

Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

Ekonomické vyhodnocení provozu fotovoltaické elektrárny při poruše

Jan Šutka

Květen 2016
Vedoucí práce: Ing. Ladislava Černá

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Šutka Jan**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Obor: Elektrotechnika a management

Název tématu:

Ekonomické vyhodnocení provozu fotovoltaické elektrárny při poruše

Pokyny pro vypracování:

1. Zpracujte rešerši na téma poruch fotovoltaických (PV) modulů.
2. Posuďte možnosti jejich včasné detekce a závažnosti z hlediska vlivu na výkon, respektive bezpečnost provozu PV elektrárny.
3. Proveďte sérii měření na PV modulu při různém zastínění s důrazem na zjištění poměrů v jednotlivých řetězcích článků.
4. Určete roční ekonomické ztráty systému v případě poruchy PV modulů v různé míře.

Seznam odborné literatury:

1. Gray, Jeffery L. The Physics of the Solar Cell. A. Luque a S. Hegedus. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. Chichester : John Wiley & Sons, Ltd., 2003, 3.
2. CASTAÑER, Luis a Santiago SILVESTRE. UNIVERSIDAD POLITECNICA DE CATALUÑA. Modelling Photovoltaic Systems using PSpice. Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd, 2002.
3. STRACHE, Sebastian, Ralf WUNDERLICH a Stefan HEINEN. A Comprehensive, Quantitative Comparison of Inverter Architectures for Various PV Systems, PV Cells, and Irradiance Profiles. IEEE Transactions on Sustainable Energy [online]. 2014, vol. 5, issue 3, s. 813-822 [cit. 2015-04-22]. DOI: 10.1109/TSTE.2014.2304740. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6775325>

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Ladislava Černá

Platnost zadání: do konce letního semestru 2016/2017

L.S.

Prof. Ing. Jaroslav Knápek, CSc.

vedoucí katedry

Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.

děkan

V Praze dne 10.2.2016

Poděkování / Prohlášení

Tímto bych rád poděkoval vedoucí mé práce Ing. Ladislavě Černé za cenné rady a vstřícný přístup při konzultacích a Ing. Pavlu Hrzinovi, Ph.D. za pomoc při realizaci měření. Dále doc. Ing. Jiřímu Vašíčkovi, CSc. a Ing. Tomáši Králíkovi za pomoc při návrhu ekonomického modelu. V neposlední řadě patří poděkování mé rodině za velkou podporu v době mého studia.

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

V Praze dne 26. 5. 2016

.....

Abstrakt / Abstract

Tato práce řeší problematiku výskytu závad na fotovoltaických elektrárnách a jejich dopad na ekonomickou stránku provozu. Vyhodnocení poruch je prováděno na ekonomickém modelu fiktivní fotovoltaické instalace. K vyhodnocení je využito kritérium čisté současné hodnoty a vnitřního výnosového procenta. Výstupem práce je nalezení mezních hodnot poklesu výkonu při dosažení očekávaného výnosu z investice a návrh řešení nadstandardního poklesu výkonu.

Klíčová slova: Fotovoltaika, poruchy, degradace výkonu, ekonomický model, čistá současná hodnota, vnitřní výnosové procento

This thesis addresses the impacts of photovoltaic power plants defects on the economic side of the operation. Failures evaluation is carried out using an economic model of fictive photovoltaic installation. Net present value and internal rate of return are used as the evaluation criteria. This thesis aims to find the power decrease limit providing the expected discount rate and outline solutions to excessive power decrease.

Keywords: Photovoltaics, defects, power degradation, economic model, net present value, internal rate of return

Title translation: Economic Evaluation of PV Power Plant with Defects Operation

Obsah /

1 Úvod	1
2 Poruchy PV modulů	2
2.1 Rám	2
2.2 Sklo	3
2.2.1 Moduly z krystalického křemíku	3
2.2.2 Tenkovrstvé moduly	3
2.3 Kabely a konektory	3
2.4 Junction box	4
2.5 Překlenovací diody	5
2.6 EVA/TCO	5
2.6.1 Moduly z krystalického křemíku	5
2.6.2 Tenkovrstvé moduly	6
2.7 Tedlar	6
2.8 Fotovoltaické články	7
2.8.1 Hot-spot	7
2.8.2 Prasklý článek	8
2.8.3 Ulomený článek	8
2.8.4 Vadné pájení a spoje	8
2.8.5 Potencial Induced Degradation (PID)	9
3 Diagnostika PV modulů	11
3.1 Vizualní kontrola	11
3.2 Měření voltampérové charakteristiky	12
3.2.1 Reálné podmínky	12
3.2.2 Laboratorní podmínky	12
3.3 Elektroluminiscence	13
3.4 Termografie	13
4 Měření na PV modulu	15
4.1 Návrh měření	15
4.2 Komponenty pro realizaci měření	16
4.3 Měření č.1 - proudy v sériovém zapojení	17
4.3.1 Schéma zapojení pro měření č.1	17
4.3.2 Realizace měření č.1	17
4.3.3 Výsledky měření č.1	18
4.4 Měření č.2 - proudy paralelními větvemi	19
4.4.1 Schéma zapojení pro měření č.2	19
4.4.2 Realizace měření č.2	19
4.4.3 Výsledky měření č.2	19
5 Ekonomický model PV elektrárny	21
5.1 Základní předpoklady	21
5.2 Hodnocení investice	21
5.3 Diskont	22
5.4 Peněžní tok (Cash Flow)	22
5.5 Zisk	22
5.6 Výnosy	23
5.6.1 Výkupní ceny	23
5.6.2 Vyrobený výkon	24
5.7 Náklady	26
5.7.1 Počáteční investice	26
5.7.2 Náklady na opravy měničů	27
5.7.3 Náklady na běžný provoz	28
5.7.4 Odvod z elektřiny ze slunečního záření	28
5.7.5 Recyklační poplatek	29
5.7.6 Daňové odpisy	29
5.7.7 Daň z příjmů právnických osob	30
6 Ekonomické vyhodnocení	31
6.1 Simulace poklesu výkonu	31
6.1.1 Konstantní pokles výkonu	31
6.1.2 Lineární pokles výkonu	32
6.1.3 Exponenciální pokles výkonu	32
6.2 Řešení poklesu výkonu	33
6.2.1 Výměna prokazatelně poškozených modulů	34
6.2.2 Dorovnání výkonu na nominální hodnotu	34
6.2.3 Finanční kompenzace ušlých zisků	34
7 Závěr	36
Literatura	37
A Seznam použitých zkratk	39
B Schéma měřeného modulu	40
C Měření proudů v sériovém zapojení	41
D Měření proudů paralelními větvemi	53
E Ekonomické vyhodnocení	59
F Obsah příloženého CD	61

Tabulky / Obrázky

5.1. Výkupní ceny za elektřinu	23
5.2. Očekávaný pokles výkonu.....	24
5.3. Náklady na počáteční investici	26
6.1. Koeficienty poklesu výkonu	31
6.2. Konstantní pokles výkonu - příklad	32
6.3. Lineární pokles výkonu - příklad	32
6.4. Exponenciální pokles výkonu - příklad	33
2.1. Poškozené sklo modulu z krystalického křemíku.....	3
2.2. Poškozené sklo tenkovrstvého modulu	3
2.3. Poškozená ochrana kabelů	4
2.4. Poškození konektorů	4
2.5. Zničený junction box.....	4
2.6. Poškozený junction box	4
2.7. Zničené překlenovací diody	5
2.8. Delaminace EVA	6
2.9. Zabarvení EVA	6
2.10. Delaminace TCO	6
2.11. Delaminace TCO pomocí mikroskopu	6
2.12. Poškození tedlaru	7
2.13. Hot-spot	7
2.14. Prasklina článku	8
2.15. Prasklina článku - ELCD	8
2.16. Ulomený článek	9
2.17. Ulomený článek - ELCD	9
2.18. Vadné sběrnice	9
2.19. PID efekt - termovizní měření .	10
2.20. PID efekt - ELCD.....	10
3.1. Zařízení PROVA 210.....	12
3.2. Flash tester v LDFS	12
3.3. Zařízení ELCD	13
3.4. Snímky modulů pomocí EL-CD	13
4.1. Snímek pracoviště	15
4.2. Měřený PV modul	16
4.3. Přípravek pro měření proudů ..	16
4.4. Stínící prvky.....	17
4.5. Zapojení pro měření č.1.....	17
4.6. Zapojení pro měření č.2.....	20
5.1. Citlivostní analýza - diskont ...	22
5.2. Citlivostní analýza - vstupní investice	27
5.3. Vývoj cen měničů	28
6.1. Citlivostní analýza - lineární pokles výkonu	34

Kapitola 1

Úvod

Česká republika se zavázala do roku 2010 navýšit podíl elektrické energie vyrobené z obnovitelných zdrojů na 8 %. To vedlo k vytvoření výhodných podmínek pro výstavbu fotovoltaických (dále jen PV) elektráren v letech 2009 a 2010. Tento PV „boom“ v kombinaci s nedostatkem zkušeností návrhu elektráren mimo jiné zapříčinil výstavbu velkého množství nepovedených projektů. Hlavním problémem se stalo užívání nekvalitních komponent, špatné návrhy systémů a nedostatečná informovanost o potřebné údržbě elektráren.

Během provozu se postupně začaly objevovat různé druhy závad. Práce v první části přináší přehled nejčastějších z nich. S rozšiřováním závad na elektrárnách se pochopitelně nesl i rozvoj diagnostiky. Metody, které se standardně využívají pro diagnostiku reflektuje navazující kapitola.

Cílem do budoucna je vytvoření dostatečně přesného a názorného programu pro simulaci a predikci chování PV systému z hlediska výkonu. Tento program nyní vzniká a spolupráce na něm se projevuje v kapitole s měřením PV modulu, kde se zkoumá především chování systému při různých stavech. Provozovatelé elektráren mohou být následně lépe seznámeni s důsledky různých situací, například zanedbané údržby systému nebo nově se rozvíjejících závad na jejich elektrárně.

Druhým cílem je spojit predikci výkonu s ekonomickou stránkou provozu a dát tak provozovatelům ucelený přehled o dopadech různých typů závad a tím také představu o jejich závažnosti a potřebě tyto závady řešit.

Kapitola 2

Poruchy PV modulů

PV moduly lze třídit dle maximálního výkonu. Hodnotu výkonu výrobce obvykle garantuje ve dvou fázích. Roky a procenta se mohou lišit dle výrobce, jedna z možných variant pro ukázkou:

- maximální pokles P_{MAX} o 10 % po dobu 10 let
- maximální pokles P_{MAX} o 20 % po dobu 25 let

Garantovaný výkon počítá s postupným poklesem výkonu způsobeným opotřebením, nikoliv však s poruchami, které mohou nárazově snížit výkon pod garantovanou úroveň, případně významně urychlit degradační procesy.

Dle [1] můžeme poruchu chápat jako jev, který se projeví vytvořením bezpečnostního rizika, případně snížením výkonu, a není vratný za pomoci standardní údržby. Pro lepší pochopení uveďme příklad. Pokud dojde v zimě k pokrytí skla modulu sněhem, nejedná se o poruchu, neboť sníh lze pomocí standardní údržby odstranit. Pokud ale dojde vlivem teploty, náležející do intervalu provozních teplot, k porušení izolace vodičů, jedná se o poruchu.

V následujících podkapitolách budou popsány známé poruchy, které se běžně vyskytují na PV modulech. Poruchy jsou rozděleny dle části PV modulu, na které se vyskytují. V případě, že se liší struktura složení modulů, je podkapitola rozdělena na tenkovrstvé moduly a moduly z krystalického křemíku.

Popsané poruchy vychází ze znalostí nabytých v Laboratoři diagnostiky fotovoltaických systémů (dále jen LDFS) a z přehledu závad na PV modulech [1]. Snímky jednotlivých závad pochází z archivu LDFS.

2.1 Rám

PV modul je obvykle chráněn pomocí hliníkového rámu, který zároveň slouží pro upevnění modulu na nosnou konstrukci.

Rám může být poškozen vlivem silného mechanického působení. Například nešetrné zacházení s moduly, působení sněhu nebo špatný návrh nosné konstrukce, v jehož důsledku na rám působí síly způsobené teplotní roztažností této konstrukce.

Ačkoliv se závada nemusí projevit na vyráběném výkonu, tak představuje bezpečnostní riziko. Klesá mechanická odolnost modulu, může dojít ke vzniku rizika úrazu elektrickým proudem a k uvolnění modulu na nosné konstrukci.

Závadu lze velmi dobře diagnostikovat pomocí vizuální prohlídky.

2.2 Sklo

2.2.1 Moduly z krystalického křemíku

Sklo pokrývá čelní stranu modulu. Jeho funkce je ochránit PV články před vnějším mechanickým namáháním a před klimatickými vlivy. Sklo je speciálně navrženo tak, aby mělo co největší propustnost dopadajícího záření a zároveň dostatečnou mechanickou odolnost. Dále funguje podobně jako automobilové sklo, tedy při prasknutí drží pohromadě (je tvrzené – tepelně nebo chemicky).

V důsledku působení mechanické síly může dojít k poškození skla. Obvykle se jedná o letící kámen ze sekačky na trávu (obrázek 2.1), silné krupobití či opět špatný návrh nosné konstrukce a působení mechanické síly mezi moduly navzájem.

Poškození skla se může projevit okamžitým skokovým snížením vyráběného výkonu a z dlouhodobého hlediska urychlením degradace. Zároveň dochází k problému z hlediska bezpečnosti, porucha může způsobit úraz elektrickým proudem či poranění částmi skla.

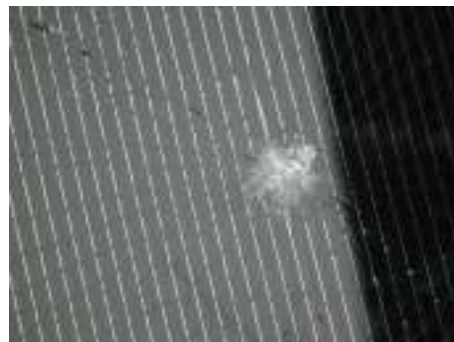
Modul s poškozeným sklem je obvykle odhalen během vizuální kontroly.

2.2.2 Tenkovrstvé moduly

Tenkovrstvé moduly jsou specifické svým uspořádáním. Přináší i variantu se sklem na přední i zadní straně modulu. Zároveň se tyto moduly mohou vyrábět i bez ochranného rámu.



Obrázek 2.1. Poškozené čelní sklo modulu z krystalického křemíku vlivem nárazu kamene.



Obrázek 2.2. Poškozené čelní sklo tenkovrstvého modulu vlivem nárazu kamene.

Platí zde velmi podobné následky (obrázek 2.2), jako v případě modulu z krystalického křemíku. Navíc je zde větší pravděpodobnost poškození samotné tenké vrstvy, která je přímo deponována na sklo.

2.3 Kabely a konektory

Každý modul je vybaven párem kabelů opačné polaroty zakončených konektory. Ty umožňují snadné zapojení modulů do PV systému a zároveň zabraňují záměně polaroty, protože koncovky tvoří doplňující se dvojici. Některé typy konektorů jsou navíc vybaveny pojistným mechanismem k zabránění náhodného rozpojení modulů.

Pokud jsou kabely a konektory vystaveny špatnému mechanickému zacházení, může dojít k porušení izolace, případně poškození konektoru. Jedná se například o odletující kameny ze sekačky, špatné zafixování vodičů ke konstrukci či rozpojování konektorů s pojistkou bez speciálního klíče. Zároveň může být vlivem vysoké teploty a UV záření



Obrázek 2.3. Poškozená ochrana kabelů vlivem UV záření.



Obrázek 2.4. Konektory poškozené nadměrným zahřátím.

(obrázek 2.3) urychlena degradace izolace kabelů či ochran kabelů. Špatné ochlazování je například důsledkem nevhodného návrhu konstrukce. Nadměrné oteplení konektorů může být způsobeno rozpojením PV modulů při připojené zátěži (obrázek 2.4).

Při špatném kontaktu v konektorech vzrůstá odpor a tím i elektrické ztráty, které se projeví nadměrným zahříváním spojení konektorů. Poškození izolace kabelu znamená bezpečnostní riziko.

Závadu lze odstranit výměnou kabelu s konektorem, případně vhodnou opravou izolace, aby došlo k zamezení náhodného dotyku s částí, která je pod napětím. Obvykle je závada odhalena při vizuální kontrole.

2.4 Junction box

Junction box se nachází na zadní straně PV modulu. Jedná se o ochranný obal, ve kterém se spojují vnější kabely a vodiče z vnitřní struktury modulu. Zároveň se zde nachází i překlenovací diody, pokud je jimi modul vybaven. Obal se k modulu připevňuje pomocí silikonu.

Poškození junction boxu lze způsobit mechanickým a tepelným namáháním. Projeví se poškozením silikonu a tedy špatným uchycením boxu, případně degradací plastového obalu, která může vést až k roztavení a shoření boxu. Tepelné namáhání (obrázek 2.5) se objeví při špatném návrhu nosné konstrukce, zahříváním překlenovacích diod či nadproudem ve vodičích.



Obrázek 2.5. Celkové poškození junction boxu vlivem nadměrného zahřátí.



Obrázek 2.6. Přerušení kontaktu stringu PV modulu.

Závada představuje bezpečnostní riziko. V důsledku poškození se mohou vyskytovat nechráněné vodiče pod napětím. Zároveň může být narušeno spojení vodičů (obrázek 2.6) a tím průchodnost proudu. Poškození může vést také k velkým ztrátám na výkonu.

Výhodou závady je do jisté míry opravitelnost, vzhledem k poloze junction boxu a jeho připevnění. Odtržení junction boxu odhalí vizuální kontrola, nadměrné zahřívání lze spatřit na snímku z termografického měření.

2.5 Překlenovací diody

Pro tento účel obvykle využíváme Schottkyho diody. Jsou velmi výhodné pro své vlastnosti, především nízký úbytek napětí v propustném směru. Překlenovací diody se uplatňují v případě porušení či zastínění článků.

Nevýhodou Schottkyho diod je náchylnost na mechanické působení a vysoké napětí v závěrném směru. Proto je třeba při instalaci diody pracovat velmi obezřetně, aby nedošlo k poškození nebo proražení diody. Diody mohou být také poškozeny v důsledku úderu blesku do PV modulů a nevhodného zapojení na elektrárně. Příklad poškozené diody je na obrázku 2.7.



Obrázek 2.7. Zničené překlenovací diody v důsledku vysokého proudu.

Pokud dojde k odpojení překlenovací diody, může vzniknout bezpečnostní riziko, protože nebude fungovat dioda jako ochranný prvek v případě poškození či zastínění článků. Druhým případem je zkratování překlenovací diody. To s sebou přináší skokovou ztrátu výkonu a dále nebezpečí v podobě požáru.

Zatímco k diagnostice odpojené diody je třeba provést měření voltampérové charakteristiky (dále jen VACH) při zastínění a bez něj, tak k diagnostice zkratované diody poslouží snímek z termografického měření, měření VACH i elektroluminiscence.

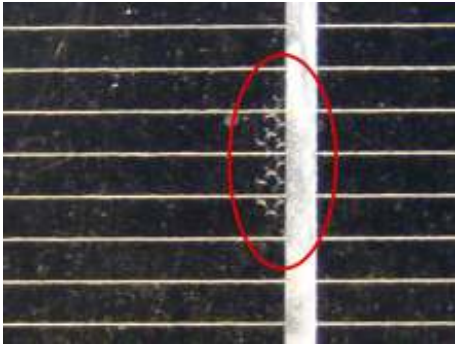
2.6 EVA/TCO

2.6.1 Moduly z krystalického křemíku

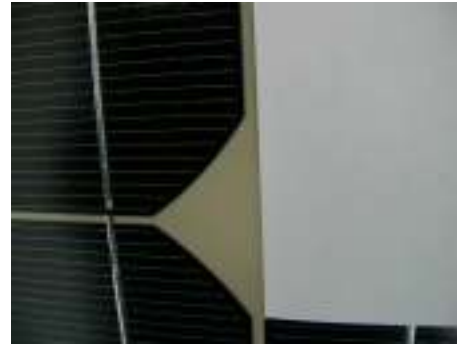
Ethyl vinyl acetát (dále jen EVA) spojuje jednotlivé stavební prvky modulu, to znamená sklo, články a tedlar. Jedná se o materiál, který je transparentní. Zahřátím, při výrobě modulů, dochází k přetavení a polymeraci a tím uvedení materiálu do konečné podoby.

První závada, která se na EVA vyskytuje, je delaminace. Jedná se o stav, kdy se EVA začne oddělovat od předního skla, případně od článků. Tato závada vzniká jako důsledek výrobní vady, působením různých faktorů, mezi které řadíme UV záření, teplotu a vlhkost.

Delaminace se projeví sníženou transparentností (obrázek 2.8). Dále se vlivem delaminace zvyšuje riziko degradace z důvodu vlhkosti a s ní související koroze.



Obrázek 2.8. Delaminace EVA ve velmi raném stádiu.



Obrázek 2.9. Zabarvení EVA v porovnání s bílým podkladem.

Druhá závada související s EVA je zabarvení. Materiál je obohacen o složky, které mají této závadě zabránit. Pokud jsou ale přidány v nevhodném množství, objeví se vlivem UV záření a tepelného zatěžování zabarvení EVA. Závada je zachycena na obrázku 2.9, v porovnání s bílým papírem, který simuluje požadovanou barvu EVA.

Zabarvení má negativní dopad na výkon vyráběný PV modulem. V důsledku zabarvení je snížena transparentnost a tedy průchod dopadajícího záření.

Obě dvě závady jsou snadno odhalitelné při vizuální kontrole.

2.6.2 Tenkovrstvé moduly

Tenkovrstvé moduly se liší od modulů z krystalického křemíku. Mezi sklem a vrstvou polovodiče je nanesen transparentní vodivý materiál (dále jen TCO). Tento materiál může taktéž vlivem špatného zacházení a klimatických podmínek ztratit přilnavost. Vizuální podobu vady můžeme vidět na obrázku 2.10 a 2.11.



Obrázek 2.10. Delaminace TCO tenkovrstvého modulu.

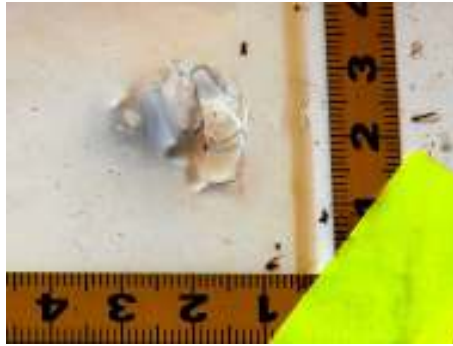


Obrázek 2.11. Mikroskopický snímek delaminace TCO.

Následkem delaminace TCO je vrstva náchylná na kontaminaci vlhkostí a následný vznik koroze.

2.7 Tedlar

Pokrytí zadní části modulu zajišťuje obvykle tedlar, či podobný materiál. Plní ochrannou funkci před přírodními vlivy, dotykem živých částí a částečně i mechanickou ochranu. Materiál je navržen tak, aby byl rezistentní vůči UV záření a tepelnému namáhání.



Obrázek 2.12. Poškození tedlaru vlivem vysoké teploty.

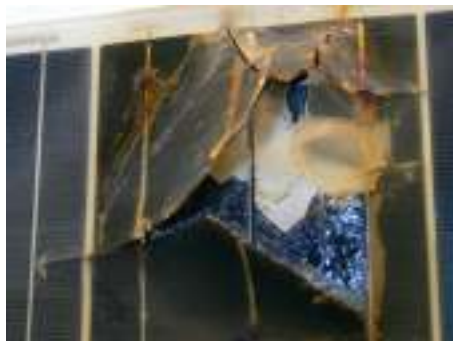
Pokud je vystaven nadměrnému UV záření nebo vysoké teplotě, dochází k urychlení jeho degradace, vzniku delaminace a tím snížení ochrany vnitřní struktury modulu. Hrozí tedy nebezpečí úrazu elektrickým proudem a urychlení degradace vlivem možného průniku vlhkosti. Vysokou teplotu může způsobit například nadměrné zahřívání článku v důsledku jeho poruchy nebo zastínění. Poškození způsobené vysokou teplotou je na obrázku 2.12.

2.8 Fotovoltaické články

PV články jsou velmi tenké a křehké a v důsledku těchto vlastností vykazují velkou náchylnost na poškození. Přestože jsou chráněny prvky popsány výše, dochází k jejich poškození. To je většinou způsobené několika faktory, mezi které patří chyba ve výrobě, nešetrné zacházení při transportu či instalaci na elektrárně, případně vliv přírodních podmínek. V následující části jsou popsány nejčastěji se vyskytující poruchy.

2.8.1 Hot-spot

Jak název napovídá, jedná se o nadměrně zahřívání místo v článku. Část výkonu je spotřebována v místě poruchy, čímž se snižuje celkový výkon modulu. V důsledku spotřebovávání výkonu v místě poruchy dochází k zahřívání a k působení tepla na okolní materiály. Vysoká teplota může způsobit roztavení tedlaru (obrázek 2.12) či poškození EVA a v nejzávažnějším případě i shoření části modulu (obrázek 2.13). Také může být vlivem hot-spotu přerušena vodivá cesta, to zamezí toku proudu a vzniknou ztráty na výkonu.



Obrázek 2.13. Hot-spot na modulu s krycí vrstvou z plastu.

Hot-spoty mohou mít různé příčiny. V zásadě dochází k zahřívání článku v kterémkoliv místě, kde je nějakým způsobem narušen tok proudu, roste zde odpor a tím i

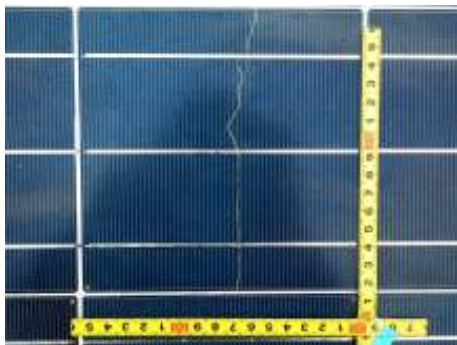
tepelné ztráty. Ty jsou úměrné proudu a odporu dle vztahu:

$$P = R \cdot I^2 \quad (2.1)$$

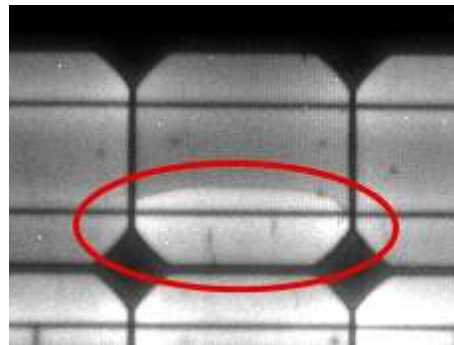
Řadíme sem poruchy pájení a vodivých spojů viz. kapitola 2.8.4. Hot-spoty se také mohou objevit v důsledku zastínění části modulu (např. stromy, exkrementy ptactva, apod.).

■ 2.8.2 Prasklý článek

Praskliny v PV článcích vznikají v důsledku mechanického namáhání. Zárodky prasklin mohou vzniknout při manipulaci s nechráněnými články v továrně vyrábějící PV moduly. Dále se mohou na vzniku a rozšíření již existujících prasklin podílet všechna mechanická namáhání, např. tíha sněhu nebo rozpínavost materiálů v důsledku změn teploty. Praskliny obvykle nelze spatřit pouhým okem a musí být využita některá z diagnostických metod. Jako velmi efektivní se jeví elektroluminiscence (blíže popsána v kapitole 3.3). Příklad zachycení praskliny je na obrázku 2.14 a pro srovnání na obrázku 2.15 je zachycení praskliny pomocí elektroluminiscence.



Obrázek 2.14. Prasklina PV článku viditelná okem.



Obrázek 2.15. Prasklina PV článku zachycená pomocí ELCD.

V závislosti na rozsahu praskliny se rozvíjí ztráty na výkonu. V raném stádiu se praskliny na výkonu nemusí vůbec projevit. S velkým rozšířením může nastat vytvoření oblasti, která bude neaktivní a nebude dodávat výkon. Zároveň se může narušit tok proudu. Vzniká také bezpečnostní riziko v podobě nadměrného zahřívání oblasti.

■ 2.8.3 Ulomený článek

Vada je na rozdíl od praskliny často viditelná pouhým okem. Vzniká v momentu výroby modulu, kdy dojde vlivem mechanického působení k odlomení části článku a takto poškozený článek je uložen do modulu (obrázek 2.16). Případně se rozšíří prasklina a část článku se zcela oddělí od zbytku (obrázek 2.17).

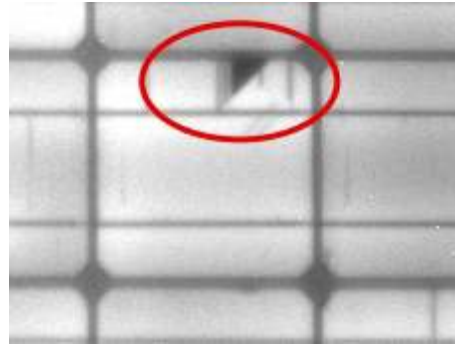
Projevuje se snížením výkonu modulu. Toto snížení odpovídá ploše, která chybí, či není kontaktována pomocí vodičů na článku.

■ 2.8.4 Vadné pájení a spoje

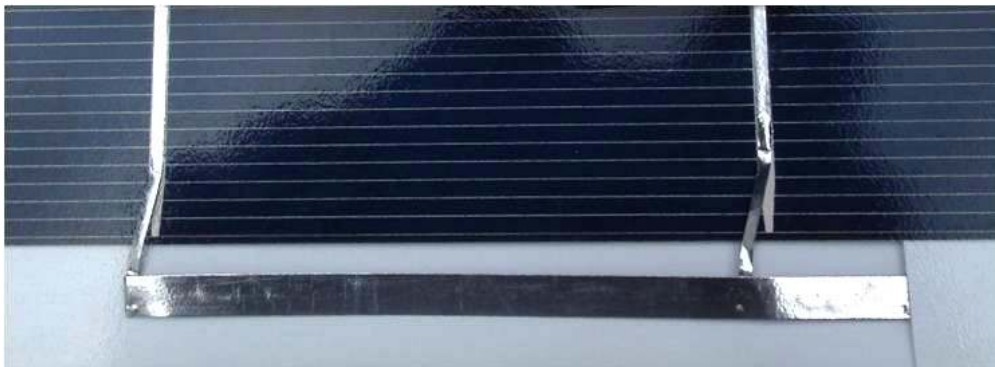
Velmi důležitou součástí vnitřní struktury modulů jsou vodivé cesty, které tvoří pásy z vodičů a pájené spoje. V případě, že jsou tyto spoje poškozeny vlivem tepelného a mechanického namáhání, případně byly špatně realizovány při výrobě modulu, dochází k nárůstu odporu.



Obrázek 2.16. Ulomená část PV článku.



Obrázek 2.17. Ulomená část PV článku zachycená pomocí ELCD.



Obrázek 2.18. Vadné vodivé spoje.

Na obrázku 2.18 je zachycen špatně vyrobený spoj, který je deformován vlivem působení mechanické síly. V nejhorším případě může dojít k narušení vodivého spojení, zahřívání místa a destrukci postižené oblasti.

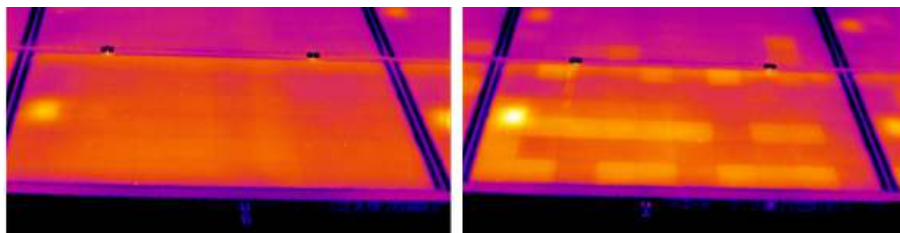
Důsledkem této vady je případný vznik hot-spotů a nadměrná degradace vlivem rostoucí teploty. Vada se také projevuje na výkonu. Ztráty na odporu se projeví poklesem výkonu. Vodivé cesty také mohou zdegradovat působením vlhkosti, to se projeví korozí vodičů a poklesem jejich vodivosti.

■ 2.8.5 Potencial Induced Degradation (PID)

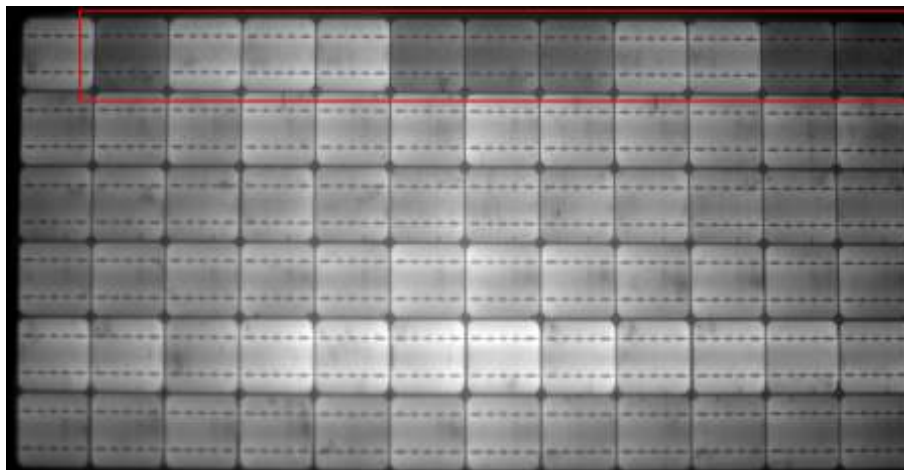
Tato závada je velmi specifická. Na rozdíl od ostatních zde popsaných závad je tato do jisté míry vratná a její výskyt je ovlivněn především návrhem PV elektrárny. Vlivem působení napětí mezi rámem modulu a článkem dochází k migrační polarizaci Na^+ iontů ze skla do struktury modulu, kde způsobují nárůst povrchové rekombinace v PV článku a tím pokles výkonu. Tento stav je z velké části vratný v případě přiložení opačného napětí. Aby nedošlo k opakování stavu, je nutné s tzv. léčením PIDu zároveň provést změny v zapojení modulů či výměnu střídačů.

Rozsáhlejší změny se objeví v momentě, když kladné ionty Na^+ difundují dovnitř struktury PN přechodu a tím vytváří mikrokratky. Dochází k poklesu paralelního odporu R_P a napětí naprázdno.

Závada se obvykle projeví velkým snížením výkonu, které lze zaznamenat na monitoringu PV elektrárny. Spolehlivým nástrojem pro určení PID u krystalických modulů je termografie (obrázek 2.19) a elektroluminiscence.



Obrázek 2.19. Srovnání nepoškozeného modulu (vlevo) a modulu zasaženého PIDem (vpravo) na snímku z termografického měření.



Obrázek 2.20. Zachycení modulu poškozeného v raném stádiu PID efektem na ELCD (degradované články jsou označeny červeně).

Kapitola 3

Diagnostika PV modulů

Diagnostiku lze provádět ve dvou odlišných prostředích. Prvním z nich je diagnostika v místě PV instalace. Mnoho PV systémů je vybaveno monitoringem, který hromadí data o vyráběném výkonu, proudech tekoucích jednotlivými větvemi apod. Na základě těchto dat je provozovatel schopen zjistit oblast, která nefunguje dle očekávání. Ve venkovních podmínkách lze následně provést s relativně velkou přesností selekci podezřelých modulů. K tomu se využívá především vizuální kontrola, termografie a měření pomocí přenosného analyzátoru (pozn. měří VACH a charakteristické hodnoty). Ve venkovním prostředí nelze s dostatečnou přesností určit jmenovitý výkon modulu. Vzhledem k proměnlivým hodnotám, především ozářenosti, teploty a proudícího větru, je jmenovitý výkon modulu měřen v laboratorním prostředí.

V laboratorních podmínkách jsme schopni dosáhnout standardních testovacích podmínek (dále jen STC). Hodnota výkonu naměřená v laboratorním prostředí může být porovnána s udávaným jmenovitým výkonem modulu. V laboratorních podmínkách se také standardně provádí vizuální kontrola, elektroluminiscence, měření izolačního odporu a elektrické pevnosti. Výhoda zkoušek provedených v laboratorních podmínkách je jejich opakovatelnost. Jsme tedy schopni pomocí pravidelného měření stejných přípravků vyhodnotit například rychlost degradace.

Společným prvkem je snaha o nedestruktivní metody. Testované moduly se obvykle vrací zpět do místa instalace, případně je na ně uplatňována záruční garance a poškození způsobené diagnostikou by vedlo k poškození zájmů vlastníka PV instalace. V následujících podkapitolách jsou uvedeny nejčastěji užívané metody diagnostiky PV instalací.

3.1 Vizuální kontrola

Základní metoda diagnostiky PV modulů je vizuální kontrola. Metoda vychází z norem ČSN EN 61215 v případě modulů z krystalického křemíku a z ČSN EN 61646 v případě tenkovrstvých modulů. Cílem vizuální kontroly je zaznamenat jakoukoliv nesrovnalost, která by mohla mít vliv na správnou funkci modulu. Vizuální kontrolu lze provádět jak v terénu, tak v laboratorním prostředí.

Během vizuální kontroly dochází k ověření rozměrů a váhy modulu, počtu článků a jejich zapojení. Tyto náležitosti se porovnávají s daty uvedenými v technické dokumentaci modulu.

Druhá část vizuální kontroly spočívá v hledání viditelných závad. Především se jedná o praskliny na skle, nestandardní zbarvení, ulomené články, delaminace, poškozené spoje článků, poškození rámu, junction boxu, či přívodních kabelů a konektorů.

K dokumentaci závad se užívá zařízení pro záznam obrazu. Nejčastěji se tedy jedná o fotoaparát, v případě nutnosti většího přiblížení se užívá i mikroskop. Nalezené nedostatky jsou zaznamenávány i v písemné formě. Vizuální kontrola dle požadavku normy vyžaduje osvětlení minimálně 1000 lux¹⁾.

¹⁾ Vysvětlení fotometrických veličin na adrese: <http://pasan.feld.cvut.cz/dokumenty/fotometrie.pdf>

Fotografie závad v předešlé kapitole pochází z vizuálních kontrol prováděných v LDFS.

3.2 Měření voltampérové charakteristiky

Jeden z nejdůležitějších údajů pro zkoumání výkonu PV modulů je VACH a charakteristické údaje.

Měření spočívá v připojení řízené zátěže na modul. Během krátkého časového intervalu je proměřena závislost $I = f(U)$, kde I je výstupní proud z PV modulu a U je napětí na výstupních svorkách PV modulu. Měření se provádí od stavu nakrátko, kde je připojená zátěž rovna nule, do stavu naprázdno. Tento stav odpovídá zátěži tak velké, že $I = 0$ A. Samotné měření VACH lze provádět ve dvou zcela odlišných prostředích a v závislosti na prostředí se liší i užívané přístroje.

3.2.1 Reálné podmínky

V reálných podmínkách využívá LDFS např. přístroj PROVA 210 (obrázek 3.1), či MI 3108 EurotestPV. Některé přístroje jsou navrženy tak, aby s nimi bylo možné měřit až do hodnoty napětí na výstupních svorkách 1000 V. Pak je možné na vstupní svorky zařízení připojit celý string (např. 15 – 20 modulů v sérii) a změřit hodnoty pro celé zapojení. Na základě měření a tvaru VACH lze určit, v jakém stavu se string nachází. Lze takto odhalit například aktivní práci překlenovací diody.

3.2.2 Laboratorní podmínky

V laboratorních podmínkách se využívá solární simulátor, obvykle tzv. flash tester (obrázek 3.2). Jeho kvalita je definována na základě nejistot měření a simulace spektra AM 1,5.



Obrázek 3.1. Zařízení PROVA 210.



Obrázek 3.2. Flash tester v prostorách LDFS.

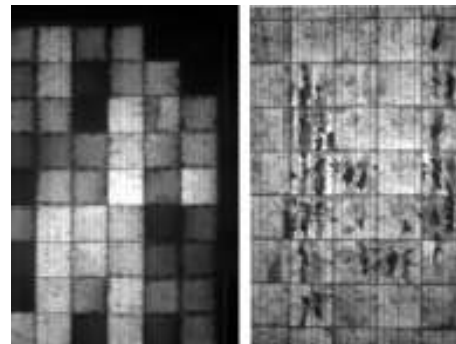
Výhodou měření VACH a charakteristických hodnot flash testerem je rychlost měření, která se pohybuje ve zlomku sekundy. Během měření je tím pádem vyloučen vliv oteplení modulů a následného zkreslení naměřených výsledků. Simulátor je obsluhován pomocí počítačového programu, ve kterém lze nastavit mnoho parametrů a zajistit tak opakovatelnost. Další výhodou je možnost měřit při různých úrovních ozáření (intenzitách záření). Metoda vychází z normy ČSN EN 60904-1.

3.3 Elektroluminiscence

Zkráceně ELCD. Tato metoda je velmi mocným nástrojem z hlediska zjišťování typu závady. Princip spočívá v zaznamenání záření, které vychází z modulu. Aby modul začal vyzařovat, musíme ho připojit ke zdroji proudu. Poté začne vyzařovat ve spektru, které odpovídá typu použitého materiálu a technologii zpracování článků. Spektrum se však prakticky vždy nachází mimo rozsah viditelný lidským okem. To je ovlivněno rekombinačním zářením. Podrobně se problematikou generačně-rekombinačního záření PV článku zabývá například publikace [2]. K záznamu se tedy užívá chlazená CCD, popřípadě InGaAs kamera. Celé uspořádání musí být umístěno v oblasti se sníženou intenzitou okolního záření, požadavek na maximální okolní záření záleží na typu použité kamery a její kvalitě.



Obrázek 3.3. Zářící zařízení ELCD v prostorách LDFS.



Obrázek 3.4. Snímky poškozených modulů pořízené elektroluminiscencí.

Výhodou metody je její rychlost, která se, pro zaznamenání snímku jednoho modulu, pohybuje od řádu desítek sekund až po zobrazení v reálném čase v závislosti na použité kameře. Nevýhodou je náročnost na okolní podmínky (např. temná komora) a potřeba měřit každý modul zvlášť¹⁾. Metoda nám dále neřekne nic o celkovém výkonu modulu.

Výstupem z kamery je snímek v dvoubarevném spektru. Jas barvy odpovídá rozložení proudu, který protéká modulem. V ideálním případě by modul na snímku měl všude stejný jas. Tmavší místa značí oblasti, které jsou poškozeny a nepodílí se na výrobě proudu, případně se podílí omezeně. Metodou lze odhalit i praskliny, které nejsou viditelné pouhým okem, články poškozené z výroby, apod. Příklady výstupu této metody použité na poškozené moduly jsou na obrázcích 3.4.

3.4 Termografie

Termografické měření se uplatňuje téměř výhradně na venkovních instalacích. K měření se využívá infračervená (IR) kamera, která zobrazuje distribuci teplot na snímaném povrchu. Poškozená místa na PV modulech se při průchodu proudu zahřívají a jejich teplota se výrazně liší od okolních článků. Dále se zahřívají např. překlenovací diody.

Velká výhoda spočívá v možnosti provádět měření za plného provozu elektrárny. Provozovatel tak nepřichází o vyráběný výkon. Zároveň lze měření provádět velmi rychle a na několika modulech zároveň. V současné době získávají na oblibě drony osazené IR kamerou, kterou jsou schopny snímat celou elektrárnu. Pro prvotní selekci narušených

¹⁾ Výjimku tvoří systémy pro měření v místě instalace. Ty proměřují větší část systému, tyto systémy jsou ale velmi drahé a vlastní je pouze několik laboratoří na světě.

modulů se jeví jako velmi výhodná. Na základě snímků pořízených IR kamerou nejsme schopni určit výkonový rozsah poškození, tak jako v případě měření VACH. Metoda ELCD pro změnu dává více informací ohledně určení typu závady. Tato měření se tedy nezastupují, ale doplňují.

Kapitola 4

Měření na PV modulu

4.1 Návrh měření

PV elektrárna je komplexní systém. Pro správně pochopení chování systému, je vhodné si tento systém vytvořit v laboratorním prostředí a zaměřit se na změny zkoumaných veličin při různých stavech systému. Snahou při měření je maximální zjednodušení, aby bylo měření názorné a jednoznačně ukázalo chování PV elektrárny. Pro měření nejsou stěžejní přesné hodnoty. Druhým cílem měření je získání dat pro ověření funkce programu simulujícího chování PV elektrárny. Tento program je vyvíjen v prostředí PSpice [3] a je stále ve vývoji, proto není použit pro návrhy poklesů výkonu v této práci.

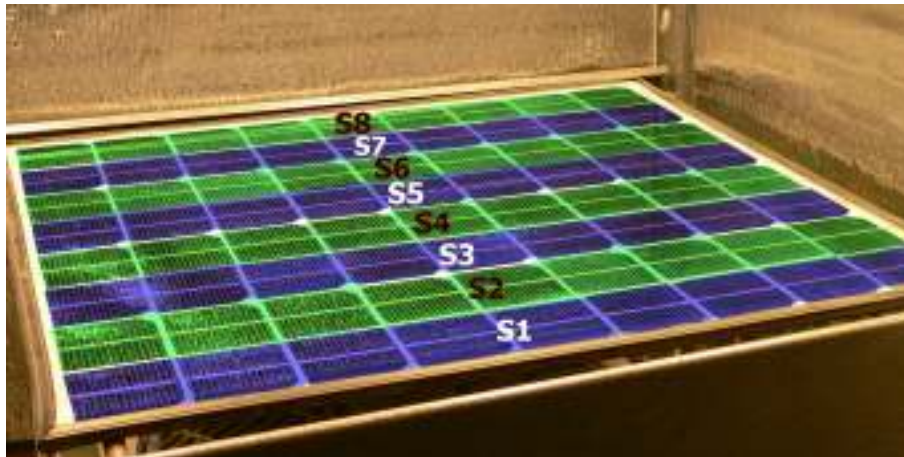
Celé pracoviště je zachyceno na obrázku 4.1. Skládá se z několika částí. Na pravé straně se vyskytuje měřený modul. Ten je umístěn v boxu se 4 halogenovými žárovkami. Celý box je uvnitř pokryt vrstvou s vysokou odrazivostí. Tento mechanismus zajišťuje homogenizaci ozáření měřeného modulu. V boxu je také umístěn větrák pro ochlazování. Z modulu jsou vyvedeny jednotlivé vodiče do přípravku, ve kterém se spojuje modul s měřicí technikou a zátěží. Tento přípravek umožňuje měřit proudy jednotlivými částmi zapojení. Na přípravek jsou následně připojeny jednotlivé měřicí přístroje a zátěž v závislosti na zapojení a požadovaných hodnotách.



Obrázek 4.1. Snímek pracoviště s popisem jednotlivých částí

4.2 Komponenty pro realizaci měření

Pro měření toků proudu na PV elektrárně je využit modul z obrázku 4.2. Ten je speciálně upraven tak, aby se dala měnit jeho konfigurace. Je zde 8 řad (označeno jako S1 až S8), z nichž každá má 9 článků zapojených v sérii. Toto zapojení je na obrázku barevně naznačeno. Pro lepší zápis jednotlivých stínění je využito schéma z přílohy B.1.



Obrázek 4.2. Speciálně upravený PV modul pro měření.

Další důležitá část je přípravek na obrázku 4.3. Je složen z osmi stejných zapojení, tak aby šla každá řada z měřeného modulu připojit zvlášť. Jeden segment je tvořen třemi svorkami. Mezi první dvě je zapojena Schottkyho dioda a mezi další dvě odpor. Konkrétní využití přípravku je blíže popsáno v daném zapojení.



Obrázek 4.3. Přípravek pro měření proudů.

Pro měření hodnot napětí naprázdno (U_{OC}), proudu nakrátko (I_{SC}), maximálního výkonu (P_{MAX}), napětí při maximálním výkonu (U_{MP}) a proudu při maximálním výkonu (I_{MP}) je využit přístroj PROVA 210 (obrázek 3.1).

Pro měření proudů na měřicím přípravku jsou připojeny multimetry M890G použité jako voltmetry, pomocí kterých je měřeno napětí na rezistoru v přípravku a pomocí Ohmova zákona dopočítáván proud. Hodnoty veličin na výstupních svorkách jsou měřeny pomocí multimetrů značky METEX (typ M-3630D pro napětí a M-4640A pro proud). Jako zátěž je využit potenciometr.

Vzhledem k nedestruktivní povaze celého měření je třeba simulovat závady vratným způsobem. Proto jsou využity prvky pro zastínění článků, které simulují jejich poškození. Stínící prvky jsou na obrázku 4.4.

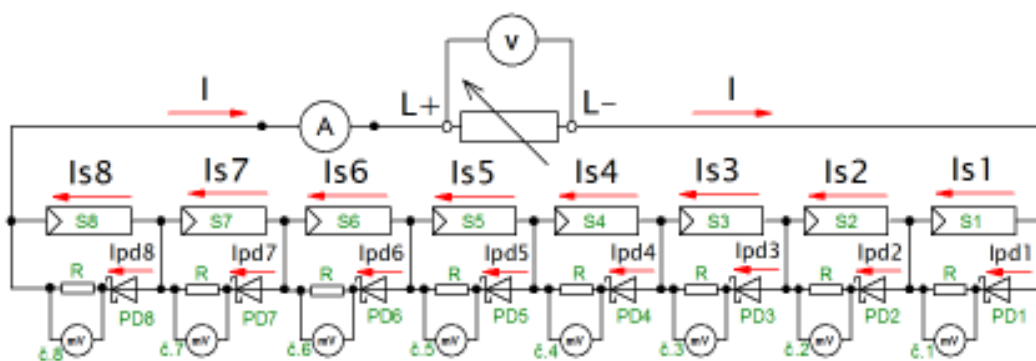


Obrázek 4.4. Stínící prvky pro simulaci závad.

4.3 Měření č.1 - proudy v sériovém zapojení

4.3.1 Schéma zapojení pro měření č.1

První zapojení má za cíl zobrazit chování jedné paralelní větve na PV elektrárně. Jednotlivé řady (S1 až S8) na modulu představují standardní moduly zapojené do série. Každá řada má paralelně připojenou překlenovací diodu a rezistor (zajištěno na měřicím přípravku). Na výstupní svorky je připojeno zařízení PROVA 210 nebo zátěž s voltmetrem. Celé zapojení tedy vypadá jako na obrázku 4.5.



Obrázek 4.5. Schéma pro měření proudu v sériovém zapojení.

4.3.2 Realizace měření č.1

Při samotném měření je využit následující postup:

- 1) Zapojíme jednotlivé řady (S1 až S8) do série dle schématu 4.5
- 2) K řadám připojíme paralelně diody (PD1 - PD8) s rezistory (R)
- 3) Na rezistory připojíme multimetry (č.1 - č.8, M890G)
- 4) Na výstupní svorky připojíme ampérmetr (A, M-4640A)
- 5) Zapneme halogenové žárovky a větrák umístěný pod modulem, počkáme do ustálení prvotní velké změny teploty
- 6) Provedeme námi požadované zastínění článků
- 7) Na svorky zapojíme zařízení PROVA 210 a necháme provést měření, naměřené hodnoty zaznamenanáme
- 8) Odpojíme zařízení PROVA 210 a připojíme zátěž s voltmetrem (V, M-3630-D)
- 9) Pomocí potenciometru nastavíme zátěž odpovídající bodu maximálního výkonu (tak aby hodnoty U_{MP} a I_{MP} odpovídaly hodnotám na voltmetru a ampérmetru) a zaznamenanáme hodnoty napětí na multimetrech (č.1 - č.8)
- 10) Proces zastínění a naměření hodnot opakujeme dle našich požadavků

4.3.3 Výsledky měření č.1

Pro interpretaci naměřených dat je výhodné k sobě seskupit určité typy stínění. Dále byly naměřené hodnoty U_{OC} , U_{MP} , I_{SC} , I_{MP} , P_{MAX} znormovány dle následujícího výpočtu:

$$X_{norm_n} = \frac{X_n}{X_1}, \quad (4.1)$$

kde X_1 je hodnota veličiny pro stínění č.1 (obrázek C.2), X_n je hodnota veličiny pro n-té stínění a X_{norm_n} je znormovaná hodnota veličiny pro n-té stínění.

Hodnoty proudu, které protékají skrze jednotlivé diody byly ponechány bez znormování a jsou tedy uvedeny v ampérech [A]. Následuje vyhodnocení jednotlivých skupin zapojení:

- 1) Skupinu tvoří stínění z obrázku C.2. Hlavním cílem bylo ověřit předpoklad, že následky závady nejsou závislé na její pozici v řadě. Jednalo se tedy o postupně stínění celých řad S1 až S8. Simulace představuje zapojení nefunkčního modulu v sérii s funkčními moduly.

Z grafu C.3 jednoznačně plyne, že pokles U_{OC} a U_{MP} je víceméně konstantní. Drobné odchylky mohou souviset s mírnou odlišností jednotlivých článků a s homogenním rozložením ozáření a teplot na modulu. Také je patrné, že zatímco pokles U_{OC} je velmi malý, tak pokles U_{MP} je okolo 18 %. Proud I_{SC} , I_{MP} jsou téměř neměnné (graf C.4) při různých zastíněních. Pokles v naměřených hodnotách pro I_{SC} se pohybuje maximálně okolo 5 %. Pokles výkonu P_{MAX} (graf C.5) je také v rozmezí 11 % až 16 %.

Všechny překlenovací diody se správně uplatnily v momentu, kdy byla stíněná část, kterou překlenovaly. Graf C.6 názorně ukazuje, jak vždy pouze diodou u stíněných článků protéká proud, ostatní diody se neuplatní, protože proud protéká nezastíněnými články.

- 2) Druhou skupinu tvoří stínění C.7. Stínění je menšího rozsahu. Simulujeme tedy nefunkčnost pouze části modulu. Menší závada je ale prezentována na třech místech zároveň. Může se jednat například o různé praskliny článku a další drobnější závady. Cílem je porovnat, jestli se budou diody chovat obdobně a vždy se otevřou tam, kde je zastíněný článek, nebo budeme pozorovat jiné chování.

Chování U_{OC} a U_{MP} (graf C.8) je obdobné jako v předešlém případě. Stínění č.11 až č.16 oproti č.10 vykazuje lehký pokles U_{OC} . V mnohem větší míře se projevuje pokles U_{MP} . Pro hodnoty I_{SC} , I_{MP} (graf C.9) došlo opět k lehkému kolísání do 10 %.

Funkce diod (graf C.11) v tomto případě nebyla natolik jednoznačná. Ačkoliv lze vždy spolehlivě z grafu určit, které diody se uplatnily, tak míra jejich uplatnění se liší. Vzhledem k menší zastíněné ploše se více projevuje rozdílnost jednotlivých článků zapojených v řadách.

- 3) Třetí skupina stínění (obrázek C.12) je rozšířením druhé skupiny. Stínění se vyskytuje na více řadách zároveň a také se mění rozsah stínění na určité řadě. Taková situace může nastat například při stínění cizím předmětem (větve stromu, sloup vn, apod.). Vždy zastíňujeme celé články.

Opět vidíme na grafu C.13 znatelný pokles U_{MP} . U_{OC} je téměř neměnné. Z grafu C.14 plyne, že hodnoty I_{SC} , I_{MP} jsou na takovémto typu stínění velmi málo závislé a jejich pokles je v řádu jednotek procent. Výkon (graf C.15) poklesl téměř o 50 %.

Diody se chovají velmi podobně jako v případě druhé skupiny. Ve všech třech variantách zastínění se uplatňují diody D3, D4 a D5. Zároveň ale vidíme rozdíl jejich uplatnění. Diodou D3 protéká pouze část proudu při stínění č.18 a č.19 a hlavní část

proudu protéká pouze při stínění č.17, které je rozsáhlejší pro řadu S3 (obdobně pro diodu D4). Diodě D5 stačí menší zastínění k tomu, aby skrze ni začal protékat větší proud. Na grafu C.16 vidíme drobný nárůst při stínění č.19 ve srovnání se stíněním č.17 a č.18, ale není tak dramatický, jako pro diodu D3 a D4.

- 4) Poslední skupinou jsou stínění dle obrázku C.17. Stínění se odlišuje od zbylých skupin, protože se jedná pouze o částečné stínění článků. Postupně se stínění rozšiřuje na větší plochu. Tímto způsobem můžeme například simulovat znečištění ptáky, které obvykle zasáhne modul napříč více články, ale pouze v omezené míře.

Na grafech C.18, C.19 vidíme, že se stíněním poklesl proud I_{MP} . To se ale děje pouze do doby, než se dostatečným napětím otevřou překlenovací diody, poté se hodnota I_{MP} opět zvětší. Opačně se chová napětí U_{MP} . Ačkoliv výkonově (graf C.20) si nepomůžeme, neboť se zvětšujícím se rozsahem stínění klesá i výkon, tak funkce diod je důležitá z hlediska bezpečnosti. Tím, že překlenu postíženou oblast, zamezí přehřívání a urychlí degradaci a nárůstu nebezpečí.

4.4 Měření č.2 - proudy paralelními větvemi

4.4.1 Schéma zapojení pro měření č.2

Druhé zapojení má za cíl zobrazit toky proudu v paralelním zapojení řad. Nyní pro nás znamená jeden článek na měřeném modulu simulaci jednoho modulu na PV elektrárně. Jednu řadu bude tvořit osmnáct článků, simulujeme tedy PV elektrárnu o osmnácti modulech v sérii a čtyř řadách paralelně. Pro toto měření nebudeme využívat překlenovací diody, které nelze ke každému článku zvlášť připojit a zároveň by bylo velmi náročné naměřená data interpretovat. Vliv překlenovacích diod byl změřen v měření č.1. Schéma pro měření č.2 je na obrázku 4.6.

4.4.2 Realizace měření č.2

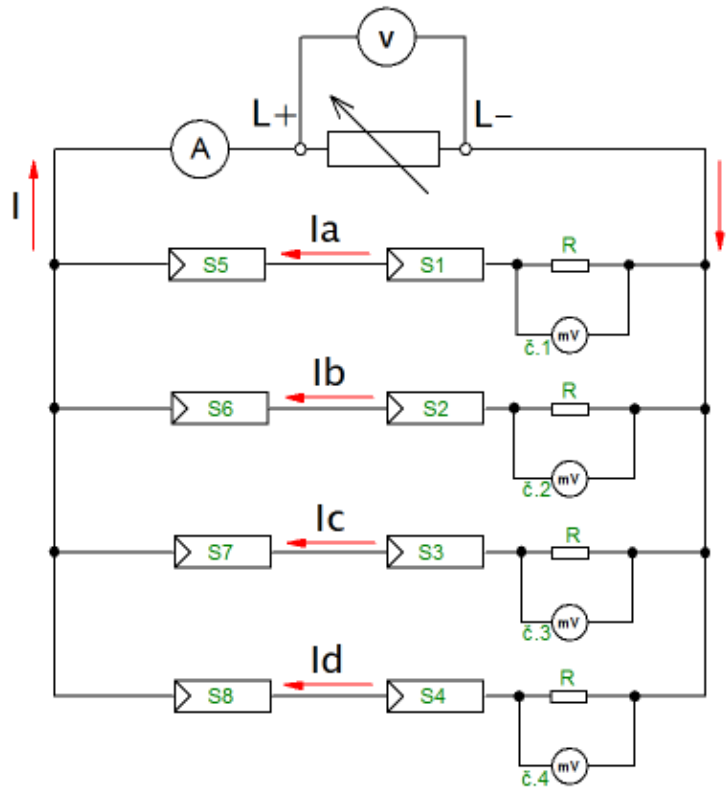
Při samotném měření je využit následující postup:

- 1) Zapojíme jednotlivé řady (S1 až S8) do sério-paralelní kombinace dle schématu 4.6
- 2) K řadám připojíme sériově rezistory (R)
- 3) Na rezistory připojíme multimetry (č.1 - č.4, M890G)
- 4) Na výstupní svorky připojíme ampérmetr (A, M-4640A)
- 5) Zapneme halogenové žárovky a větrák umístěný pod modulem, počkáme do ustálení prvotní velké změny teploty
- 6) Provedeme námi požadované zastínění článků
- 7) Na svorky zapojíme zařízení PROVA 210 a necháme provést měření, naměřené hodnoty zaznamenáme
- 8) Odpojíme zařízení PROVA 210 a připojíme zátěž s voltmetrem (V, M-3630-D)
- 9) Pomocí potenciometru měníme zátěž od stavu naprázdno do stavu nakrátko a zaznamenáváme hodnoty napětí na multimetrech (č.1 - č.8)
- 10) Proces zastínění a naměření hodnot opakujeme dle našich požadavků

4.4.3 Výsledky měření č.2

Obdobně jako v měření č.1 máme dvě skupiny stínění a také hodnoty U_{OC} , U_{MP} , I_{SC} , I_{MP} , P_{MAX} byly znormovány dle vztahu (4.1).

Hodnoty proudu, které protékají skrze jednotlivé řetězce, byly ponechány bez znormování a jsou uvedeny v ampérech [A].



Obrázek 4.6. Schéma pro měření proudu paralelními větvemi.

Z grafu D.27 plyne, že hodnoty U_{OC} , U_{MP} byly na stínění v podstatě nezávislé. Pro hodnoty I_{SC} , I_{MP} pozorujeme na D.28 pokles se zastíněním. Neprojevila se však závislost poklesu těchto hodnot na rostoucím rozsahu zastínění jednoho řetězce. Z hlediska výkonu D.29 pozorujeme pokles, odpovídající poklesu I_{MP} . Opět tedy platí, že výkon neklesal v závislosti na rozsahu stínění, ale pouze s výskytem stínění. Samotné průběhy proudů pro různá stínění jsou rozděleny dle skupiny stínění:

- 1) Stínění je na obrázku D.22. Stínění je navrženo tak, abychom postupně zastínili vždy jeden článek v řadě a ověřili, jestli všechny řady vykazují stejné chování.

Na grafech D.23 jsou vyneseny hodnoty proudů, které protékaly jednotlivými řadami při různém stínění. Z grafů plyne jednoznačné chování systému. Pokud je systém ve stavu blízkém stavu nakrátko, pak se zastínění projeví pouze nízkým poklesem proudu, je zde ale silná závislost na rostoucí zátěži. Zatímco ostatní řady vykazují pozvolný pokles proudu v závislosti na zátěži, tak zastíněná řada má pokles proudu rychlý. Při velkém zatížení přechází proud také do záporné hodnoty. To značí, že systémem začnou téci vyrovnávací proudy, řada se začne chovat jako spotřebič, nikoliv jako zdroj.

- 2) Druhá sada stínění (obrázek D.24) je realizována pouze na řadě obsahující sériově zapojené řetězce S1 a S5. Ostatní řady jsou nezastíněné. Cílem je získat lepší přehled o závislosti proudu v řetězci na rozsahu stínění.

Na grafech D.25 vidíme, že nezastíněné řetězce vykazují relativně malou odlišnost proudů při různém stínění. Zastíněný řetězec naopak vykazuje značný pokles proudu (v detailu D.26). Rychlost tohoto poklesu je závislá na rozsahu stínění. Od jisté prahové hodnoty se řetězec dostává do fáze, kdy stačí malý nárůst zátěže na výstupu, a řetězec vykazuje chování spotřebiče. Dochází k opačnému směru toku proudu.

Kapitola 5

Ekonomický model PV elektrárny

Ekonomický model bude sloužit jako nástroj pro ekonomické vyhodnocení výkonných ztrát na PV elektrárně. Abychom mohli vyhodnotit, jakým způsobem ztráty z finančního hlediska ovlivní provoz elektrárny, je třeba namodelovat funkční elektrárnu bez závad po celou dobu její životnosti.

5.1 Základní předpoklady

Pro účely této bakalářské práce uvažujeme elektrárnu postavenou na volné ploše, tedy nikoliv domovní instalace. Elektrárnu bude vlastnit právnická osoba. Spuštění elektrárny je stanoveno na konec roku 2010 a trvání jejího provozu na dobu 20 let¹⁾, tedy do roku 2030. Toto rozhodnutí velmi ovlivní legislativu, která se bude k provozu PV elektrárny vztahovat. Druhý důležitý dopad tohoto rozhodnutí je, že pro rok 2010 nebudeme uvažovat žádné výnosy z prodeje vyrobené elektřiny. Dalším předpokladem je instalovaný výkon elektrárny. Ten byl zvolen jako $P_{inst} = 4 \text{ MW}_p$, tento výkon odpovídá PV elektrárně střední velikosti, která se standardně vyskytuje na volné ploše. Předpokládáme úhradu nákladů z vlastních prostředků, tedy bez úvěru.

5.2 Hodnocení investice

Pro hodnocení investice jsou využita 2 kritéria a to čistá současná hodnota (dále jen NPV) a jako doplňkové kritérium vnitřní výnosové procento (dále jen IRR).

NPV je absolutní kritérium pro hodnocení investic, které bere v úvahu časové rozložení toku peněz. Jeho matematická definice je:

$$NPV = \sum_{t=0}^T CF_t \cdot (1+r)^{-t}, \quad (5.1)$$

kde T je doba trvání investice, CF_t je peněžní tok v roce t a r je požadovaný diskont.

Doba trvání investice je určena na základě základních předpokladů 5.1. Hodnotu diskontu si určíme (podrobněji v 5.3) a peněžní toky (podrobněji 5.4) určíme na základě výpočtů popsaných níže.

IRR je relativní kritérium pro hodnocení investic, které také bere v úvahu časové rozložení toku peněz. Matematicky je definováno jako:

$$\sum_{t=0}^T CF_t \cdot (1+IRR)^{-t} = 0, \quad (5.2)$$

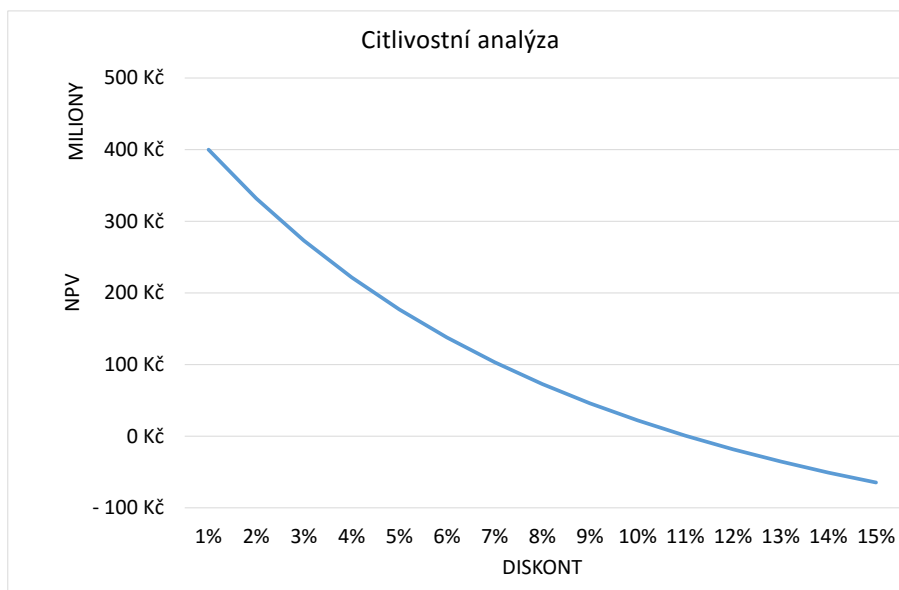
kde T je doba trvání investice (u nás 20 let) a CF_t je peněžní tok v roce t .

Kritérium v zásadě vyjadřuje, pro jaký diskont r je NPV nulové. V našem případě tedy pouze rozšiřuje výsledky získané pomocí NPV a usnadňuje čtení výsledků. Nevýhodou IRR je riziko, že hodnota nemusí existovat, případně jich může existovat více.

¹⁾ vyhláška č. 364/2007 Sb., Čl. I, Příloha č.3 k vyhlášce č. 475/2005 Sb., Fotovoltaika, odstavec 1

5.3 Diskont

Stanovení diskontu je obvykle velmi subjektivní, neboť vyjadřuje naše očekávání ohledně vybrané investice. Pro model budeme uvažovat hodnotu diskontu $r = 7\%$. Tato hodnota vychází z metodiky stanovení výkupních cen a zelených bonusů [4] energetického regulačního úřadu. Zde se uvádí hodnota 6,3%. Vzhledem k odlišnostem od předpokladů v metodice využíváme odlišnou hodnotu, která je ale blízká. Jaký má dopad na NPV projektu změna diskontu nejlépe zobrazuje citlivostní analýza na grafu 5.1.



Obrázek 5.1. Závislost NPV na výši diskontu r .

5.4 Peněžní tok (Cash Flow)

Pro posuzování investice potřebujeme stanovit peněžní toky v průběhu provozování PV elektrárny. V ekonomickém modelu vycházíme mimo jiné z předpokladu, že všechny výnosy se stanou příjmy a všechny náklady (vyjma odpisů) se stanou také výdaji. To znamená, že všechny závazky budou zavčasu v plné výši vypořádány. Peněžní tok stanovíme nepřímou metodou jako:

$$CF_t = EAT_t + N_{odp,t}, \quad (5.3)$$

kde CF_t je peněžní tok v roce t , EAT_t je zisk po zdanění v roce t a $N_{odp,t}$ jsou daňové odpisy v roce t (kapitola 5.7.6).

5.5 Zisk

Pro stanovení CF_t dle vzorce (5.3) potřebujeme znát zisk po zdanění (dále jen EAT_t) v jednotlivých letech provozu elektrárny. Jako první stanovíme zisk před zdaněním (EBT_t). Pro EBT_t platí jednoduchý vztah:

$$EBT_t = V_{celkem,t} - N_{celkem,t}, \quad (5.4)$$

kde $V_{celkem,t}$ jsou celkové výnosy v jednotlivých letech (blíže vztah (5.6)) a $N_{celkem,t}$ jsou daňově uznatelné náklady v jednotlivých letech (vztah (5.14)).

Následný přechod k EAT je na základě výsledku rovnice (5.4) velmi jednoduchý. Je třeba odečíst daň z příjmu právnických osob (blíže 5.7.7).

$$EAT_t = EBT_t - D_{příjem,t}, \quad (5.5)$$

kde EBT_t je zisk před zdaněním stanovený na základě vztahu (5.4) a $D_{příjem,t}$ je vypočtená daň z příjmu dle vztahu (5.21).

5.6 Výnosy

Veškeré výnosy z provozu PV elektrárny jsou tvořeny prodejem vyrobené elektrické energie. Výnosy jsou pro jednotlivé roky stanoveny dle následujícího vztahu:

$$V_{celkem,t} = S_t \cdot P_{vyr,t}, \quad (5.6)$$

kde $V_{celkem,t}$ jsou celkové výnosy v roce t , S_t je garantovaná výkupní cena v roce t (dle vztahu (5.7)), $P_{vyr,t}$ je vyrobený výkon v roce t na základě vztahu (5.13) a t je rok provozu elektrárny.

5.6.1 Výkupní ceny

Cena, za kterou je elektřina vykupována do sítě, závisí na cenovém rozhodnutí Energetického regulačního úřadu (dále jen ERÚ). Rozhodnutí jsou online k dispozici na webových stránkách ERÚ. Budoucí výkupní ceny můžeme velmi dobře odhadnout, neboť ceny jsou dle vyhlášky¹⁾ garantovány po dobu životnosti výroben elektřiny, to je v našem případě 20 let. Druhou podstatnou informací, kterou tato vyhláška sděluje je, že dochází k valorizaci výkupních cen od 2 % do 4 % ročně. V tabulce 5.1 názorně vidíme, že v posledních letech se procento valorizace pohybuje na spodní hladině, a proto budeme v ekonomickém modelu uvažovat pro budoucí výkupní ceny valorizace v podobě $K_{val} = 2\%$.

Rok	Výkupní cena za 1 MWh	Valorizace	Cenové rozhodnutí
2010	12 150 Kč	-	č. 5/2009
2011	12 400 Kč	2,06 %	č. 2/2010
2012	12 650 Kč	2,02 %	č. 7/2011
2013	12 903 Kč	2,00 %	č. 4/2012
2014	13 161 Kč	2,00 %	č. 4/2013
2015	13 424 Kč	2,00 %	č. 1/2014
2016	13 692 Kč	2,00 %	č. 9/2015

Tabulka 5.1. Výkupní ceny stanovené cenovými rozhodnutími ERÚ [5].

Pro výkupní ceny v jednotlivých letech platí:

$$S_t = S_0 \cdot (1 + K_{val})^t, \quad (5.7)$$

kde S_t je garantovaná výkupní cena v roce t , S_0 je garantovaná výkupní cena v roce 2010 a K_{val} odpovídá valorizaci výkupních cen.

¹⁾ vyhláška č. 150/2007 Sb., § 2, odstavec 11

5.6.2 Vyrobený výkon

PV elektrárna vychází z předpokladu instalovaného výkonu o velikosti 4 MW_p . Výkon modulu uvedený v datovém listu je ale stanoven při splnění STC, které obvykle venku nepanují. To znamená, že modul po většinu času nevyrábí svůj špičkový výkon, ale výkon nižší. Abychom vzali tento fakt v potaz, zavádíme takzvaný **koeficient ročního využití**. Ten nám udává, kolik hodin ročně by musela elektrárna vyrábět instalovaný výkon, aby vyrobené množství energie odpovídalo skutečné výrobě. To lze matematicky vyjádřit následovně:

$$\int_{t=1}^T (t \cdot P_t) dt = K_{rv} \cdot P_{inst}, \quad (5.8)$$

kde T je počet dní v daném roce, P_t je okamžitý výkon v čase t , K_{rv} je koeficient ročního využití a P_{inst} je instalovaný výkon. Vzorec (5.8) platí za předpokladu, že by nedocházelo k žádnému poklesu výkonu.

Výše koeficientu ročního využití pro ekonomický model je přebrána z vyhlášky¹⁾, která stanoví, že pro výrobní na 100 kW_p je $K_{rv} > 1000$ hodin, právě tato hraniční hodnota je uvažována pro model.

Rok	Pokles instalovaného výkonu	Meziroční změna poklesu
2011	2,10%	2,10%
2012	3,50%	1,40%
2013	4,55%	0,95%
2014	5,25%	0,70%
2015	5,95%	0,70%
⋮	⋮	⋮
2020	9,45%	0,70%
⋮	⋮	⋮
2030	16,45%	0,70%

Tabulka 5.2. Průměrný procentuální pokles instalovaného výkonu P_{inst} v jednotlivých letech.

Pro reálné aplikace musíme samozřejmě uvažovat pokles výkonu v čase. Pokles můžeme uvažovat ve dvou variantách. Ta první je **očekávaný pokles výkonu**. Jedná se o pokles, který má obvykle výrobce zanesený ve svých záručních podmínkách. Příklad takové garance výkonu je uveden v kapitole 2. Tyto podmínky budou dodrženy v ekonomickém modelu. Můžeme uvažovat, že v prvních letech provozu bude působením klimatických podmínek docházet k největším změnám při poklesu výkonu, než dojde k ustálení výkonu modulu. Proto je v prvním roce uvažován 3 násobek, ve druhém roce 2 násobek a ve třetím roce 1,5 násobek **koeficientu poklesu výkonu** K_{pv} . Za předpokladu, že je $K_{pv} = 0,7\%$ za rok, dostáváme průběh poklesu výkonu uvedený v tabulce 5.2.

Druhou složkou, která zastupuje pokles výkonu, je **pokles vlivem závad**. Tento pokles může nastat například v důsledku nedodržení instalačního manuálu či v důsledku klimatických podmínek. Procentuální pokles výkonu je vždy vztažen vůči instalovanému výkonu. Budeme uvažovat tři možné průběhy poklesu výkonu:

¹⁾ vyhláška č. 300/2010 Sb., kterou se mění vyhláška č. 475/2005 Sb., Čl. I

1) Konstantní pokles výkonu

Pod touto variantou se ukrývají závady způsobené např. krupobitím, blesky, požárem a podobně. Jde tedy v zásadě o situaci, kdy dojde skokově k poškození modulů na elektrárně, ale neočekáváme rozvoj závad do budoucna. Matematicky je tato situace modelována následovně:

$$K_{závad,t} = K_{konst}, \quad (5.9)$$

kde $K_{závad,t}$ je procentuální pokles výkonu v roce t , t značí dobu po kterou se závada vyskytuje na elektrárně v letech a $K_{konst} \in [0\%, 100\%]$ je procentuální pokles výkonu v prvním roce výskytu závady.

2) Lineárně rostoucí pokles výkonu

Varianta s lineárně rostoucím poklesem výkonu představuje již závady klasického charakteru, jakými jsou například praskliny článků či zabarvení EVA. Zde očekáváme rozvoj těchto závad s narůstajícím časem. Rozvoj závad a tím způsobený pokles výkonu bude závislý na klimatických podmínkách, jako je dopadající záření, teplota okolí, množství sněhu v zimě a další. Lze ale očekávat spíše mírný a stabilní nárůst, než dramatické skoky v poklesu výkonu. Matematicky je pokles vyjádřen takto:

$$K_{závad,t} = \begin{cases} t \cdot K_{lin} & \text{pro } t \cdot K_{lin} \leq 100\% \\ 100\% & \text{pro } t \cdot K_{lin} > 100\% \end{cases} \quad (5.10)$$

kde $K_{závad,t}$ je procentuální pokles výkonu v roce t , t značí dobu po kterou se závada vyskytuje na elektrárně v letech a K_{lin} je konstanta odpovídající meziročnímu poklesu výkonu v procentech.

3) Exponenciálně rostoucí pokles výkonu

Poslední uvažovaná varianta bere v potaz závady s tendencí zrychlovat svůj dopad na výkon. Především se bavíme o degradaci modulů vlivem PID. Pro simulaci budeme uvažovat exponenciální funkci o základu e a rovnice má následující tvar:

$$K_{závad,t} = \begin{cases} \exp(t \cdot K_{exp})/100 & \text{pro } \exp(t \cdot K_{exp})/100 \leq 100\% \\ 100\% & \text{pro } \exp(t \cdot K_{exp})/100 > 100\% \end{cases} \quad (5.11)$$

kde $K_{závad,t}$ je procentuální pokles výkonu v roce t , K_{exp} je konstanta upravující sklon exponenciálního průběhu a t značí dobu, po kterou se závada vyskytuje na elektrárně v letech.

Celkový pokles výkonu v každém roce stanovíme pomocí vztahu (5.12). Za $K_{celkem,t}$ dosazujeme dle varianty vztahu (5.9),(5.10),(5.11).

$$K_{celkem,t} = \begin{cases} K_{závad,t} + K_{oček,t} & \text{pro } K_{závad,t} + K_{oček,t} \leq 100\% \\ 100\% & \text{pro } K_{závad,t} + K_{oček,t} > 100\% \end{cases} \quad (5.12)$$

Množství vyrobeného výkonu je závislé na poklesu výkonu a koeficientu ročního využití. Tuto skutečnost vyjadřuje vztah (5.13), který je užit i v ekonomickém modelu.

$$P_{vyr,t} = K_{rv} \cdot P_{inst} \cdot (1 - K_{celkem,t}), \quad (5.13)$$

kde $P_{vyr,t}$ je vyrobený výkon v roce t , K_{rv} je koeficient ročního využití, P_{inst} je instalovaný výkon a $K_{celkem,t}$ je celkový procentuální pokles výkonu v roce t (podle vztahu (5.12)).

5.7 Náklady

Celkové náklady tvoří několik dílčích položek. Můžeme je vyjádřit následovně:

$$N_{celkem,t} = \begin{cases} I_{poč,0} + N_{pro,t} & \text{pro } t=0 \\ N_{opr,t} + N_{pro,t} + N_{odp,t} + N_{odvod,t} + N_{recyk,t} & \text{pro } t \in [1, 20] \end{cases} \quad (5.14)$$

kde $N_{celkem,t}$ jsou celkové daňově uznatelné náklady v roce t , $I_{poč,0}$ je počáteční investice v roce 0 (kapitola 5.7.1), $N_{pro,t}$ jsou provozní náklady v roce t (kapitola 5.7.3), $N_{opr,t}$ jsou náklady na opravy v roce t (kapitola 5.7.2), $N_{odp,t}$ jsou daňové odpisy v roce t (kapitola 5.7.6), $N_{odvod,t}$ je odvod z elektřiny ze slunečního záření (kapitola 5.7.4), $N_{recyk,t}$ je recyklační poplatek v roce t (kapitola 5.7.5) a t je počet let provozu elektrárny.

5.7.1 Počáteční investice

Základní součástí ekonomického modelu je správný odhad výše **investic pro vybudování PV elektrárny**. Pro odhad byl využit článek publikovaný v roce 2010 kolegy z VŠB-TU v Ostravě [6]. Druhým pramenem pro stanovení výše počáteční investice jsou indikativní hodnoty technických a ekonomických parametrů ¹⁾. Dle těchto parametrů jsou pro splnění maximální návratnosti investice do 15 let, při garantovaných výkupních cenách, měrné investiční náklady pro systém nad 100 kW_p menší než 55 000 Kč/kW_p. Celková výše nákladů je stanovena za pomoci obou zdrojů.

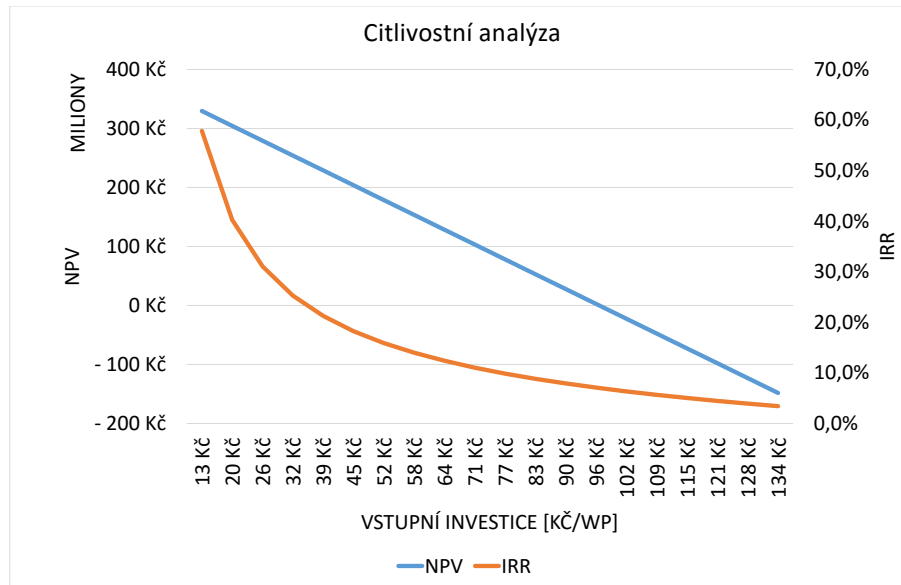
Položka	Náklady na 1 W _p
Pozemek	9,00 Kč
Transformátor	2,00 Kč
Zázemí pro obsluhu	0,30 Kč
Mechanické konstrukce	6,00 Kč
Kabeláž a elektrické rozvody	5,00 Kč
Fotovoltaické moduly	30,00 Kč
Měniče	7,00 Kč
Stavební práce	9,00 Kč
Zabezpečovací zařízení	2,00 Kč
Základní pojištění	0,30 Kč
Celkem	70,60 Kč

Tabulka 5.3. Náklady na počáteční investici vztahované na 1 W_p.

Z tabulky 5.3 je patrné, že položky jako pozemek či stavební práce činí značnou část výsledných odhadovaných nákladů. Je nutné si uvědomit, že lze jen stěží stanovit tyto položky bez znalosti dalších informací. Pro lepší představu si rozebereme náklady na pozemek. Hodnota přebíraná z článku [6] uvádí náklady ve výši 9 Kč/W_p. Pokud si představíme instalovaný výkon 1 MW_p a realizaci pomocí modulů se štítkovým výkonem 200 W_p, dostaneme počet potřebných modulů roven 5 000 ks. Dále zavedeme předpoklad, že modul bude mít rozměry 1 x 1,5 m, jeden modul má tedy plochu 1,5 m² a všechny moduly celkem zaberou plochu 0,75 ha. Tuto hodnotu ještě zdvojnásobíme, abychom brali v potaz nutné mezery mezi řadami, z důvodu stínění. Celkem tedy můžeme odhadem uvažovat 1,5 ha na výstavbu 1 MW_p. Pokud převedeme náklady z tabulky vztahované na 1 W_p na cenu pozemku za 1 m², dostáváme cenu 600 Kč/m². Pokud

¹⁾ vyhláška č. 300/2010 Sb., kterou se mění vyhláška č. 475/2005 Sb., Čl. I

se podíváme na ceny zemědělské půdy, dozvíme se například z článku [7], že cena se pohybuje okolo 7 - 15 Kč/m². Uvažujme tedy horní hranici tohoto rozmezí. Pak dojdeme k závěru, že náklady uvedené v tabulce 5.3 pro pozemek jsou až 40 krát vyšší. Na druhou stranu je třeba si uvědomit, že pokud si vlastník půdy uvědomil její například výhodnou pozici z hlediska dopadajícího záření, mohl cenu razantně zvýšit.



Obrázek 5.2. Závislost NPV (při $r = 7\%$) a IRR na vstupní investici vztahované na $1 W_p$.

Obdobně bychom mohli uvažovat nad náklady spojenými se stavebními pracemi v závislosti na přístupnosti terénu. Období roku 2010 bylo také dramatické z hlediska vývoje cen modulů, vzhledem k nárůstu počtu instalací [8] a vstupu čínských výrobců na trh [9]. Tuto skutečnost reflektují nižší náklady na PV moduly a měniče vzhledem k hodnotám v článku [6].

Ačkoliv hodnoty uvedené v tabulce 5.3 budou použity pro následnou analýzu chování elektrárny při poklesu výkonu, provedli jsme citlivostní analýzu pro vyšší NPV (kapitola 5.2) na vyšší nákladů na počáteční investici.

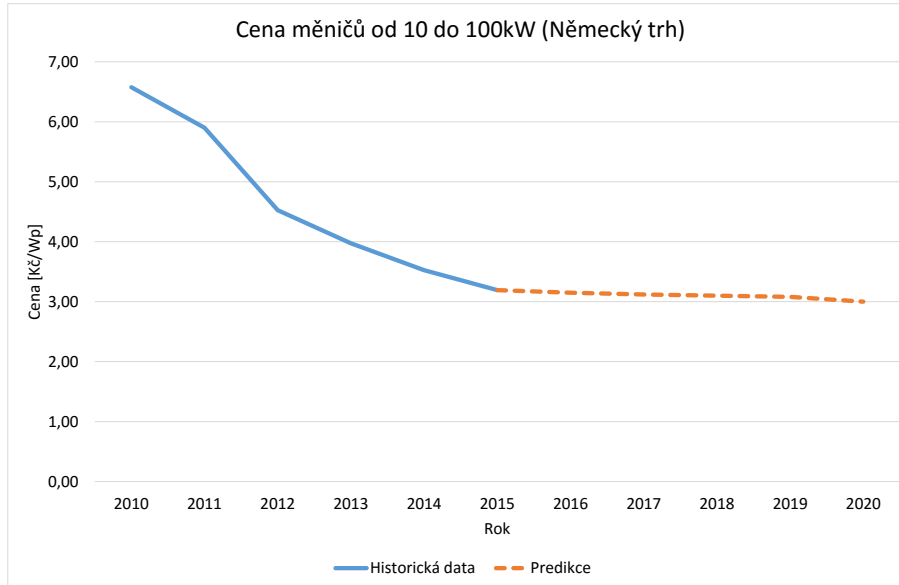
5.7.2 Náklady na opravy měničů

Životnost měničů je obvykle 10 let. To je dáno jejich konstrukčním provedením. V 10. roce provozu elektrárny uvažujeme ukončení provozu měničů instalovaných při zahájení provozu a jejich výměnu za nové. Tato položka je v modelu uvažována jako oprava a její uskutečnění tedy neovlivní výši odpisů, pouze se jednorázově projeví jako daňově uznatelný náklad. Výši nákladů na opravu měničů uvažujeme jako 50% z ceny v roce 2010. To je dáno očekávaným poklesem ceny měničů¹⁾, který je znázorněn na grafu 5.3 a uvažováním pesimistické varianty, tedy o něco horší, než plyne z grafu.

$$N_{opr,měn} = 0,5 \cdot I_{měn,1W_p} \cdot P_{inst} \quad (5.15)$$

kde $N_{opr,měn}$ náklady na opravu měničů, $I_{měn,1W_p}$ je výše počáteční investice do měničů vztahovaná na $1 W_p$ a P_{inst} je instalovaný výkon na elektrárně.

¹⁾ Data pro sestavení vývoje cen v budoucnu jsou založena na hodnotách „inverter price index“ publikovaných v časopise Photon International: The Solar Power Magazine (www.photon.info) v letech 2010 až 2015.



Obrázek 5.3. Vývoj cen měničů s výkonem od 10 do 100 kW.

5.7.3 Náklady na běžný provoz

PV elektrárna jako každé zařízení vyžaduje pozornost a údržbu, aby správně fungovala. Řadíme sem tedy náklady na pravidelné kontroly celého systému, výdaje na bezpečnosti agenturu, péči o okolí (např. sekání trávy), čištění komponent (především PV modulů), diagnostiku systému, apod. Pokud jsou tyto činnosti zanedbávány, může být následkem neočekávané zkrácení životnosti zařízení, případně nadměrný pokles výkonu způsobený špatnou údržbou.

Náklady na běžný provoz jsou určeny na základě reálných dat poskytnutých za tímto účelem od zákazníka LDFS. Ten provozuje elektrárnu o instalovaném výkonu 1 MW_p . Lze očekávat, že náklady budou v tomto případě pouze narůstat v závislosti na výši instalovaného výkonu a data jsou tak pro náš případ relevantní. Pokud by se jednalo o diametrálně se lišící instalovaný výkon (např. střešní instalace), mohla by se částka podstatně lišit.

Náklady jsou vyjádřeny jako procentuální podíl z počáteční investice a to ve výši $K_{prov} = 0,8\%$ za rok. Také je brána v potaz inflace ve výši $\alpha = 2\%$ dle inflačního cíle ČNB [10]. Výpočet pro jednotlivé roky provozu vypadá následovně:

$$N_{provoz,t} = K_{prov} \cdot I_{poč,0} \cdot (1 + \alpha)^t, \quad (5.16)$$

kde N_{provoz} jsou výdaje při běžném provozu v roce t , K_{prov} je procentuální podíl z počáteční investice, $I_{poč}$ je výše počáteční investice v roce 0 a α je koeficient zohledňující inflaci.

5.7.4 Odvod z elektřiny ze slunečního záření

Při provozování PV elektrárny spuštěné v letech 2009 a 2010 je nutné uvažovat pro ekonomický model odvod z elektřiny ze slunečního záření. Ten byl zaveden s účinností od 1. 1. 2011¹⁾. Předmětem tohoto odvodu je elektřina vyrobená ze slunečního záření od 1. 1. 2011 do 31. 12. 2013. Výše odvodu je stanovena jako 26 % z výnosů za prodanou

¹⁾ zákon č. 402/2010 Sb. novelizující zákon č. 180/2005 Sb., o podpoře výroby z elektřiny z obnovitelných zdrojů energie

elektřinu v rámci výkupních cen. Od 1. 1. 2014 je sazba odvodu zákonem¹⁾ snížena na 10 %. Snížená sazba je brána v potaz jako výchozí pro budoucí roky v ekonomickém modelu.

$$N_{odvod,t} = V_{celkem,t} \cdot S_{odvod,t}, \quad (5.17)$$

kde $N_{odvod,t}$ je odvod z elektřiny ze slunečního záření v roce t , V_t jsou výnosy z prodeje vyrobené elektrické energie v roce t a $S_{odvod,t}$ je sazba pro odvod platná v roce t .

Odvod je v ekonomickém modelu považován za daňově uznatelný náklad. Odůvodnění tohoto postupu se nachází ve sdělení Generálního finančního ředitelství [11]. Částka odvodu je uznatelným nákladem pro období, do kterého spadá příjem z prodeje elektřiny.

■ 5.7.5 Recyklační poplatek

Dle vyhlášky o nakládání s elektrozařízeními a elektroodpady²⁾ jsou provozovatelé, v případě PV elektráren složených z modulů uvedených na trh do 1. ledna 2013, povinni uzavřít smlouvu s provozovatelem kolektivního systému a odvést mu poplatek na recyklaci po skončení provozu.

Pro určení výše recyklačního poplatku je třeba znát celkovou hmotnost instalovaných modulů. Pro potřeby vyhlášky je hmotnost modulů definovaná jako:

$$M = P \cdot K, \quad (5.18)$$

kde M je uvažovaná hmotnost modulů instalovaných na elektrárně v kg, P je instalovaný výkon a $K = 0,11$ kg představuje průměrnou hmotnost vztaženou na $1 W_p$.

Sazba pro výpočet minimální výše recyklačního poplatku je stanovena vyhláškou na $S = 8,50$ Kč/kg. Celková výše poplatku je tedy:

$$N_{recyk} = M \cdot S, \quad (5.19)$$

kde za M dosadíme ze vztahu (5.18).

Tento poplatek je provozovatel povinen uhradit v rozmezí let 2014 - 2018, to znamená během pěti let. Každý rok uhradí jednu pětinu celkové částky. Poplatek je dle zákona o daních z příjmů³⁾ daňově uznatelným nákladem.

■ 5.7.6 Daňové odpisy

Stránka odpisů je pro účely ekonomického modelu značně zjednodušena. To si můžeme dovolit vzhledem k přesnosti modelu (odhad mnoha položek). V modelu je využito odpisování zákona o daních z příjmu⁴⁾. Ten říká, že hmotný majetek využívaný k výrobě elektřiny ze slunečního záření se odpisuje rovnoměrně bez přerušení po dobu 240 měsíců do 100 % vstupní nebo zvýšené vstupní ceny.

Provedeme dvě úpravy. Tou první je, že nebudeme odpisy počítat po měsících ale rocích. Dle zákona máme povinnost zahájit odpisování počínaje následujícím měsícem po měsíci, ve kterém byly splněny podmínky pro odpisování. To znamená, že v případě spuštění elektrárny v prosinci roku 2010 začínáme odepisovat po celých letech od roku 2011.

¹⁾ zákon č. 407/2012 Sb. novelizující zákon č. 165/2012 Sb., o podporovaných zdrojích energie

²⁾ vyhláška č. 352/2005 Sb., §14b Bližší podmínky financování nakládání s elektroodpadem ze solárních panelů uvedených na trh do dne 1. ledna 2013

³⁾ zákon č. 586/1992 Sb., §23 Základ daně, c) odstavec 10

⁴⁾ zákon č. 586/1992 Sb., § 30b, Odpisy hmotného majetku využívaného k výrobě elektřiny ze slunečního záření

Druhou úpravou je, že do tohoto způsobu odepisování zahrneme celou počáteční investici a nebudeme tedy rozlišovat odpisové skupiny pro ostatní komponenty.

Odpisy v našem případě vypadají následovně:

$$N_{odp,t} = \frac{I_{poč,0}}{20}, \quad (5.20)$$

■ 5.7.7 Daň z příjmů právnických osob

Jediná odváděná daňová položka v ekonomickém modelu je daň z příjmu právnických osob. Tato položka se řídí příslušným zákonem¹⁾. V našem případě pro právnickou osobu platí sazba ve výši $d_{příjem} = 19\%$. Daň je vypočtena v jednotlivých rocích jako:

$$D_{příjem,t} = d_{příjem} \cdot EBT_t, \quad (5.21)$$

kde $D_{příjem,t}$ je daň z příjmů v roce t , $d_{příjem}$ je sazba daně a EBT_t je zisk před zdanění v roce t (blíže 5.5).

¹⁾ zákon č. 586/1992 Sb. o daních z příjmů, § 21, odstavec 1

Kapitola 6

Ekonomické vyhodnocení

6.1 Simulace poklesu výkonu

Vyhodnocení je založeno na hledání mezních hodnot koeficientů poklesu výkonu (kapitola 5.6.2), pro které platí v ekonomickém modelu $IRR = r = 7\%$ a to znamená $NPV = 0$. Nalezené koeficienty jsou uvedené v tabulce 6.1.

Rok	Rok provozu	K_{konst}	K_{lin}	K_{exp}
2011	1	24,1 %	2,6 %	0.257
2012	2	25,8 %	2,9 %	0.278
2013	3	27,6 %	3,3 %	0.303
2014	4	29,6 %	3,8 %	0.333
2015	5	32,4 %	4,3 %	0.369
2016	6	35,4 %	4,9 %	0.414
2017	7	38,9 %	5,7 %	0.472
2018	8	42,9 %	6,7 %	0.545
2019	9	47,6 %	8,0 %	0.641
2020	10	53,2 %	9,9 %	0.801
2021	11	60,1 %	13,0 %	1.040
2022	12	67,0 %	18,7 %	1.437
2023	13	75,6 %	32,7 %	2.224
2024	14	100,0 %	100,0 %	4.658
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2030	20	100,0 %	100,0 %	4.658

Tabulka 6.1. Mezní hodnoty koeficientů poklesu výkonu. K_{konst} značí koeficient konstantního poklesu výkonu, K_{lin} koeficient lineárního poklesu výkonu a K_{exp} koeficient exponenciálního poklesu výkonu.

Je třeba zdůraznit, že všechny hodnoty uvedené v tabulce 6.1, platí pouze pro model vytvořený dle kapitoly 5 a nelze je tak považovat za hodnoty platné pro jakoukoliv PV instalaci. Bližší interpretace získaných hodnot je uvedená v následujících podkapitolách.

6.1.1 Konstantní pokles výkonu

Konstantní pokles výkonu je zastoupen koeficientem K_{konst} . Správné pochopení výsledku je vysvětleno na mezní hodnotě uvedené v tabulce 6.1 pro rok 2013. Grafické znázornění poklesu výkonu s tímto koeficientem je v příloze E.30.

Tabulku 6.2 lze chápat následujícím způsobem. Protože uvažujeme K_{konst} pro rok 2013, tak pro roky 2010 až 2012 se nevyskytuje žádný pokles výkonu vlivem závad. Jedná se o konstantní pokles výkonu, tím pádem se pokles vlivem závad žádným způsobem nezvětšuje v čase, jedná se o jednorázové poškození, které setrvává po dobu životnosti elektrárny.

Rok	$K_{konst} = 30,0\%$	$K_{konst} = 27,6\%$	$K_{konst} = 15,0\%$
2012	0,0%	0,0%	0,0%
2013	30,0%	27,6%	15,0%
2014	30,0%	27,6%	15,0%
⋮	⋮	⋮	⋮
2030	30,0%	27,6%	15,0%

Tabulka 6.2. Příklad konstantních poklesů výkonu.

Prostřední sloupec s $K_{konst} = 27,6\%$ naznačuje mezní situaci. Pokud v roce 2013 dojde k poškození elektrárny v tomto rozsahu, bude se výsledné $NPV = 0$ Kč. Pro $K_{konst} > 27,6\%$ dostáváme vždy $NPV < 0$ Kč. V našem případě pro $K_{konst} = 30,0\%$ je $NPV = -8\,832\,027$ Kč. Naopak, pokud je $K_{konst} < 27,6\%$, bude vždy $NPV > 0$ Kč. Pro $K_{konst} = 15,0\%$ je $NPV = 47\,237\,451$ Kč.

Obdobně lze pracovat se všemi hodnotami K_{konst} v tabulce 6.1. Od roku 2024 dosahuje koeficient 100%. Z toho plyne, že pokud by elektrárna přestala zcela vyrábět, očekávání z investice to již neohroží.

6.1.2 Lineární pokles výkonu

Lineární pokles výkonu reprezentuje koeficient K_{lin} . Pro nastínění výsledků je využito z tabulky 6.1 mezní hodnoty $K_{lin} = 2,6\%$ pro rok 2011. Graficky je tento pokles zpracován v příloze E.31.

Rok	$K_{lin} = 3,5\%$	$K_{lin} = 2,6\%$	$K_{lin} = 1,5\%$
2010	0,0%	0,0%	0,0%
2011	3,5%	2,6%	1,5%
2012	7,0%	5,2%	3,0%
⋮	⋮	⋮	⋮
2029	66,5%	49,8%	28,5%
2030	70,0%	52,4%	30,0%

Tabulka 6.3. Příklad lineárních poklesů výkonu.

V nasimulované variantě (tabulka 6.3) se nyní nadměrný pokles vlivem závady vyskytuje již od 1. roku provozu. Meziroční navýšení poklesu odpovídá konstantě K_{lin} . Opět platí, že pro $K_{lin} = 2,6\%$ (mezní hodnota pro rok 2011) je $NPV = 0$ Kč. Pro $K_{lin} = 3,5\%$, tedy hodnotu větší, než je mezní, dostáváme $NPV = -35\,852\,421$ Kč. Naopak menší hodnotě $K_{lin} = 1,5\%$ odpovídá $NPV = 44\,159\,206$ Kč.

Obecně můžeme prohlásit, že pokud se v daném roce vyskytne závada, pro kterou platí $K_{lin} > K_{lin,mezní}$, pak bude vždy $NPV < 0$ Kč. Totéž platí naopak, tedy pokud $K_{lin} < K_{lin,mezní}$, pak platí $NPV > 0$ Kč. Opět platí, že od roku 2023 si můžeme dovolit ztratit až 100% výkonu (tabulka 6.1) a investice stále bude plnit naše kritéria pro její realizaci.

6.1.3 Exponenciální pokles výkonu

Velikost exponenciálního poklesu je závislá na konstantě K_{exp} . Výsledky jsou vysvětleny na mezní hodnotě $K_{exp} = 0,333$ pro rok 2014 uvedené v tabulce 6.1. Grafické zobrazení tohoto poklesu je uvedeno v příloze E.32.

Rok	$K_{exp} = 0,400$	$K_{exp} = 0,333$	$K_{exp} = 0,260$
2013	0,0 %	0,0 %	0,0 %
2014	1,5 %	1,4 %	1,3 %
2015	2,2 %	1,9 %	1,7 %
2016	3,3 %	2,7 %	2,2 %
⋮	⋮	⋮	⋮
2024	81,5 %	2,7 %	17,5 %
2025	100,0 %	54,5 %	22,6 %
2026	100,0 %	76,1 %	29,4 %
2027	100,0 %	100,0 %	38,1 %
⋮	⋮	⋮	⋮
2030	100,0 %	100,0 %	83,1 %

Tabulka 6.4. Příklad exponenciálních poklesů výkonu.

K_{exp} jako jediná konstanta poklesu výkonu není vyjádřena v procentech. V tabulce 6.4 je patrné, jakým způsobem konstanta ovlivňuje pokles výkonu. Se snižující se hodnotou konstanty jsou dopady na výkon mírnější.

Platí obdobné závěry, jako v předchozích variantách. Jakmile hodnota K_{exp} překročí mezní hodnotu pro daný rok, pak IRR klesne pod námi požadovaný diskont a tím pádem bude $NPV < 0$ Kč. Opačně dopadne situace, kdy K_{exp} bude menší než mezní hodnota.

V tabulce 6.1 je od roku 2024 $K_{exp} = 4,658$. Této hodnotě odpovídá pokles výkonu 100 % v daném roce. Z toho opět plyne, že od roku 2024 investice splnila naše očekávání bez ohledu na velikost poklesu výkonu.

6.2 Řešení poklesu výkonu

Nalézt řešení situace, kdy dojde k nadměrnému poklesu výkonu, nemusí být snadné. První důležitou informací je posouzení příčiny. Pokud je závada způsobena na straně majitele, pak je čistě na jeho rozhodnutí, jak se situací naložit. Nabízí se zjistit, jaký může mít pokles ekonomický dopad a na základě toho zvážit dvě varianty.

V případě, že NPV bude stále kladné i přes výskyt závady, pak lze uvažovat o nepřerušném provozu elektrárny i se závadami. Pokud ale NPV klesne pod nulu, nabízí se možnost vynaložit peněžní prostředky na opravu systému. Tato varianta může zlepšit situaci a opět tak vrátit NPV do kladných čísel, je třeba ale důkladné analýzy celého systému, aby byly finanční prostředky vynaloženy účelně a opatření mělo pozitivní dopad na vzniklou situaci.

Pokud nese vinu za nadměrný pokles výkonu výrobce komponent, stavební společnost či projektant elektrárny, vstupuje do rozhodnutí další faktor a to znění smlouvy mezi majitelem a daným subjektem. Východiska jak řešit tuto situaci se mohou lišit u každé instalace v závislosti na záručních podmínkách a dojednaném postupu při reklamačním řízení. Jak ukáží následující podkapitoly, je velmi důležité si sjednat dostatečně kvalitní záruční podmínky, aby se minimalizovala rizikovost investice do PV elektrárny.

Databáze LDFS obsahuje nabídku řešení reklamačního řízení českému zákazníkovi ze strany zahraničního výrobce modulů, kterou lze v anonymizované verzi podrobněji prozkoumat. Výrobce nabídnul celkem tři varianty řešení reklamace.

6.2.1 Výměna prokazatelně poškozených modulů

První varianta je založená na výměně vadných modulů. Tato nabídka bezesporu přináší dostatečnou nápravu situace, pokud budou vyměněny všechny vadné moduly. Je nutné si uvědomit finanční náročnost a požadavky na diagnostické metody, které se užívají. V případě zasažení menšího počtu modulů si lze představit selekci modulů na základě termografie a měření v terénu a následné měření VACH v laboratorním prostředí. Důležitou součástí této nabídky je také informace, že diagnostika, provedená na nesprávně vytipovaných modulech, nebude předmětem náhrady v reklamačním řízení. Rizika špatné selekce modulu na diagnostická měření tedy nese strana provozovatele elektrárny. Na druhou stranu velkou výhodou této nabídky je okamžité zřízení nápravy situace na elektrárně.

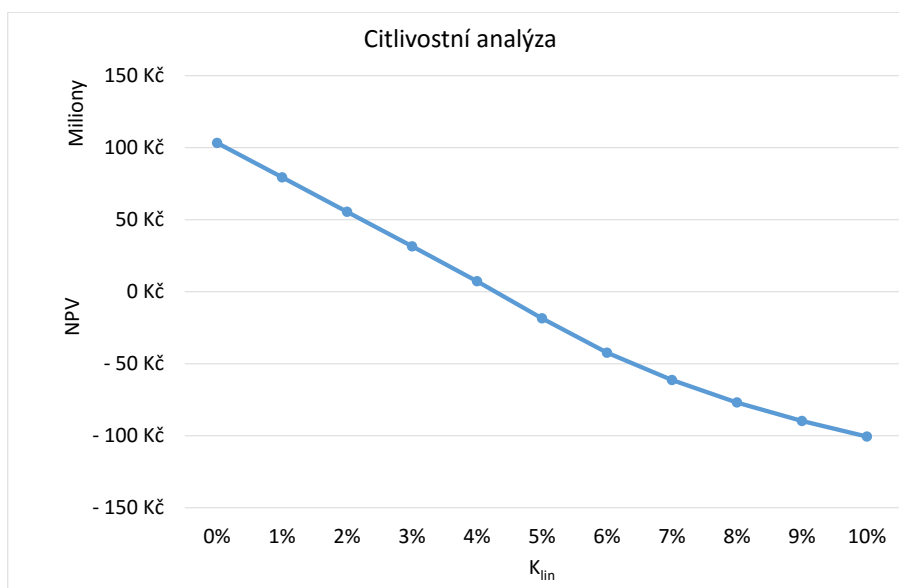
6.2.2 Dorovnání výkonu na nominální hodnotu

Druhá varianta předpokládá určení výše ztraceného výkonu a dodávky nových modulů v jeho výši. Tento způsob vyřízení reklamace by mohl uspokojit požadavky zákazníka v případě konstantního poklesu výkonu. Pokud bude pokles výkonu vzrůstat, jeví se jako nevýhodný.

Druhým problémem této nabídky je rozpor s podmínkami pro licenci na provozování PV elektrárny. Instalací nových modulů by došlo k navýšení instalovaného výkonu, tím pádem by provozovatel musel požádat o novou licenci a přišel by o garantovanou výkupní cenu na vyrobenou elektřinu. Tuto variantu lze tedy zavrhnout, protože je v podmínkách České republiky nerealizovatelná.

6.2.3 Finanční kompenzace ušlých zisků

Poslední varianta je založena na předpokladu kvalitního ekonomického modelu PV elektrárny, tak aby mohl být co nejpřesněji dopočítán ušlý zisk. Z hlediska zákazníka je nutné si uvědomit o jaké částky se jedná. V závislosti na smlouvě se nabízí dvě varianty vyrovnání. Tou první je okamžité vyrovnání za všechny ušlé zisky v každém roce. Druhou je pravidelné roční vyrovnání ušlých zisků.



Obrázek 6.1. Závislost NPV na koeficientu lineárního poklesu výkonu $K_{lin} \in [0\%, 10\%]$.

V první variantě můžeme ušlý zisk prezentovat na hodnotě NPV , která představuje čistou současnou hodnotu v roce 2010. Budeme předpokládat lineární pokles výkonu, který započne v pátém roce provozu. Provedeme citlivostní analýzu výše NPV závislou na výši koeficientu poklesu K_{lin} .

Na grafu 6.1 je názorné, jak rychle se mění hodnota NPV s rostoucí koeficientem poklesu. Pokud uvažujeme $K_{lin} = 5\%$, pak je rozdíl oproti situaci bez poklesu více než 100 000 000 Kč. S takto rostoucí sumou se nabízí otázka, jak moc je reálné, ze strany výrobce, uhradit tuto sumu, aniž by pro něj byla likvidační.

Pokud tedy výrobce nabízí při podpisu smlouvy záruku takového rozsahu, je dobré zvážit jeho schopnost dostát svým závazkům. To znamená posoudit historii společnosti a její postavení na trhu.

Druhá varianta, v podobě postupného splácení ušlého zisku v každém roce, je snazší z hlediska přesnějšího určení ušlých zisků. Také nabízí výrobci rozložit platby, což by mohlo zachovat jeho existenci. Na druhou stranu to pro zákazníka znamená, že bude po celou dobu vyplácení ušlého zisku v napětí, jak se bude společnosti dařit. Jedná se tedy z pohledu zákazníka o poměrně rizikový způsob řešení reklamačního řízení.

Kapitola 7

Závěr

Tato bakalářská práce má cíl nalézt způsob, jak spojit otázku technického charakteru, tedy určení velikosti poklesu výkonu, a ekonomického charakteru v podobě vyčíslení ekonomického dopadu.

Jsou zde představeny závady, které se běžně vyskytují na fotovoltaických modulech. Druhá důležitá část zastupuje diagnostické metody, kterými lze odhalit závady a to jak metody pro venkovní podmínky vhodné především pro výběr poškozených modulů, tak metody v laboratorním prostředí vhodné k přesnému stanovení výkonu modulů. Část s měřeními doplňuje technickou část bakalářské práce, neboť názorně ukazuje chování fotovoltaických instalací a zdůrazňuje, že pokud chceme fotovoltaickou elektrárnu simulovat v počítačovém prostředí, musíme ji chápat jako kompaktní systém, který je závislý na každém modulu.

Na druhé straně práce přináší detailní informace o podmínkách provozování PV instalací zprovozněných v roce 2010. Zaměřuje se především na finanční problematiku, tedy výkupní ceny, daně, odvody či odpisy. Právě odpisy nabízí prostor pro budoucí přesnější zpracování a tím i zpřesnění výsledků získaných z ekonomického modelu. Nabízí se také možnost rozšíření celé problematiky i mimo rok 2010 a vytvoření nástroje obecnějšího charakteru, který bude v závislosti na zvoleném roce zahájení provozu elektrárny schopen pracovat dle různých pravidel nastavených legislativou.

Z provedené analýzy systému, navrženého v ekonomickém modelu, jsme získali mezní hodnoty koeficientů pro konstantní, lineárně rostoucí a exponenciální průběh poklesu výkonu. Poklesy reflektují různé typy závad. Hodnoty koeficientů odpovídají poklesům výkonu, které zachovávají naše očekávání z investice. Také byla pro ukázkou vyhodnocena závislost čisté současné hodnoty na různé rychlosti poklesu výkonu. Oblast vyhodnocení nabízí do budoucna možnost přesnějšího zpracování chování jednotlivých závad v průběhu času, které je v této práci zobrazeno na tři základní typy průběhů. Další analýzy přinesly informace, jak se investice chová v případě rozdílné vstupní investice a odlišných očekávání z investice.

Ekonomické vyhodnocení v této práci přináší způsob, jak prezentovat finanční dopady závad a chování investice. Navržený ekonomický model zároveň prezentuje vypočtená data číselně i graficky, což má mít za následek snazší pochopení výstupů a tím lepší názornost pro uživatele ekonomického modelu.

Literatura

- [1] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS PROGRAMME. *Performance and Reliability of Photovoltaic Systems: Subtask 3.2: Review of Failures of Photovoltaic Modules*. 2014. ISBN 978-3-906042-16-9. Dostupné z: http://www.iea-pvps.org/index.php?id=95&eID=dam_frontend_push&docID=2064
- [2] GRAY, Jeffery L. The Physics of the Solar Cell. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. John Wiley Sons, Ltd, 2010, s. 82-129. DOI: 10.1002/9780470974704.ch3. ISBN 9780470974704. Dostupné také z: <http://dx.doi.org/10.1002/9780470974704.ch3>
- [3] CASTANER, Luis. a Santiago. SILVESTRE. *Modelling photovoltaic systems using PSpice*. Hoboken, NJ: J. Wiley, c2002. ISBN 0470845287.
- [4] Metodika stanovení výkupních cen a zelených bonusů. In: *Energetický regulační úřad* [online]. [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: http://www.eru.cz/documents/10540/462902/metodika_180_2005.pdf/
- [5] Elektřina: Cenová rozhodnutí: Platná cenová rozhodnutí: Archiv. *Energetický regulační úřad* [online]. [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://www.eru.cz/cs/elektřina/cenova-rozhodnuti/platna-cenova-rozhodnuti/archiv>
- [6] NOVÁK, Tomáš, Jaroslav ŠNOBL a Karel SKOKANSKÝ. FVE z pohledu investičních nákladů a návratnosti. *Světlo: časopis pro světelnou techniku a osvětlování*. Praha: FCC public, 2010, **13**(6), 48-50. ISSN 12120812. Dostupné také z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/fve-z-pohledu-investicnich-nakladu-a-navratnosti--15456>
- [7] MAŠEK, František. Půda: Investice hlavně pro trpělivé. In: *Peníze.CZ* [online]. ©2000-2016 [cit. 2016-04-27]. Dostupné z: <http://www.penize.cz/investice/186980-puda-investice-hlavne-pro-trpelive>
- [8] BENDA, Vítězslav, Kamil STANĚK a Petr WOLF. *Fotovoltaické systémy: Učební text k semináři* [online]. In: . 15.4.2011 [cit. 2015-10-28]. Dostupné z: <http://www.crr.vutbr.cz/kurzy-seminare/ekologie/seminar-fotovoltaicke-systemy>
- [9] DIVIŠOVÁ, Michaela. Jak to bylo a je s fotovoltaikou v Česku. In: *Peníze.cz* [online]. 2013 [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://www.penize.cz/nakupy/275131-jak-to-bylo-a-je-s-fotovoltaikou-v-cesku>
- [10] Aktuální prognóza ČNB: Prognóza inflace na horizontu měnové politiky. In: *Česká národní banka* [online]. 2016 [cit. 2016-04-27]. Dostupné z: https://www.cnb.cz/cs/menova_politika/prognoza/#inflation
- [11] Sdělení Generálního finančního ředitelství k aplikaci ustanovení Čl. I bodu 2 a Čl. II bodu 2 zákona č. 402/2010 Sb. In: *Finanční správa* [online]. ©2013-2016 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://www.financnisprava.cz/cs/dane-a-pojistne/dane/dan-z-prijmu/informace-stanoviska-a-sdeleni/2011/sdeleni-generalniho-financniho-reditel-2577>

Příloha A

Seznam použitých zkratek

- ELCD ■ Elektroluminiscenční diagnostická metoda (Electroluminescence Crack Detection Test)
- ERÚ ■ Energetický regulační úřad, <http://www.eru.cz/cs/>
- EVA ■ Ethyl vinyl acetát
- LDFS ■ Laboratoř diagnostiky fotovoltaických systémů, <http://pasan.feld.cvut.cz/>
- PV ■ Fotovoltaický, z anglického „photovoltaic“
- STC ■ Standardní testovací podmínky (standard test conditions), jsou definovány teplotou přechodu 25 °C, intenzitou záření 1000 W/m² a spektrem světla AM 1,5.
- TCO ■ Transparentní vodivý materiál
- VACH ■ Voltampérová charakteristika, charakteristika se závislostí proudu na napětí při měnící se zátěži

Příloha B

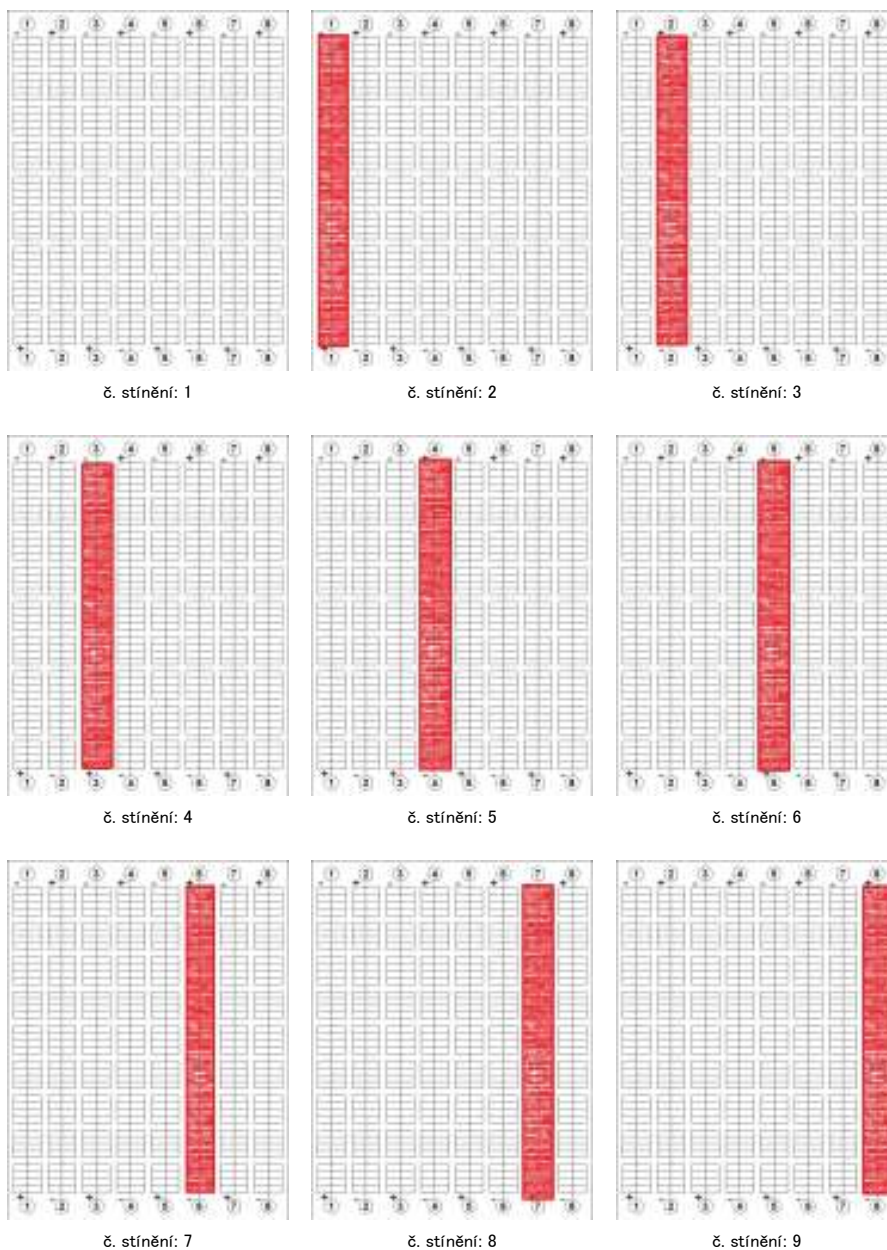
Schéma měřeného modulu



Obrázek B.1. Schéma měřeného modulu pro snazší zakreslení stínění.

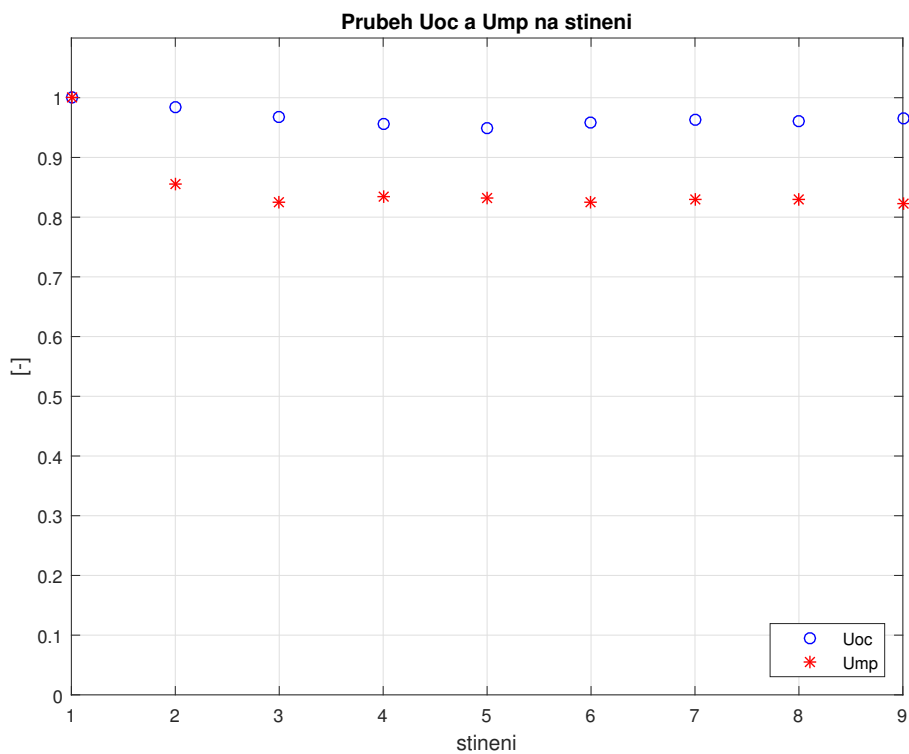
Příloha C

Měření proudů v sériovém zapojení

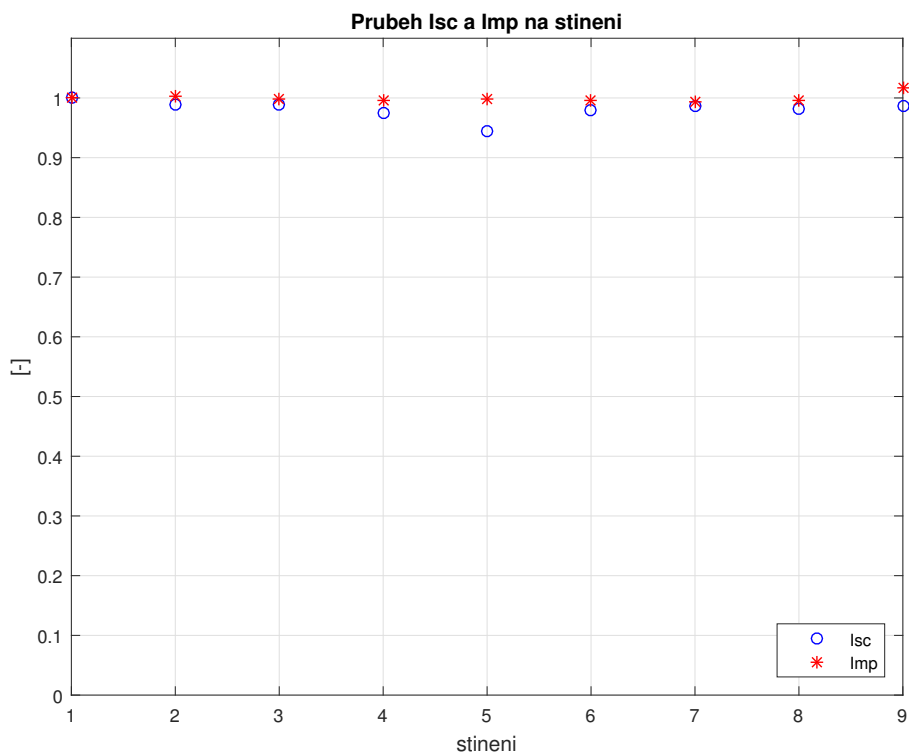


Zoner Photo Studio 15

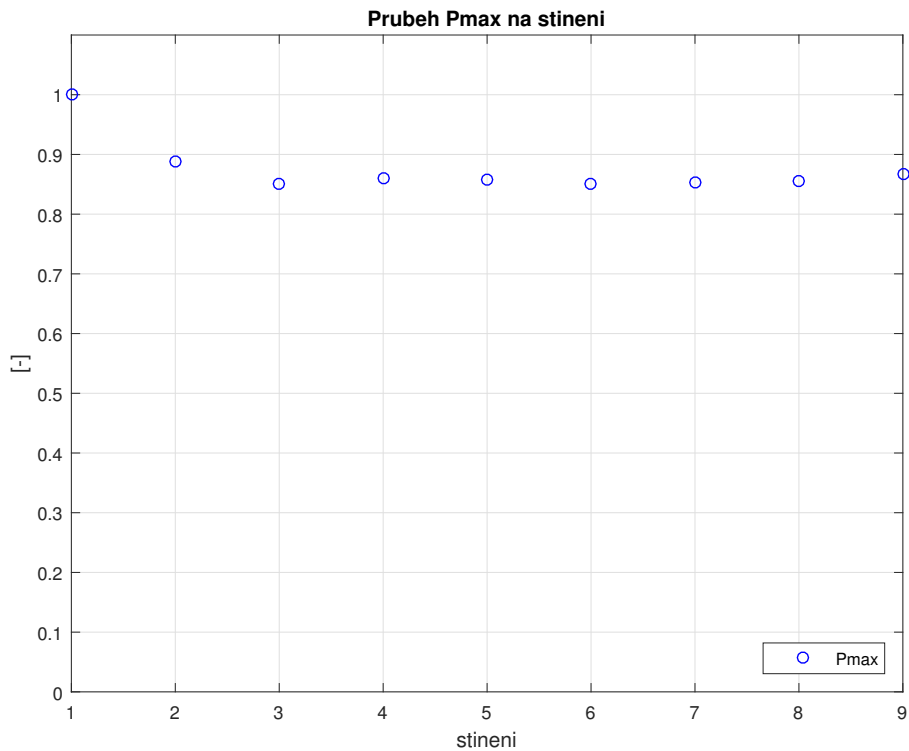
Obrázek C.2. Stínění č.1 až č.9



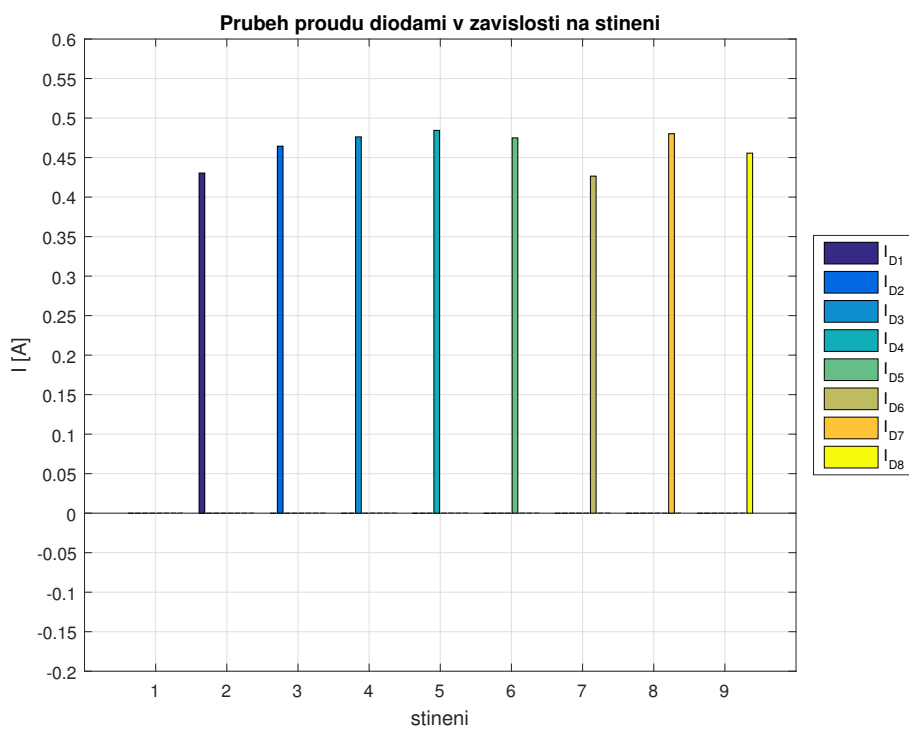
Obrázek C.3. Stínění č.1 až č.9 - porovnání U_{OC} a U_{MP} .



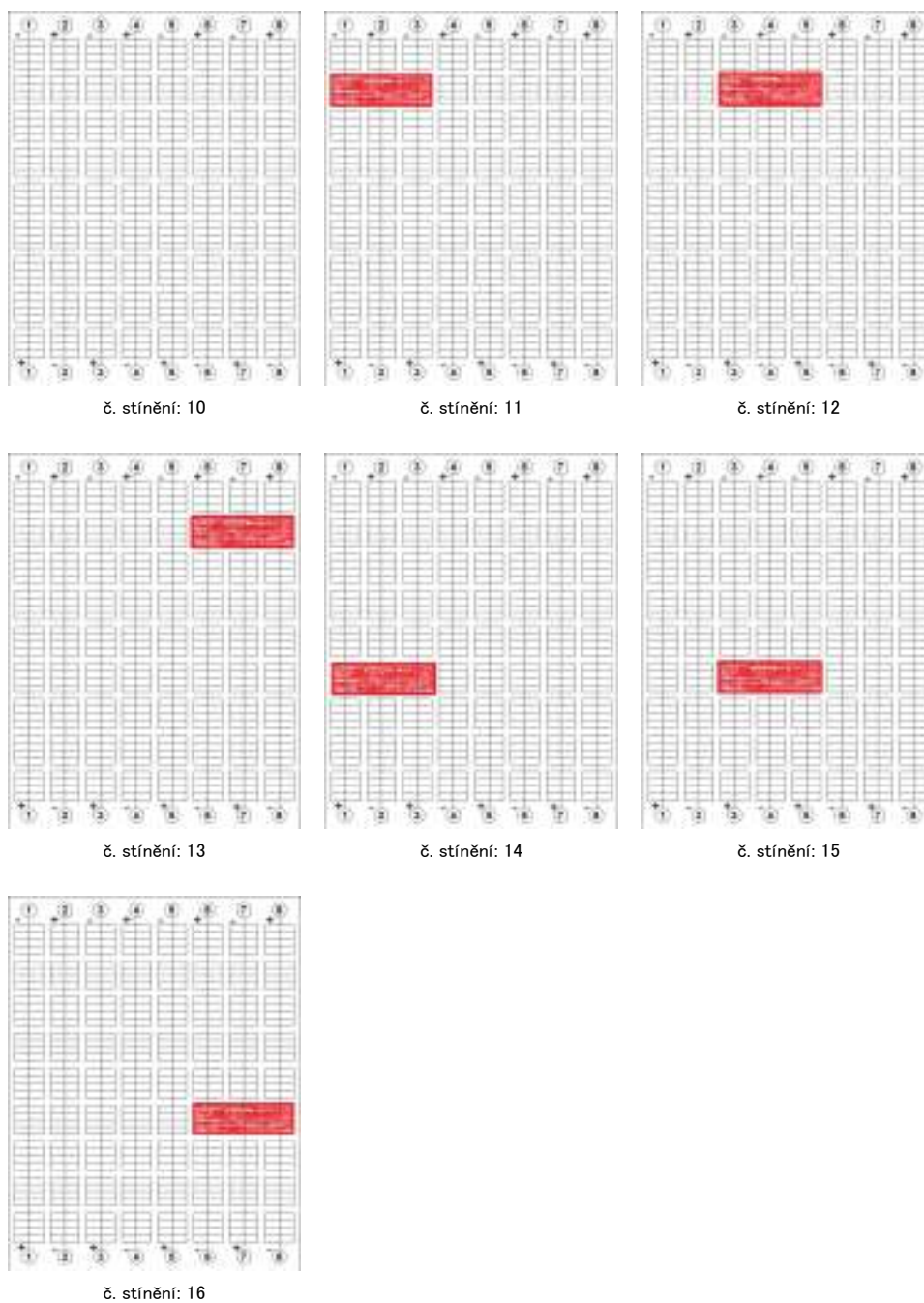
Obrázek C.4. Stínění č.1 až č.9 - porovnání I_{SC} a I_{MP} .



Obrázek C.5. Stínění č.1 až č.9 - porovnání P_{MAX} .

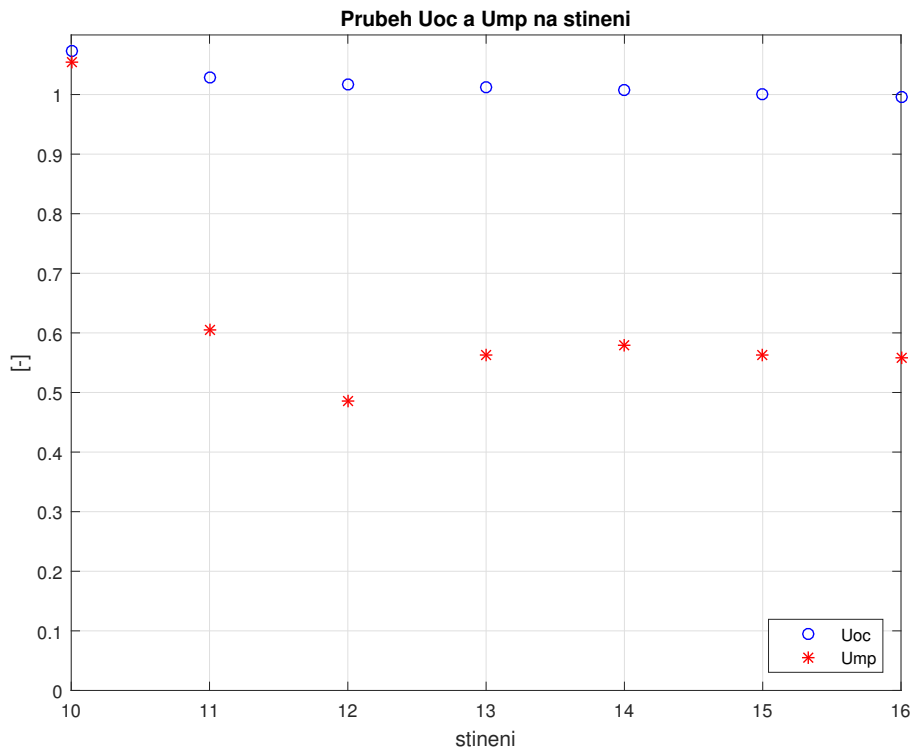


Obrázek C.6. Stínění č.1 až č.9 - porovnání proudů překlenovacími diodami.

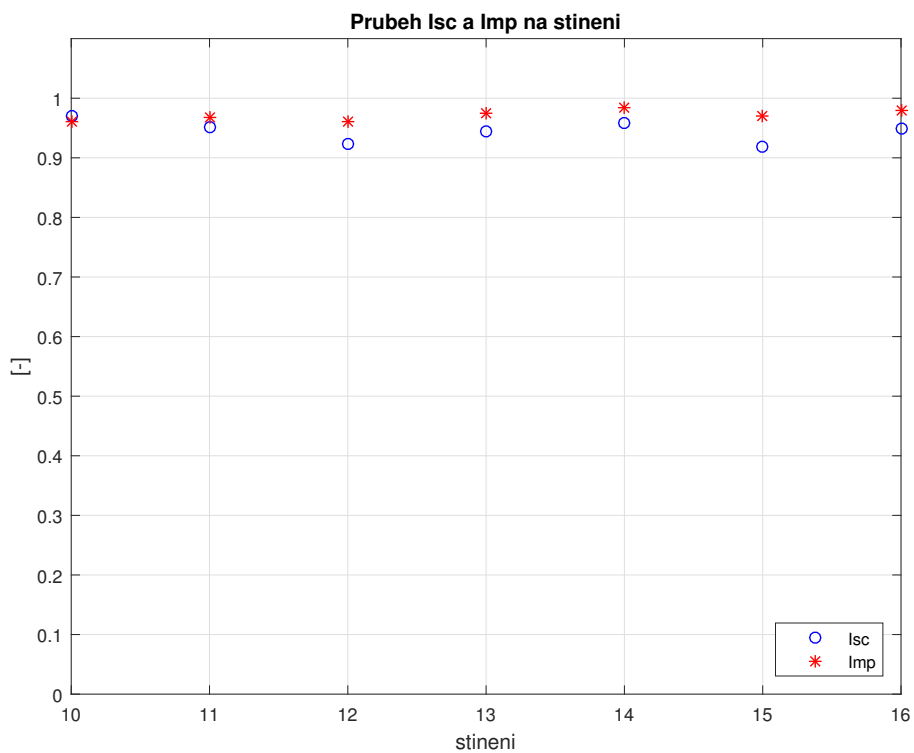


Zoner Photo Studio 15

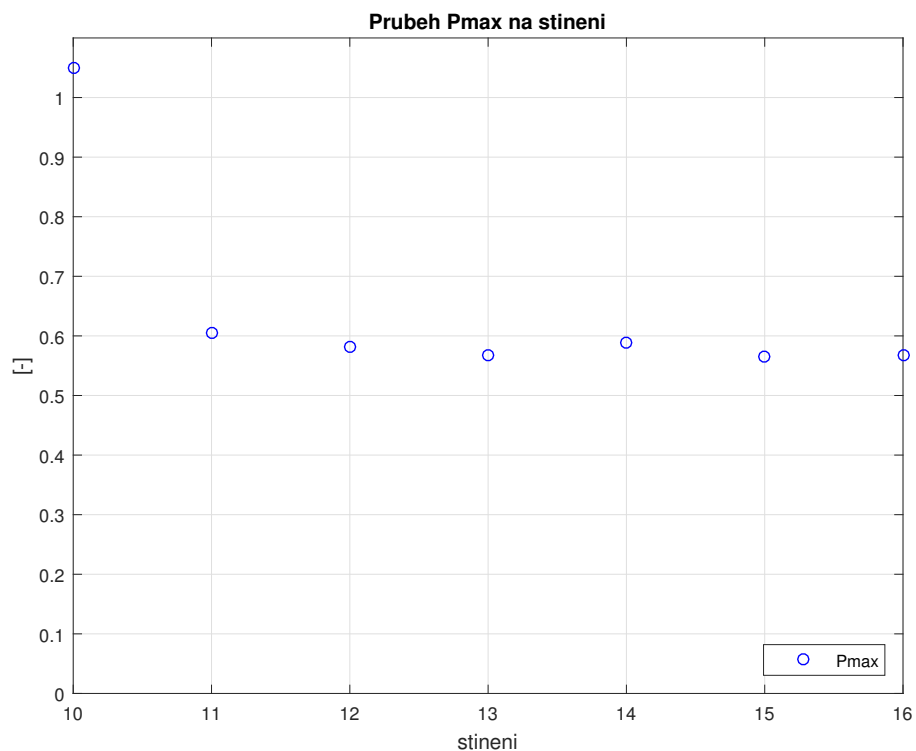
Obrázek C.7. Stínění č.10 až č.16



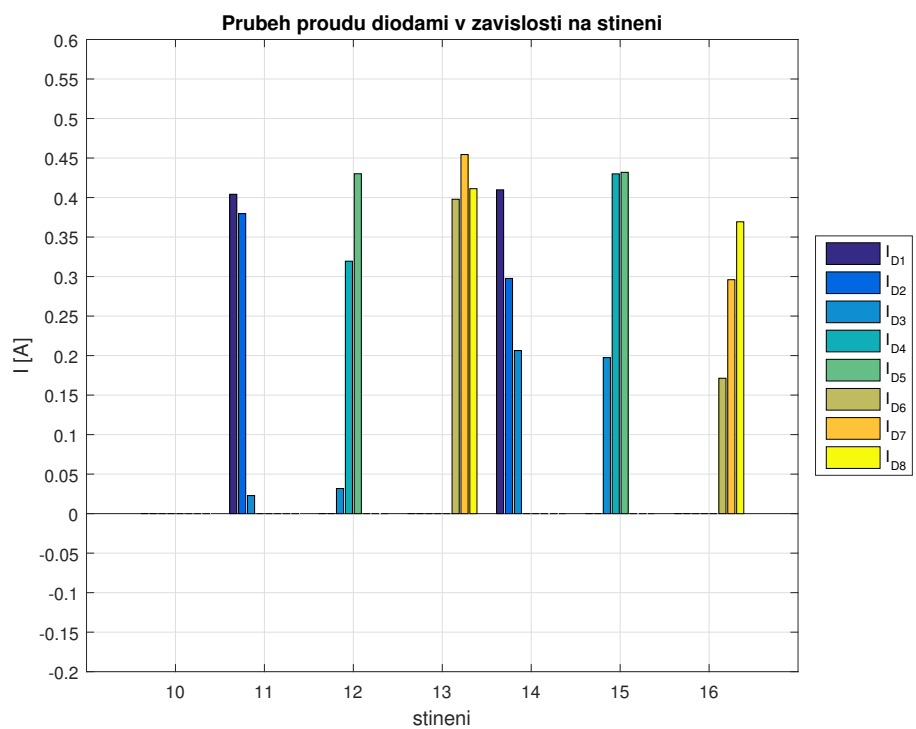
Obrázek C.8. Stínění č.10 až č.16 - porovnání U_{OC} a U_{MP} .



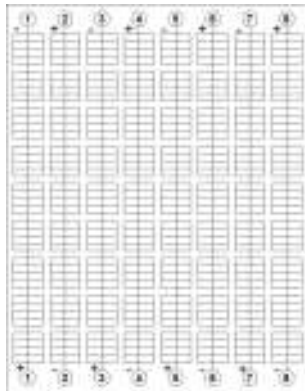
Obrázek C.9. Stínění č.10 až č.16 - porovnání I_{SC} a I_{MP} .



Obrázek C.10. Stínění č.10 až č.16 - porovnání P_{MAX} .



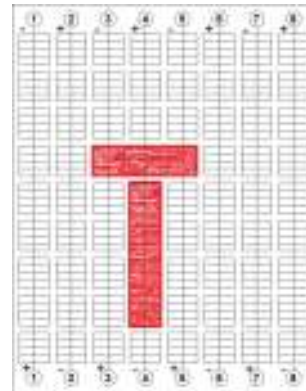
Obrázek C.11. Stínění č.10 až č.16 - porovnání proudů překlenovacími diodami.



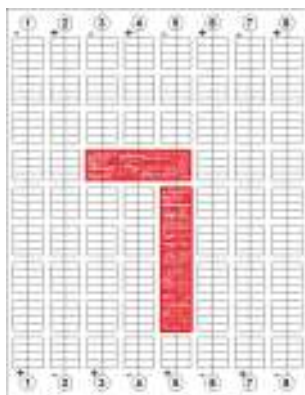
č. stínění: 10



č. stínění: 17

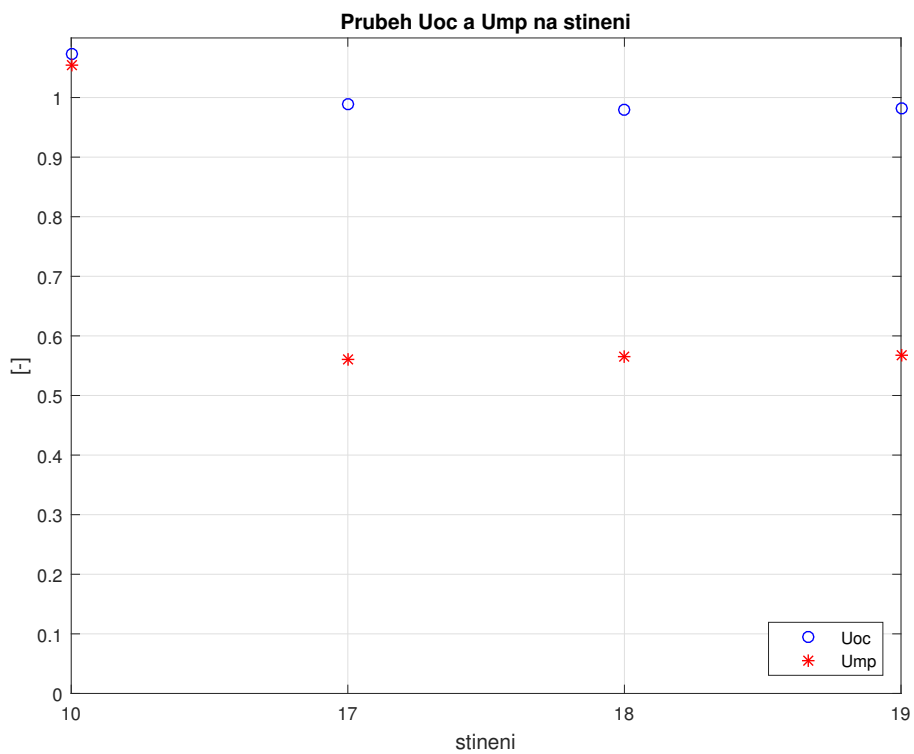


č. stínění: 18

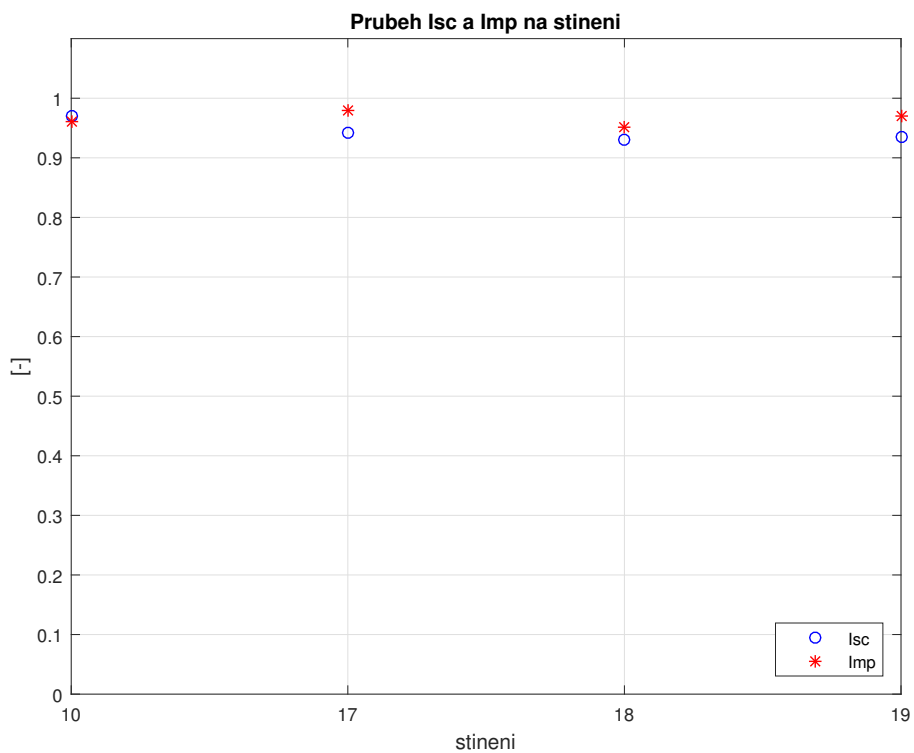


č. stínění: 19

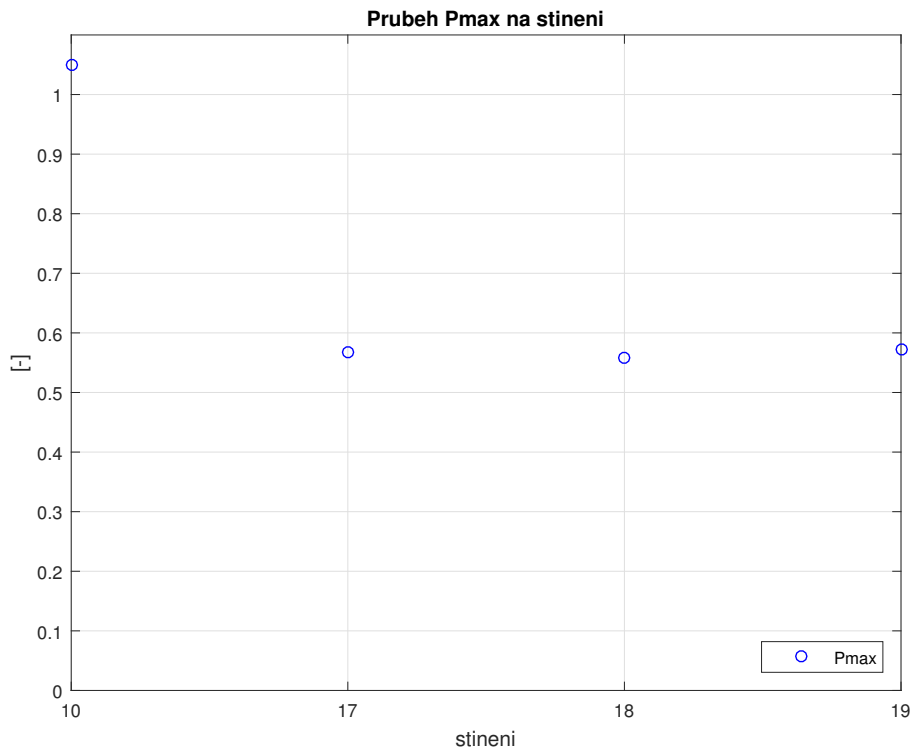
Obrázek C.12. Stínění č.10 a č.17 až č.19



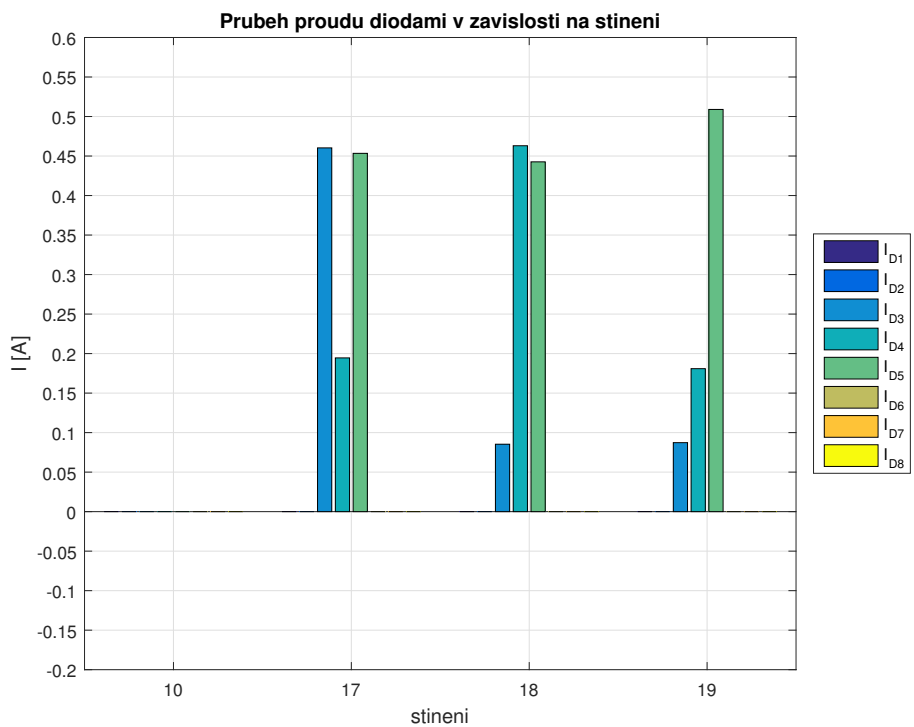
Obrázek C.13. Stínění č.10 a č.17 až č.19 - porovnání U_{OC} a U_{MP} .



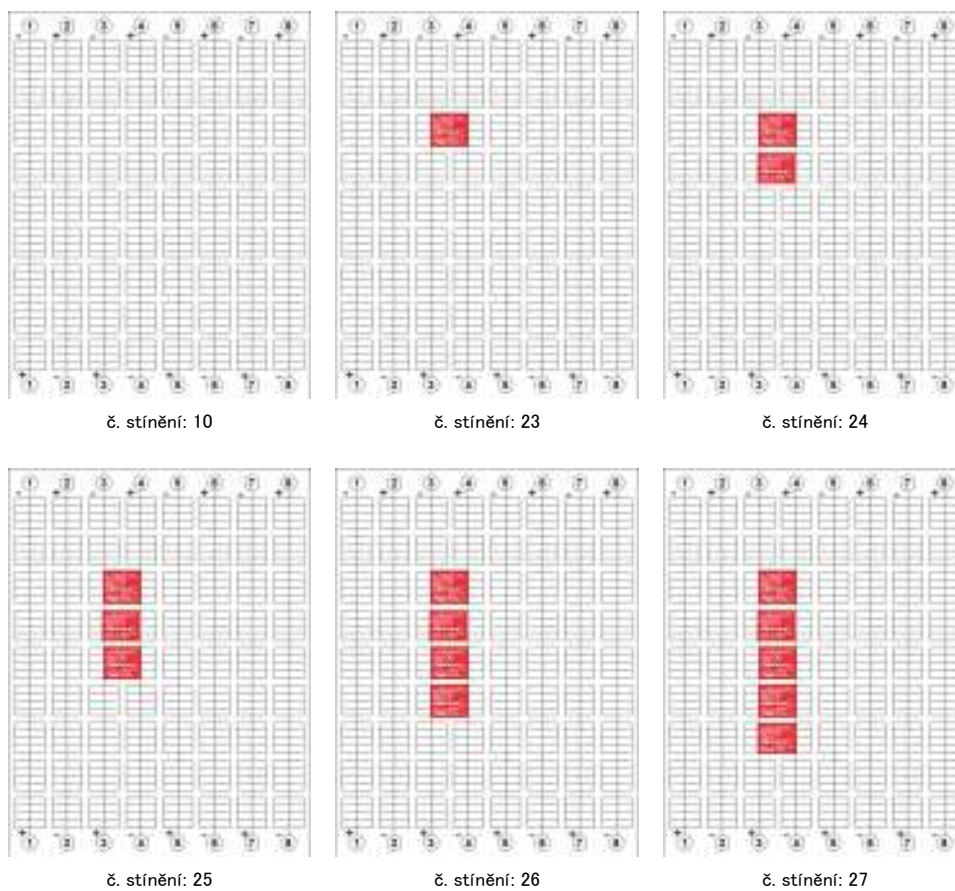
Obrázek C.14. Stínění č.10 a č.17 až č.19 - porovnání I_{SC} a I_{MP} .



Obrázek C.15. Stínění č.10 a č.17 až č.19 - porovnání P_{MAX} .

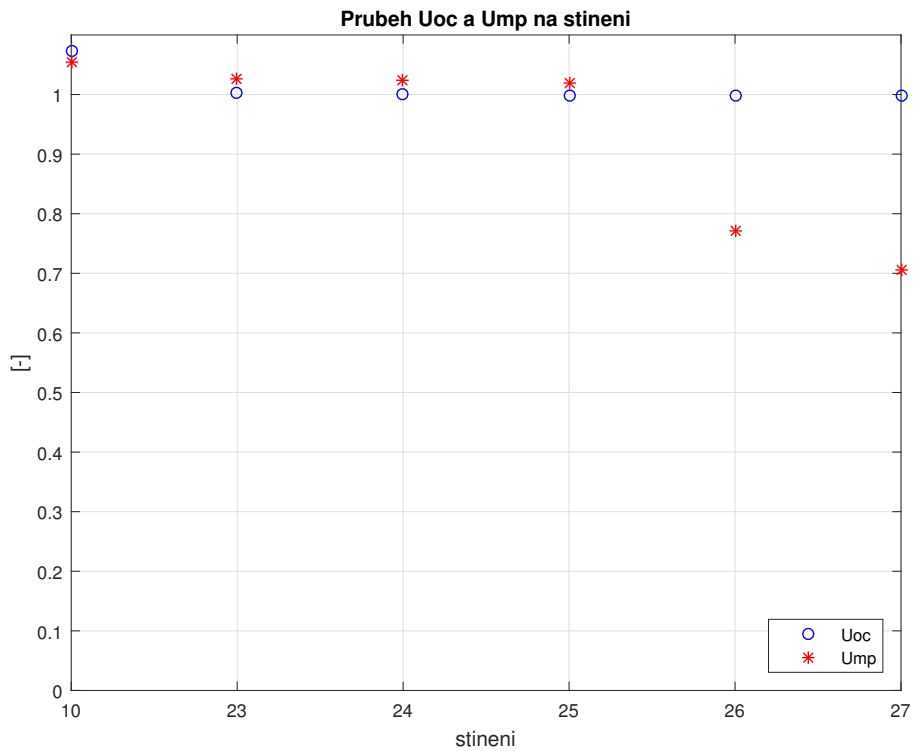


Obrázek C.16. Stínění č.10 a č.17 až č.19 - porovnání proudů překlenovacími diodami.

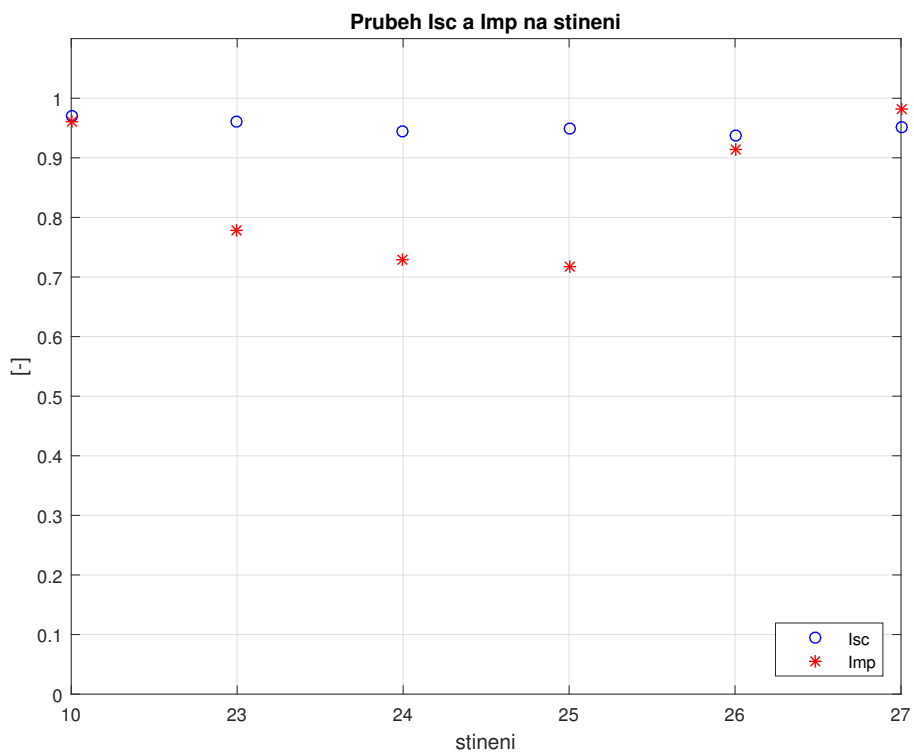


Zoner Photo Studio 15

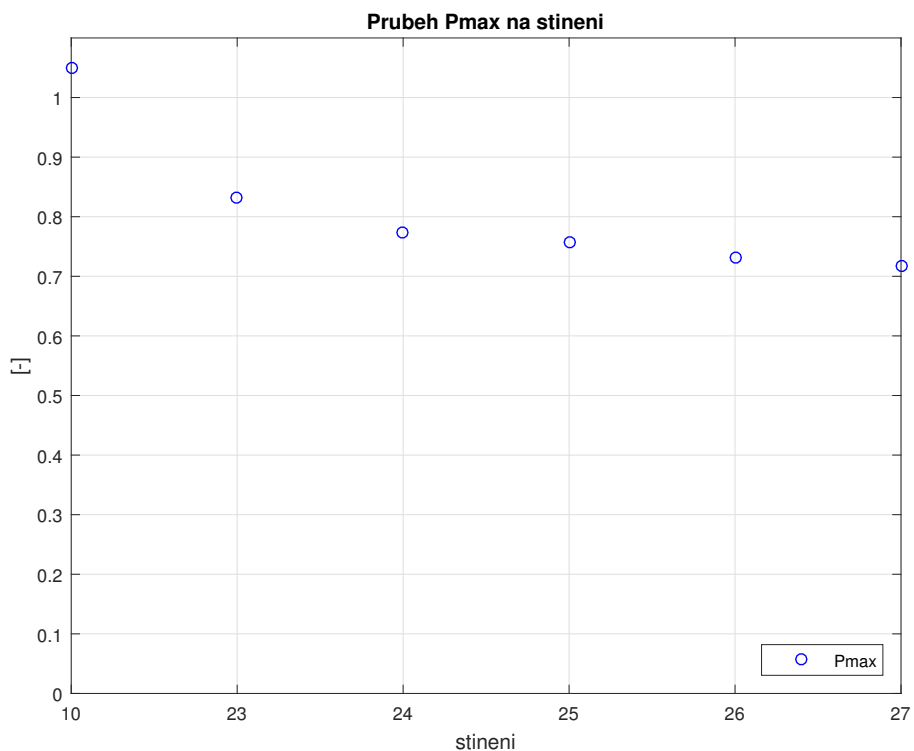
Obrázek C.17. Stínění č.10 a č.23 až č.27.



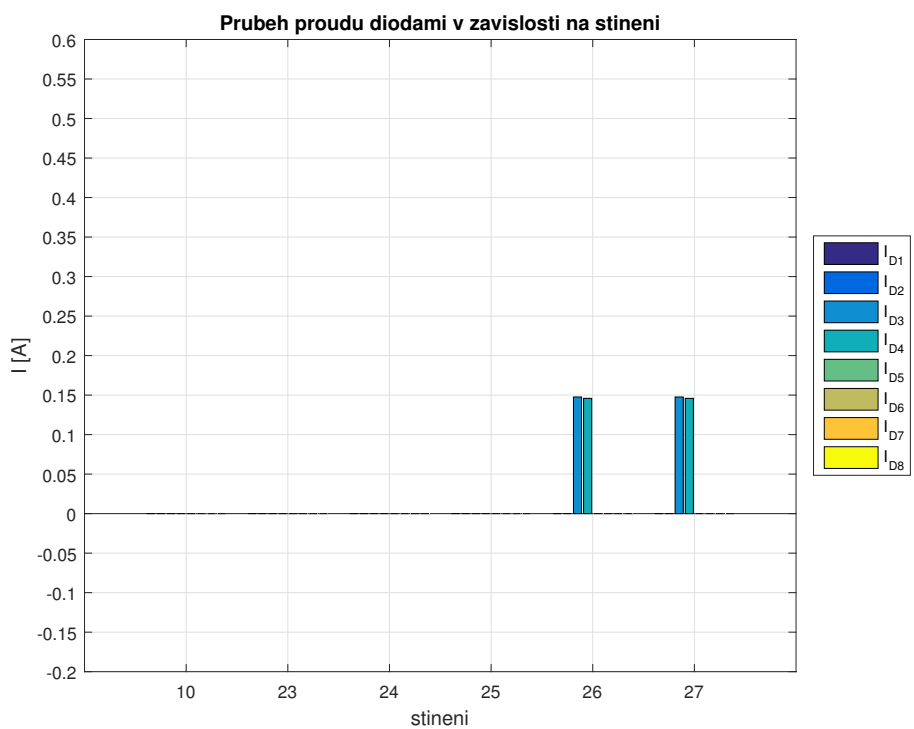
Obrázek C.18. Stínění č.10 a č.23 až č.27 - porovnání U_{OC} a U_{MP} .



Obrázek C.19. Stínění č.10 a č.23 až č.27 - porovnání I_{SC} a I_{MP} .



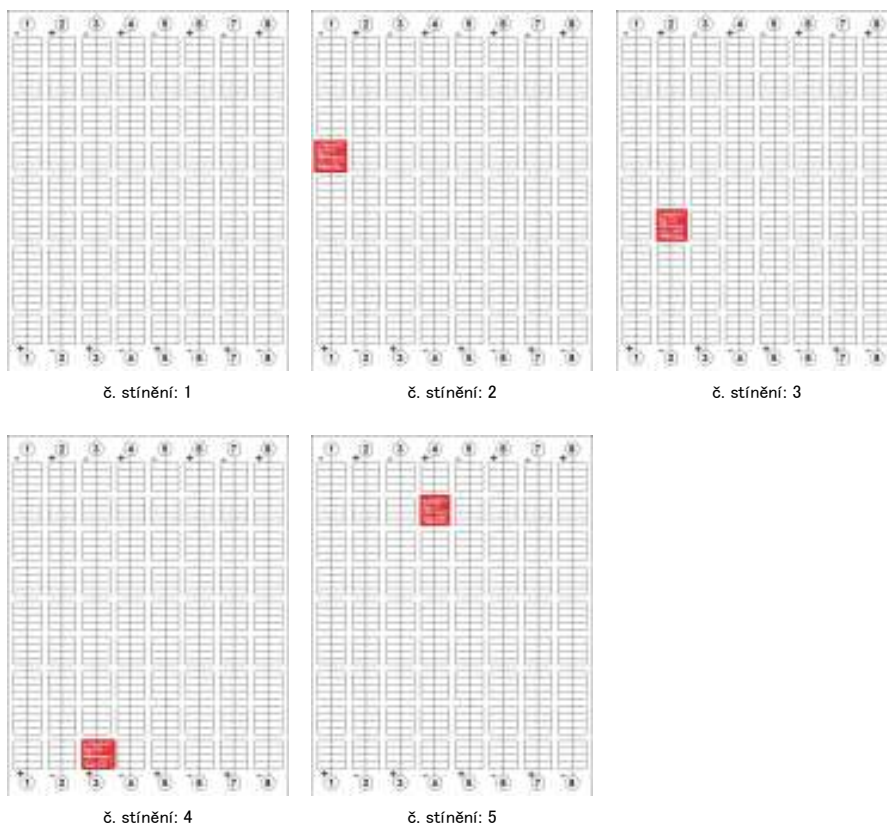
Obrázek C.20. Stínění č.10 a č.23 až č.27 - porovnání P_{MAX} .



Obrázek C.21. Stínění č.10 a č.23 až č.27 - porovnání proudů překlenovacími diodami.

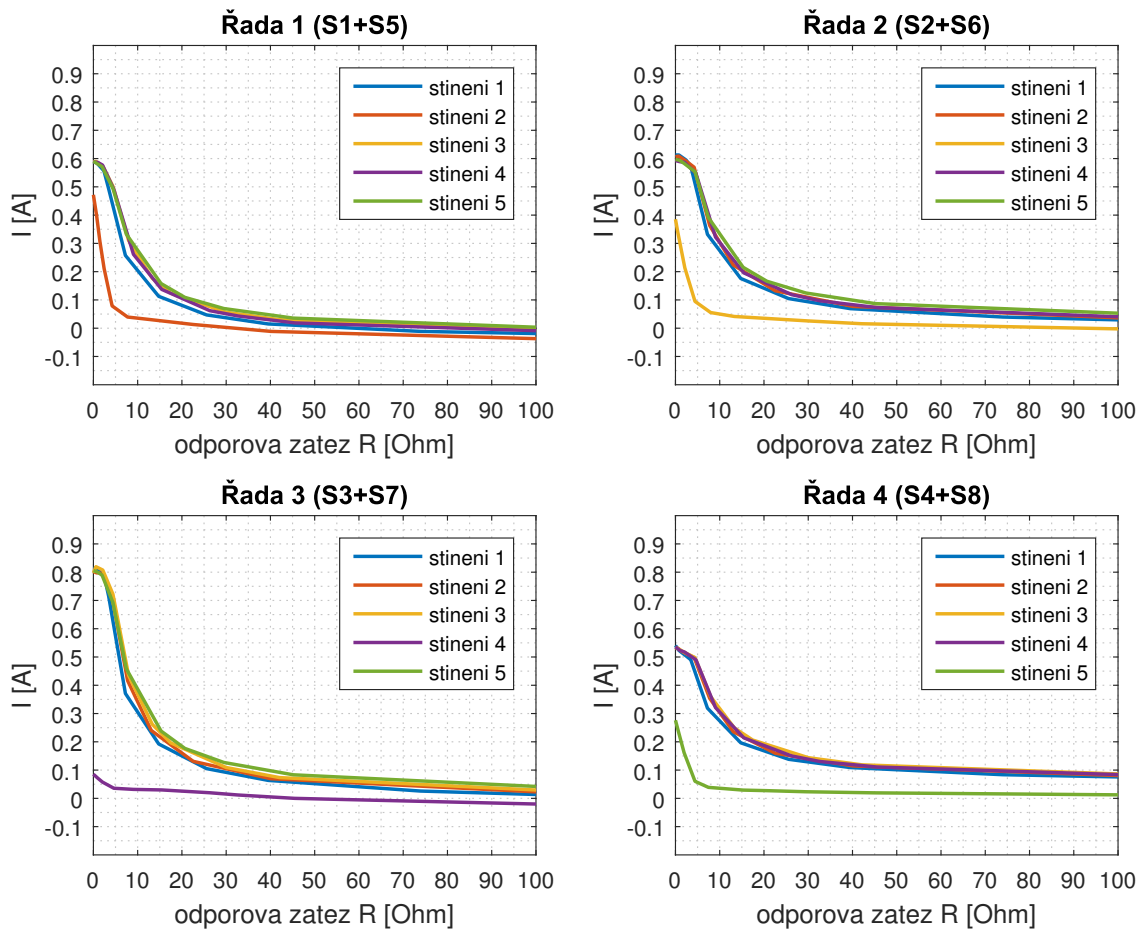
Příloha D

Měření proudů paralelními větvemi

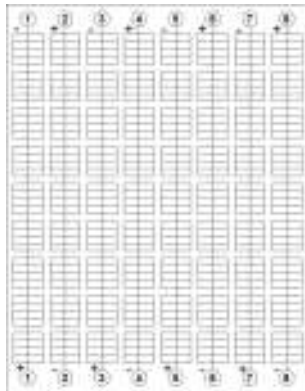


Zoner Photo Studio 15

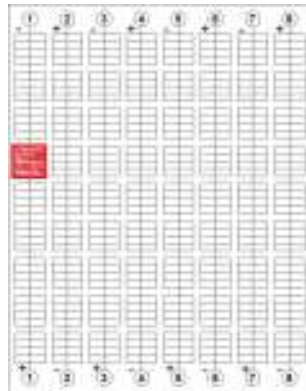
Obrázek D.22. Stínění č.1 až č.5



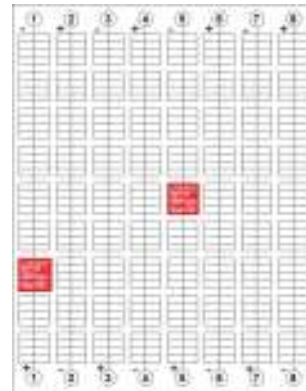
Obrázek D.23. Stínení č.1 až č.5 - Závislost proudu na zátěži



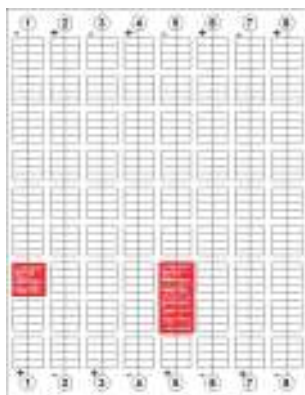
č. stínění: 1



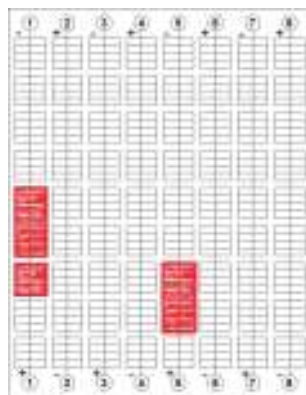
č. stínění: 2



č. stínění: 6



č. stínění: 7



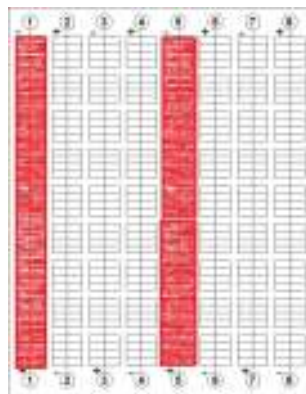
č. stínění: 8



č. stínění: 9



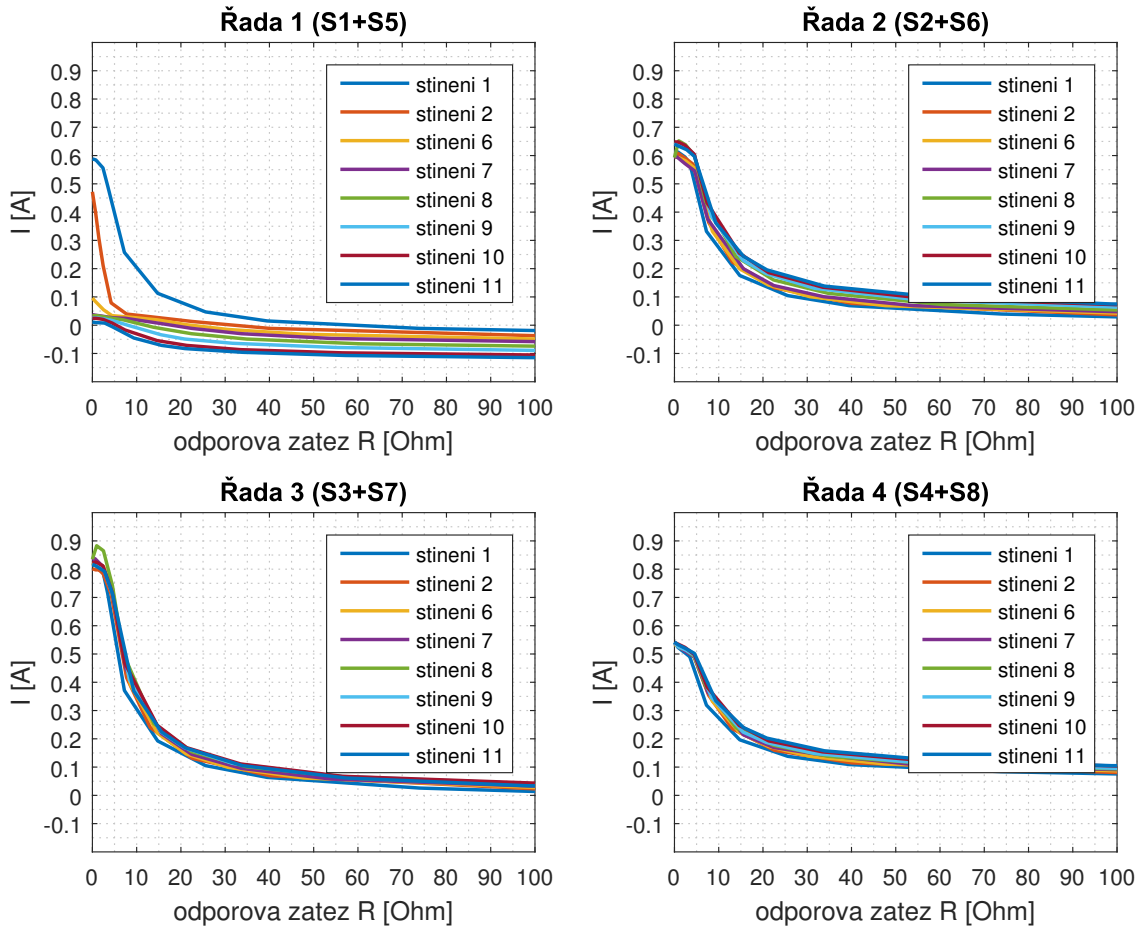
č. stínění: 10



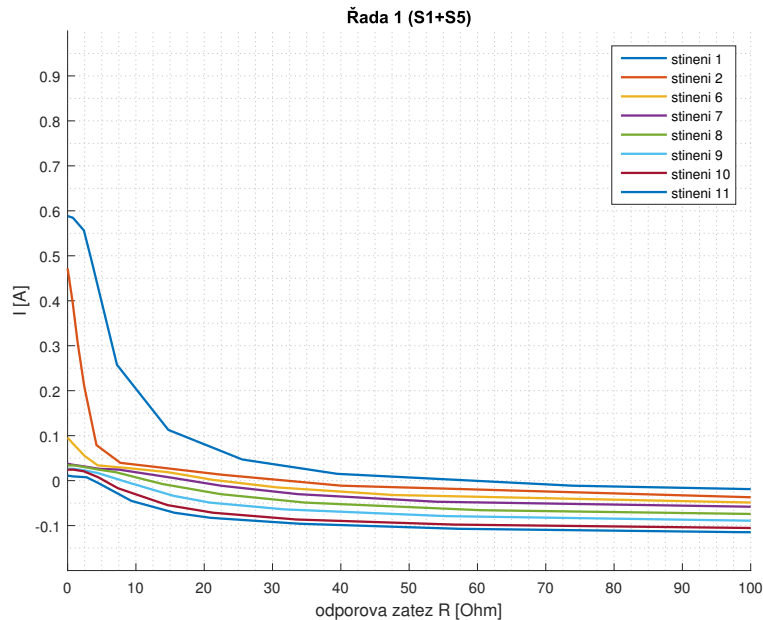
č. stínění: 11

Zoner Photo Studio 15

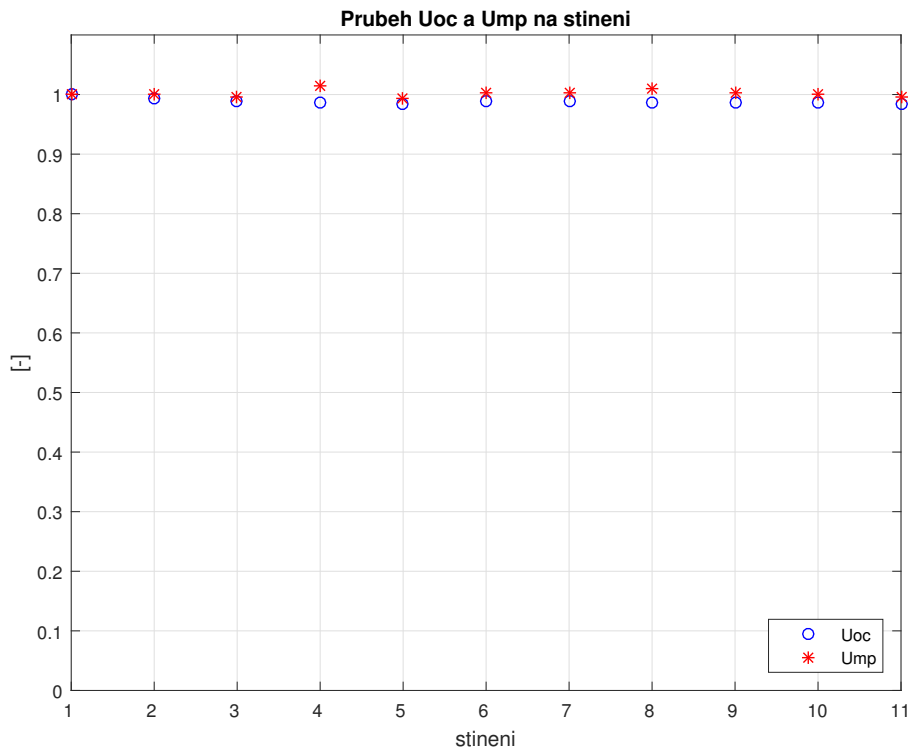
Obrázek D.24. Stínění č.1, č.2 a č.6 až č.11



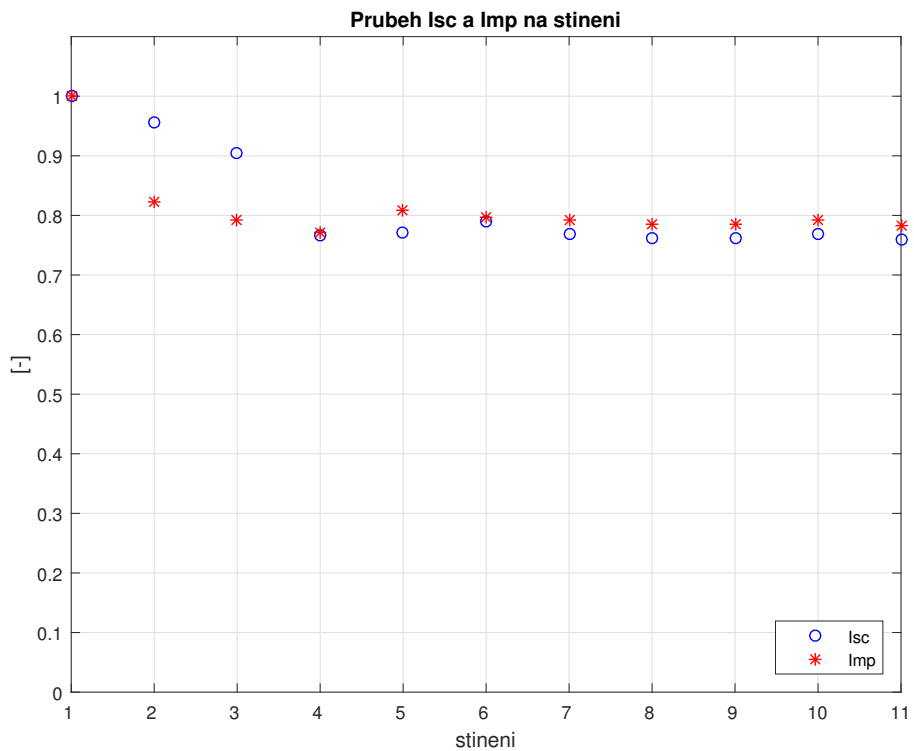
Obrázek D.25. Stínění č.1, č.2 a č.6 až č.11 - Závislost proudu na zátěži



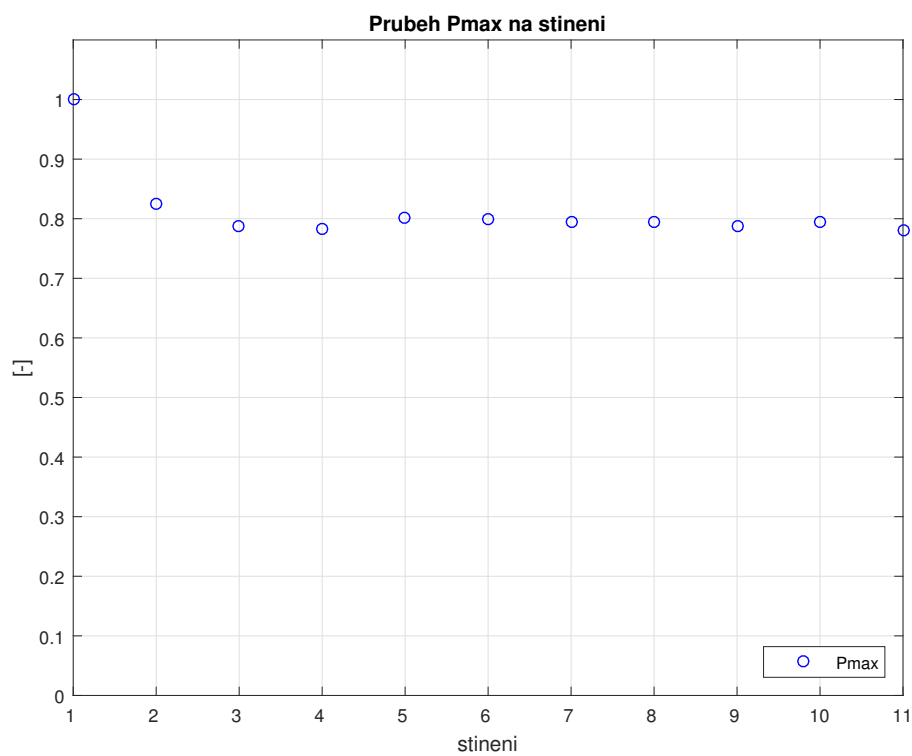
Obrázek D.26. Stínění č.1, č.2 a č.6 až č.11 - Závislost proudu na zátěži - DETAIL



Obrázek D.27. Stínění č.1 až č.11 - porovnání U_{OC} a U_{MP} .



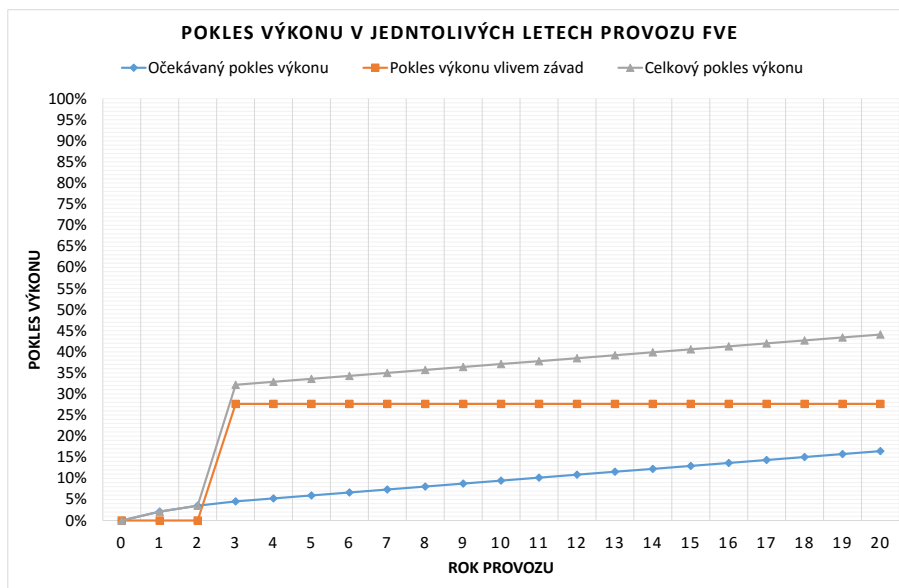
Obrázek D.28. Stínění č.1 až č.11 - porovnání I_{SC} a I_{MP} .



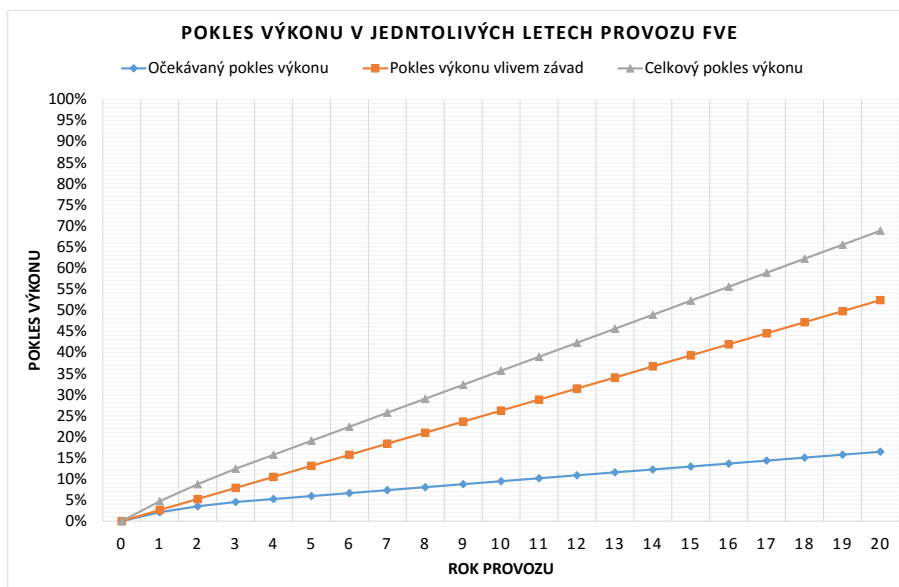
Obrázek D.29. Stínění č.1 až č.11 - porovnání P_{MAX} .

Příloha E

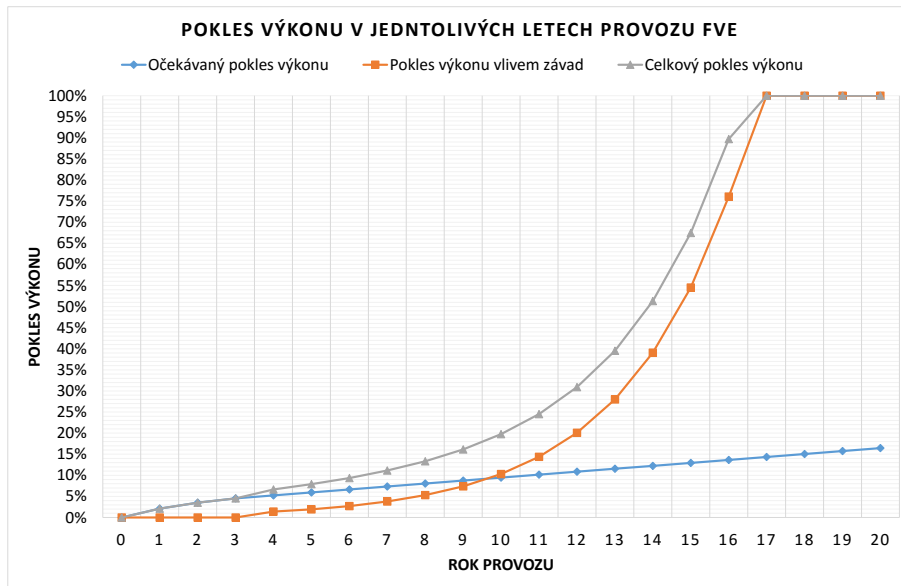
Ekonomické vyhodnocení



Obrázek E.30. Celkový pokles výkonu způsobený očekávaným poklesem výkonu a konstantním poklesem pro $K_{konst} = 27,6\%$ s počátkem v roce 2013 (3. rok provozu).



Obrázek E.31. Celkový pokles výkonu způsobený očekávaným poklesem výkonu a lineárním poklesem pro $K_{lin} = 2,6\%$ s počátkem v roce 2011 (1. rok provozu).



Obrázek E.32. Celkový pokles výkonu způsobený očekávaným poklesem výkonu a exponenciálním poklesem pro $K_{exp} = 0,333$ s počátkem v roce 2014 (4. rok provozu).

Příloha F

Obsah přiloženého CD

CD přiložené k bakalářské práci obsahuje následující složky:

- /bakalarska_prace - obsahuje znění bakalářské práce a kopii zadání
- /ekon_model - obsahuje ekonomický model vytvořený v programu Excel
- /mereni - obsahuje soubor se záznamem naměřených dat v Excelu a program pro jejich zpracování vytvořený v programu MATLAB