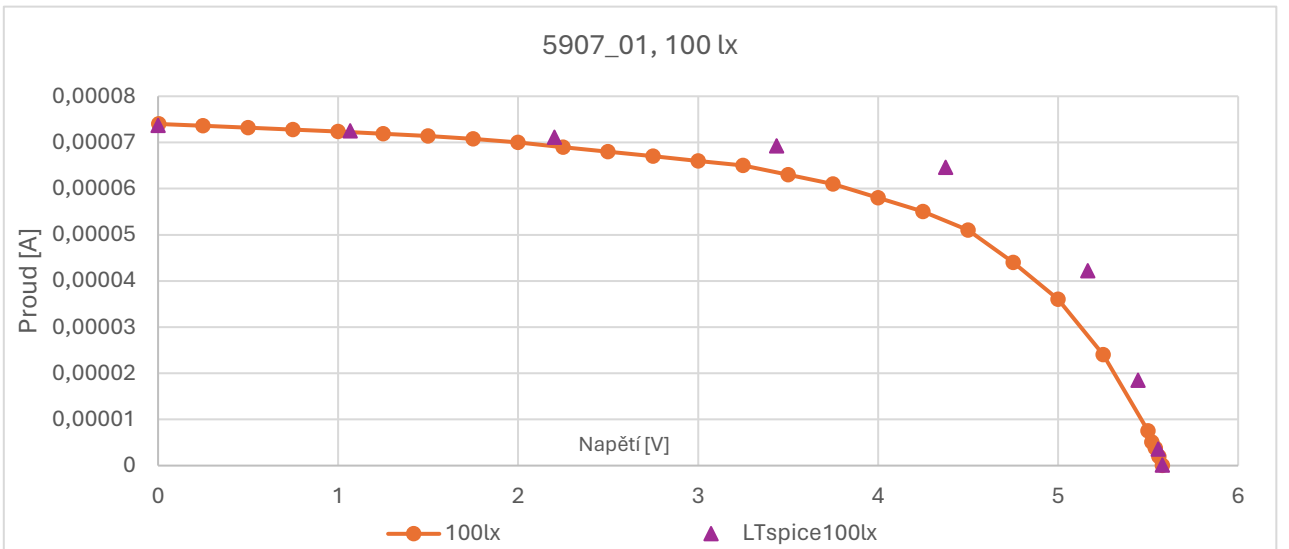
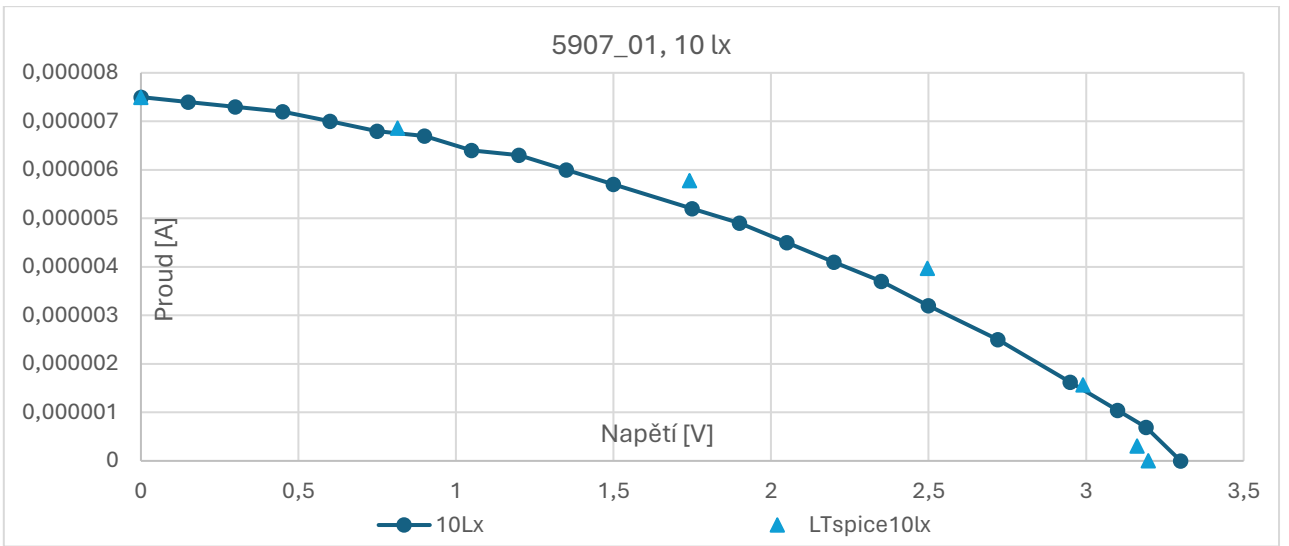


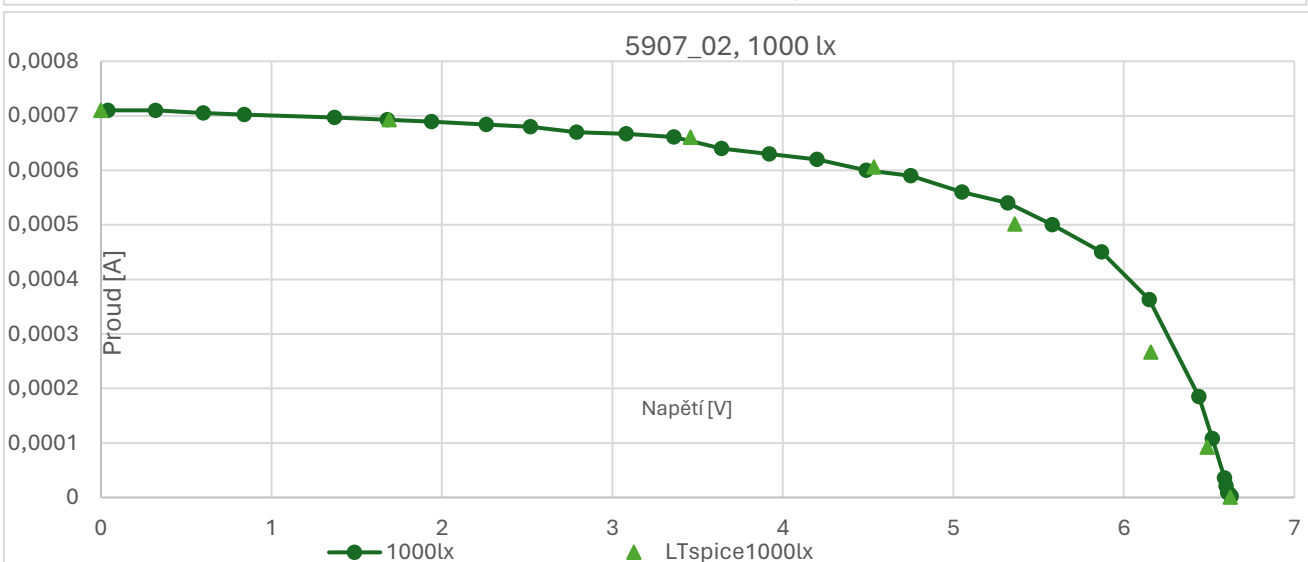
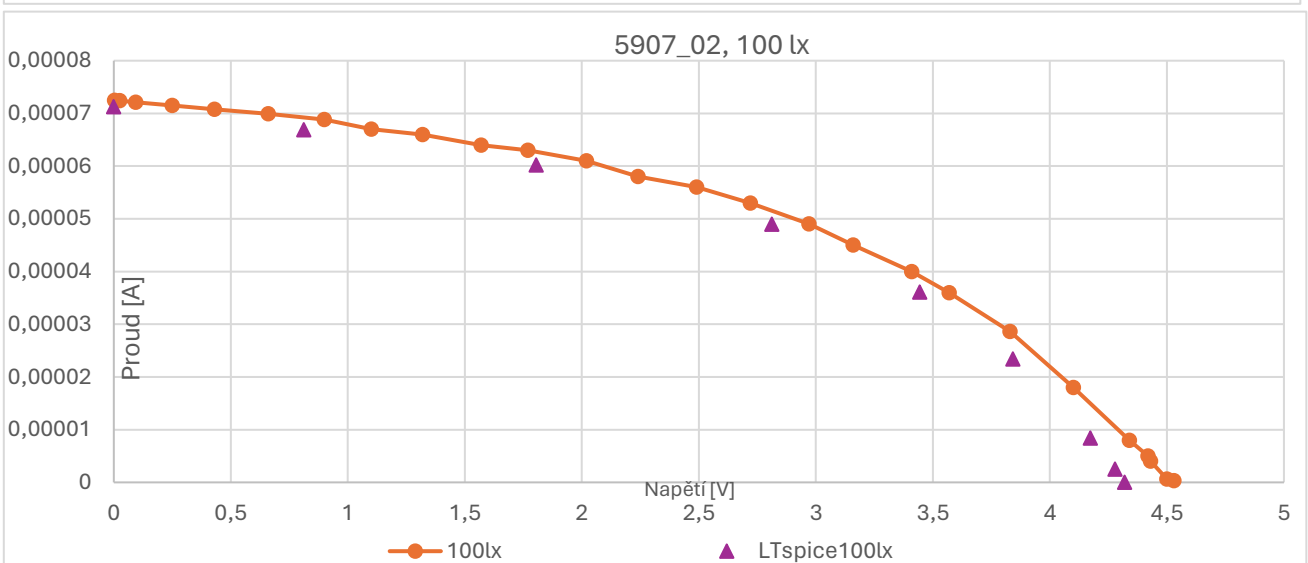
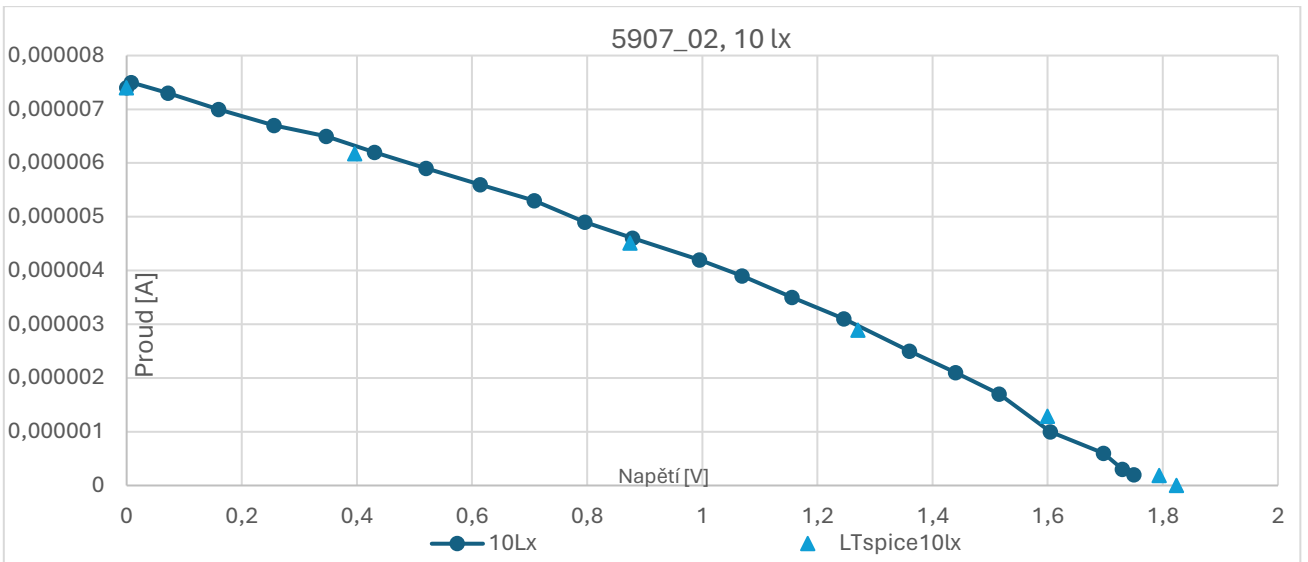
SPECIFICATION

Manufacturer	PANASONIC
Type of photovoltaic element	photovoltaic cell
Application	outdoor, photovoltaics
Body dimensions	75x55x1.8mm
Maximum power	228.5mW
Current at max. power	45.7mA
Open circuit voltage	5.9V
Operating voltage	5V DC
Manufacturer series	Amorton
Net weight	18.3g

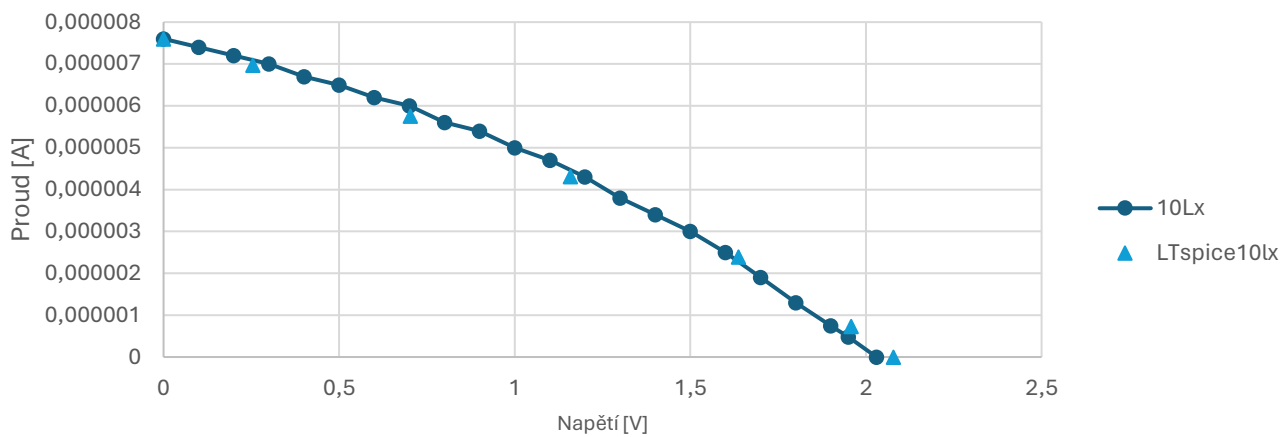
5907_1										5907_2									
E (lx)	Isc (A)	Voc (V)	S _{sc} (A/V)	S _{oc} (A/V)	P _{max} (W)	V _{pm} (V)	R _{rev} (Ω)	R _θ (°C)	KLI (A/lx)	αLI (A/lx)	I _{SPV} (A)	n _{pv} (-)	KRP (Mohm)	α (-)	R _{θPV} (°C)				
10	7.5E-06	3.2	-0.0000006296	-6.36E-06	9.3E-06	1.9	1588235	1888112	7.36869E-07	1.31313E-07	1.30E-10	1.64E+01	3.9590079335	-0.3215586	3.66E+01				
100	7.4E-05	5.68	-0.00000113	-6.94E-05	0.00023	4.25	769230.8	833333	7.36869E-07	1.31313E-07	5.49E-06	2.68E+01	3.9590079335	-0.3215586	-3.30E+02				
1000	0.00074	6.59	-0.000002426	-0.001632653	0.00353	5.4	411764.7	429448	Výsledek ověřen tím, pro jaké hodnoty osvětlení je to počítáno						Nemůže být záporná hodnota - vliv chyby měření na výpočet I _{SPV} . Nahradím hodnotou 1 Ohm				
5907_2										5907_3									
E (lx)	Isc (A)	Voc (V)	S _{sc} (A/V)	S _{oc} (A/V)	P _{max} (W)	V _{pm} (V)	R _{rev} (Ω)	R _θ (°C)	KLI (A/lx)	αLI (A/lx)	I _{SPV} (A)	n _{pv} (-)	KRP (Mohm)	α (-)	R _{θPV} (°C)				
10	7.4E-06	1.75	-0.0000024667	-7.37E-06	4.2E-06	0.995	405399.9	422529	0.00000070969697	0.00000030303030	0.0000004517394	-35.1797	0.7994	-0.276906	-1.21E+02				
100	7.3E-05	4.53	-4.5833E-06	-4.33E-05	0.00015	2.97	218183.4	223050	Výsledek ověřen tím, pro jaké hodnoty osvětlení je to počítáno						Nemůže být záporná hodnota - vliv chyby měření na výpočet I _{SPV} . Nahradím				
1000	0.00071	6.63	-0.000008571	-0.000860215	0.00287	5.32	116667.1	118044	Výsledek ověřen tím, pro jaké hodnoty osvětlení je to počítáno						Nemůže být záporná hodnota - vliv chyby měření na výpočet I _{SPV} . Nahradím				
5907_3										5907_4									
E (lx)	Isc (A)	Voc (V)	S _{sc} (A/V)	S _{oc} (A/V)	P _{max} (W)	V _{pm} (V)	R _{rev} (Ω)	R _θ (°C)	KLI (A/lx)	αLI (A/lx)	I _{SPV} (A)	n _{pv} (-)	KRP (Mohm)	α (-)	R _{θPV} (°C)				
10	7.8E-06	2.03	-0.0000020333	-6.50E-06	5.2E-06	1.1	491803.3	517241	0.00000073777778	0.00000022222222	0.0000003225595	32.9834	1.3617	-0.420399	92.450889644				
100	7.5E-05	4.89	-0.00000276	-6.80E-05	0.00016	3	352318.8	375940	Výsledek ověřen tím, pro jaké hodnoty osvětlení je to počítáno						Nemůže být záporná hodnota - vliv chyby měření na výpočet I _{SPV} . Nahradím				
1000	0.00074	6.5	-0.000013500	-0.0008	0.00287	4.9	74074.07	74626.9	Výsledek ověřen tím, pro jaké hodnoty osvětlení je to počítáno						Nemůže být záporná hodnota - vliv chyby měření na výpočet I _{SPV} . Nahradím				

Přepočítané hodnoty z křivky V-A charakteristiky pro panel AM-5907CAR-AS. (vpravo)
 Hodnoty pro náhradní model LTspice pro panel AM-5907CAR-AS. (vlevo)

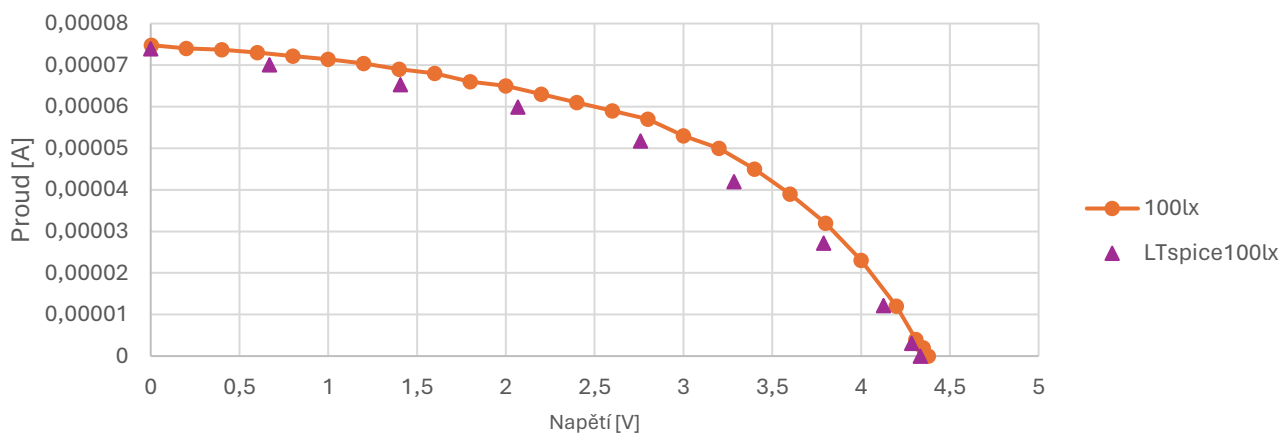




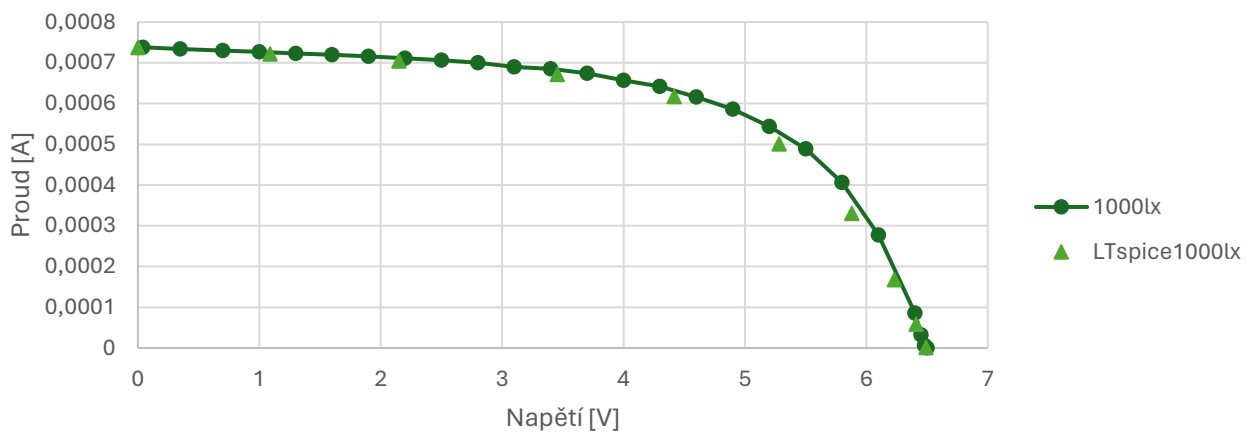
5907_03, 10 lx



5907_03, 100 lx



5907_03, 1000 lx

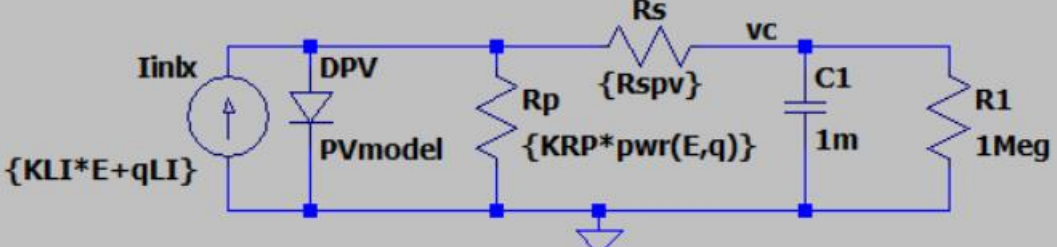


```

.ic v(vc)=0

.tran 100
*****User parameter*****
.param E=100    illuminance applied on PV (lx)

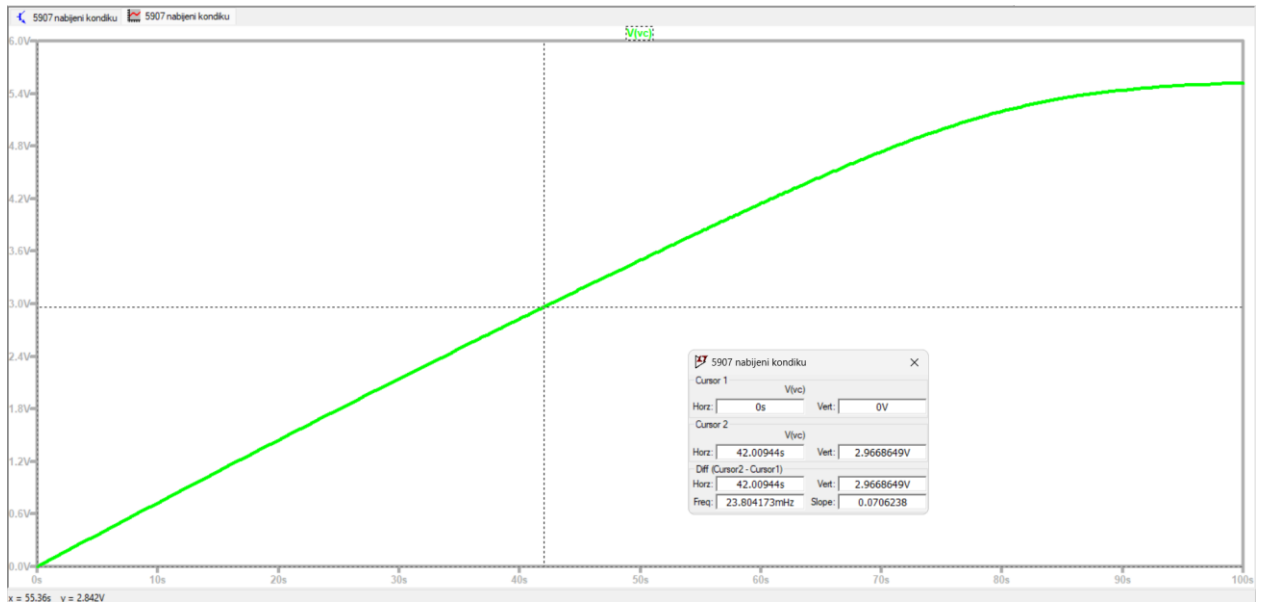
    
```



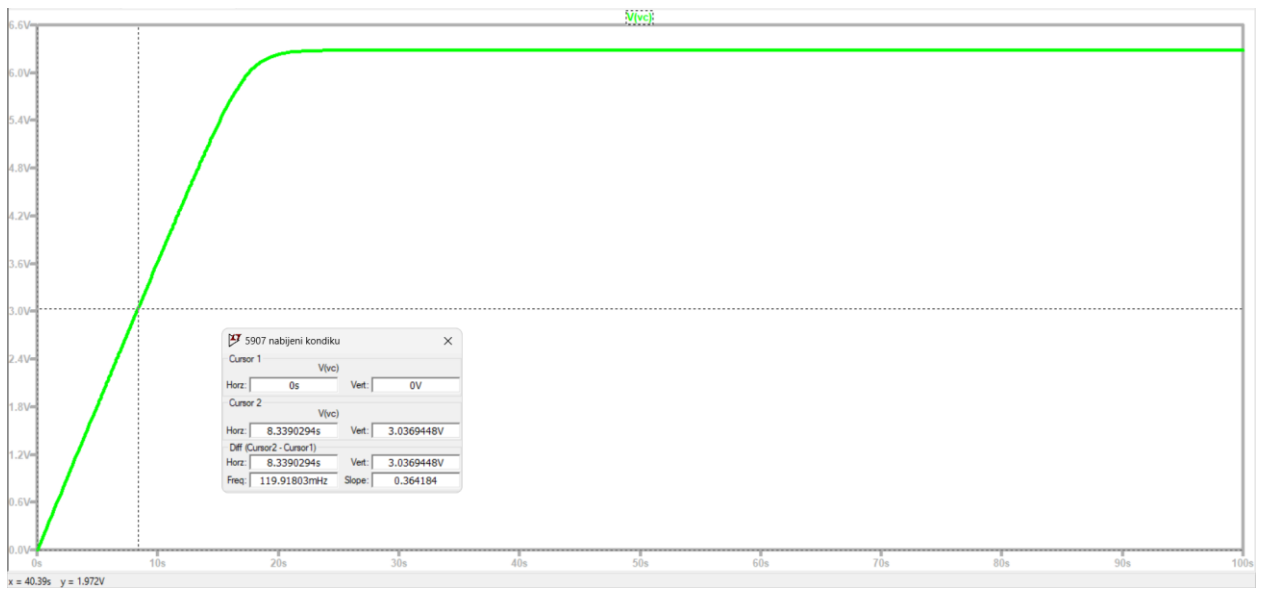
```

***** parameters of the model*****
.param KLI=7.36869E-07  Parameter for setting Inlx current
.param qLI=1.31313E-07  Parameter for setting Inlx current
.param Ispv=1.30E-10    Saturation current of the diode
.param npv=1.64E+01     Ideality factor of the diode
.param KRP=3.959Meg     Parameter for setting Rp
.param q=-0.321         Parameter for setting Rp
.param Rspv=1           Parameter Rs
*****Model of the diode*****
.model PVmodel D(Is={Ispv} n={npv})  Model of the diode
    
```

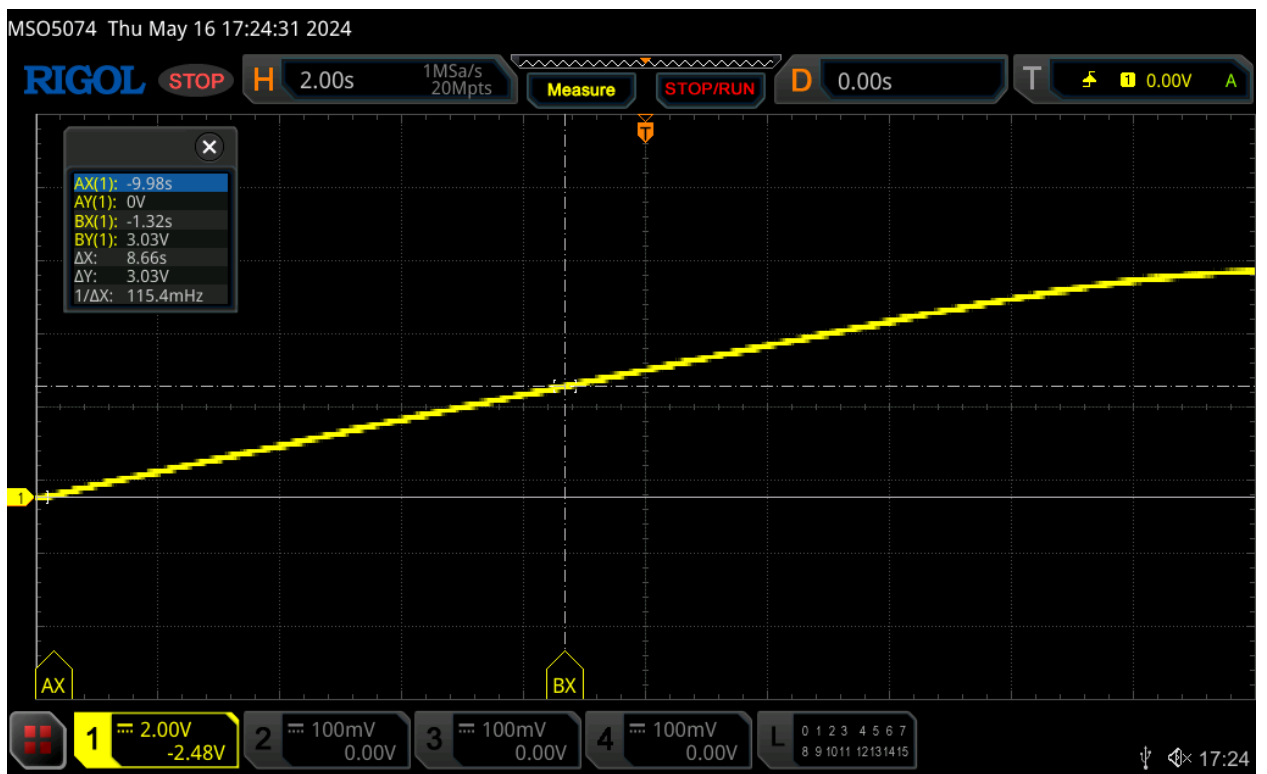
Náhradní obvod v programu LT Spice panel AM-5907CAR-AS



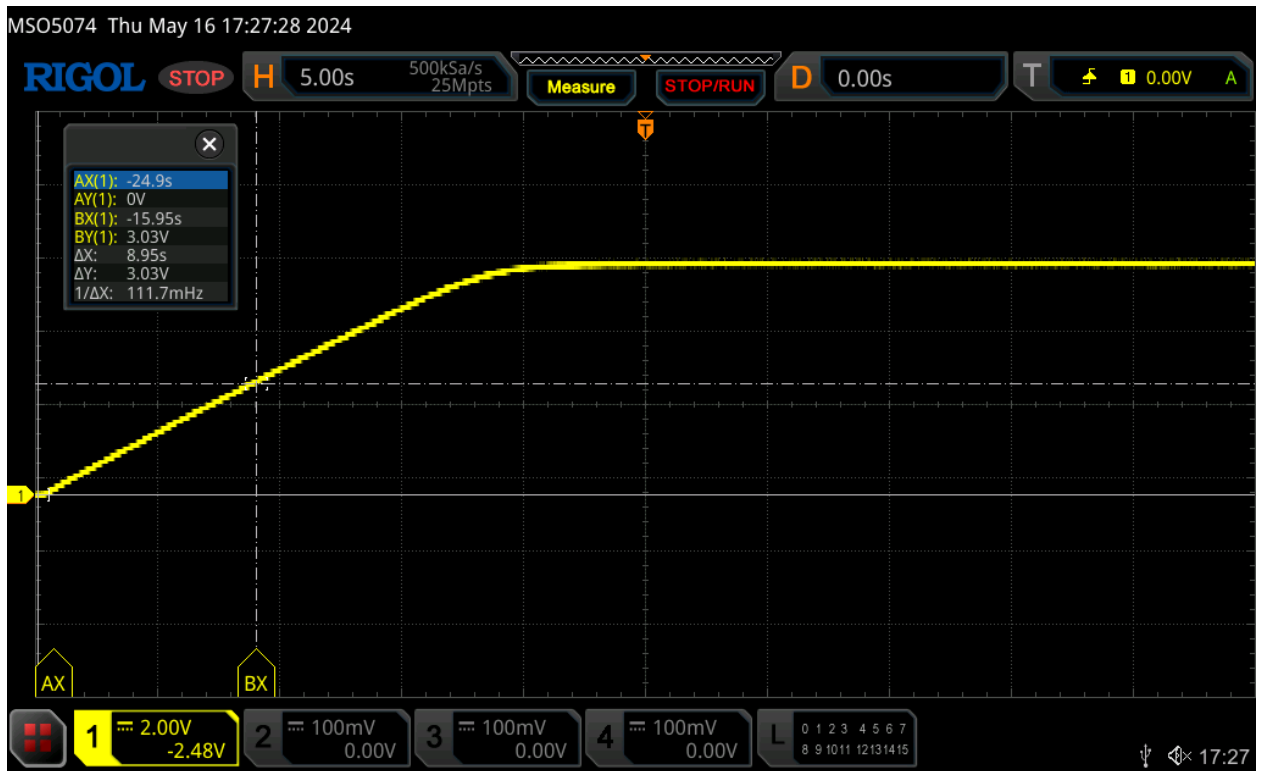
Simulace v LT Spice pro 100 lx panel AM-5907CAR-AS



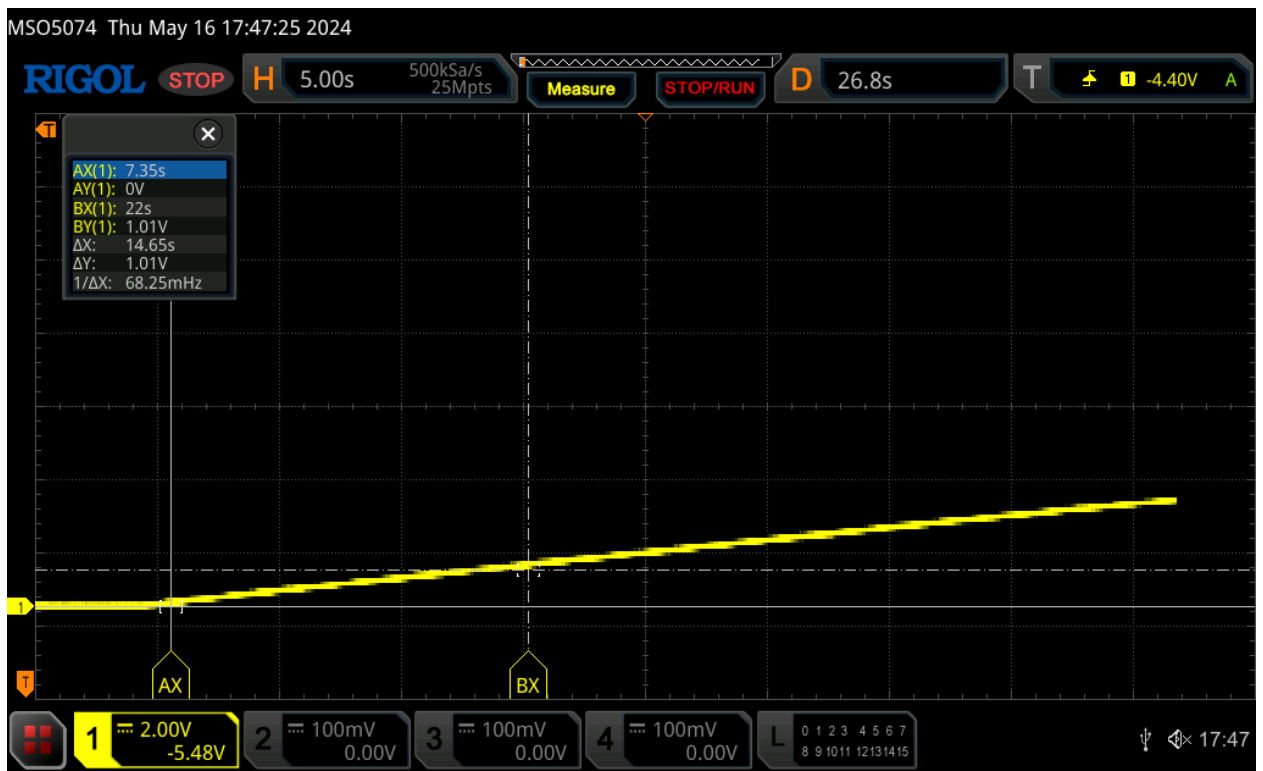
Simulace v LT Spice pro 500 lx panel AM-5907CAR-AS



Naměřená data pomocí multimetru pro hodnotu 500 lx panel AM-5907CAR-AS



Naměřená data pomocí multimetru pro hodnotu 500 lx panel AM-5907CAR-AS



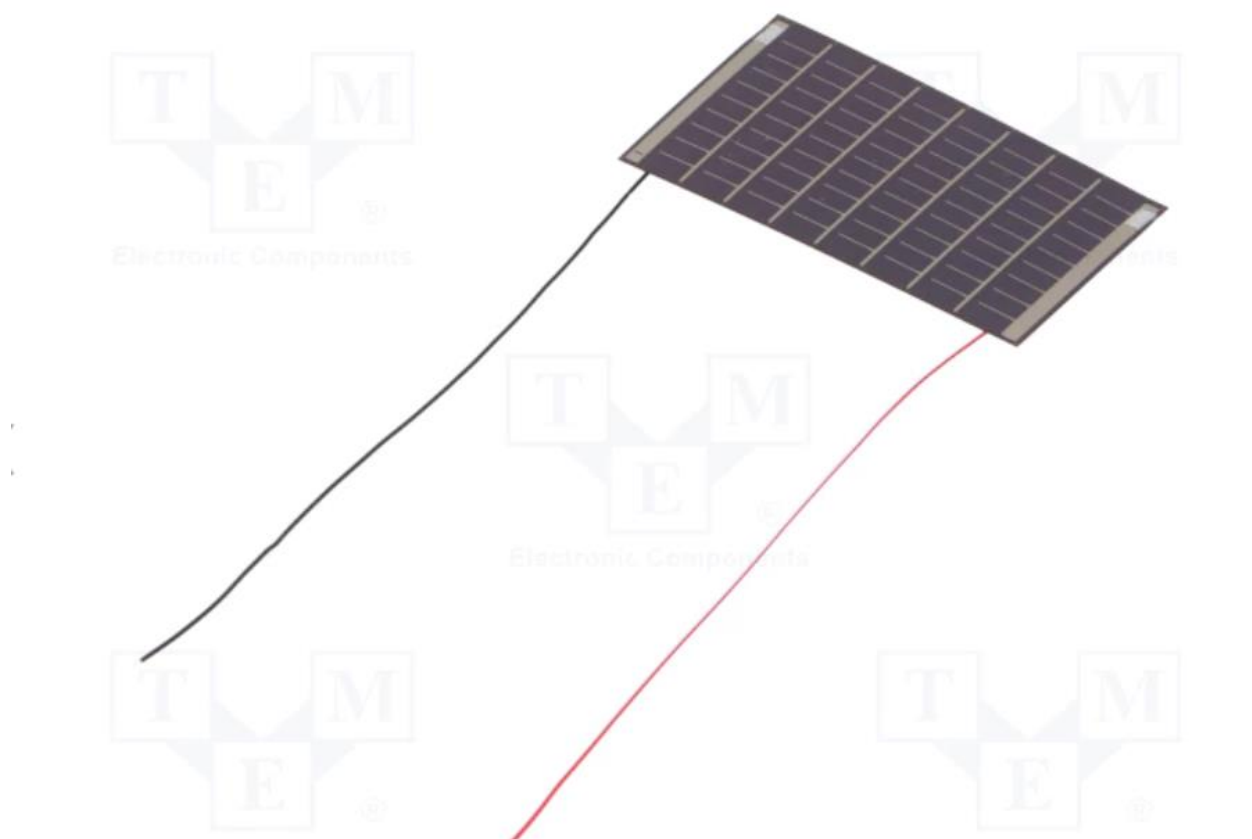
Naměřená data pomocí multimetru pro hodnotu 100 lx panel AM-5907CAR-AS



Příloha D

AT-7802A

AT-7802A



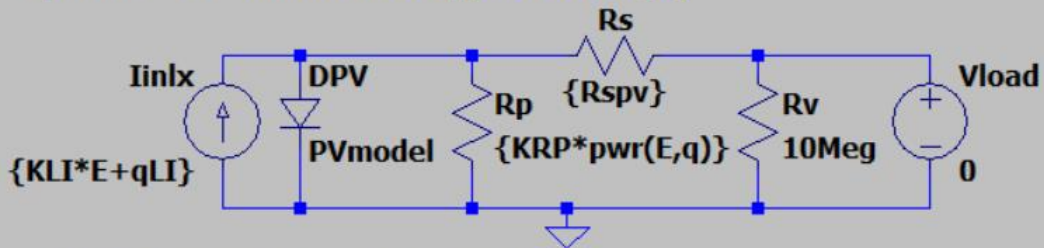
SPECIFIKACE

Výrobce	PANASONIC
Typ fotovoltaického článku	fotovoltaický článek
Použití	pro vnější prostředí
Vnější rozměry	73x42x0,3mm
Maximální výkon	118,8mW
Proud při max. výkonu	29,7μA
Jmenovité napětí	4,8V
Pracovní napětí	4V DC
Řada výrobce	Amorton
Hmotnost netto	4g

.dc Vload 0 10 0.001DC analysis for loading IV characteristics

*****User parameter*****

.param E=10 illuminance applied on PV (lx)



***** parameters of the model*****

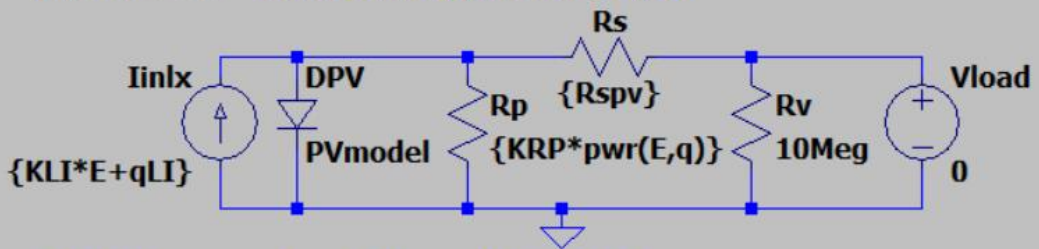
.param KLI=0.00000052767677 Parameter for setting Iinlx current
 .param qLI=0.00000032323232 Parameter for setting Iinlx current
 .param Ispv=0.0000001426878 Saturation current of the diode
 .param npv=28.1191 Ideality factor of the diode
 .param KRP=0.9533Meg Parameter for setting Rp
 .param q=-0.257983375 Parameter for setting Rp
 .param Rspv=54 Parameter Rs
 *****Model of the diode*****
 .model PVmodel D(Is={Ispv} n={npv})Model of the diode

Náhradní obvod v programu LT Spice panel AT-7802A_1

.dc Vload 0 10 0.001DC analysis for loading IV characteristics

*****User parameter*****

.param E=10 illuminance applied on PV (lx)



***** parameters of the model*****

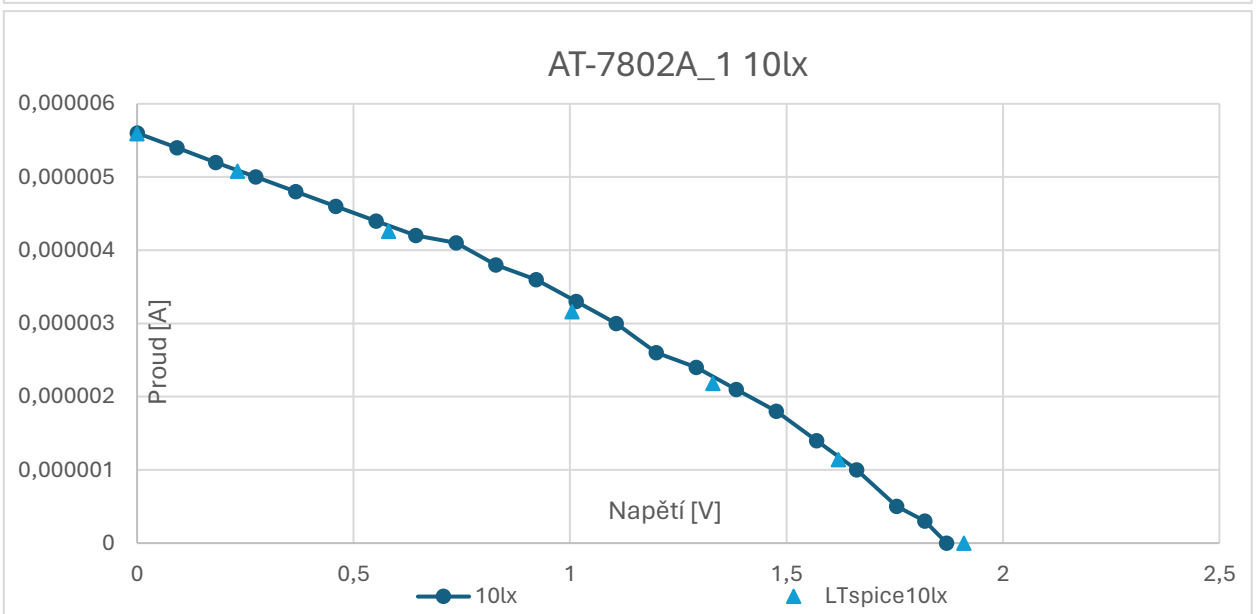
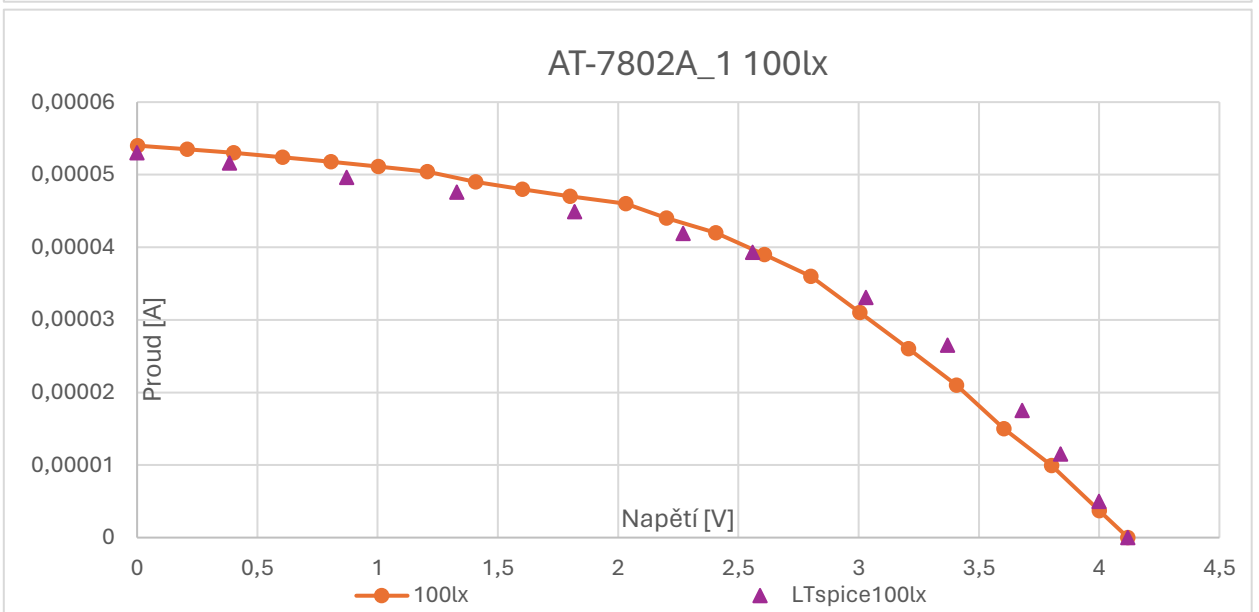
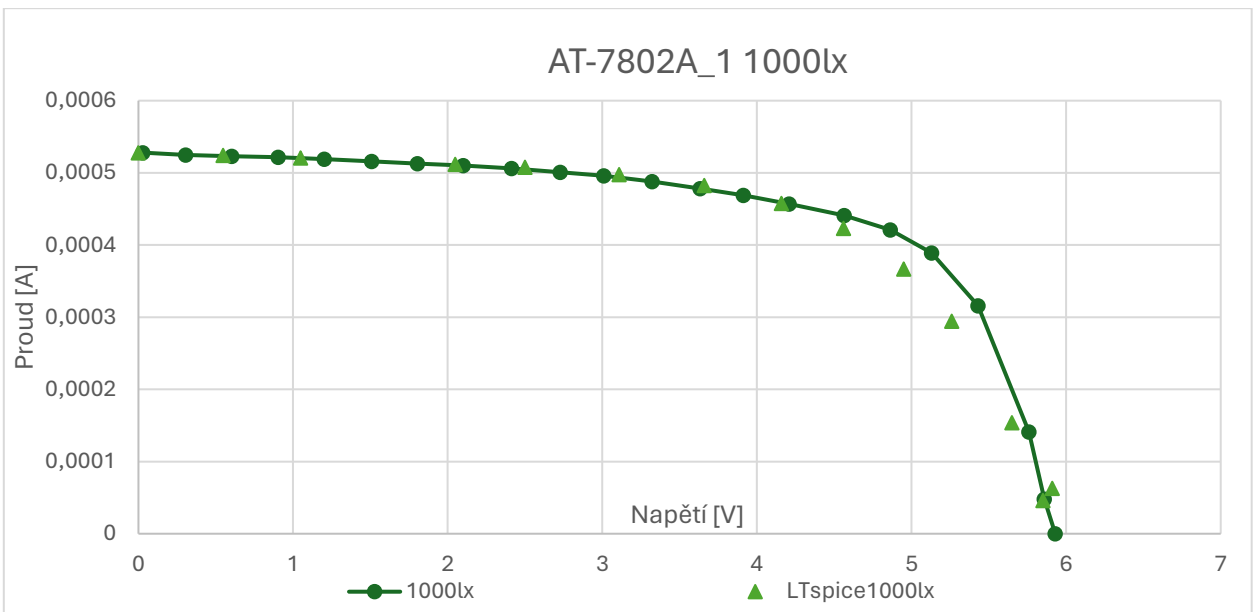
.param KLI=0,00000051666667 Parameter for setting Iinlx current
 .param qLI=0,00000033333333 Parameter for setting Iinlx current
 .param Ispv=0.0000001483772 Saturation current of the diode
 .param npv=28.2860 Ideality factor of the diode
 .param KRP=0.2679Meg Parameter for setting Rp
 .param q=-0.118213474 Parameter for setting Rp
 .param Rspv=1 Parameter Rs
 *****Model of the diode*****
 .model PVmodel D(Is={Ispv} n={npv})Model of the diode

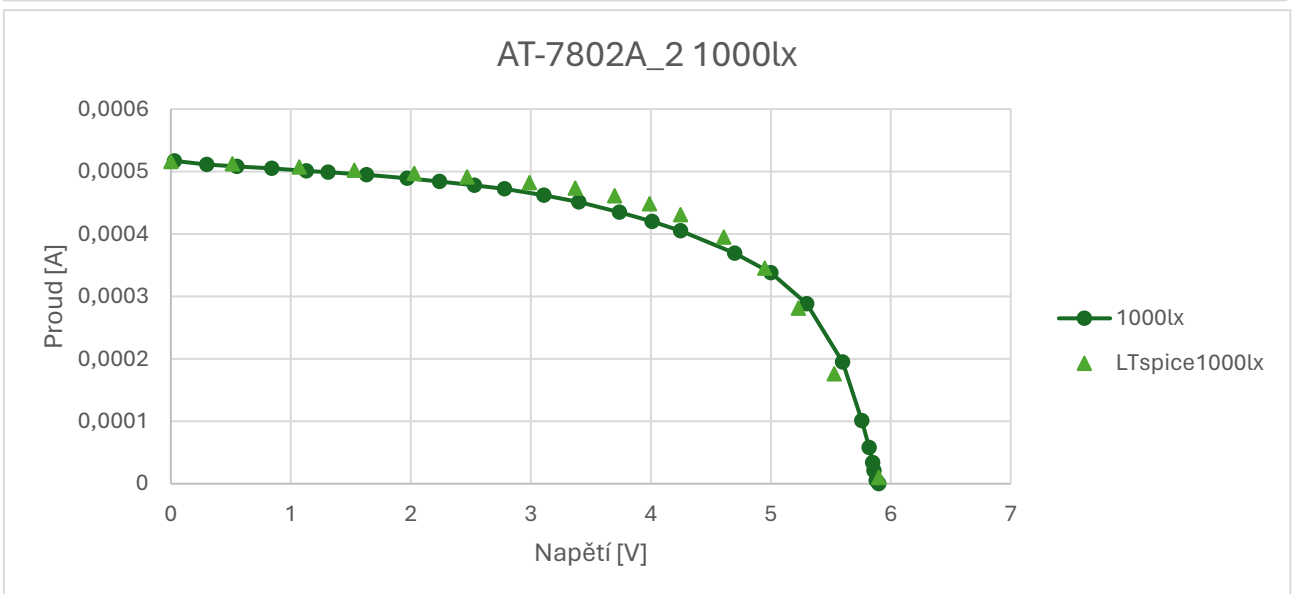
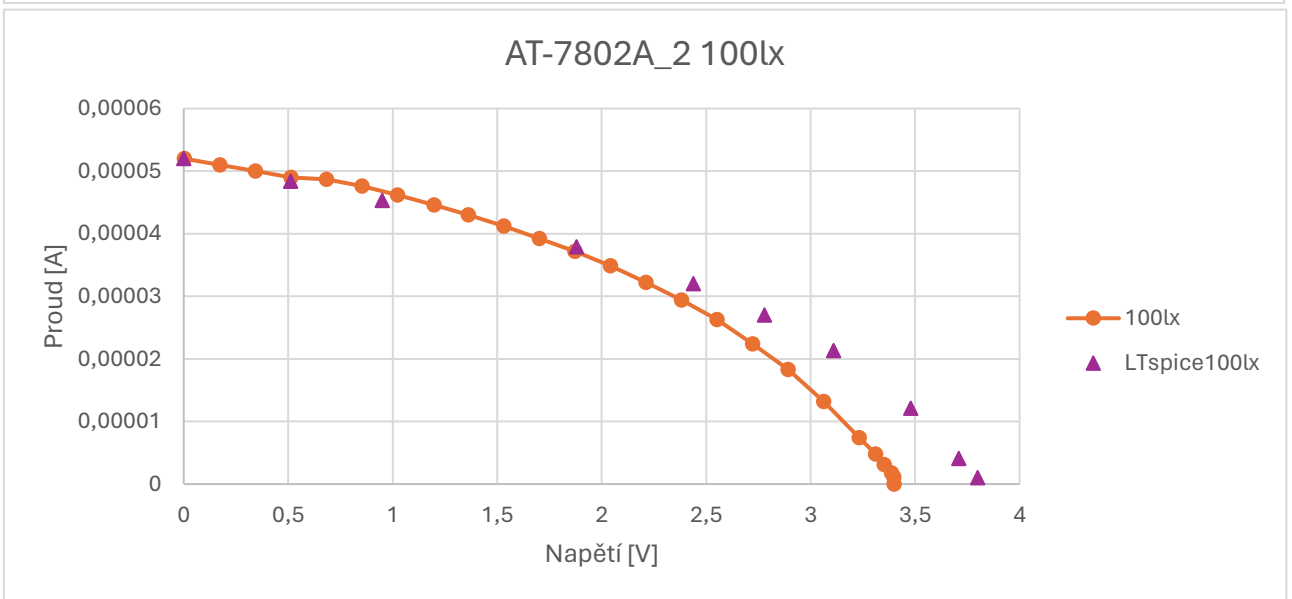
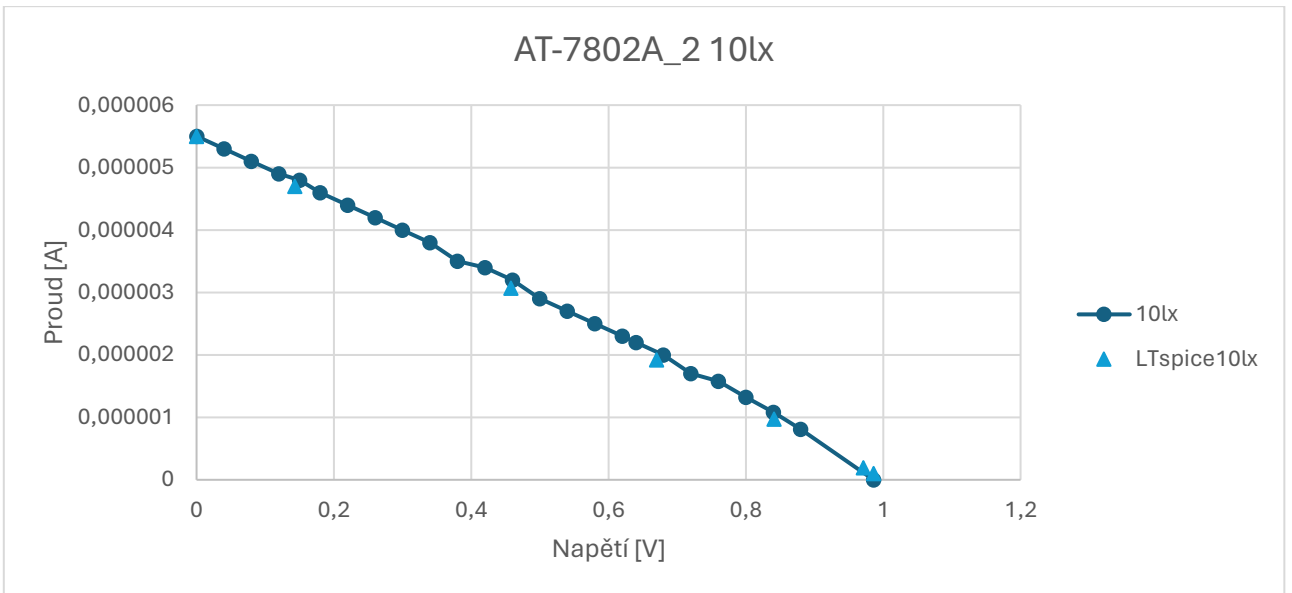
Náhradní obvod v programu LT Spice panel AT-7802A_2

AT-7802A_1									
E (lx)	Isc (A)	Voc (V)	S _{sc} (A/W)	S _{oc} (A/W)	P _{max} (W)	V _{pmax} (V)	R _{ov} (Ω)	R _p (Ω)	R _{spv} (Ω)
10	5.8E-05	1.87	-0.0000020000	-7.14289E-05	3.3E-05	1.0145	500000	526316	0.00000052767677
100	5.4E-05	4.12	-0.000000	-2.98013E-05	0.0001	2.609	333333.3	344628	0.00000032323232
1000	0.00053	5.93	-0.000008333	-0.000697674	0.00205	4.893	157694.7	160428	0.0000001426878
									28.1191
									0.9533
									-0.2579834
									54.003890475

AT-7802A_2									
E (lx)	Isc (A)	Voc (V)	S _{sc} (A/W)	S _{oc} (A/W)	P _{max} (W)	V _{pmax} (V)	R _{ov} (Ω)	R _p (Ω)	R _{spv} (Ω)
10	5.5E-05	0.986	-0.0000050000	-1.57233E-05	1.5E-05	0.54	200000	204082	0.00000051666667
100	5.2E-05	3.4	-5.3125E-06	-4.09091E-05	7.1E-05	2.043	188235.3	191847	0.00000033333333
1000	0.00052	5.9	-0.000008546	-0.00073	0.00173	4.7	117021.3	118407	0.0000001483772
									28.2860
									0.2679
									-0.1182135
									-83.701547668

Přepočítané hodnoty z křivky V-A charakteristiky pro panel AT-7802A. (vpravo)
 Hodnoty pro náhradní model LTspice pro panel AT-7802A. (vlevo)





```

.ic v(vc)=0

.tran 200
*****User parameter*****
.param E=500    illuminance applied on PV (lx)

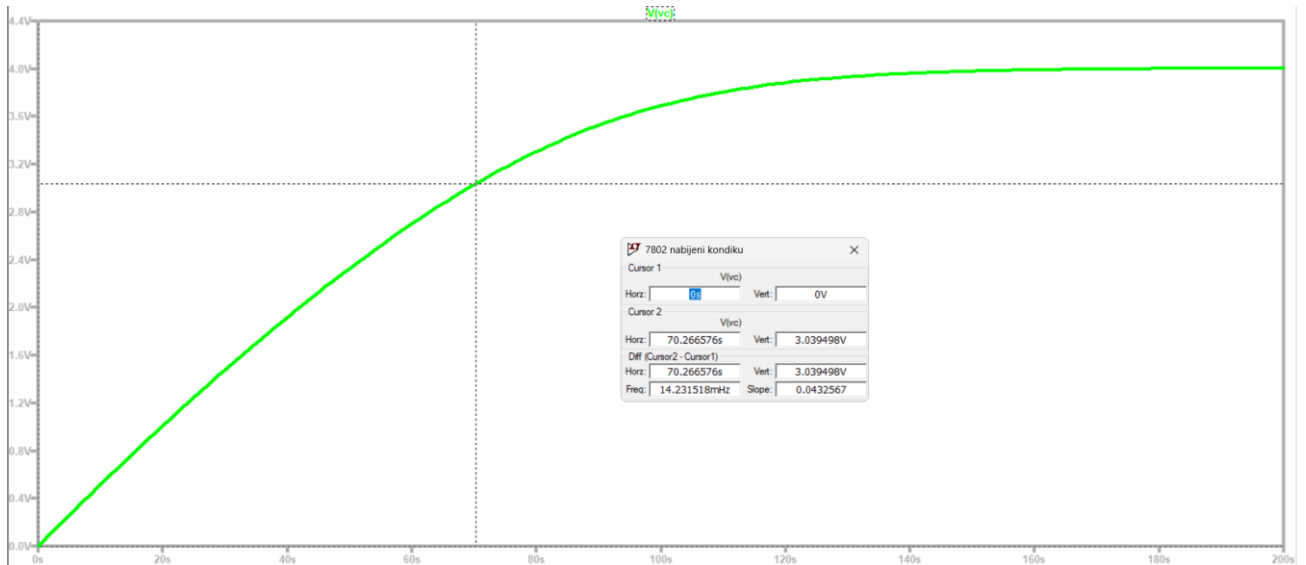
```

```

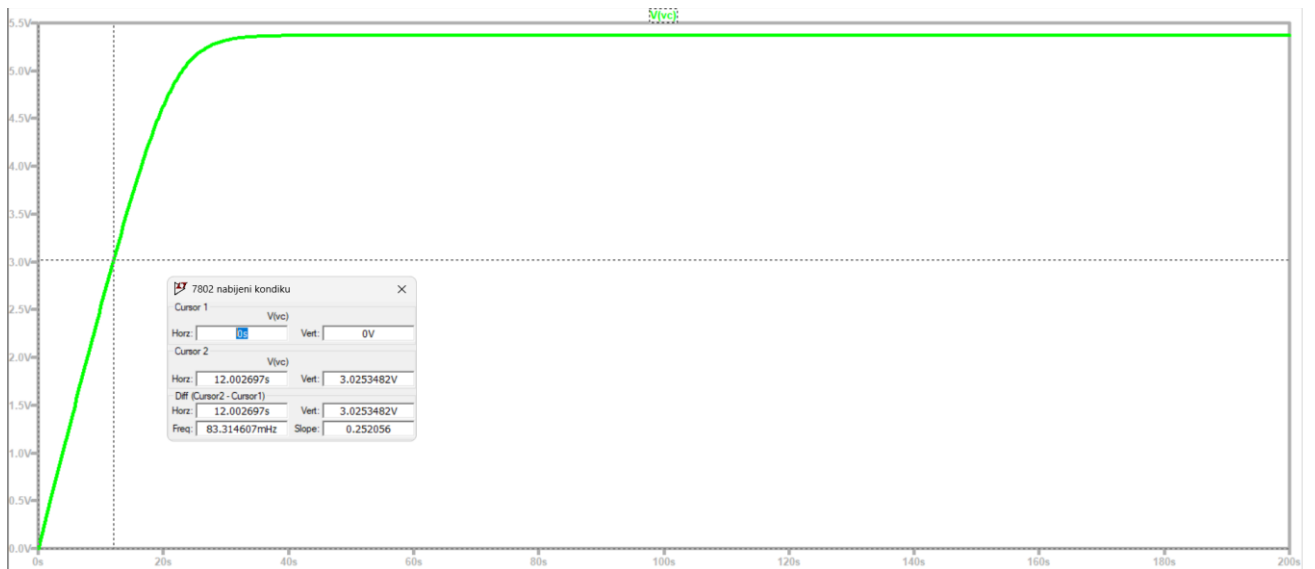
***** parameters of the model*****
.param KLI=0.000000527    Parameter for setting Iinlx current
.param qLI=0.0000003232323232    Parameter for setting Iinlx current
.param Ispv=0.000000143    Saturation current of the diode
.param npv=28.1191    Ideality factor of the diode
.param KRP=0.9533Meg    Parameter for setting Rp
.param q=-0.2579    Parameter for setting Rp
.param Rspv=54    Parameter Rs
*****Model of the diode*****
.model PVmodel D(Is={Ispv} n={npv})    Model of the diode

```

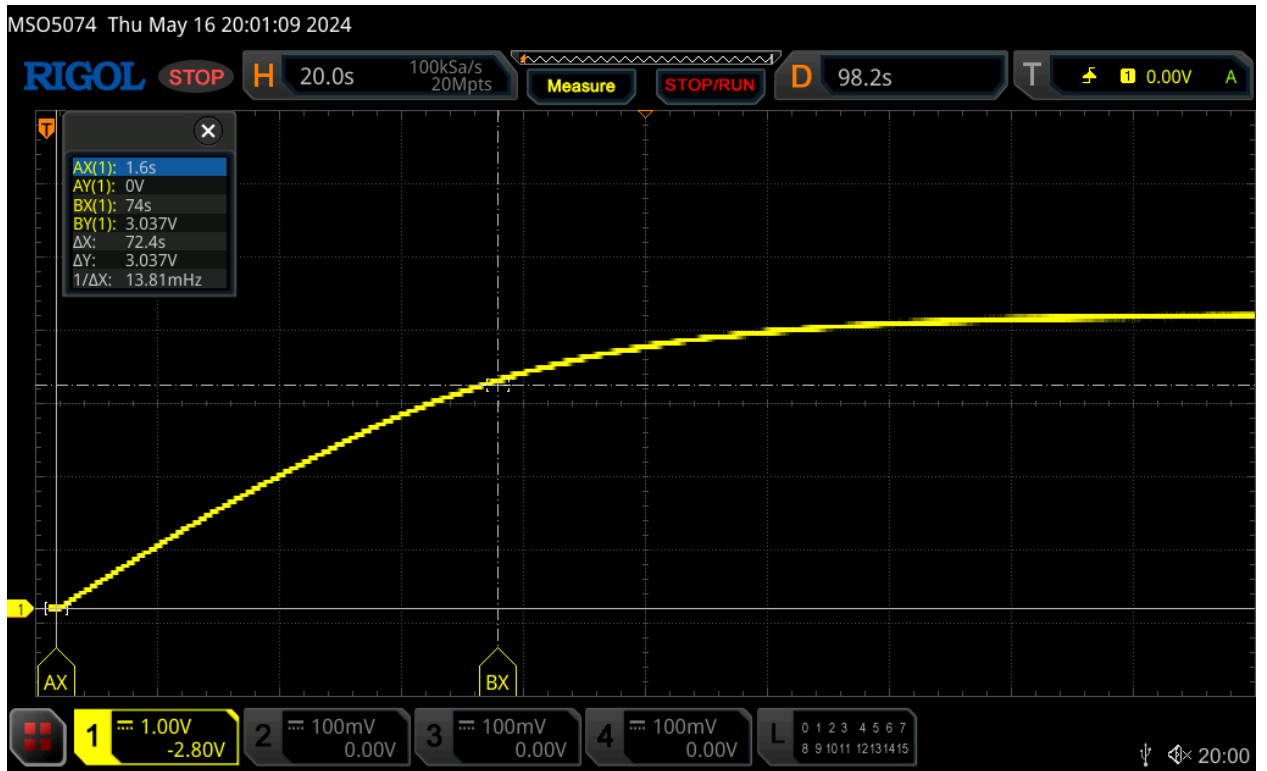
Náhradní obvod v programu LT Spice panel AT-7802A_1



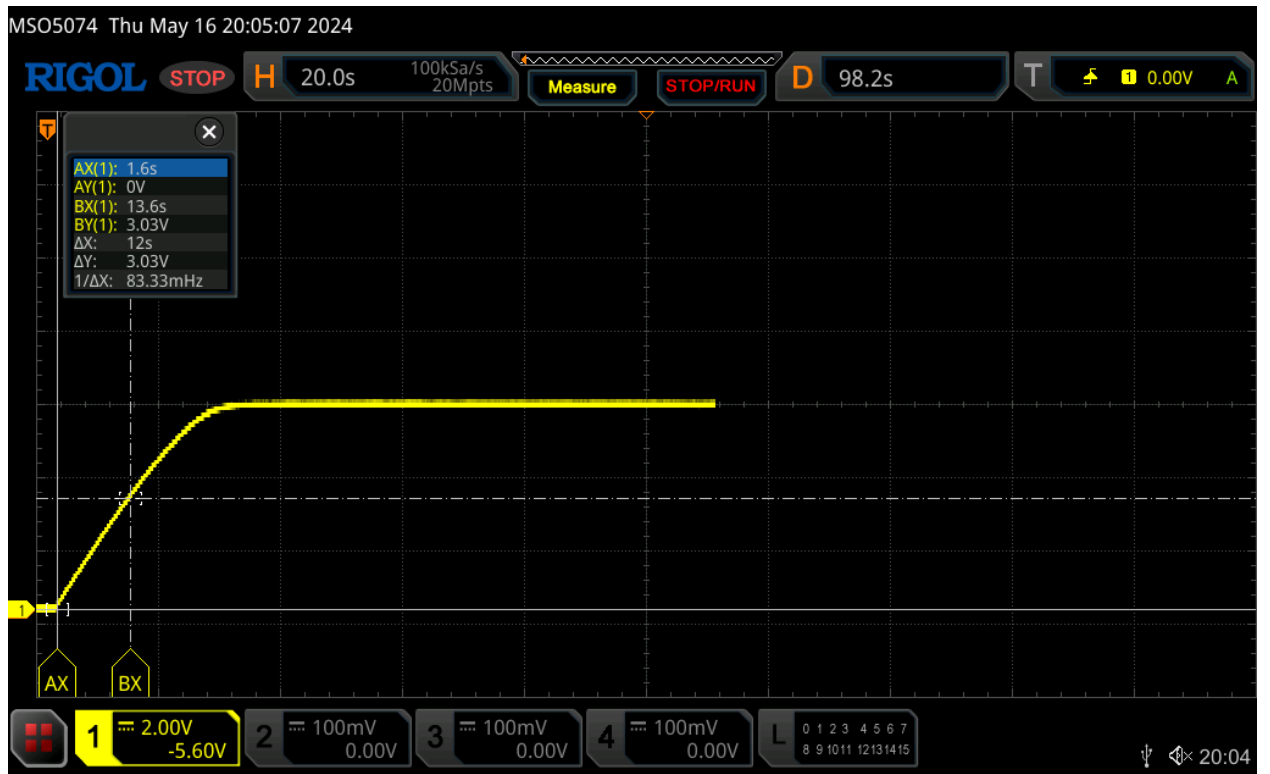
Simulace v LT Spice pro 100 lx panel AT-7802A_1



Simulace v LT Spice pro 500 lx panel AT-7802A_1



Naměřená data pomocí multimetru pro hodnotu 100 lx panel AT-7802A_1



Naměřená data pomocí multimetru pro hodnotu 500 lx panel AT-7802A_1