



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY**

SIMULACE ZAPOJENÍ SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ V PROGRAMU MATLAB

SIMULATION OF INTERCONNECTION OF SOLAR CELLS IN MATLAB

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MARTIN STRÍPEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Marcel Janda, Ph.D.

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií
Ústav elektrotechnologie

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektrotechnická výroba a management

Student: Bc. Martin Střípek
Ročník: 2

ID: 98539
Akademický rok: 2011/12

NÁZEV TÉMATU:

Simulace zapojení solárních článků v programu MATLAB

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s popisem solárních článků pomocí náhradního modelu. Měřením určete parametry náhradního schématu jednoho solárního článku.

Na základě zvoleného typu náhradního schématu vytvořte v prostředí Matlab aplikaci, která bude simulovat zapojení solárních článků do sestavy.

Samotná sestava bude reprezentována sériovým, paralelním a sériově paralelním zapojením článků. Ovládání vytvořené aplikace realizujte jako grafické uživatelské prostředí.

Výsledky vyhodnoťte a popište možnosti aplikace tohoto programu v návrhu solárních panelů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího diplomové práce.

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 24.5.2012

Vedoucí práce: Ing. Marcel Janda, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.
předseda oborové rady



UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Cílem diplomové práce „Simulace zapojení solárních článků v programu MATLAB“ je seznámit s principem přeměny slunečního záření v elektrickou energii ve fotovoltaickém článku. Dále se práce zabývá matematickými modely a rovnicemi, které popisují solární článek, a jejich zapojováním. Hlavním úkolem bylo vytvořit program s uživatelským rozhraním pomocí MATLABu. Vytvořený program má sloužit pro simulování jednoho článku nebo sériového, paralelního nebo sériově-paralelního zapojení, a tím i simulovat fotovoltaický panel.

Klíčová slova: fotovoltaika, MATLAB, simulace, matematický model

ABSTRACT

The main goal of the master's thesis SIMULATION OF INTERCONNECTION OF SOLAR CELLS IN MATLAB is introduction of conversion principle of solar radiation into electrical energy in photovoltaic cells. The thesis deals with mathematical models and equations that describe the solar cell and their interconnection. The main task was to develop a user interface program using MATLAB. The produced program is intended to simulate a single cells or series connection, parallel or in series – parallel cells, and so simulate a photovoltaic panel.

Keywords: photovoltaics, MATLAB, simulation, mathematical model

Bibliografické citace

STŘÍPEK, M. *Simulace zapojení solárních článků v programu MATLAB*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 73 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Marcel Janda, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Simulace zapojení solárních článků v programu MATLAB jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 24. května 2012

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji panu Ing. Marcelu Jandovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování projektu.

Rád bych také poděkoval svým rodičům za podporu během studia.

V Brně dne 24. května 2012

.....
podpis autor

OBSAH

| | |
|--|----|
| ÚVOD | 7 |
| 1 TEORETICKÁ ČÁST..... | 7 |
| 1.1 Fyzikální podstata světla..... | 7 |
| 1.2 Fyzikální podstata fotovoltaické přeměny energie | 8 |
| 1.3 Princip funkce PV článku | 11 |
| 2 Matematický model FVČ..... | 13 |
| 2.1 Určující parametry FVČ | 13 |
| 2.1.1 Proud nakrátko I_{SC} , fotoelektrický proud I_L | 13 |
| 2.1.2 Napětí naprázdno U_{OC} | 14 |
| 2.1.3 Pracovní bod – PB | 14 |
| 2.1.4 MPP – Maximum Power Point..... | 14 |
| 2.1.5 FF – Fill Factor (činitel naplnění)..... | 15 |
| 2.1.6 Účinnost fotovoltaického článku | 15 |
| 2.1.7 Teoretická maximální účinnost | 16 |
| 2.1.8 Sériový R_{SO} a paralelní R_{SH} odpor fotočlánku | 17 |
| 2.2 Vliv osvětlení na FVČ | 19 |
| 2.3 Vliv teploty na FVČ..... | 19 |
| 2.4 Výkonová charakteristika FVČ..... | 22 |
| 2.5 Odpor FVČ..... | 25 |
| 2.5.1 Statický odpor..... | 25 |
| 2.5.2 Dynamický odpor | 25 |
| 2.6 Matematický model FVČ..... | 27 |
| 2.6.1 Jednodiódový model FVČ | 28 |
| 2.6.2 Dvodiódový model FVČ | 29 |
| 2.6.3 Dvodiódový model FVČ s rozvinutým členem | 31 |
| 2.7 Zapojení fotovoltaických článků..... | 32 |

| | | |
|-------|--|----|
| 2.7.1 | Sériové zapojení | 32 |
| 2.7.2 | Paralelní zapojení | 37 |
| 2.7.3 | Sériové – paralelní zapojení | 38 |
| 3 | MATLAB | 39 |
| 3.1 | Jazyk pro technické výpočty | 39 |
| 3.2 | Výpočetní jádro | 40 |
| 3.3 | Grafický subsystém | 40 |
| 3.4 | Otevřená architektura | 40 |
| 3.5 | Pracovní nástroje | 40 |
| 3.6 | Toolboxy | 41 |
| 4 | POPIS PROGRAMU | 43 |
| 4.1 | SIMULACE FVČ | 43 |
| 4.2 | Dvou - diodový model | 46 |
| 4.3 | Dvou – diodový model s rozvinutým členem | 47 |
| 5 | SIMULACE | 49 |
| 5.1 | Měřicí pracoviště | 49 |
| 5.2 | Simulace FVČ se změnami parametrů | 52 |
| 6 | ZÁVĚR | 57 |
| | SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY | 59 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ | 61 |
| | SEZNAM OBRÁZKŮ | 63 |
| | SEZNAM TABULEK | 64 |
| | SEZNAM PŘÍLOH | 64 |

ÚVOD

Fotovoltaika patří mezi obnovitelné zdroje energie. Jde o šetrný a čistý způsob výroby energie. Výhodou této technologie je dlouhodobě nevyčerpatelný zdroj Slunce. Mnoho zemí Evropské unie fotovoltaiku podporuje, včetně České republiky. Fotovoltaika je technologie, která umožňuje přeměnu dopadajícího slunečního záření na elektrickou energii. Využívá se fotoelektrického jevu, kdy částice záření, fotony, dopadají na plochu solárního článku a při dopadu uvolňují elektrony. Ty jsou pomocí polovodičové struktury článku přeměněny na stejnosměrný proud. Spojením více článků se vytvoří fotovoltaický modul (panel), který může mít různý výkon. V dnešní době se účinnost panelů pohybuje kolem 17% a v laboratorních podmínkách až 24% u monokrystalických článků. V budoucnu by pomocí nanotechnologií bylo možné dosáhnout účinnosti až 35%.

Teoretická část diplomové práce se skládá ze tří částí. První je zaměřená na princip přeměny slunečního záření na elektrickou energii. Ve druhé části teorie jsou popsány podrobněji určující parametry fotovoltaického článku a rovnice pro výpočet těchto parametrů, mezi které patří napětí naprázdno, proud nakrátko, fill factor, účinnost článku, sériový a paralelní odpor. Jsou zde popsány vlivy, které ovlivňují fotovoltaický článek, jako je intenzita slunečního záření, teplota a další.

Následuje popis náhradních modelů solárního článku, jejich matematické rovnice a jejich schéma zapojení. Mezi tyto modely patří jedno – diodový model, dvou – diodový model a dvou – diodový model s rozvinutým členem. Nakonec je zde popsáno sériové, paralelní a sériově – paralelní zapojení. Poslední, třetí, část teorie má seznámit s programem MATLAB, ve kterém byl vytvořený program pro simulaci fotovoltaického článku pomocí již zmíněných matematických modelů. MATLAB slouží pro simulaci různých matematických výpočtů, modelování, návrhy algoritmů, simulace a dalších různých analýz dat. Mohou zde být vytvořeny aplikace pro různé oblasti lidské činnosti díky knihovnám, které obsahuje.

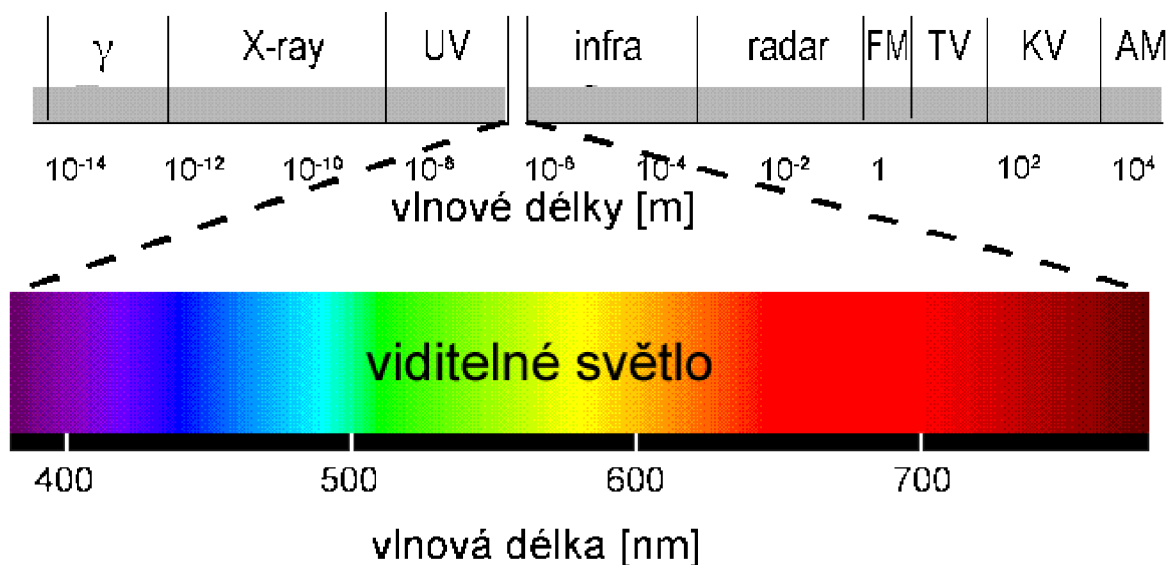
V praktické části je popsán program pro simulaci fotovoltaického článku, který byl vytvořen v programu MATLAB a jeho ovládání pomocí uživatelského prostředí. Po spuštění si je možné vybrat ze dvou modelů, podle kterých budou probíhat simulace. Na výběr je dvou – diodový model a dvou – diodový model s rozvinutým členem. Dále je zde srovnání naměřeného článku, jehož hodnoty byly brány jako referenční spolu se simulacemi. Nakonec jsou v závěru vyhodnocené výsledky, tedy porovnání naměřených hodnot s hodnotami ze simulací a uvedení praktického využití vytvořeného programu.

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Fyzikální podstata světla

V dnešní době je známo, že světlo jsou příčné elektromagnetické vlny v poměrně úzké oblasti vlnových délek a projevují se zároveň jako tok fotonů. Na konci 17. století začínají vážnější úvahy o podstatě světla. V roce 1678 předložil Christian Huighens (1629 – 1695) pojednání o povaze světla jako podélného vlnění. Issac Newton (1643 – 1727) ale považoval světlo za tok částic. Teprve v 19. století nastal velký rozvoj vlnové teorie, podpořený vědeckými objevy v oboru elektřiny a magnetismu.

Vlnové délky elektromagnetických vln (elektromagnetického záření) mohou být ve velmi širokém rozmezí od řádu 10^{-13} m i kratších až po stovky či tisíce metrů nebo i delší. Z toho viditelné záření tvoří jen úzkou oblast v intervalu vlnových délek $\lambda \in < 380 \text{ nm}; 760 \text{ nm} >$ a každá vlnová délka odpovídá určité barvě. S prodlužující se vlnovou délkou v tomto intervalu barvy postupně přecházejí od fialové, přes modrou, zelenou a žlutou, až k červené. Sluneční světlo je vnímáno jako bílé, protože je složeno ze spojitého spektra všech barev. [8][12] Na obr. 1 je vidět rozložení elektromagnetického záření.



Obrázek 1: Oblasti spektra elektromagnetického záření [2]

Zajímavou vlastností elektromagnetických vln je, že mají dualistický charakter. Chovají se současně jako vlny i jako částice. Vlnový charakter převládá u záření s delší vlnovou délkou, korpuskulární (částicový charakter) převládá u záření s kratší vlnovou délkou. V elektromagnetické vlně energie není rozdělena spojitě, ale je soustředěna v jakýchsi shlucích – kvantech, které jsou chápány jako kvazičástice, tj. částice s nulovou klidovou hmotností. Z tohoto hlediska má světlo také povahu částicovou a mluví se o vlnově částicovém dualismu. [3] V důsledku vlnového charakteru podléhají elektromagnetické vlny všem zákonitostem vlnění (zákon odrazu a lomu světla atd.) Důsledkem částicového charakteru jsou projevy spadající do oboru kvantové mechaniky.

Záření se projevuje jako tok částic, nebo lépe řečeno kvazičástic, zvaných fotony.

Podle frekvence příslušné elektromagnetické vlny mají fotony energii

$$E = h \cdot \nu, \quad (1)$$

kde ν je frekvence a h je Planckova konstanta ($h = 6,626176 \cdot 10^{-34} [J \cdot s]$). Vlnová délka je nepřímo úměrná frekvenci a přímo úměrná době kmitu podle vztahu

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = c \cdot T. \quad (2)$$

1.2 Fyzikální podstata fotovoltaické přeměny energie

K přeměně fotovoltaické energie z elektromagnetického záření na elektrickou energii dochází v polovodičových fotovoltaických (PV) článcích. Nejvíce používané PV články jsou na bázi křemíku.

Polovodiče se dělí podle typu nosiče na vlastní (intrinické) a příměsové. Polovodiče příměsové mohou být dále typu N (majoritními nosiči náboje jsou elektrony) nebo typu P (majoritními nosiči náboje jsou díry, které se chovají jako částice s kladným nábojem).

Křemík (Si) obsahuje 14 elektronů, má krystalovou strukturu diamantu. Proto je každý atom obklopen čtyřmi nejbližšími sousedními elektrony. Poslední čtyři elektrony (valenční) vytvářejí s těmito sousedními elektrony kovalentní vazby. [4][8][12] Volný elektron, který nepodléhá působení žádných sil, může jeho energie nabývat různých hodnot. Ale energie v krystalu křemíku v důsledku pohybu v poli periodického potenciálu může nabývat určitých

hodnot. Tyto hladiny energie jsou děleny na pásy „dovolených energií“ a ty jsou od sebe odděleny „pásy zakázaných energií“.

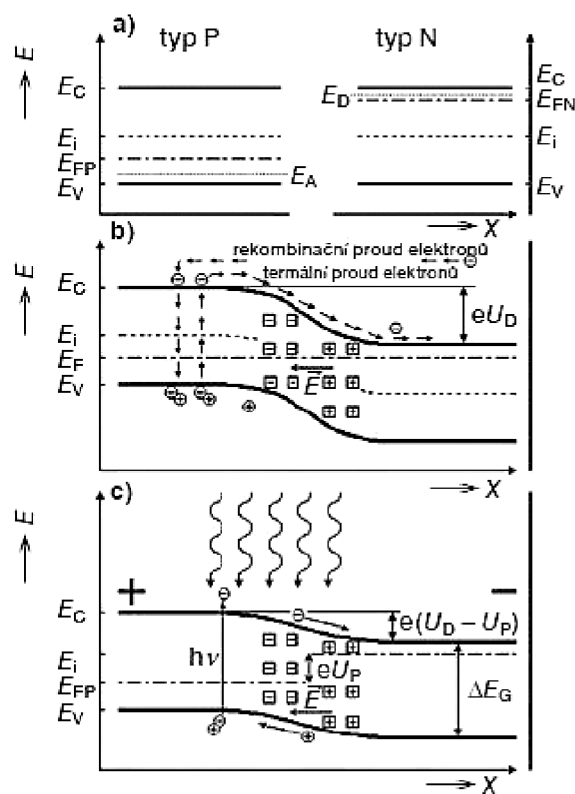
Nejvyšší energetická hladina valenčního pásu se značí E_V a nejnižší hladinu vodivostního pásu značíme E_C . Šířka zakázaného pásu je pak $E_G = E_C - E_V$. Významnou energetickou hladinou je Fermiho energie E_F . U vlastního polovodiče leží hladina Fermiho energie uprostřed zakázaného pásu. Obsazené hladiny ve valenčním pásu valenčními elektrony způsobí, že nemůže protékat elektrický proud. Pokud se dodá energie např. tepelná (fonon) nebo světelná (foton), některé elektrony přejdou do vodivostního pásu. To vede k tomu, že valenční i vodivostní pás se stanou pásy částečně obsazenými.

V energetickém schématu se to projeví tak, že tento elektron uvolní energetickou hladinu ve valenčním pásu a obsadí hladinu s vyšší energií ve vodivostním pásu. U atomu křemíku tak vzniklo prázdné místo po pevně vázaném elektronu. Buď zde může opět uvíznout volný elektron, což se v energetickém schématu projeví jako zpětný přestup elektronu z vodivostního pásu na příslušnou hladinu ve valenčním pásu, nebo sem může přeskočit pevně vázaný elektron od sousedního atomu. Takový elektron musí mít dostatek energie, aby překonal určitou energetickou bariéru. Tím se ale volné místo posune k sousednímu atomu a dalšími podobnými přeskoky se může dále posouvat. V elektrickém poli se volné i přeskakující vázané elektrony posunují proti směru intenzity elektrického pole, neboť mají záporný elektrický náboj. To znamená, že prázdné místo se posunuje ve směru pole. Prázdné místo se tedy chová jako částice s kladným nábojem a větší hmotností, než jakou má volný elektron. Tato částice se označuje „díra“.[8] [12]

Pokud nahradíme některé krystaly v křemíku atomy prvku 5. skupiny periodické tabulky (As, P, Sb), které obsahují pět valenčních elektronů, tak budou čtyři z nich vázány kovalentní vazbou s nejbližšími atomy křemíku. Zbývající pátý bude pouze slabě vázán k atomu příměsi. Vzniklý polovodič, který je takto dopován, je nazýván polovodičem typu N (negative). V případě, že nahradíme některé atomy křemíku v krystalu 3. skupiny periodické tabulky prvků (B, Al, Ga), které mají 3 valenční elektrony. To znamená, že jedna vazba těchto atomů nebude zaplněna a bude se chovat jako díra. Takový polovodič se nazývá polovodič typ P (positive) a příměsi, které tvoří záchytná centra, se nazývají akceptory.

Přechod PN vzniká tak, že jedna část krystalu je dopována jako polovodič typu P a sousední část je dopována jako polovodič typu N. V místě přechodu část volných elektronů

přejde z oblasti N do oblasti typu P a část děr opačně. Pevně vázané náboje ionizovaných příměsí vytvoří oblasti prostorového náboje. [8]. Vytvoří se mezi nimi elektrické pole, které zabraňuje dalšímu toku volných nosičů. Jelikož musí být energie Fermiho hladiny v rovnovážném stavu v celém krystalu a to vede k ohybu pásů v místě přechodu. Při teplotě $T > 0$ K stále dochází ke generaci a rekombinaci elektronů a děr a to znamená, že přes přechod PN tečou elektrické proudy oběma směry. V polovodiči typu N mohou některé elektrony mít vyšší energii, než jaká odpovídá potenciálové bariéře difusního napětí U_D . Elektrony pak mohou přecházet přes přechod PN do polovodiče typu P, kde rekombinují s volnými dírami. Proud, který takto vznikne, se nazývá rekombinační. V polovodiči typu P dochází zároveň ke generaci párů volných elektronů a děr, kde elektrony, které jsou volné v elektrickém poli přechodu PN urychleny směrem do polovodiče typu N. Tento proud se nazývá termální nebo difuzní. Pokud se nepřiloží vnější napětí, tak jsou proudy v obou směrech vyrovnány a navenek se neprojeví. Po přiložení vnějšího napětí a uzavření elektrického obvodu dochází k porušení rovnováhy. [12]



Obrázek 2: Model energetických hladin PV článku a fotovoltaické přeměny energie [4]

K přeměně fotovoltaické energie dochází v polovodičových fotovoltaických člancích. Energie dopadajících fotonů se mění na elektrickou. Jde v podstatě o velkoplošnou diodu, kde

přechod PN je orientován kolmo k čelní ploše mezi přední a zadní stranou [8]. Jestliže na fotovoltaický článek dopadají fotony, které mají větší energii, než jaká odpovídá šířce zakázaného pásu (Si 1,1 eV), pak tyto fotony generují páry elektron-díra. Tímto způsobem odevzdávají svou energii a dochází k toku částic. Přebytek energie se předá kmitům mřížky a přemění se v teplo. To má za následek ohřev materiálu polovodiče. V oblasti přechodu PN generované páry elektron-díra jsou od sebe odděleny elektrickým polem \vec{E} mezi vázanými prostorovými náboji. To znamená, že díry jsou urychleny ve směru elektrického pole a elektrony jsou urychleny v opačném směru. Elektrické napětí se objeví mezi opačnými póly PV článku. Připojením do elektrického obvodu teče obvodem stejnosměrný proud a PV článek se stává zdrojem elektrické energie.

Na obrázku 2a je schéma energetických hladin v polovodiči typu P a typu N a z obr. 2b je zřejmé vyrovnání Fermiho energie a ohyb pásů u přechodu PN v neosvětleném fotovoltaickém článku. Jsou zde znázorněny i rekombinační a termální proudy v rovnovážném stavu a rovněž jsou vyznačeny oblasti prostorového náboje a difuzní napětí U_D . Ve tmě se PV článek chová jako polovodičová dioda. Na obr. 2c je znázorněna situace při osvětlení PV článku, který není zapojen v elektrickém obvodu. [4]

1.3 Princip funkce PV článku

V kapitole 1.2 byla popsána fyzikální podstata principu přeměny sluneční energie. Fotovoltaické články pracují na principu fotoelektrického jevu, kdy na rozhraní dvou polovodičových materiálů, na které dopadá světlo, vzniká elektrické napětí. Absorpce elektromagnetického záření je dána interakcí světla (fotony) s částicemi hmoty (elektrony a jádry). V důsledku toho mohou nastat tyto případy:

interakce částice s mřížkou

využití nízkoenergetických fotonů

interakce s volnými elektrony

dochází pouze ke zvýšení teploty (fototermální systémy)

interakce s vázanými elektrony

vznikají volné nosiče náboje

může dojít k uvolnění elektronu z vazby

K přeměně fotovoltaické energie musí být splněny podmínky:

foton musí být pohlcen

foton musí excitovat elektron do vyššího vodivostního pásu

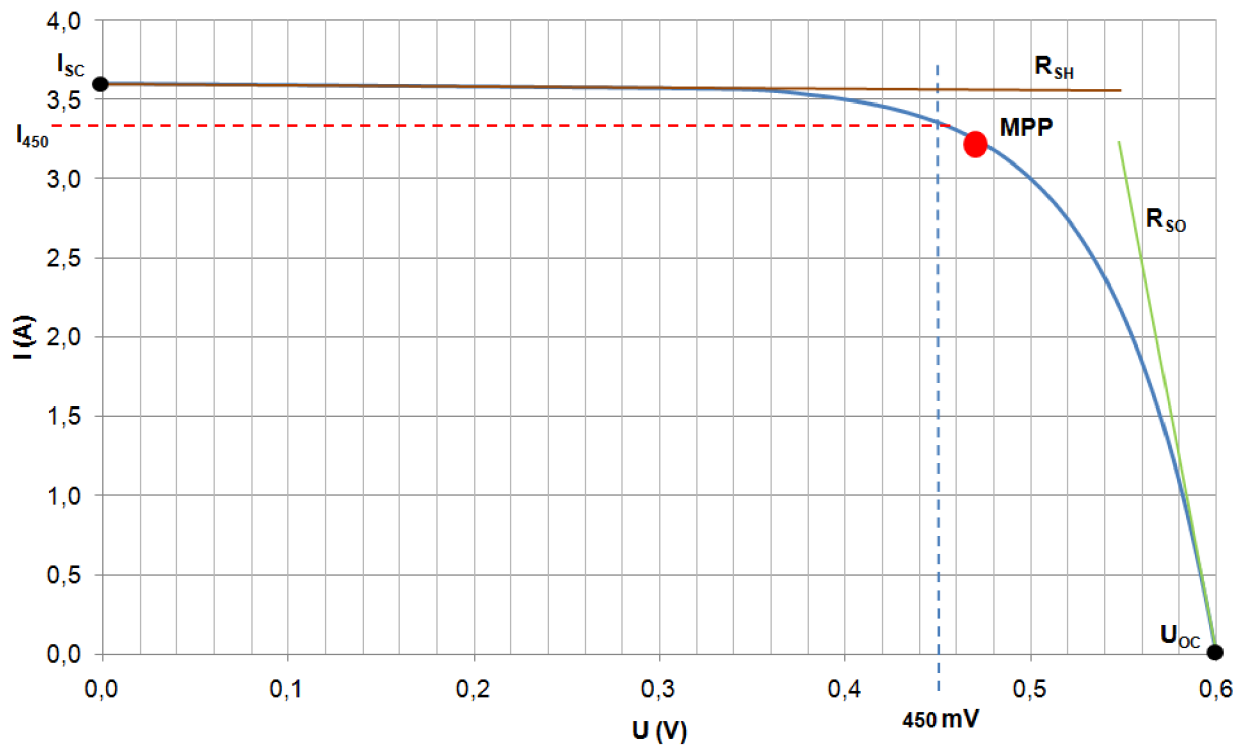
vzniklá dvojice elektron, díra musí být separována, aby se znovu nespojila

oddělené náboje jsou následně odvedeny ke spotřebiči. [9]

2 Matematický model FVČ

2.1 Určující parametry FVČ

Základní informaci o činnosti fotovoltaického článku udává voltampérová charakteristika. Určující veličiny jsou na voltampérové charakteristice napětí naprázdno U_{OC} a proud nakrátko I_{SC} . Tyto informace lze také vyčíst z katalogového listu daného PV článku.



Obrázek 3: V-A charakteristika FVČ [1]

2.1.1 Proud nakrátko I_{SC} , fotoelektrický proud I_L

Proud nakrátko nebo také fotoelektrický proud je charakteristickou hodnotou V-A charakteristiky, která bývá uváděna nebo ji můžeme odečíst z V-A charakteristiky. Proud nakrátko ve své fyzikální podstatě představuje maximální proud, který může fotovoltaický článek při dané intenzitě slunečního záření dodávat. Velikost tohoto proudu je závislá na:

- intenzitě osvětlení;
- spektrální citlivosti FVČ;

c) ploše FVČ;

d) teplotě.

Velikost proudu nakrátko se pohybuje řádově v desítkách mA až jednotek A . Největší běžně dostupné FVČ mají při plném ozáření proud nakrátko nad hranicí $6A$.

2.1.2 Napětí naprázdno U_{OC}

Napětí naprázdno je maximální napětí, které může dodávat fotovoltaický článek bez připojení spotřebiče za daného osvětlení a teplotě. U monokrystalických článků bývá toto napětí kolem $0,6 V$.

2.1.3 Pracovní bod – PB

Pracovní bod FVČ je bod na V-A charakteristice, ve kterém FVČ momentálně pracuje. Jeho poloha je dána vlastnostmi spotřebiče. Pokud je pracovní bod v režimu proud nakrátko nebo napětí naprázdno neodevzdává FVČ žádný výkon.

Režimy práce FVČ:

a) FVČ pracující do obecné zátěže: poloha PB je dána odporem zátěže.

b) FVČ pracující do akumulátoru (nabíjecí režim): poloha PB je dána napětím akumulátoru.

2.1.4 MPP – Maximum Power Point

MPP je bod na V-A charakteristice s maximálním výkonem P_m . Tento výkon je dán napětím U_m a proudem I_m . Typické solární články dosahují maximálního výkonu od $1,5$ do $3 W$. Výkon FVČ závisí na ozáření, na spektru světla a teplotě článku.

P_m - maximální výkon, který může článek dodávat (Na V-A charakteristice je zhruba uprostřed ohybu);

U_m - napětí, při kterém dodává FVČ P_m ;

I_m - proud, při kterém dodává FVČ P_m ;

R_m - vnitřní odpor FVČ, při kterém dodává FVČ P_m :

$$R_m = \frac{U_m}{I_m} \quad (3)$$

2.1.5 FF – Fill Factor (činitel naplnění)

FF udává poměr mezi maximálním výkonem a výkonem daným napětím naprázdno a proudem nakrátko. Je závislý na kvalitě kontaktů, morfologii materiálu a odporu

aktivní polovodiivé vrstvy.

$$FF = \frac{U_m \cdot I_m}{U_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (4)$$

Čím je hodnota FF vyšší, tím větší výkon je schopen dodat a tím je článek kvalitnější.

2.1.6 Účinnost fotovoltaického článku

Účinnost FVČ je dána vlastnostmi materiálu, ze kterého je vyrobený FVČ. Použitý materiál má vliv na přeměnu dopadajícího záření na elektrickou energii. Využívá různých vlnových délek slunečního spektra. Z rovnice je zřejmé, že účinnost je dána maximálním výkonem v bodě MPP a výkonu dopadajícího záření. V tabulce 1 jsou účinnosti jednotlivých FVČ.

| Typ solárního článku | Typická efektivita článku za běžných podmínek | Maximální naměřená efektivita článku za běžných podmínek | Maximální naměřená hodnota článku v laboratoři |
|-------------------------|---|--|--|
| | [%] | [%] | [%] |
| Monokrystalický křemík | 12 - 16 | 22 | 25 |
| Multikrystalický křemík | 11- 14 | 16 | 20 |
| Amorfní křemík | 5 - 7 | 10 | 13 |
| Telurid kademnatý | 10 | 12 | 16 |

Tab. 1: Účinnosti jednotlivých typů fotovoltaických článků [9]

$$\eta = \frac{P_m}{P_{rad}} = \frac{P_m}{E \cdot A_C} \quad (5)$$

P_m - max. výkon, který může článek dodávat (bod P_m FVČ je na V-A charakteristice zhruba uprostřed ohybu VAch);

P_{rad} - výkon dopadajícího záření;

E - intenzita osvětlení (ozáření) při standardizovaných zkušebních podmínkách ($W \cdot m^{-2}$);

A_C - plocha FVČ (m^2)

2.1.7 Teoretická maximální účinnost

$$\eta = \eta_r \cdot \eta_e \cdot \eta_p \cdot \eta_{el} = \eta_r \cdot \eta_e \cdot \eta_p \cdot FF \quad (6)$$

η_r je poměr výkonu odraženého záření k výkonu dopadajícímu; s respektováním průměrné odrazivosti křemíku ($R = 0,3$), můžeme psát $\eta_r = 0,70$

η_e je účinnost Carnotova tepelného cyklu:

$$\eta_e = 1 - \frac{T}{T_s} = 1 - \frac{298,15}{6000} = 0,9503 \quad (7)$$

T je okolní teplota a je rovna při $25^\circ C$ $298,15$ K a T_s je teplota Slunce a je rovna 6000 K.

η_p je příspěvek k účinnosti vlivem nepřizpůsobení křemíku ke spektru slunečního záření $\eta_p = 0,42$.

$\eta_{el} = FF$ je příspěvek k účinnosti daný kumulativními elektronickými parametry FVČ, dostupný měřením

$$FF = \frac{U_m \cdot I_m}{U_{oc} \cdot I_{oc}} \quad (8)$$

Po dosazení hodnot vychází účinnost:

$$\eta = \eta_r \cdot \eta_e \cdot \eta_p \cdot \eta_{el} = \eta_r \cdot \eta_e \cdot \eta_p \cdot FF = 0,70 \cdot 0,9503 \cdot 0,42 \cdot FF = 0,27938 \Rightarrow 27,938\%$$

Tato hodnota je určena při teplotě 25°C a nejsou zde započítány žádné ztráty při výrobě – ztráty na kontaktech atd. Při započítání parametru FF se výsledná účinnost zmenší.

2.1.8 Sériový R_{SO} a paralelní R_{SH} odpor fotočlánku

Velikost sériového a paralelního odporu nám určuje jeho kvalitu. Při malém sériovém odporu R_{SO} účinnost článků s rostoucí intenzitou záření roste, než dosáhne maxima. Začíná klesat až při velkých intenzitách záření. Účinnost FVČ při velkém sériovém odporu R_{SO} s rostoucí intenzitou záření klesá.

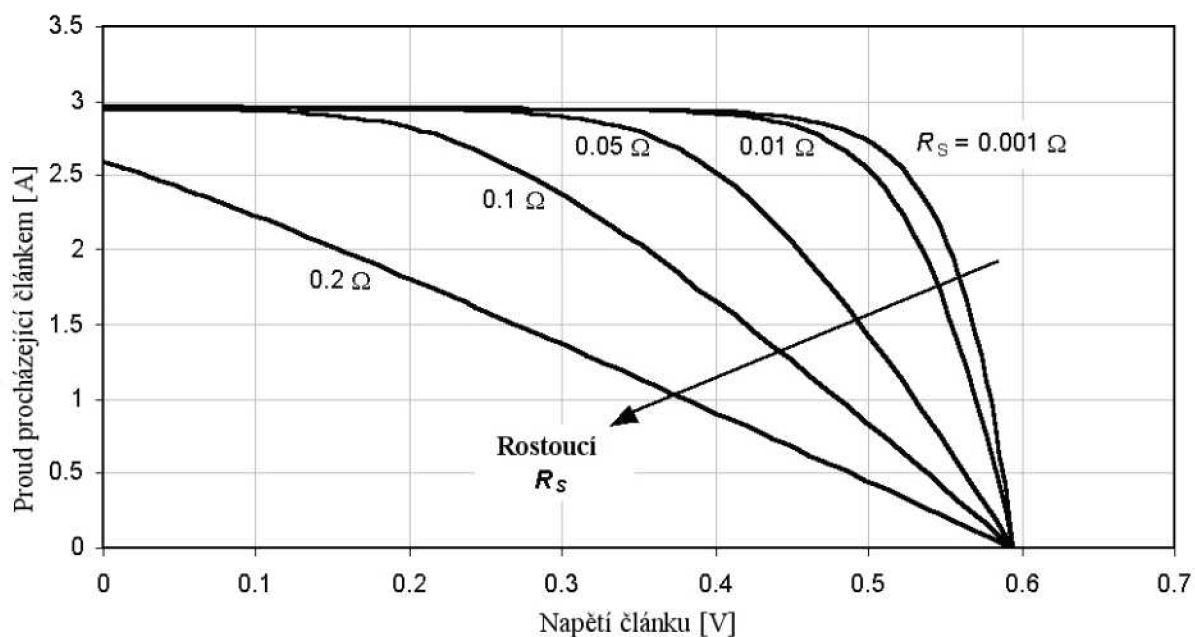
Sklon charakteristiky (tečny v bodech I_{SC} a U_{OC}) odpovídá parametrům R_{SH} a R_{SO} .

Velikosti sériového a paralelního odporu se zjistí z V-A charakteristiky a podle vztahu (9)

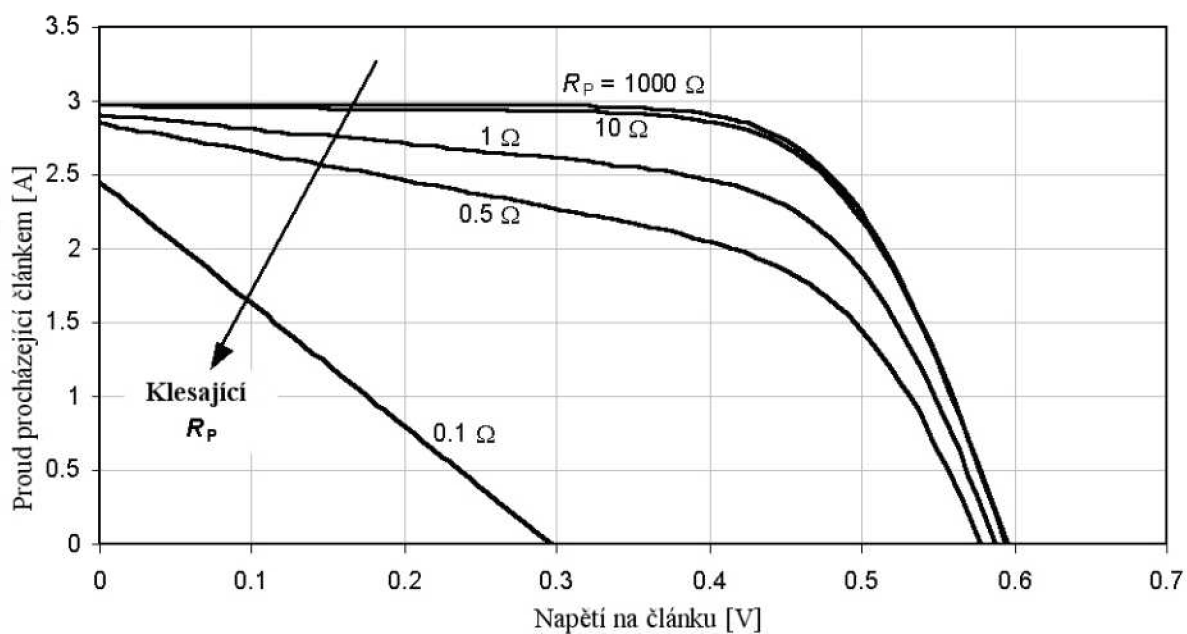
$$R_{SO} = \frac{\Delta U_{SO}}{\Delta I_{SO}} ; \quad R_{SH} = \frac{\Delta U_{SH}}{\Delta I_{SH}} \quad (9)$$

ΔU_{SO} , ΔI_{SO} - rozdíly dvou zvolených (naměřených) bodů (co nejvíce vzdálených) v lineární oblasti V-A char. za kolenem V-A char.;

ΔU_{SH} , ΔI_{SH} - rozdíly dvou zvolených (naměřených) bodů (co nejvíce vzdálených naměřených) v lineární oblasti V-A char. před kolenem V-A char. [1]



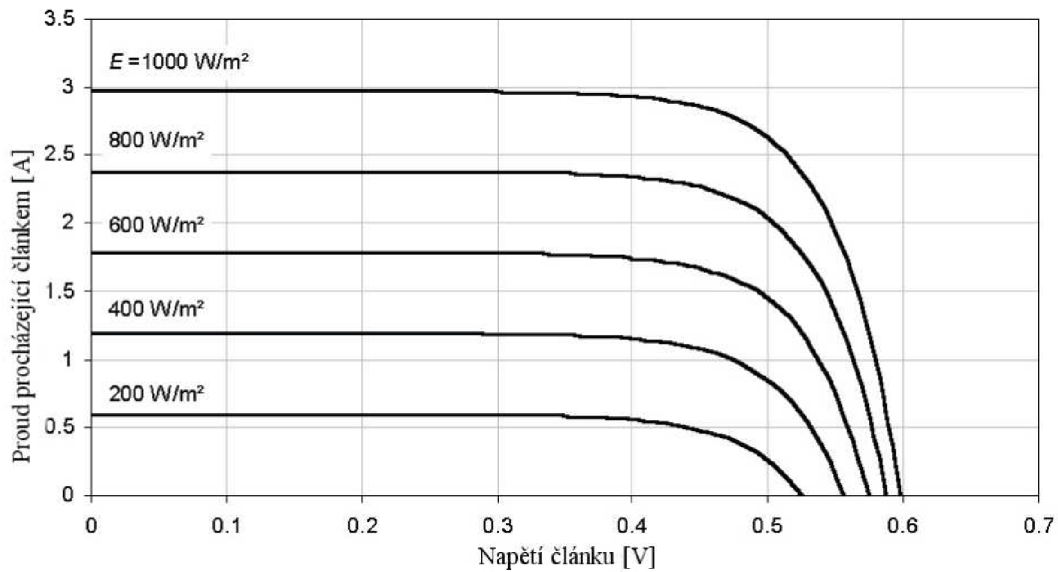
Obrázek 4: Vliv sériového odporu R_s na V-A charakteristiku FVČ [11]



Obrázek 5: Vliv paralelního odporu R_p na V-A charakteristiku FVČ [11]

Sériový odpor R_s vyjadřuje pokles napětí. Svodové proudy na hranách článku jsou popisovány paralelním odporem R_p . Na obrázku 4 a 5 je znázorněn vliv odporů R_s a R_p na V-A charakteristiku FVČ. Rozsah sériového odporu R_s je několik milionů ($m\Omega$), paralelního odporu R_p je vyšší než 10Ω .

2.2 Vliv osvětlení na FVČ



Obrázek 6: Vliv osvětlení na V-A charakteristiku FVČ [11]

Obrázek 6 znázorňuje vliv intenzity záření na FVČ. Se zvyšující se intenzitou záření roste výkon FVČ – roste proud I [A] protékající článkem a napětí U [V] na článku.

2.3 Vliv teploty na FVČ

Pro výpočty je předpokládána konstantní teplota $25^\circ C$. S měnící se teplotou se mění i charakteristiky FVČ.

Teplotní napětí U_T musí být počítáno s Boltzmannovou konstantou $k = 1,380658 \cdot 10^{-19} J/K$, absolutní teplotou T v Kelvinech $T = \Theta K/^\circ C + 273,15 K$ a elementárního náboje $e = 1,60217733 \cdot 10^{-19} C$, napětí U_T se vypočítá ze vztahu:

$$U_T = \frac{k \cdot T}{e} \quad (10)$$

Závislost saturačního proudu I_{S1} a I_{S2} s koeficienty c_{S1} a c_{S2} a šířky pásma E_g na teplotě:

$$I_{S1} = c_{S1} \cdot T^3 \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{k \cdot T}\right) \quad (11)$$

$$I_{S2} = c_{S2} \cdot T^{5/2} \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2 \cdot k \cdot T}\right) \quad (12)$$

Pokles napětí v otevřeném obvodu je způsoben zvýšením saturačního proudu s rostoucí teplotou. Teplota je závislá na sériovém odporu R_S , paralelním odporu R_P a diodový faktor se může zanedbat.

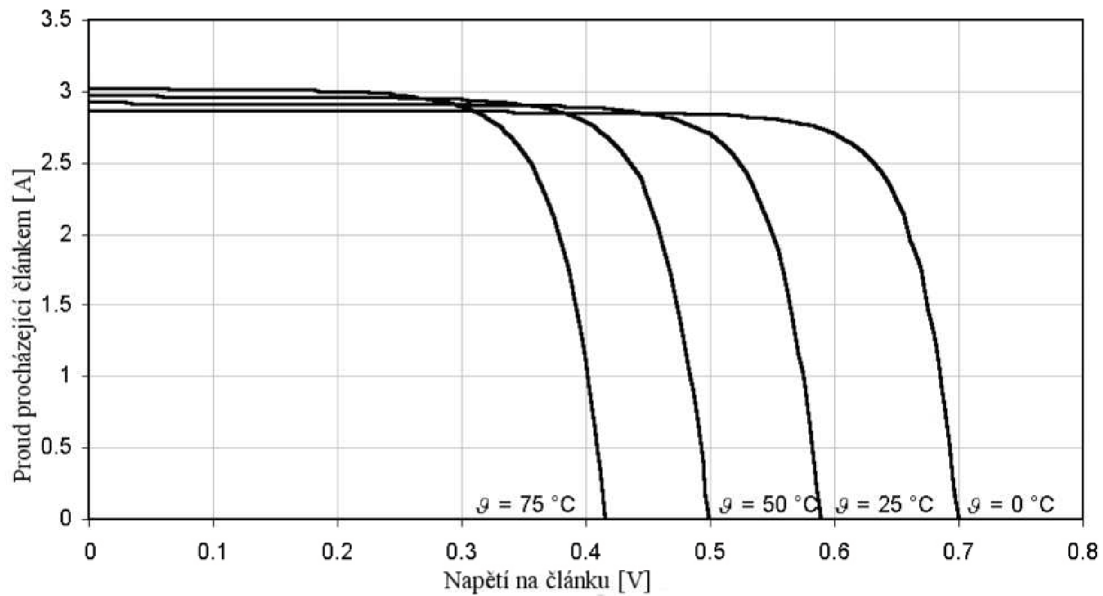
Teplotní závislost šířky zakázaného pásu nemá vliv na saturační proud, ale její teplotní závislost je rozhodující pro fotoproud I_{ph} . Se zvyšující se teplotou, díky poklesu v zakázaném pásu, mohou fotony s nižší energií povýšit elektrony do valenčního pásu se zvýšením fotoproudu. Za použití koeficientu C_1 a C_2 teplotní závislosti fotoproudu je dána rovnice:

$$I_{ph}(T) = (c_1 + c_2 \cdot T) \cdot E \quad (13)$$

| Parametr | C_{S1} | C_{S2} | C_1 | C_2 |
|---------------------|------------------|---------------------|-------------------|-----------------------|
| Jednotka | A/K ³ | A/K ^{-5/2} | m ² /V | m ² /(V K) |
| AEQ PQ 40/50 | 210,4 | 1,81E-02 | 2,24E-03 | 2,29E-06 |
| Siemens M50 | 170,8 | 1,88E-02 | 3,06E-03 | 1,79E-07 |
| Kyocera LA441J59 | 371,9 | 1,22E-02 | 2,51E-03 | 1,93E-06 |

Tab. 2: Parametry pro teplotní závislost různých fotovoltaických modulů [11]

V tabulce 2 jsou uvedeny hodnoty pro výpočet teplotní závislosti různých fotovoltaických modulů.



Obrázek 7: Teplotní závislost FVČ [11]

Na obrázku 7 je vidět, že s klesající teplotou roste výkon FVČ a opačně se zvyšující se teplotou klesá napětí na článku, mírně roste proud, klesá výkon článku.

Parametry článku I_{ph} a I_s pro simulaci FVČ musí být odhadnuty z měřených charakteristik článku. Z důvodu zjednodušení může být předpoklad, že fotoproud I_{ph} je roven proudu nakrátko I_{sc} . Pro ideální diodu lze považovat hodnotu za diodový faktor $m = 1$.

Pro neideální diodu je diodový faktor $m > 1$. Pro zjištění počátečních hodnot R_s a R_p lze využít voltampérovou charakteristiku. R_p může být stanoven ze záporné oblasti V-A charakteristiky při podmínkách zkratu. Sériový odpor R_s lze určit okolo nebo za napětím naprázdno U_0 . [1]

$$R_p \approx \frac{\partial U}{\partial I} \Big|_{U=0} \quad (14)$$

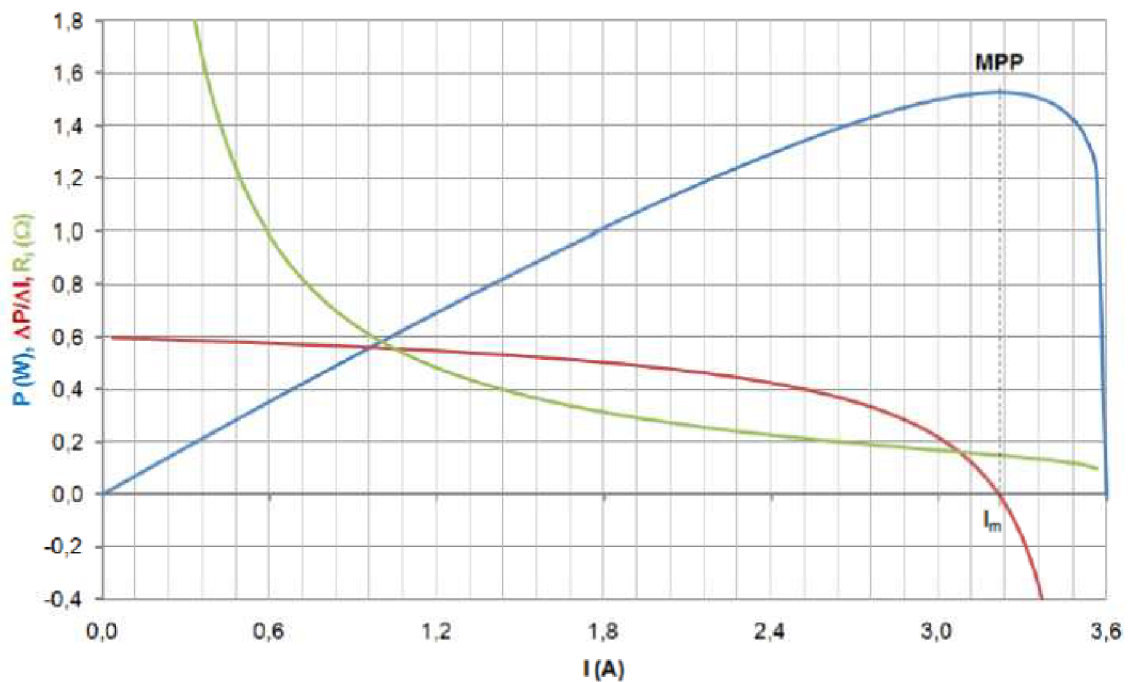
$$R_s \approx \frac{\partial U}{\partial I} \Big|_{U \gg U_{oc}} \quad (15)$$

2.4 Výkonová charakteristika FVČ

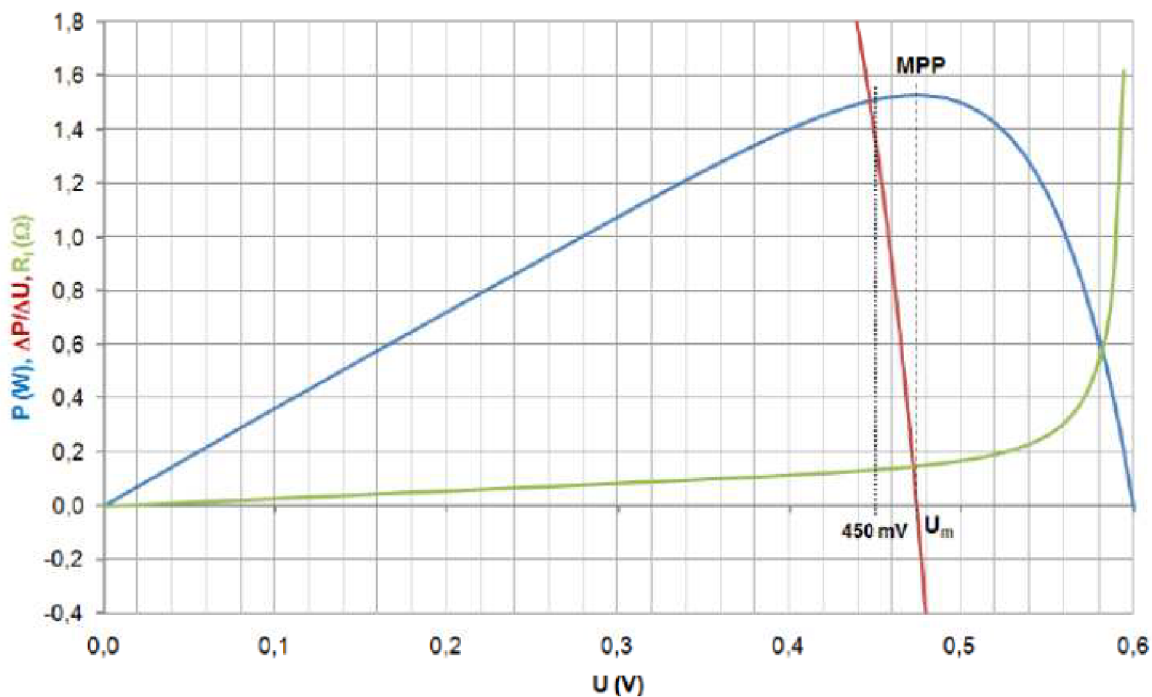
Výkonová charakteristika FVČ patří mezi základní charakteristiky, které slouží pro optimální nastavení střídače fotovoltaického systému. Je to součin okamžitých hodnot proudu a napětí na svorkách FVČ [1] [12].

$$P = U \cdot I \text{ [W]} \quad (16)$$

Výkonovou charakteristiku je možné modelovat buď pomocí napěťového, nebo proudového modelu.



Obrázek 8: Výkonová charakteristika FVČ - proudový model [1]



Obrázek 9: Výkonová charakteristika FVČ - napěťový model [1]

Pro stanovení maximálního výkonu MPP při daném osvětlení a teplotě se vychází z proudu I_{450} , což je hodnota proudu do zátěže, při které vzniká napětí 450 mV na FVČ. Tato hodnota napětí slouží při odhadu MPP, který leží uprostřed ohybu.

Při určování hodnot proudu a napětí se vychází z těchto rovnic pro zjednodušený matematický model (ve všech rovnicích se nepočítá se závěrným proudem, který je konstantní pro danou teplotu).

Pro napěťové souřadnice se vychází z napěťového modelu FVČ:

$$I = I_L - I_0 \cdot \exp\left(\frac{U}{U_t}\right), U \quad (17)$$

Po dosazení

$$P = U \cdot \left[I_L - I_0 \cdot \exp\left(\frac{U}{U_t}\right) \right] \quad (18)$$

Extrém výkonové charakteristiky najdeme 1. derivací podle napětí, která je rovna 0.

$$\frac{dP}{dU} \cdot \frac{dP_m}{dU_m} = 0 \quad (19)$$

Po úpravách se získá rovnice

$$P_m = I_L - I_0 \cdot \exp\left(\frac{U_m}{U_t}\right) \cdot \left(1 + \frac{U_m}{U_t}\right) \quad (20)$$

Pro proudové souřadnice se vychází z proudového modelu FVČ:

$$U = U_t \cdot \ln \frac{I_L - I}{I_0}, I \quad (21)$$

Po dosazení

$$P = \left(U_t \cdot \ln \frac{I_L - I}{I_0} \right) \cdot I \quad (22)$$

Extrém výkonové charakteristiky najdeme 1. derivací podle proudu, který je rovna 0.

$$\frac{dP}{dI} \cdot \frac{dP_m}{dI_m} = 0 \quad (23)$$

Po úpravách se získá vztah

$$P_m = U_t \cdot \ln \frac{I_L - I_m}{I_0} - U_t \cdot \frac{I_m}{I_L - I_m} \quad (24)$$

Rovnice pro proudové a napěťové souřadnice je možné řešit pouze pomocí:

Metodou třív

Metodou tečen

Iterační metodou

Grafickým řešením

2.5 Odpor FVČ

2.5.1 Statický odpor

Nahrazuje nelineární součástku pouze v jednom pracovním bodě. V každém jiném pracovním bodě je i jiná hodnota statického odporu.

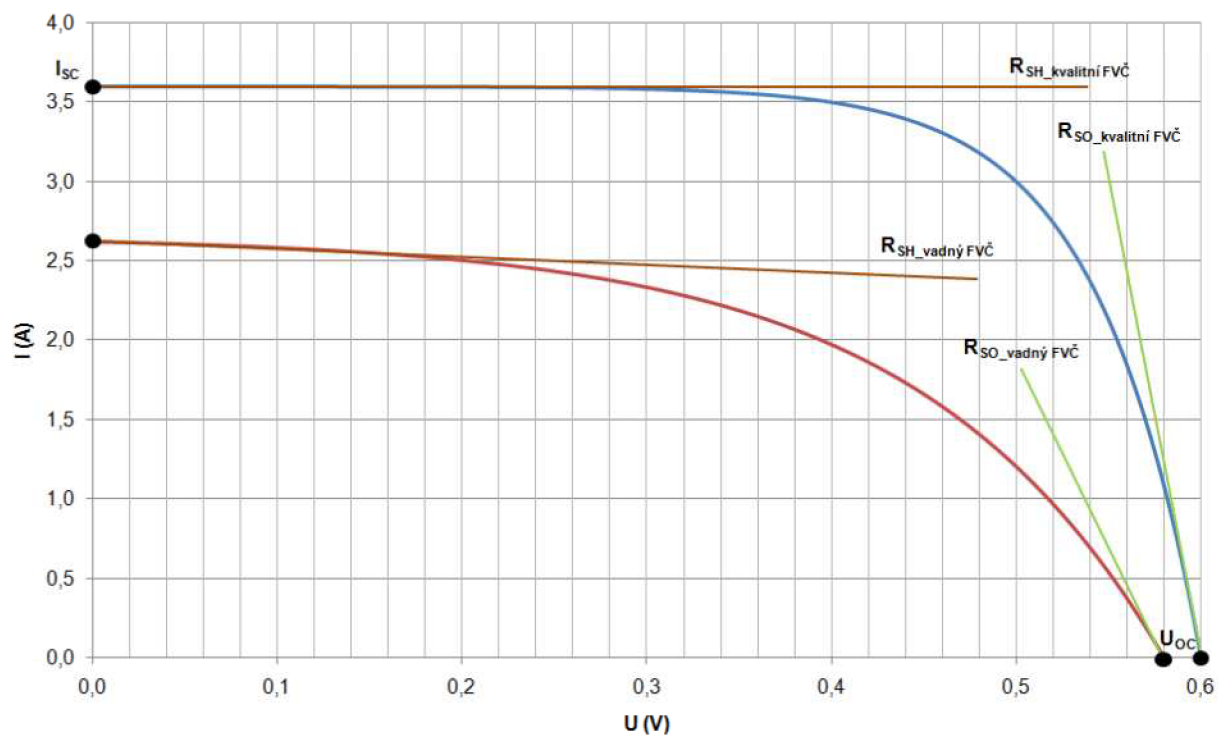
2.5.2 Dynamický odpor

Nahrazuje nelineární součástku v okolí pracovního bodu. Závisí na poloze pracovního bodu a udává změnu odporu na změnu napětí a proudu v okolí pracovního bodu. Velikost dynamického odporu určuje změnu strmost odezvy:

- malý dynamický odpor – velká změna,
- velký dynamický odpor – malá změna.

Dynamický odpor může mít různé hodnoty:

- kladný – proud s rostoucím napětím roste,
- záporný – proud s rostoucím napětím klesá,
- nulový – napětí má konstantní hodnotu s rostoucím proudem,
- nekonečný – proud má konstantní hodnotu s rostoucím napětím.



Obrázek 10: V-A charakteristika kvalitního a vadného FVČ [1]

Při určování statického a dynamického odporu se vychází z Ohmova zákona.

$$R = \frac{U}{I} [\Omega] \quad (25)$$

Statický odpor se definuje:

$$R_s = \frac{U_p}{I_p} \quad (26)$$

R_s – hodnota statického odporu

U_p – napětí v daném pracovním bodě

I_p – proud v daném pracovním bodě

Dynamický odpor se definuje:

$$R_D = \frac{\Delta U_P}{\Delta I_P} \quad (27)$$

R_D – hodnota dynamického odporu

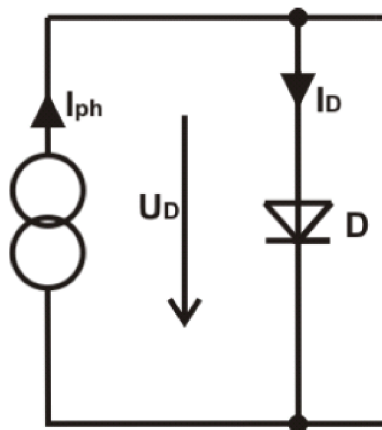
ΔU_P – změna napětí v okolí daného pracovního bodu

ΔI_P – změna proudu v okolí daného pracovního bodu

2.6 Matematický model FVČ

Matematický model FVČ vychází z popisu V-A charakteristiky polovodičové fotodiody tzv. Shockleyho rovnice:

$$I = I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{U}{U_t}\right) - 1 \right] - I_{ph} \quad (28)$$

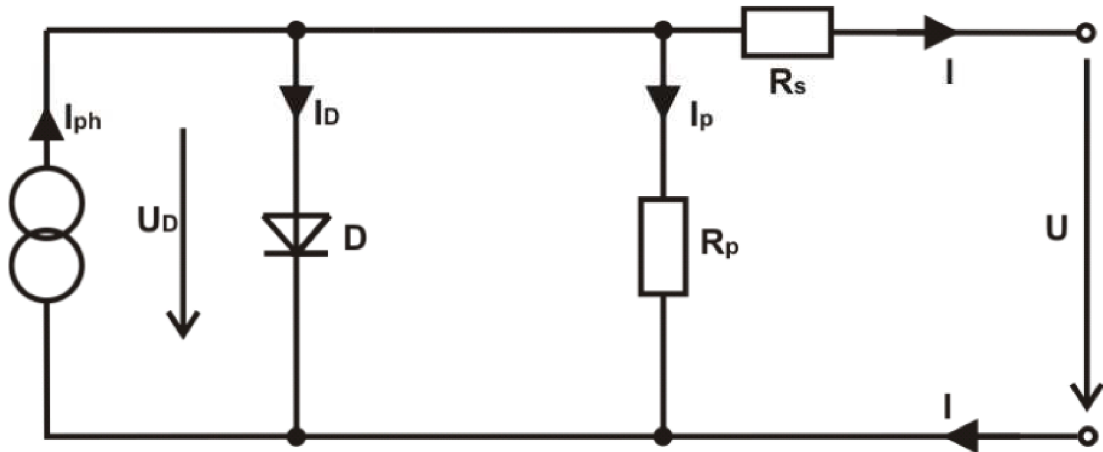


Obrázek 11: Zapojení diody [11]

Obrázek 11 znázorňuje jednoduché zapojení diody bez odporů, od kterého se následně odvíjí náhradní zapojení fotovoltického článku doplněného o odpory.

2.6.1 Jednodiódový model FVČ

Náhradní obvod (rozšířený jedno - diódový model) pro ozářené fotovoltaické články je složen z diody a proudového zdroje, který je připojen paralelně.



Obrázek 12: Náhradní obvod fotovoltaického článku (jedno - diódový model) [11]

Proudovo - napěťové charakteristiky PN přechodu fotovoltaického článku jsou ovlivněny sériovým R_s a paralelním R_p odporem. Sériový odpor je dán celkovým odporem hmoty polovodiče, odporu kontaktů a propojení. Paralelní odpor je způsoben defekty krystalické mřížky nebo svodovým proudem kolem okrajů článku. [11]

Matematické vyjádření tohoto modelu je:

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left(\exp\left(\frac{U + I \cdot R_s}{m \cdot U_t}\right) - 1 \right) - \frac{U + I \cdot R_s}{R_p} \quad (29)$$

Diodový faktor m je roven 1 u ideální diody. Přechod P-N fotovoltaického článku je totožný diodě (v propustném směru). Proudový zdroj generuje fotoproud I_{ph} , který je přímo úměrný intenzitě dopadajícího záření a koeficientu c_0 .

$$I_{ph} = c_0 \cdot E \quad (30)$$

Rovnice 29 lze řešit pouze pomocí numerických metod. Pro řešení této rovnice se použila Newtonova iterační metoda. Ta k nalezení kořenu rovnice využívá rovnice tečny. Křivka v okolí kořene je nahrazena tečnou v bodě $[x_i, f(x_i)]$. Průsečík tečny s osou x je nová

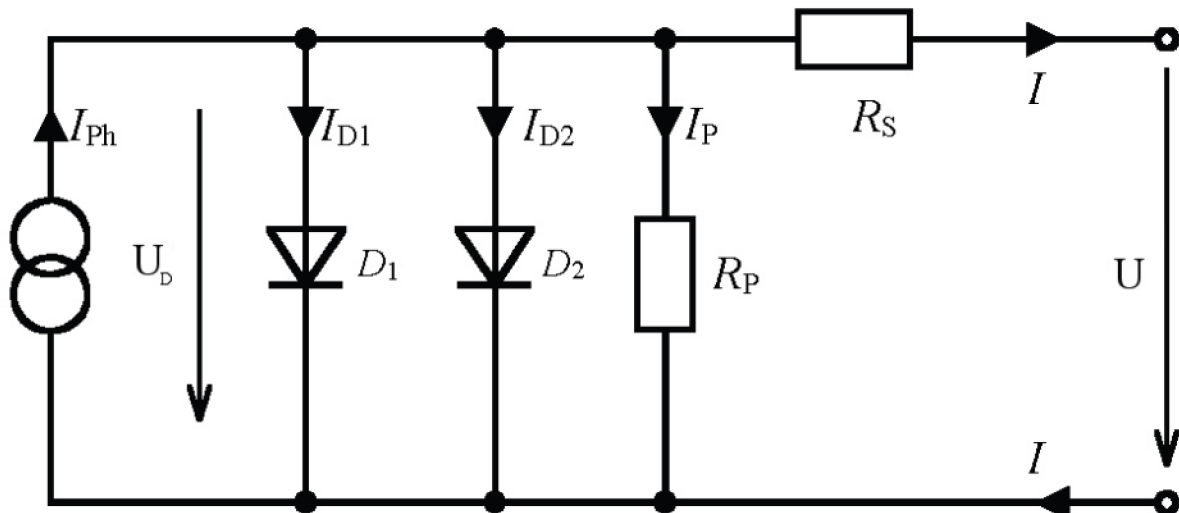
aproximace kořene x_{i+1} . Předpokladem je, že z hodnoty první derivace funkce v určitém bodě se určí rovnice tečny procházející tímto bodem. Pro výpočet Newtonovy iterační metody se využije vztahu:

$$x_{i+1} = x_i - \frac{f(x_i)}{f'(x_i)} \quad (31).$$

x_i (pro $i = 0$ – na začátku výpočtu zvolená hodnota) kořene rovnice x_{i+1} je následná upřesněná aproximace. [10]

Každá další hodnota x_i se dosazuje do vztahu tak dlouho, dokud nebude rozdíl mezi iteračními kroky menší než je předdefinovaný limit.

2.6.2 Dvoudiodový model FVČ



Obrázek 13: Dvou - diodový model FVČ [11]

Dvou - diodový model dává v mnoha případech lepší znázornění FVČ. Druhá dioda D_2 je připojena k první diodě D_1 paralelně. Obě diody mají různé saturační proudy a faktory. Dioda D_1 je obvykle ideální a její diodový faktor je $m_1 = 1$. Druhá dioda má faktor $m_2 = 2$. V tabulce 1 jsou uvedeny parametry, které pro některé moduly prokázaly dobré výsledky simulace.

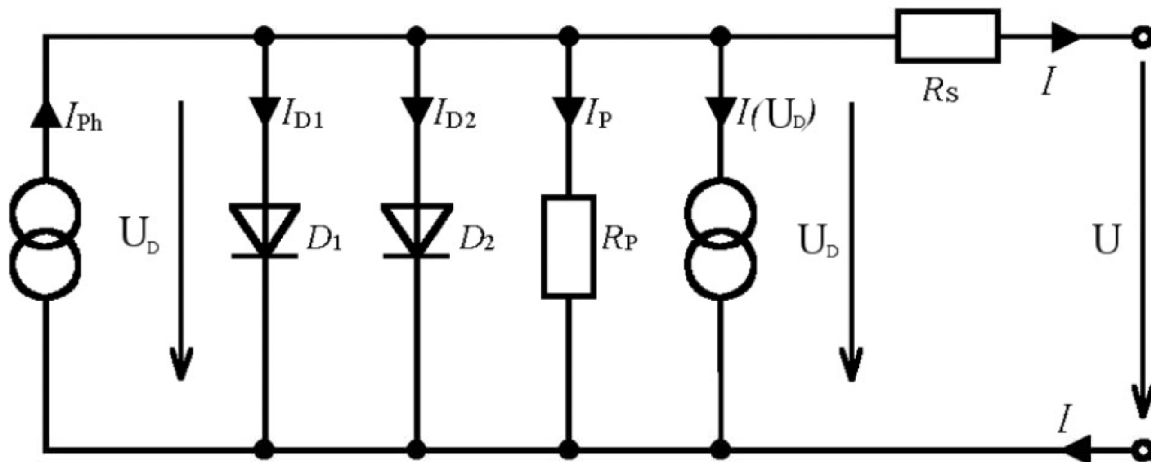
| Parametr | c_0 | I_{S1} | I_{S2} | m_1 | m_2 | R_S | R_P |
|------------------|----------|----------|----------|-------|-------|------------|----------|
| Jednotka | m^2/V | nA | μA | - | - | m Ω | Ω |
| AEG PQ 40/50 | 2,92E-03 | 1,082 | 12,24 | 1 | 2 | 13,66 | 34,9 |
| Siemens M50 | 3,11E-03 | 0,878 | 12,71 | 1 | 2 | 13,81 | 13 |
| Kyocera LA441J59 | 3,09E-03 | 1,913 | 8,25 | 1 | 2 | 12,94 | 94,1 |

Tab. 3: Parametry pro různé dvou-diodové FV moduly [11]

Matematické vyjádření, které popisuje chování dvou – diodového zapojení vyjadřuje rovnice 32.

$$I = I_{ph} - I_{S1} \cdot \left(\exp\left(\frac{U + I \cdot R_S}{m_1 \cdot U_T}\right) - 1 \right) - I_{S2} \cdot \left(\exp\left(\frac{U + I \cdot R_S}{m_2 \cdot U_T}\right) - 1 \right) - \frac{U + I \cdot R_S}{R_P} \quad (32)$$

2.6.3 Dvoudiodový model FVČ s rozvinutým členem



Obrázek 14: Náhradní obvod fotovoltaického článku (dvou - diodový rozšířený model) [11]

Na obrázku 14 je znázorněn náhradní obvod FVČ jako rozšířený dvou - diodový model s rozšířeným členem. Obvod je složen z proudového zdroje a dvou diod, které jsou připojeny paralelně. Proudový zdroj generuje fotoproud I_{ph} , který je přímo úměrný intenzitě dopadajícího záření.

Proudový zdroj $I(U_D)$ vyjadřuje rozvinutý člen. Tento zdroj popisuje pokles záporného napětí na diodě a generuje proud závisící na napětí diody U_D . Generovaný proud popisuje chování článku při záporném napětí. [11]

Matematické vyjádření tohoto modelu je:

$$I = I_{ph} - I_{s1} \cdot \left(\exp\left(\frac{U + I \cdot R_s}{m_1 \cdot U_T}\right) - 1 \right) - I_{s2} \cdot \left(\exp\left(\frac{U + I \cdot R_s}{m_2 \cdot U_T}\right) - 1 \right) - \frac{U - I \cdot R_s}{R_p} - b \cdot (U + I \cdot R_s) \cdot \left(1 - \frac{U + I \cdot R_s}{U_{Br}} \right)^{-n} \quad (33)$$

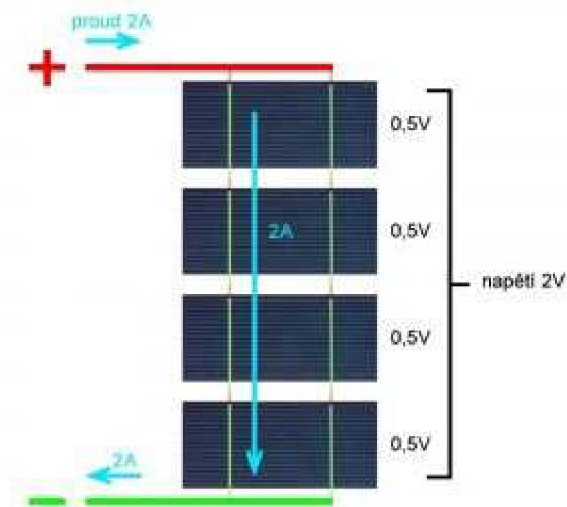
Pro oba modely výpočet saturačních proudů I_{s1} a I_{s2} byly použity rovnice 11 a 12.

2.7 Zapojení fotovoltaických článků

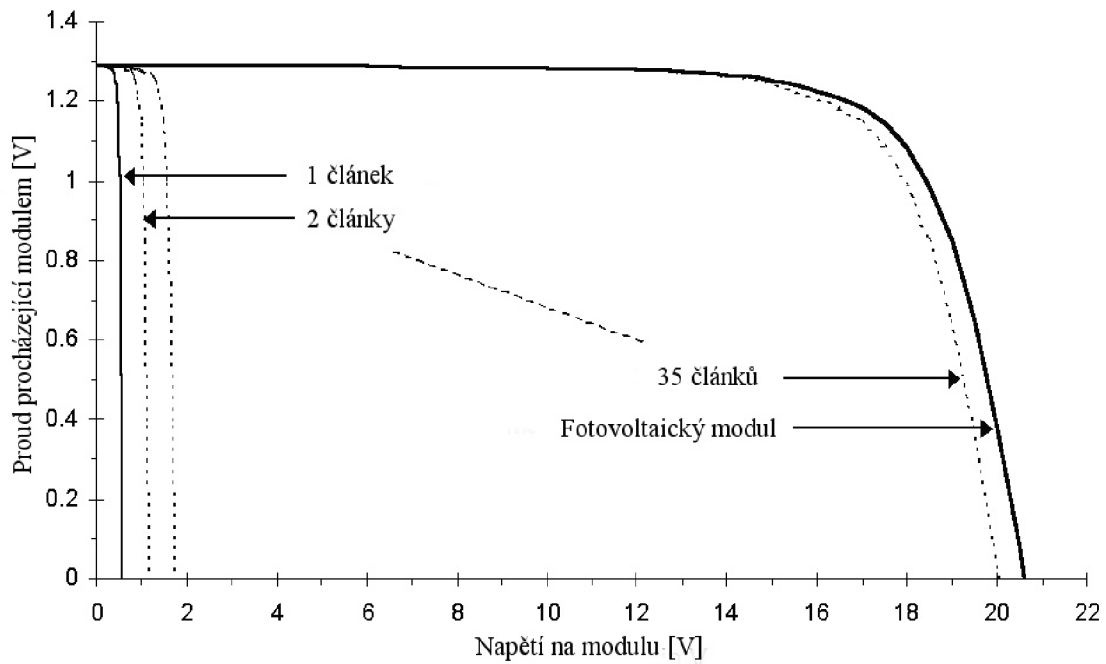
2.7.1 Sériové zapojení

Pro zvýšení napětí se používá sériové zapojení FVČ. U panelů se tento způsob zapojení volí hlavně u zařízení, která dodávají elektrickou energii do rozchodné sítě. Zapojením několika panelů do série bude procházet všemi panely proud jednoho panelu a napětí bude dáno součtem všech panelů. Na obrázku 15 je znázorněno sériové spojení FVČ.

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n = \sum_{i=1}^n U_i = n \cdot U; I \quad (34)$$



Obrázek 15: Sériové zapojení FVČ [7]



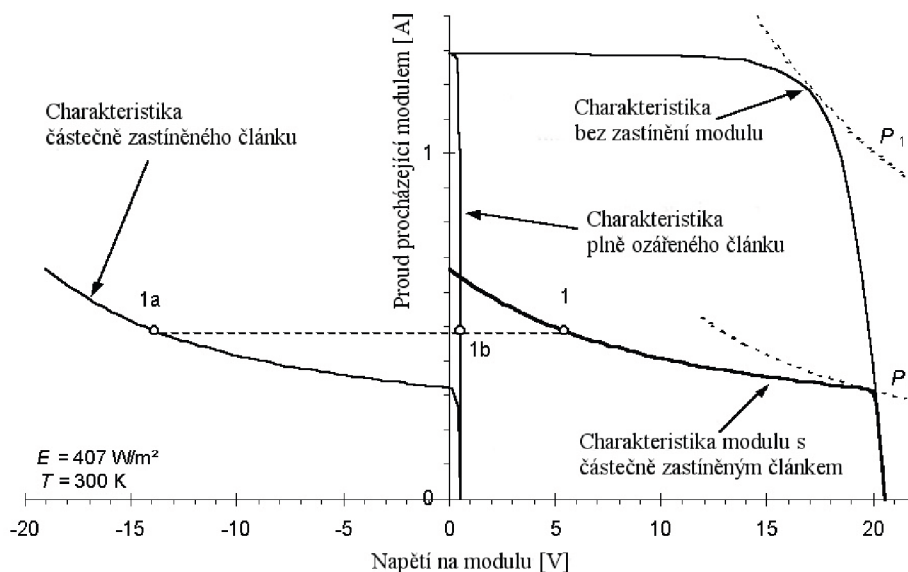
Obrázek 16: Charakteristika 36 článkového modulu (při osvětlení $E = 400 \text{ W/m}^2$, $T = 300 \text{ K}$) [11]

V reálných podmínkách jsou fotovoltaické články ovlivňovány mnoha vnějšími faktory. Panely mohou být znečištěny listím, sněhem, hmotnými překážkami okolí, ptačími exkrementy a to může zastínit několik buněk, což má veliký vliv na charakteristiku modulu.

V uváděném příkladě je předpokládáno, že 35 článků v modulu, který je složen z 36 sériově zapojených článků, je ozářeno stejně. Zbývající článek má pokles ozáření o 75 %. Proud ve všech člancích je shodný. Charakteristiky modulu lze nalézt určením rozsahu proudu od 0 do bodu proudu nakrátko I_{SC} , kdy je článek nezastíněný. Ozářené články a zastíněné články mají napětí U_F a U_S a jsou dány:

$$U = U_S(I) + 35 \cdot U_F(I) \quad (35)$$

Charakteristiku modulu lze získat při zastavení na hodnotě proudu nakrátko částečně zastíněného článku. Tyto charakteristiky se ale týkají jen malého rozsahu napětí poblíž hranice otevřeného okruhu napětí.



Obrázek 17: Charakteristika modulu se zastíněním 75% článku [11]

Jestliže je proud v částečně zastíněném článku vyšší než proud nakrátko, vyskytuje se nižší rozsah napětí charakteristik. To se může stát jen v záporném rozsahu napětí zastíněného článku, kdy článek funguje jako zátěž.

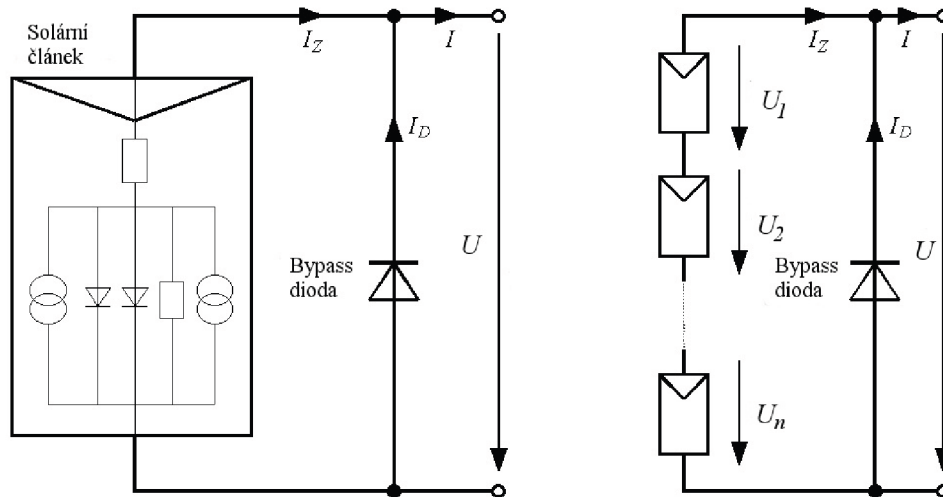
Obrázek se v bodě 1 ukazuje určení bodu charakteristiky. Napětí na modulu pro určený proud je dáno jako součet napětí částečně zastíněného článku 1a a 35x napětí ozářeného článku 1b. Celková charakteristika modulu při zastínění je vypočítána postupně pro rozdílné proudy.

Zastíněný článek snižuje drasticky výkon celého modulu. Maximální výkon modulu $P_1 = 20,3 \text{ W}$ je snížen na výkon $P_2 = 6,3 \text{ W}$, to odpovídá asi 70%, přičemž pouze 2% modulu jsou zastíněny. Částečně zastíněné FVČ se chovají jako zátěž. Pokud je modul ve zkratu, může zastíněný FVČ získat ztrátový výkon 21,7 W.

Jinou možností zastínění při vyšším ozáření je možné zvýšit ztrátový výkon zastíněného článku, až na 30 W. Tím dojde k výraznému zahřívání článku a může být i zničen. Tyto tzv. „horké body“, což jsou horké oblasti o velikosti 1mm, se objevují tam, kde se materiál článku rozpouští nebo kde je obal článku poškozen.

K ochraně jednotlivých článků od těchto bodů, se zařazují tzv. bypassové diody do fotovoltaického modulu paralelně k FVČ. Diodami protéká proud při zastínění, ale jinak

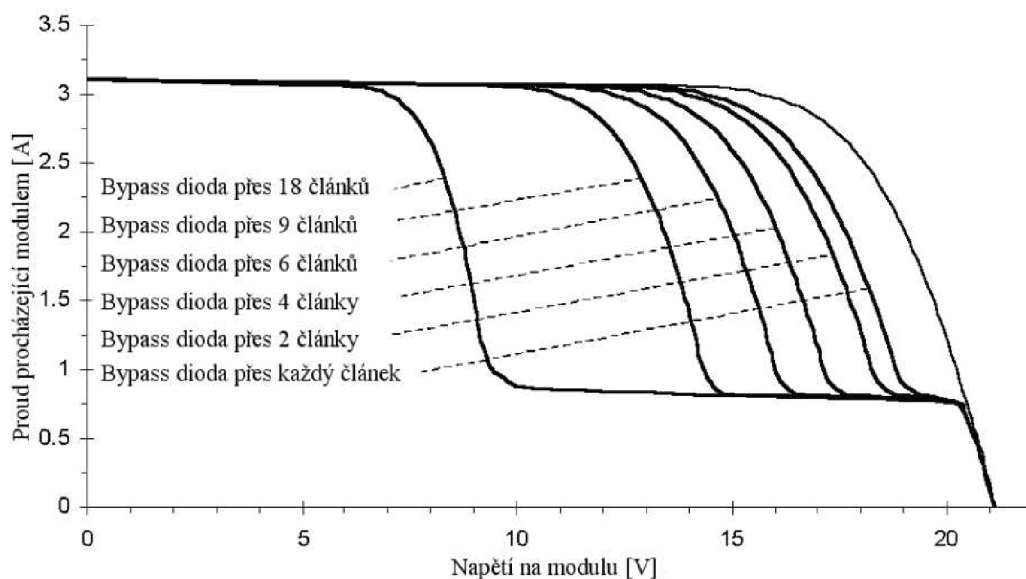
během normálního provozu nejsou aktivní. Integrace bypassových diod eliminuje možnost vysokého záporného napětí a v procesu eliminuje navýšení teploty zastíněných FVČ.



Obrázek 18: Integrace bypass diody [11]

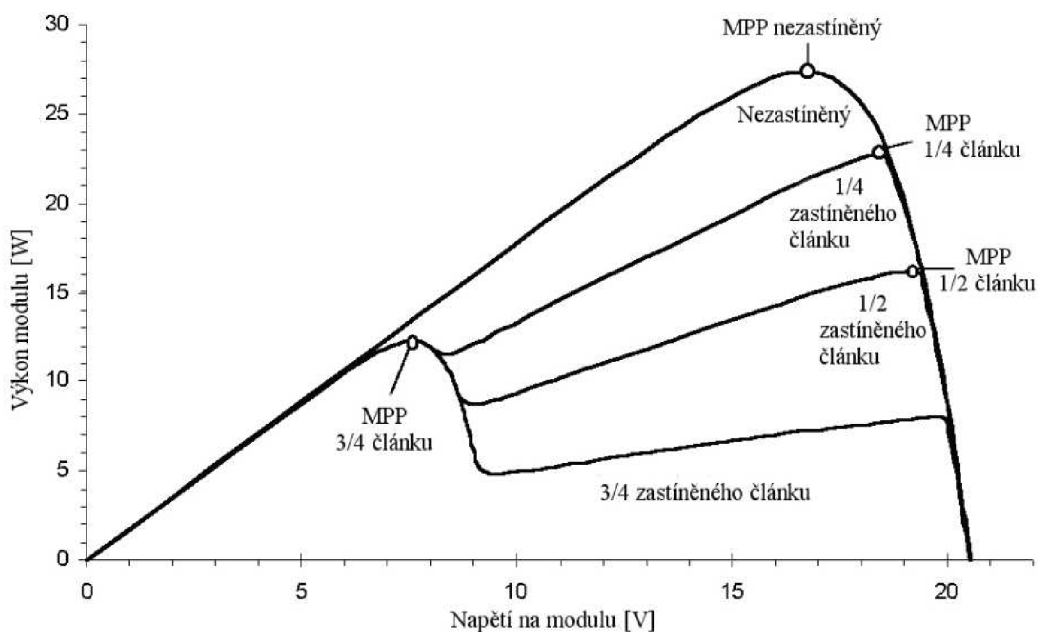
Bypassové diody se připojí obvykle přes 18 – 24 článků z ekonomického důvodu. Dvě bypassové diody jsou vhodné pro modul s výkonem okolo 50 W složeného z 36 – 40 článků. Integrace diod může být i do rámu modulu. Tyto diody ale nemohou plně ochránit jednotlivý článek. V případě použití jedné bypassové diody pro každý článek, lze poskytnout dostatečnou ochranu. Polovodičové technologie umožňují integrovat bypassové diody přímo do článků. Takto vyrobené moduly prvně vyrobené firmou Sharp vykazovaly výrazně nižší ztráty při nehomogenním osvětlení.

Na obrázku 18 je znázorněna integrace bypassové diody přes články. K přepnutí bypassové diody dojde v případě, že je záporné napětí cca -0,7 V. K tomuto zápornému napětí dojde, jestliže napětí zastíněného článku je rovno součtu napětí ozářených článků a bypassové diody.



Obrázek 19: Charakteristika simulovaného modulu s bypass diodami přes různý počet článků ($E = 1000 \text{ W/m}^2$, $T = 300 \text{ K}$) [11]

Obrázek 19 ukazuje V-A charakteristiku s bypassovými diodami napříč různým počtem článků. Zde je jeden článek zastíněn na 75 % a se snižujícím se počtem článků na bypass diodu dochází ke změně charakteristiky. Větší množství těchto diod v panelu snižuje ztráty energie a napětí na každém jednom článku.



Obrázek 20: P - U charakteristika modulu s 36 články a 2 bypass diodami. U jednoho článku se mění zastínění, ostatní jsou plně ozářeny ($E = 574 \text{ W/m}^2$, $T = 30 \text{ K}$) [11]

Obrázek 20 znázorňuje výkonovou charakteristiku 36 článkového modulu se dvěma bypass diodami napříč 18 články při různých zastínění. Maximální body MPP se přesouvají v závislosti na stupni zastínění. [11]

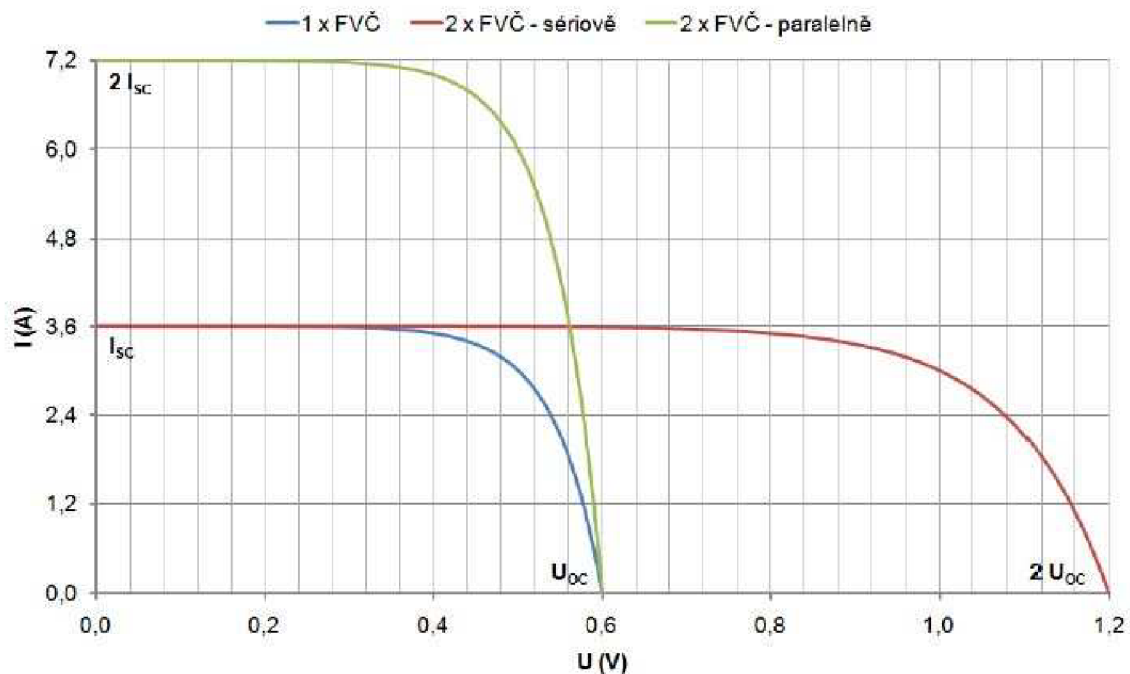
2.7.2 Paralelní zapojení

Paralelní zapojení FVČ se používá pro dosažení většího proudu. Proud je dán součtem dílčích proudů z FVČ. Tento způsob zapojení se většinou používají u menších izolovaných systémů. Na obrázku 21 je zobrazeno paralelní zapojení FVČ.

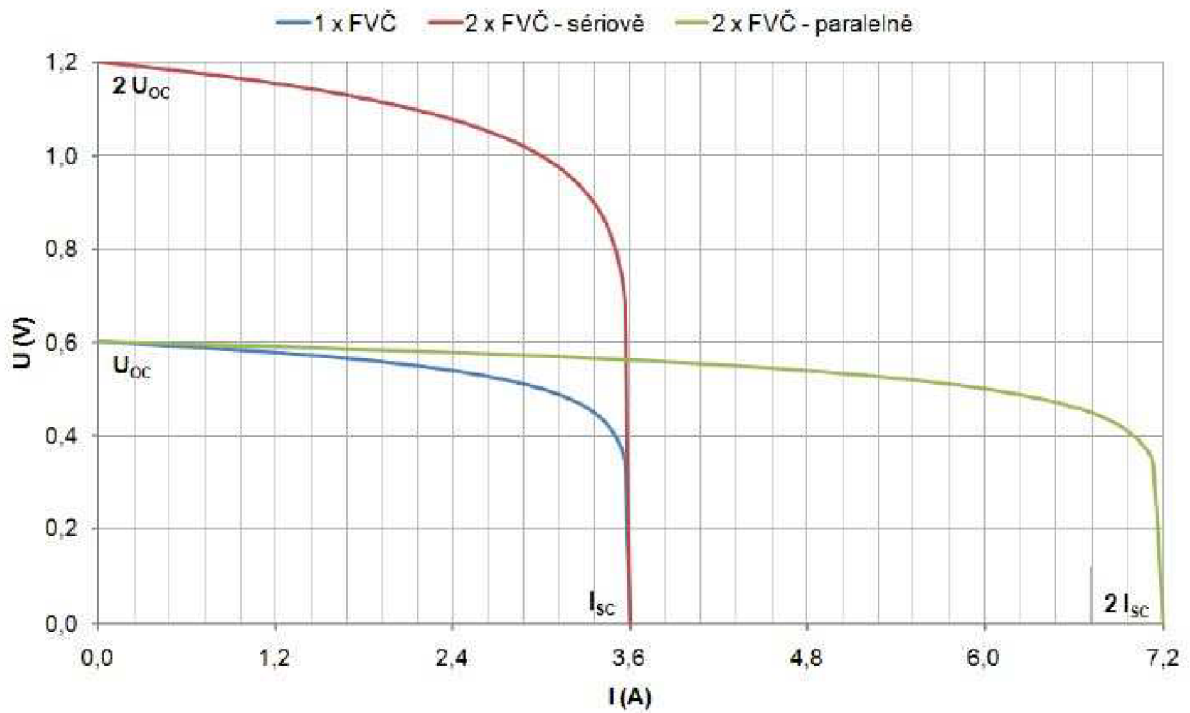
$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n = \sum_{i=1}^n I_i = n \cdot I; U \quad (36)$$



Obrázek 21: Paralelní zapojení FVČ [7]



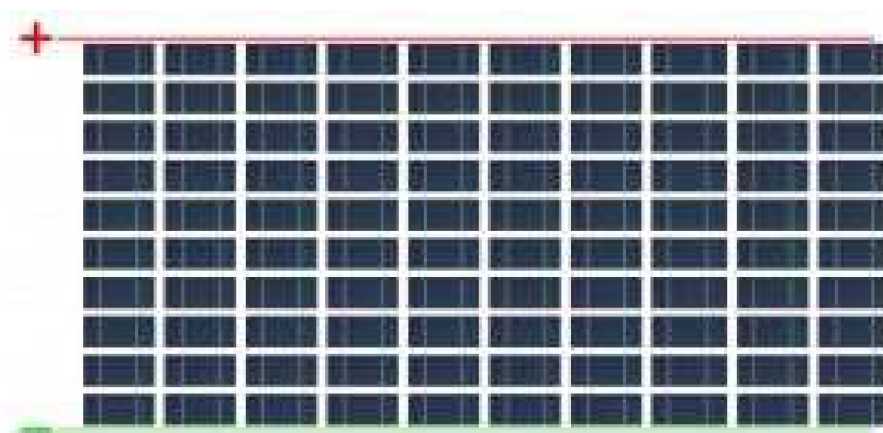
Obrázek 22: V-A charakteristika sériově a paralelně zapojených FVČ - U model [1]



Obrázek 23: V-A charakteristika sériově a paralelně zapojených FVČ - I model [1]

2.7.3 Sériové – paralelní zapojení

Zapojením FVČ do série se nastaví požadované napětí a zapojením těchto sériově zapojených FVČ se dosáhne požadovaného proudu. Na obrázku 24 je sériové – paralelní zapojení.



Obrázek 24: Sériově - paralelní zapojení FVČ [7]

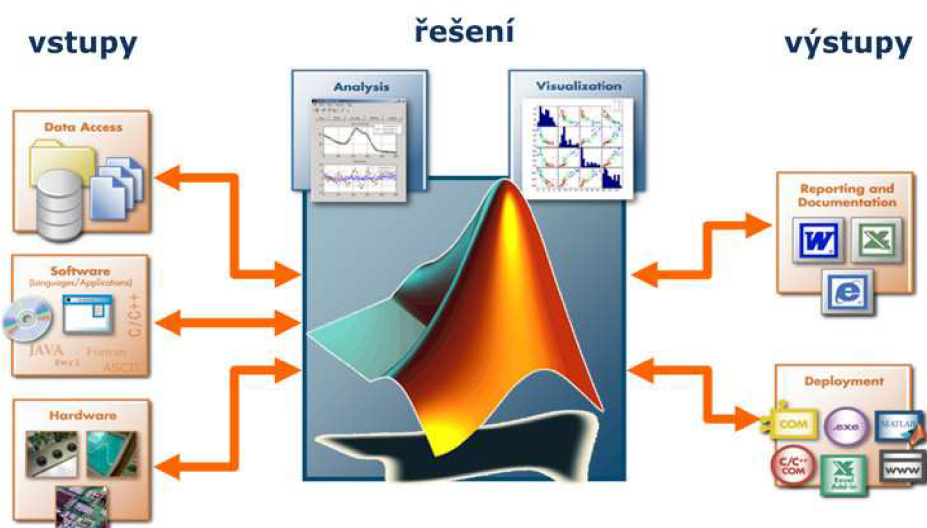
3 MATLAB

3.1 Jazyk pro technické výpočty

Název MATLAB vznikl ze spojení slov „MATrix LABoratory“. MATLAB je integrované prostředí pro vědeckotechnické výpočty, modelování, návrhy algoritmů, simulace, analýzu a prezentaci dat, paralelní výpočty, měření a zpracování signálů, návrhy řídicích a komunikačních systémů. MATLAB je nástroj jak pro pohodlnou interaktivní práci, tak pro vývoj širokého spektra aplikací.

MATLAB dává svým uživatelům nejen účinné grafické a výpočetní nástroje, ale i rozsáhlé specializované knihovny funkcí spolu s výkonným programovacím jazykem čtvrté generace. Knihovny jsou svým rozsahem využitelné prakticky ve všech oblastech lidské činnosti.

MATLAB je určen hlavně těm, kteří potřebují řešit početně náročné úlohy a přitom nechtějí nebo nemají čas zkoumat matematickou podstatu problémů. Za nejsilnější stránku MATLABu je považováno mimořádně rychlé výpočetní jádro s nejpříhodnějšími algoritmy. [5]



Obrázek 25: Schématické znázornění využití MATLABu [5]

3.2 Výpočetní jádro

Základní součástí numerického jádra MATLABu jsou algoritmy pro operace s maticemi reálných a komplexních čísel. V MATLABu se mohou provádět základní operace jako násobení, inverze, determinant atd. Může se použít i jako maticový kalkulátor. MATLAB podporuje složitější typy, jako jsou např. vícerozměrná pole reálných nebo komplexních čísel. Program obsahuje funkce pro analýzu - výpočet střední hodnoty, hledání extrémů, výpočet směrodatné odchylky, korelačních koeficientů, rychlé Fourierovy transformace. Další značnou vlastností jazyka MATLABu je práce s objekty. Ty umožňují rozšířit výpočetní prostředí o nové datové typy, na kterých je možno definovat libovolné funkce a operátory.

3.3 Grafický subsystém

MATLAB umožňuje grafické zobrazení výsledků, které byly získány výpočtem. Zobrazit je možné různé grafy jako jsou:

dvourozměrné pro funkce jedné proměnné, třírozměrné pro funkce dvou proměnných, histogramy, koláčové grafy atd.

Je možné libovolně upravovat vzhled těchto grafů a to jak při jejich vytváření, tak po jejich nakreslení.

3.4 Otevřená architektura

K rozšíření MATLABu přispěla jeho otevřená architektura. Uživatelé mohou vytvářet funkce přesně pro jejich aplikace.

3.5 Pracovní nástroje

MATLAB je navrhnut tak, aby kromě pohodlné interaktivní práce umožňoval i programování aplikací. Programovací jazyk obsahuje všechny nezbytné příkazy pro psaní programů.

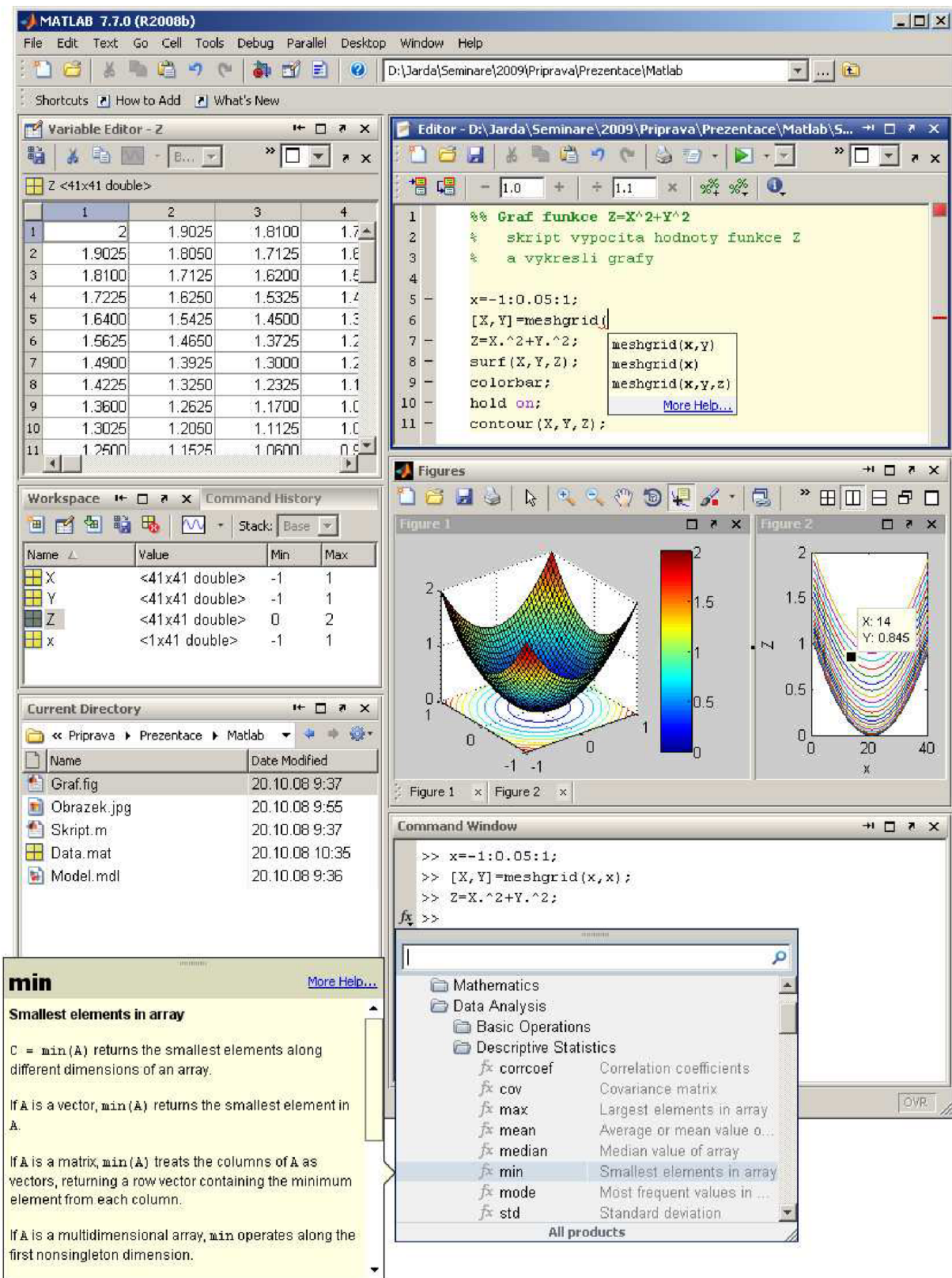
Základním nástrojem výpočetního systému je uživatelské rozhraní MATLAB Desktop na obrázku 26. Pracovní nástroje jako prohlížeč adresářů a souborů, prohlížeč pracovního prostoru, okno historie příkazů, interaktivní spouštěč aplikací, editor, debugger, profiler, hypertextová nápověda a příkazové okno jsou do prostředí plně integrovány. Uživatelské

rozhraní je konfigurovatelné, to umožňuje uživateli si uspořádat pracovní plochu, jak mu bude vyhovovat.

Výhodou programovacího jazyka MATLABu je jeho integrace s jazykem Java. Objekty jazyka Java mohou být přímo použity programem v MATLABu, což umožňuje jednak vytvářet složitá grafická rozhraní s použitím grafických objektů Javy, jednak využít velkého množství volně dostupných knihoven, které byly v jazyce Java vytvořeny. Kromě toho je možné k MATLABu připojovat také moduly napsané v jazyce C a ve Fortranu.

3.6 Toolboxy

Otevřená architektura MATLABu vedla ke vzniku knihoven funkcí, nazývaných toolboxy, které rozšiřují použití programu v příslušných vědních a technických oborech. Tyto knihovny nabízejí předzpracované specializované funkce, které je možno rozšiřovat, modifikovat, anebo jen čerpat informace z přehledně dokumentovaných algoritmů. [12][5]

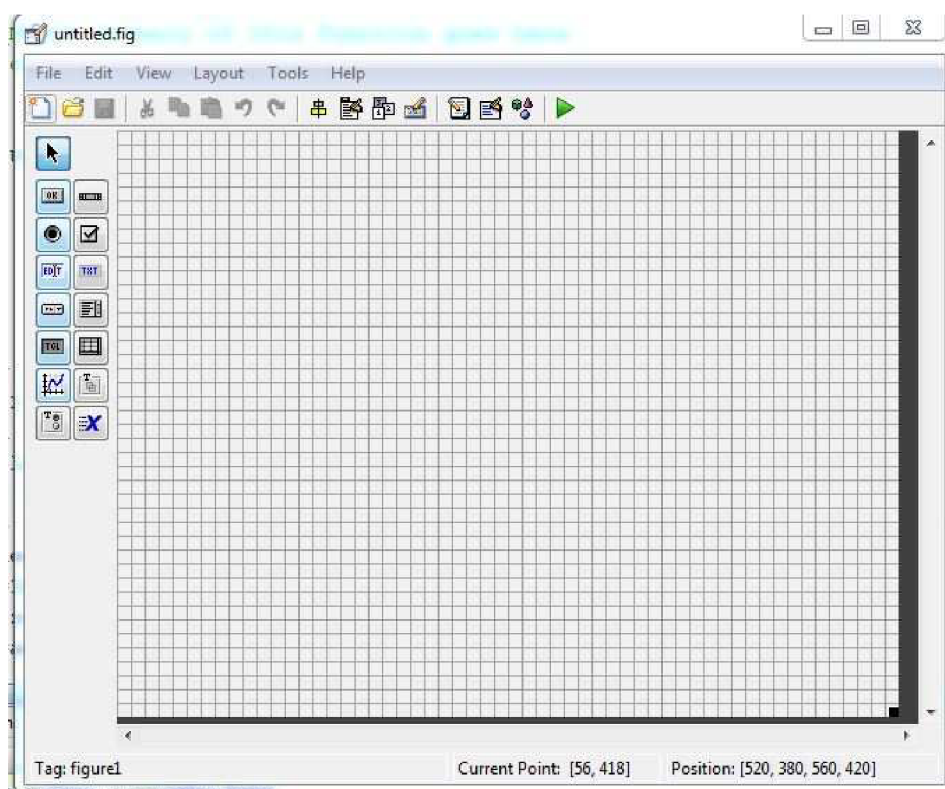


Obrázek 26: Uživatelské rozhraní MATLAB Desktop [5]

4 POPIS PROGRAMU

4.1 SIMULACE FVČ

Program „Simulace FVČ“ slouží pro simulaci FVČ. Byl vytvořen v programu MATLAB a v nastavbě GUI (uživatelské prostředí), který MATLAB obsahuje. Na obrázku níže je vidět základní, prázdná, plocha, která se pomocí různých nástrojů pro tvorbu uživatelského prostředí upraví podle potřeby.

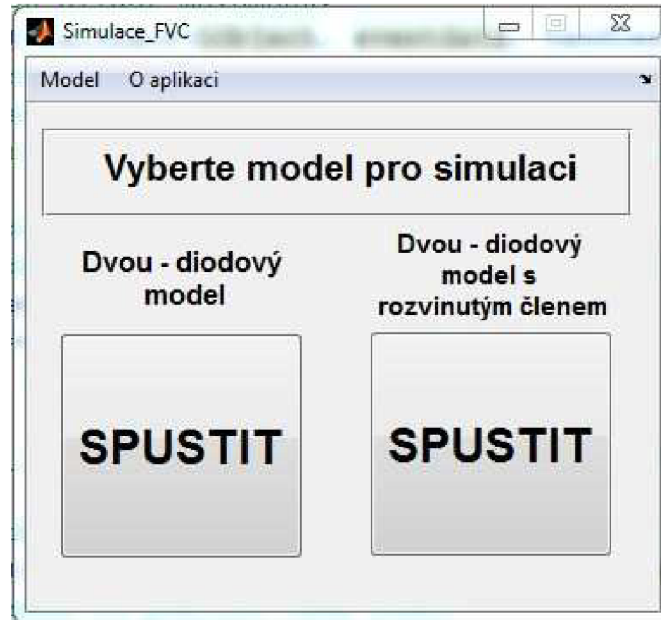


Obrázek 27: Základní plocha GUI

Na plochu pro editaci je možné přidat tlačítko, posuvník, textbox pro vkládání hodnot, zobrazení grafu a další různé ovládací nástroje pro dosažení uživatelsky jednoduchého prostředí.

V programu „Simulace FVČ“ lze simulovat jeden článek nebo je možné seskládat více článků do série, paralelně nebo sériově – paralelně. Změnou hodnot lze nastavovat podmínky, za kterých bude článek pracovat. Například změna počtu sériových, paralelních zapojení článků, teploty, intenzity záření, sériový, paralelní odpor, plocha článku a diodové faktory.

Pro simulaci lze použít buď dvou – diodové zapojení nebo dvou - diodové zapojení s rozvinutým členem.



Obrázek 28: Úvodní obrazovka programu

Při spuštění programu se objeví formulář pro vybrání modelu, pomocí kterého se budou provádět simulace. Na výběr jsou dva modely a to dvou – diodový model nebo dvou – diodová model s rozvinutým členem. Model je možné vybrat buď tlačítkem, nebo pomocí menu – Model.

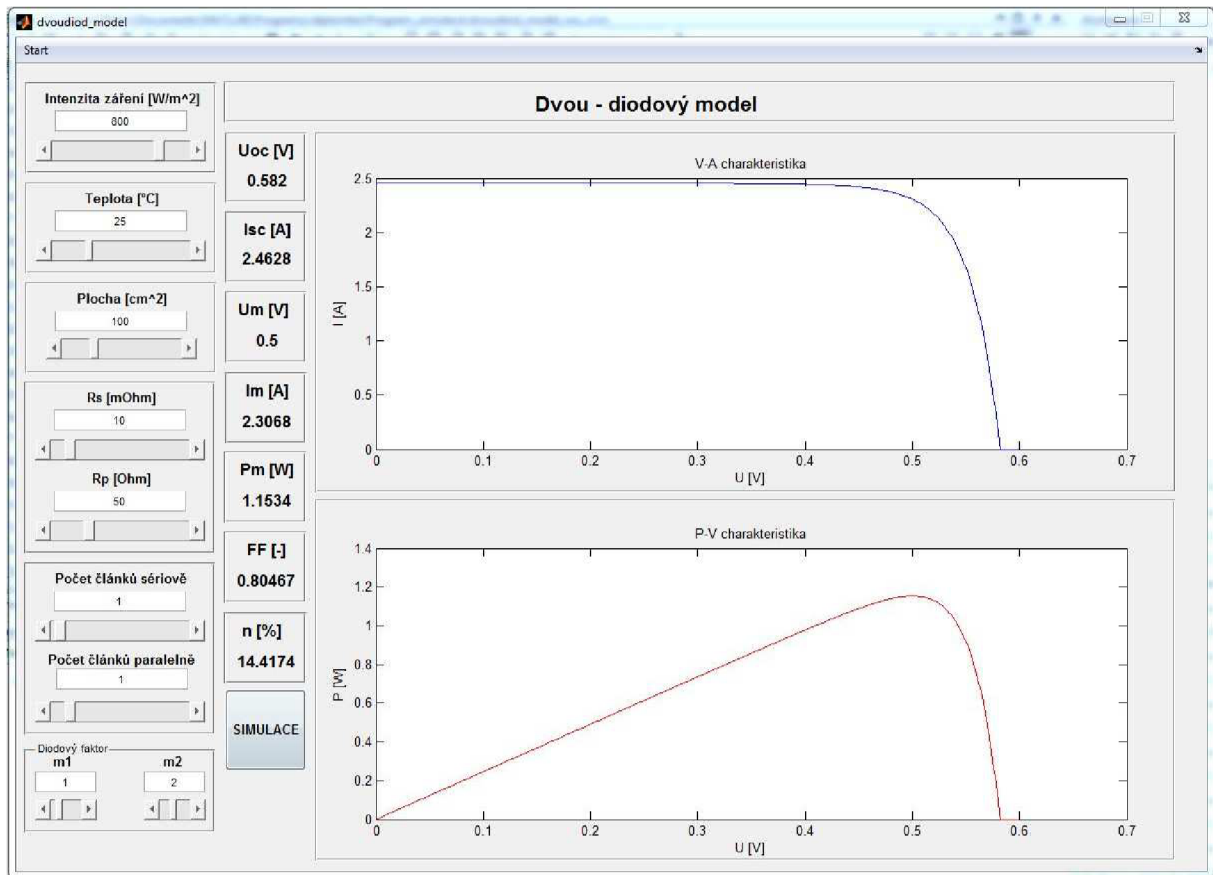


Obrázek 29: O aplikaci

Další možnost, kterou lze v menu výběrem zobrazit je – O aplikaci. Jedná se o nápovědu a popis programu, kde jsou rovnice, podle kterých vychází modely, vysvětlené značky a použité konstanty.

4.2 Dvou - diodový model

Po zvolení dvou - diodového modelu se zobrazí okno, kde jsou zobrazeny 2 grafy. První graf znázorňuje V-A charakteristiku simulovaného článku podle nastavení. Spodní graf zobrazuje V-P charakteristiku simulovaného článku.

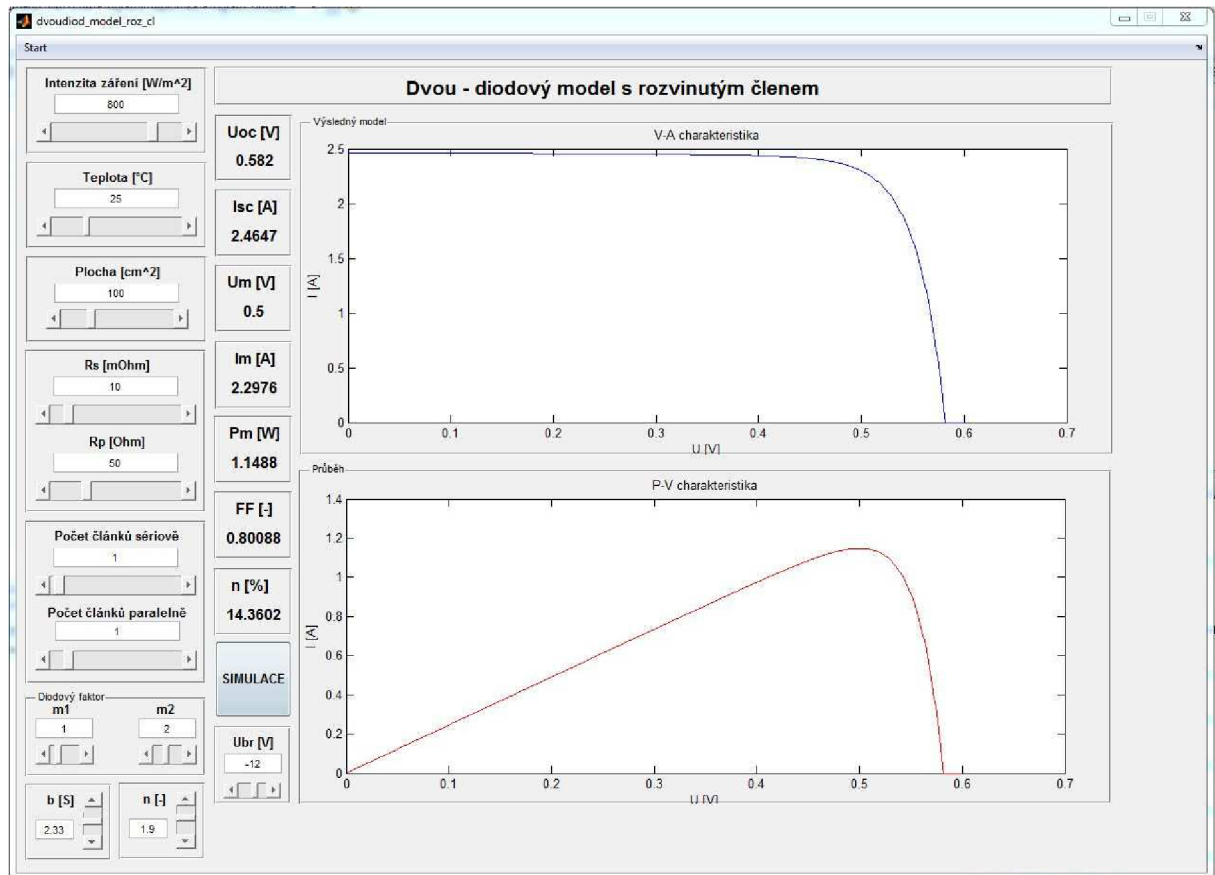


Obrázek 30: Okno programu pro simulování dvou - diodového modelu

Je možné nastavit různé parametry buď vepsáním přímo hodnoty, nebo pomocí posuvníků nastavit požadované hodnoty. Při spuštění simulace tlačítkem „SIMULACE“, případně menu nabídka start – simulace, se zobrazí dané průběhy, vypočítají se následně hodnoty fill factor, účinnost, maximální napětí, proud při maximálním výkonu P_m .

4.3 Dvou – diodový model s rozvinutým členem

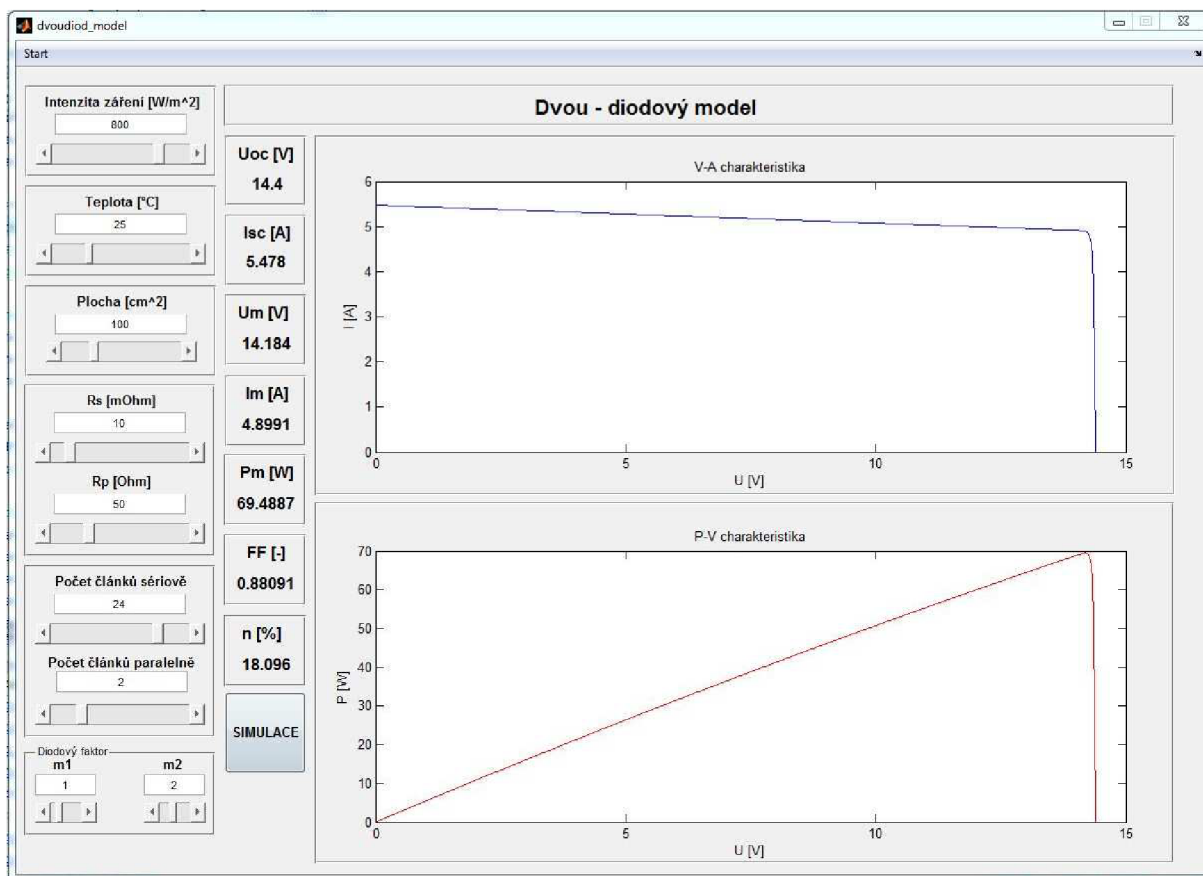
Podobně jako u předchozího modelu jsou i zde zobrazeny 2 grafy. První graf zobrazuje celkový průběh, spodní graf postupnou změnu sériově, paralelně nebo sériově – paralelně zapojených článků.



Obrázek 31: Okno programu pro simulování dvou - diodového modelu s rozvinutým členem

I zde se postupným zadáváním hodnot do polí nebo pomocí posuvníků nastaví požadované hodnoty. Opět spuštění simulace lze pomocí tlačítka „SIMULACE“ nebo v menu start – simulace. Po vykreslení grafů se zobrazí dopočítané hodnoty.

Pro oba modely a jejich okna pro simulování jsou nastavované hodnoty zaokrouhlovány na celá čísla. Průběhy jsou zaznamenávány do Exelu, pro případné další porovnání.



Obrázek 32: Simulace panelu

Na obrázku 32 je zobrazena simulace panelu, který se skládá ze 48 článků. Panel je zapojen ve 2 paralelně spojených 24 sériově zapojených článků. Napětí naprázdno je 14,4 V, proud nakrátko 5,478 A, maximální výkon je asi 69,5 W a účinnost panelu za simulovaných podmínek je téměř 18,1 %.

Hodnoty, které nejsou nastavovány, a které byly použity při výpočtech, jsou uvedeny v tabulce 4.

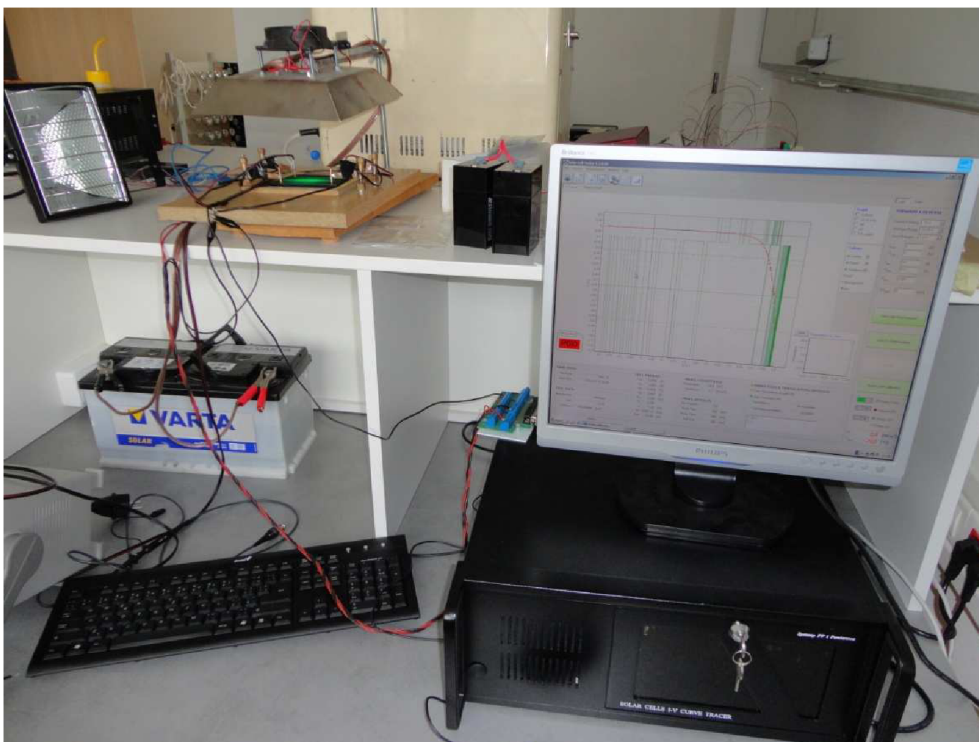
| c_1 [m ² /V] | c_2 [m ² /(V*K)] | C_{S1} [A/K ³] | C_{S2} [A/K ^{5/2}] |
|---------------------------|-------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| 0,00251 | 2,E-06 | 372 | 1,20E-02 |
| T [K] | q [C] | k [J/K] | |
| 273,15 | 1,602E-19 | 1,38E-23 | |

Tab. 4: Tabulka konstant pro výpočty [14]

5 SIMULACE

5.1 Měřicí pracoviště

Jako výchozí, referenční hodnoty byly brány hodnoty ze změřeného fotovoltaického článku, které jsou uvedeny v příloze 1 a 2. Článek byl změřen čtyřikrát a pro výpočty byla zvolena průměrná hodnota ze všech čtyř měření. Pracoviště je vyfoceno na obrázku 33. Použité přístroje jsou uvedeny v tabulce 5.



Obrázek 33: Pracoviště pro měření fotovoltaického článku

Pro měření byl použit program Solar Cell Tester 1.1.0.98, pro měření FVČ. Hodnoty byly měřeny při teplotě 20° C a intenzitě záření 1074,1 W·m⁻².

| Měřicí přístroje |
|---|
| PC se SW pro měření článku |
| Monokrystalický křemíkový článek 100 x 100 mm |
| Lampa |
| Baterie pro napájení lampy |

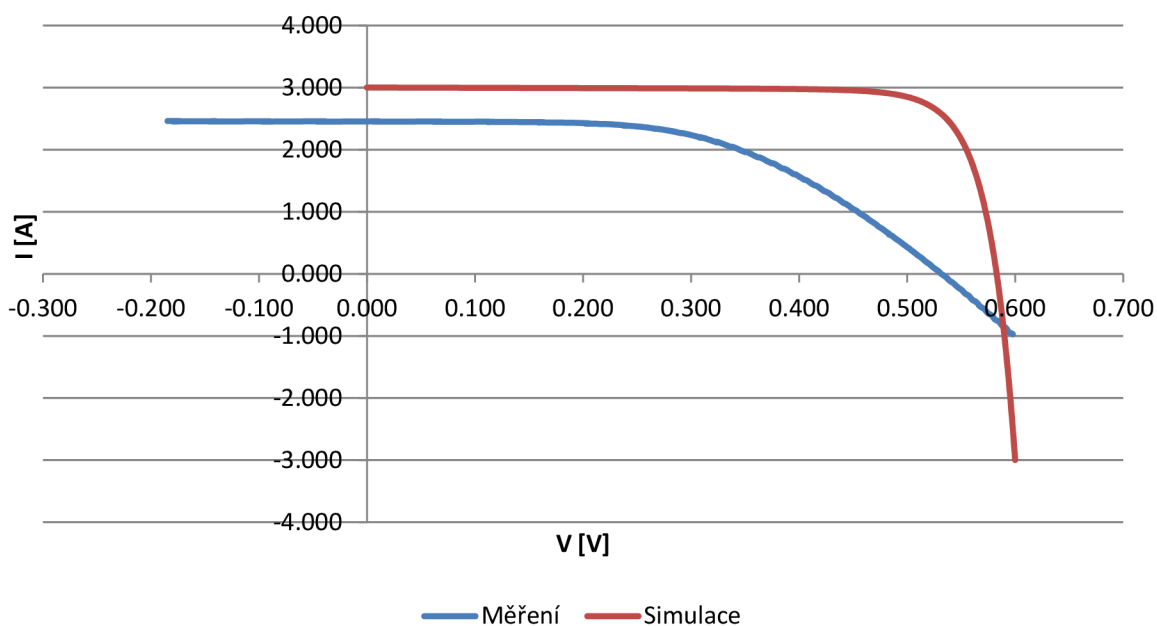
Tab. 5: Použité přístroje

| Uoc [V] | Isc [A] | Vm [V] | Im [A] | Pm [W] | FF [-] | η [%] | Rs [m Ω] | Rp [Ω] |
|---------|---------|--------|--------|--------|--------|------------|------------------|-----------------|
| 0,5132 | 2,477 | 0,317 | 2,085 | 0,652 | 0,513 | 6,29 | 70 | 23 |

Tab. 6: Tabulka změřených referenčních hodnot

V tabulce 6 jsou zprůměrované hodnoty z měření.

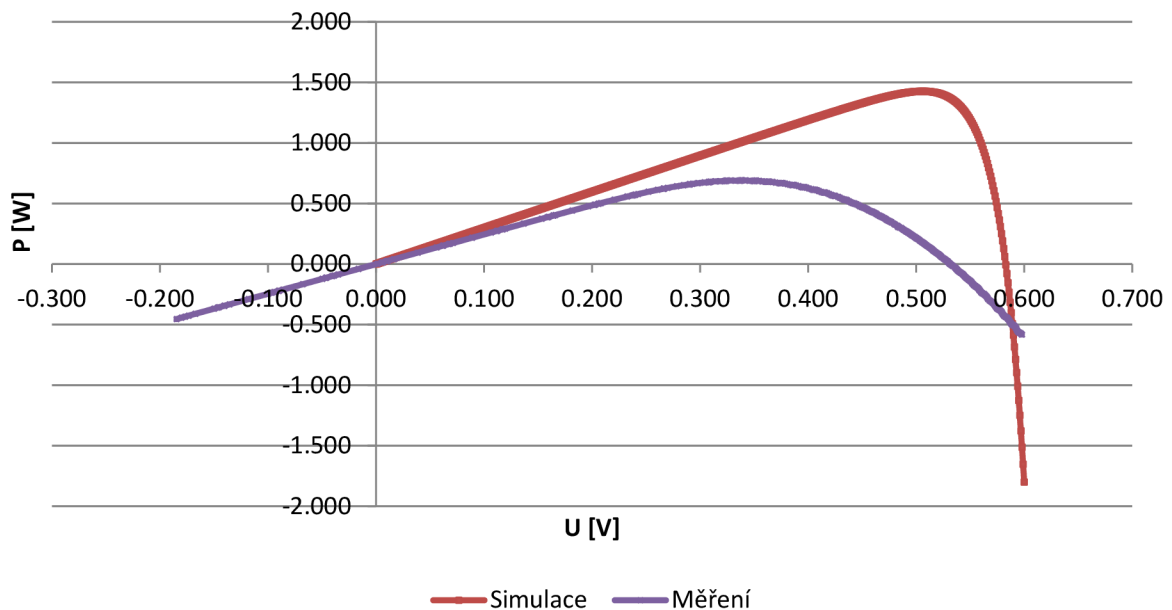
V-A charakteristika naměřeného článku a simulovaného



Obrázek 34: Porovnání V-A charakteristiky naměřeného a simulovaného FVČ

Na obrázku 34 a 35 jsou zobrazeny průběhy změřeného a simulovaného FVČ. Na prvním obrázku je vidět, že naměřený článek má před kolenem charakteristiky téměř stejný průběh. Koleno má již pozvolnější průběh, což může být dáno dalšími možnými odpory při zapojení kontaktů nebo vzniklé kapacity při měření.

P-V charakteristika naměřeného článku a simulovaného



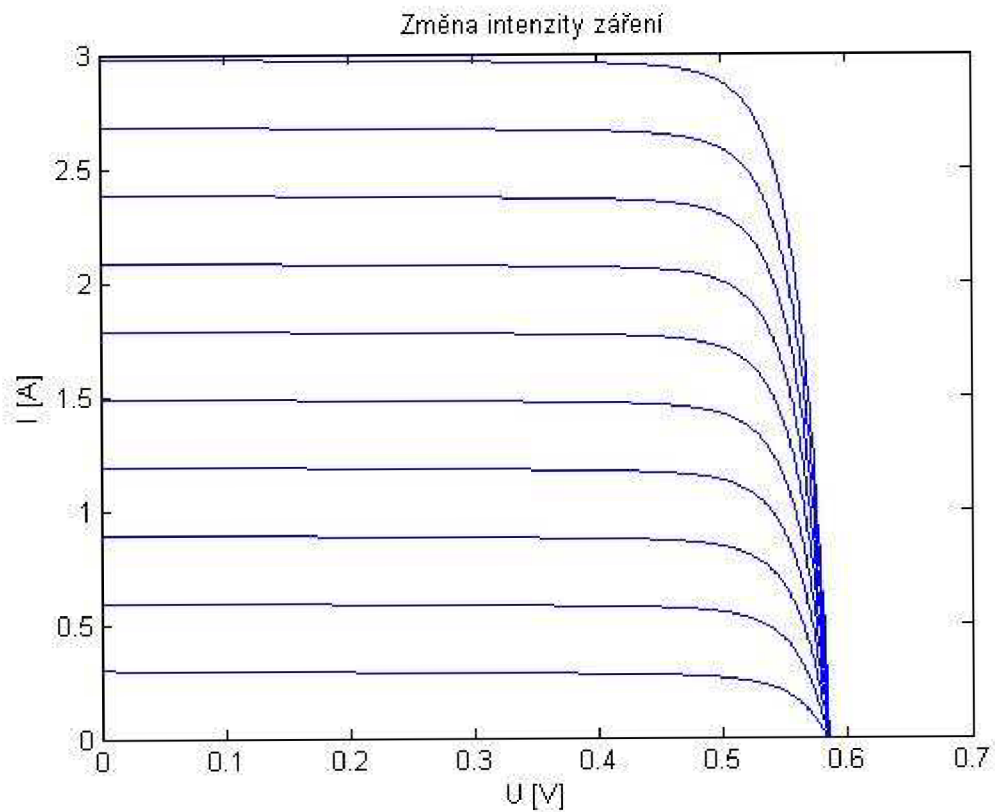
Obrázek 35: Porovnání P-V charakteristiky naměřeného a simulovaného článku

Druhý obrázek vyjadřuje ideální průběh P - V charakteristiky článku. Opět je vidět, že průběh měřeného článku je ze začátku stejný. Maximální výkon měřeného článku je téměř poloviční, což může být dáno právě vlivy, s kterými modely pro simulaci článků nepočítají. Simulované průběhy jsou ideální průběhy, kterých by měl článek dosáhnout.

Náhradní schémata jsou určena pro teoretické průběhy a výpočty. Jedná se o zjednodušené modely FVČ a nezahrnují další vlivy, jako může být materiál článku nebo případné chyby při výrobě. Každý článek, i když je vyroben ze stejného materiálu, nemusí mít stejné vlastnosti.

5.2 Simulace FVČ se změnami parametrů

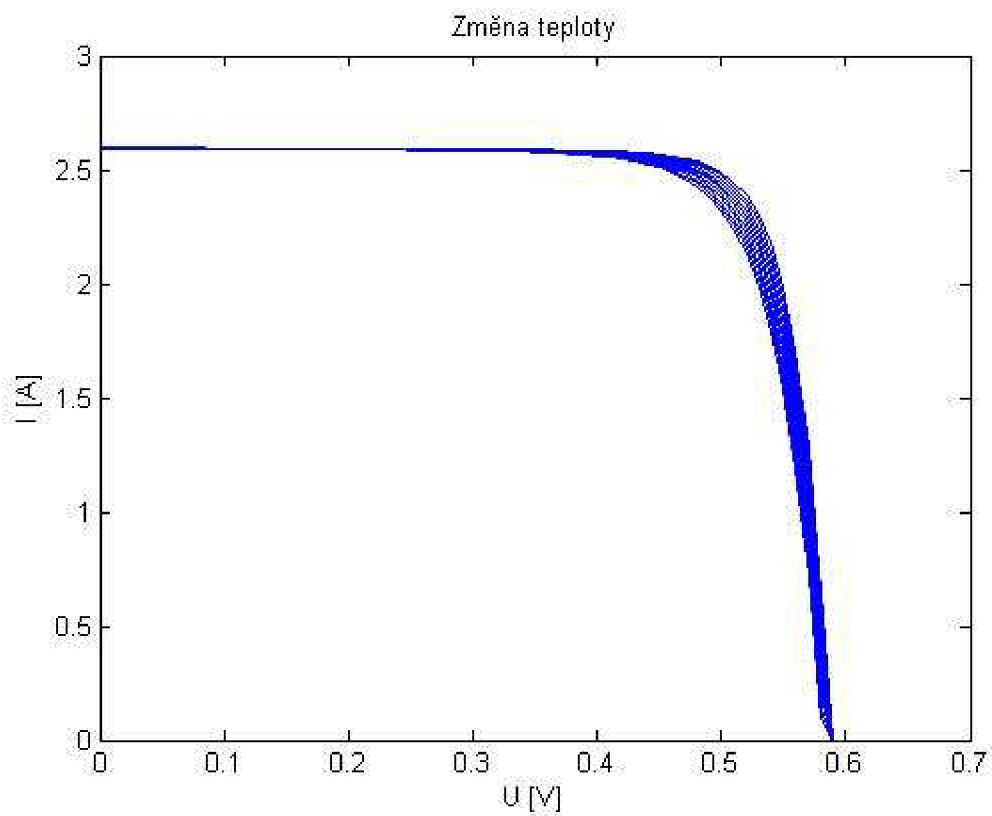
Simulace byly prováděny pomocí programu MATLAB. Na obrázcích níže jsou zobrazeny pouze grafy na změnách parametrů.



Obrázek 36: Simulace FVČ na změně intenzity záření

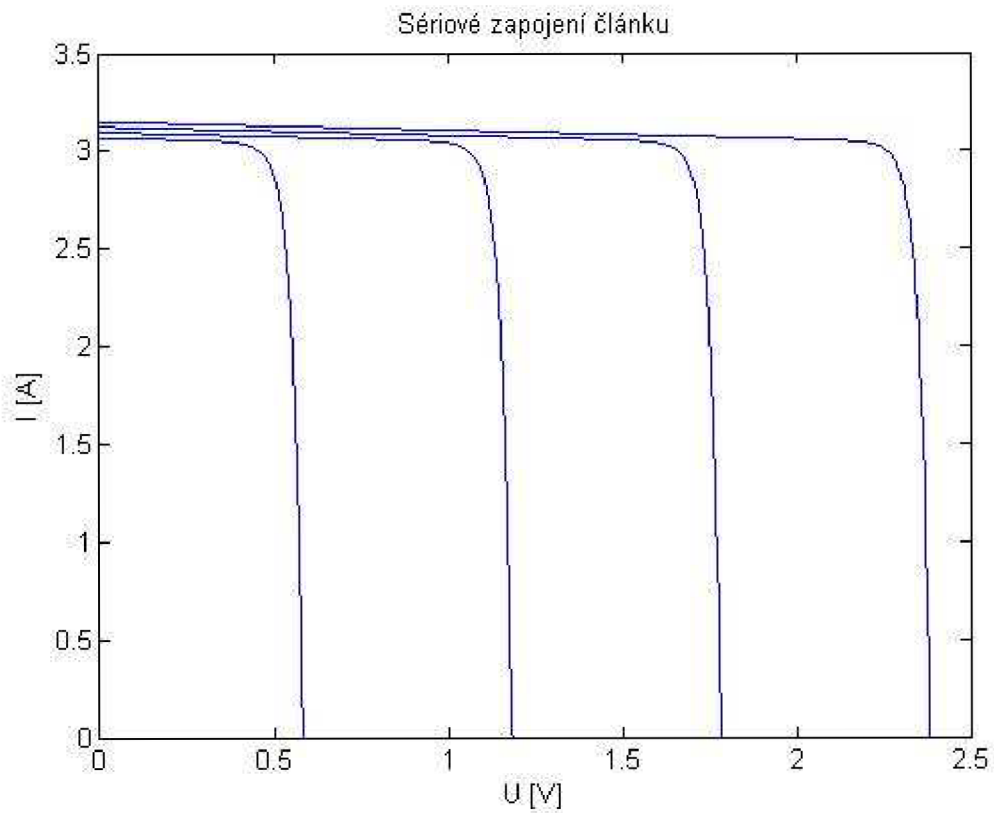
Na obrázku 36 je zobrazena změna intenzity záření dvou - diodového modelu. Se zvyšující se intenzitou záření roste proud článku a napětí se téměř nemění.

Simulace byla provedena se změnou od $100 - 1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ s krokem $100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.



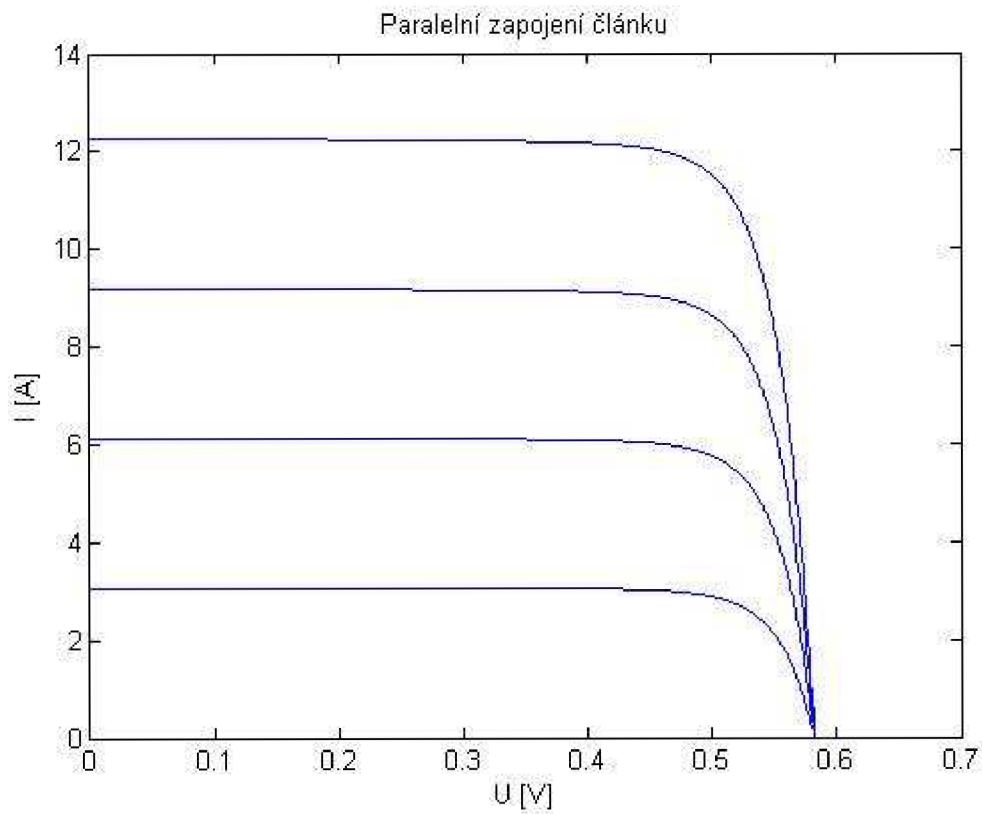
Obrázek 37: Simulace FVČ se změnou teploty

Obrázek výše simuluje změnu teploty na FVČ. Hodnoty byly nastavovány od 0 až 100°C s krokem 20° C. Je vidět, že při změně teploty se mění napětí, ale proud zůstává téměř stejný.



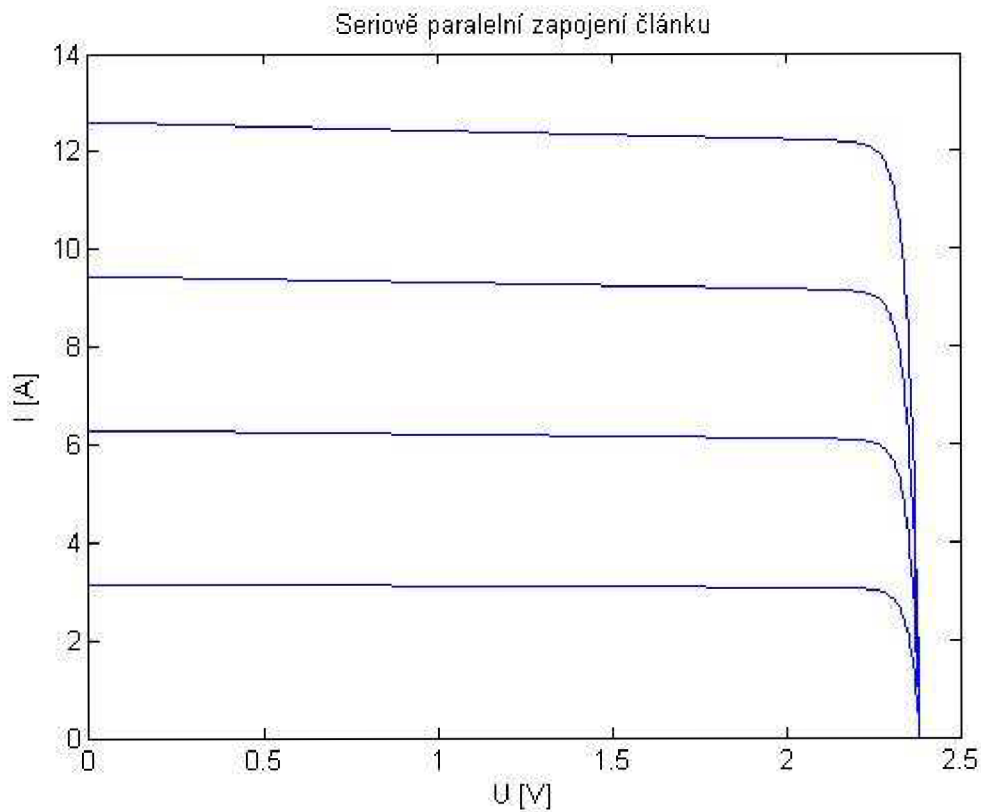
Obrázek 38: Simulace pro 4 sériově zapojené FVČ

Na obrázku je znázorněna simulace 4 sériově zapojených FVČ. Je vidět, že s každým zapojeným článkem do série se zároveň zvyšuje napětí a proud se mění minimálně.



Obrázek 39: Simulace zapojení 4 paralelně zapojených FVČ

Na obrázku 39 je znázorněna změna proudu při paralelním zapojení FVČ. Se zvyšujícím se počtem paralelně zapojených FVČ se zvyšuje proud, napětí se téměř nemění.



Obrázek 40: Simulace 4 paralelně zapojených FVČ s napětím 4 sériově zapojených FVČ

Obrázek 40 znázorňuje průběh změny 4 paralelně zapojených článků s napětím, které je dáno 4 sériově zapojených FVČ. Z obrázku je patrné, že se změnou zapojením FVČ do série a paralelně se zvyšuje jak napětí, tak i proud.

Všechny výše uvedené simulace vycházely z tabulky 7. Uvedené hodnoty jsou určeny jako výchozí. Ostatní hodnoty jsou dopočítávány pomocí vzorců uvedených v kapitole 2. Simulace byly provedeny pomocí dvou - diodového modelu.

| T [K] | q [C] | k [J/K] | t [°C] | E [W/m ²] | Rs [mΩ] | Rp [Ω] |
|------------------------|----------------------------|-------------------------|---------------------------|-----------------------|---------|---------|
| 273,15 | 1,602E-19 | 1,38E-23 | 25 | 1000 | 70 | 22 |
| c1 [m ² /V] | c2 [m ² /(V*K)] | CS1 [A/K ³] | CS2 [A/K ^{5/2}] | m1 [-] | m2 [-] | Is1 [A] |
| 0,00251 | 2,E-06 | 372 | 1,20E-02 | 1 | 2 | 1,5E-09 |
| Is2 [A] | | | | | | |
| 7,2E-06 | | | | | | |

Tab. 7: Výchozí hodnoty pro simulaci FVČ

6 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo vytvořit uživatelsky jednoduchý program, který simuluje sériové, paralelní a sériově – paralelní zapojení fotovoltaického článku. Program byl vytvořen pomocí programu MATLAB. Jako referenční hodnoty byly použity hodnoty z naměřeného fotovoltaického článku.

První část má seznámit s principem fotovoltaického článku. Jedná se o fotoelektrický jev, kdy je dopadající světlo na solární článek přeměněno na elektrické stejnosměrné napětí.

Následující kapitola již popisuje chování a průběh fotovoltaického článku. Jsou zde uvedeny určující parametry fotovoltaického článku a matematické rovnice, které ho popisují a zapojování článků. Zapojení může být do série, dojde ke zvýšení napětí, paralelní, zvyšuje se proud a sériově paralelní dojde ke zvýšení jak napětí, tak i proudu. Spojováním článků vznikne fotovoltaický panel, modul, který dosahuje požadovaného výkonu.

Solární článek je možné simulovat pomocí tří modelů. Jedná se o jedno – diodový model, dvou – diodový model a dvou – diodový model s rozvinutým členem. Mezi určující parametry FVČ patří fill factor, účinnost článku, napětí naprázdno, proud nakrátko, maximální výkon. Uvedeny jsou vlivy, které ovlivňují fotovoltaický článek, jako je změna intenzity záření, teplota, sériový anebo paralelní odpor.

Třetí kapitola seznamuje s programem MATLAB, který slouží pro simulování a vytváření algoritmů pro různé analýzy. Tento program obsahuje i uživatelskou nástavbu – GUI, kde je možné vytvořit uživatelské prostředí pomocí nástrojů, které mají za úkol usnadnit uživateli ovládání.

V praktické části je popsán vytvořený program Simulace FVČ. Ten umožňuje pomocí zvoleného modelu simulovat podle nastavení uživatele článek. Po spuštění si je možné vybrat ze dvou modelů, které popisují solární článek a podle kterého se budou provádět simulace. Na výběr je dvou – diodový model nebo dvou – diodový model s rozvinutým členem. Oba modely umožňují nastavování hodnot pomocí posuvníků nebo vepsání hodnoty. Po spuštění simulace jsou zobrazeny 2 grafy. První ukazuje V-A charakteristiku FVČ a druhý graf jeho výkonovou charakteristiku. Dále se zobrazí vypočítané hodnoty, které určují FVČ jako je napětí naprázdno, proud nakrátko, maximální výkon, fill factor a účinnost.

Poslední část diplomové práce je zaměřena na simulaci fotovoltaického článku. Referenční hodnoty byly změřeny na reálném článku za daných podmínek a to při teplotě 20°C a intenzitě záření 1074 W·m². Naměřený článek je v obrázcích 34 a 35 porovnán se simulovaným článkem.

Z porovnání naměřeného článku se simulovaným článkem ve výše uvedených obrázcích se může vyvodit, že výpočtový model ukazuje ideální průběhy, které nezahrnují další možné veličiny, které ovlivňují reálný článek. Mezi tyto vlivy mohou patřit přechodové kapacity, chybný kontakt při měření nebo vzniklé odpory, které se vzniknou při připojení měřících kontaktů k článku. Měřený článek může mít také vady, které znehodnocují článek a tím jsou i ovlivněny naměřené hodnoty.

Další simulace byly provedeny se změnami hodnot, které mají vliv na FVČ. Změna intenzity záření, kdy se zvyšující se intenzitou roste proud, vliv teploty nebo plocha článku. Počtem článků sériově, paralelně lze simulovat zapojení článků v panelu a zjistit jeho teoretické výsledné hodnoty. Pomocí simulací se ověřilo teoretické chování článku v závislosti na již zmiňovaných změnách parametrů, které ovlivňují solární článek.

Vytvořený program by měl pomoci při zjišťování teoretických hodnot fotovoltaických článků, kdy se jednotlivé vstupní veličiny mohou jednoduše nastavit a získat výsledné hodnoty účinnosti, fill faktoru, maximálního výkonu, maximální napětí nebo maximální proud. Okamžitě je vidět výsledná V-A a P-V charakteristika, kterou má daný ideální článek. Nastavením počtu článků v sérii nebo paralelního zapojení je možné simulovat i fotovoltaický panel. Výsledné hodnoty jsou ideální a těchto hodnot by měl článek dosáhnout za předpokladu, že by byl bez poruch a byl by měřen ideálními přístroji, které by nijak neměly vliv na měření.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] BANNERT, Petr. Solární fotovoltaický systém a „Zelená energie“ v Českém Švýcarsku a jeho okolí: Parametry fotovoltaických článků. *Solární fotovoltaický systém a „Zelená energie“ v Českém Švýcarsku a jeho okolí*. 2007, č. 1, s. 8. Dostupné z: http://www.vosvdf.cz/cmsb/userdata/487/FVS_001_cviceni/001_parametry_fvc.pdf

[2] CZECHSOLAR SPOL. S R.O. *Solární panely - čistá energie ze slunce* [online]. 2008. vyd. 2008 [cit. 2012-05-05]. Dostupné z: <http://www.czechsolar.cz/fotovoltaika/princip-fungovani/>

[3] Fyzikální podstata světla. *Vydavatelství FCC Public*. 2000, roč. 2000, č. 4. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=22854

[4] Fyzikální podstata fotovoltaické přeměny solární energie. *Vydavatelství FCC Public*. 2005, roč. 2005, č. 1. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/sv010532.pdf>

[5] HUMUSOFT. *MATLAB - Jazyk pro technické výpočty* [online]. 1991-2012 [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: <http://www.humusoft.cz/produkty/matlab/matlab/>

[6] ISOLAR. *Technologie - iSolar* [online]. 2009-2012 [cit. 2012-05-05]. Dostupné z: <http://www.isolar.cz/technologie.html>

[7] Jak články zapojit?. *Filutova dílna* [online]. 2005 [cit. 2012-05-05]. Dostupné z: <http://www.filutovadilna.cz/panely/jak-clanky-zapojit>

[8] LIBRA, Martin a Vladislav POULEK. *Solární energie, fotovoltaika - perspektivní trend současnosti i blízké budoucnosti*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2005, 122 s. ISBN 80-213-135-8.

[9] MASTNÝ, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jan MACHÁČEK, Michal PTÁČEK, Lukáš RADIL, Tomáš BARTOŠÍK a Tomáš PAVELKA. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 256 s. ISBN 978-80-01-04937-2.

[10] Numerické metody. KOCOUR, Pavel. KOCOUR. *Úvod do numerických metod* [online]. Plzeň, 2000, 2001 [cit. 2012-05-05]. Dostupné z: http://www.kvd.zcu.cz/cz/materialy/numet/_numet.html

- [11] QUASCHNING, Volker. *UNDERSTANDING RENEWABLE ENERGY SYSTEMS*. Earthscan London: UK by Bath Press, Bath, 2005. ISBN 1-84407-136-7.
- [12] STRÍPEK, Martin. *Monitoring provozu fotovoltaické elektrárny*. Brno, 2010. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ing. Jan Dolenský.
- [13] STRÍPEK, Martin. *Simulace solárního článku za pomoci matematického modelu*. Brno, 2011. Semestrální projekt 2. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ing. Kristýna Jandová, Ph.D.
- [14] VANĚK, Jiří. *Simulace charakteristik fotovoltaického modulu*. Brno, 2008 [cit. 2012-05-15]. Laboratorní cvičení. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

| | | |
|-----------------------------------|-----|--|
| FVČ | ... | fotovoltaický článek |
| h | ... | Planckova konstanta $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ [J·s] |
| v | ... | frekvence [Hz] |
| λ | ... | vlnová délka [m] |
| c | ... | rychlost světla [m/s^2] |
| P _m | ... | maximální výkon [W] |
| U _m | ... | napětí, při kterém FVČ dodává P _m [V] |
| I _m | ... | proud, při kterém FVČ dodává P _m [A] |
| R _m | ... | vnitřní odpor, při kterém FVČ dodává P _m [mΩ] |
| FF | ... | fill factor [-] |
| η | ... | účinnost [%] |
| U _t | ... | tepelné napětí [V] |
| k | ... | Boltzmannova konstanta [$\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$] $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ |
| T | ... | absolutní teplota [K] |
| e | ... | elementární náboj [C] |
| I _s | ... | saturační proud [μA] |
| c _{s1} , c _{s2} | ... | koeficienty pro nastavení U _{oc} [A/K^3], [$\text{A} \cdot \text{K}^{5/2}$] |
| C ₁ , C ₂ | ... | koeficienty pro nastavení proudu I _{ph} (T) [m^2/V], [$\text{m}^2/(\text{V} \cdot \text{K})$] |
| c ₀ | ... | koeficient pro výpočet I _{ph} [m^2/V] |
| I _{ph} , I _L | ... | fotoproud [A] |
| R _p | ... | paralelní odpor [Ω] |

| | | |
|----------|-----|----------------------------------|
| R_s | ... | sériový odpor [$m\Omega$] |
| P | ... | výkon [W] |
| m | ... | diodový faktor [-] |
| n | ... | exponent lavinového průrazu [-] |
| b | ... | korekční vodivost [S] |
| U_{Br} | ... | napětí průrazu [V] |
| U_{oc} | ... | napětí naprázdno [V] |
| I_{sc} | ... | proud nakrátko [A] |
| I | ... | proud protékající fotodiodou [A] |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|---|----|
| Obrázek 1: Oblasti spektra elektromagnetického záření [2] | 7 |
| Obrázek 2: Model energetických hladin PV článku a fotovoltaické přeměny energie [4] | 10 |
| Obrázek 3: V-A charakteristika FVČ [1] | 13 |
| Obrázek 4: Vliv sériového odporu R_S na V-A charakteristiku FVČ [11] | 18 |
| Obrázek 5: Vliv paralelního odporu R_P na V-A charakteristiku FVČ [11] | 18 |
| Obrázek 6: Vliv osvětlení na V-A charakteristiku FVČ [11] | 19 |
| Obrázek 7: Teplotní závislost FVČ [11] | 21 |
| Obrázek 8: Výkonová charakteristika FVČ - proudový model [1] | 22 |
| Obrázek 9: Výkonová charakteristika FVČ - napěťový model [1] | 23 |
| Obrázek 10: V-A charakteristika kvalitního a vadného FVČ [1] | 26 |
| Obrázek 11: Zapojení diody [11] | 27 |
| Obrázek 12: Náhradní obvod fotovoltaického článku (jedno - diodový model) [11] | 28 |
| Obrázek 13: Dvou - diodový model FVČ [11] | 29 |
| Obrázek 14: Náhradní obvod fotovoltaického článku (dvou - diodový rozšířený model) [11] | 31 |
| Obrázek 15: Sériové zapojení FVČ [7] | 32 |
| Obrázek 16: Charakteristika 36 článkového modulu (při osvětlení $E = 400 \text{ W/m}^2$, $T = 300 \text{ K}$) [11] | 33 |
| Obrázek 17: Charakteristika modulu se zastíněním 75% článku [11] | 34 |
| Obrázek 18: Integrace bypass diody [11] | 35 |
| Obrázek 19: Charakteristika simulovaného modulu s bypass diodami přes různý počet článků ($E = 1000 \text{ W/m}^2$, $T = 300 \text{ K}$) [11] | 36 |
| Obrázek 20: P - U charakteristika modulu s 36 články a 2 bypass diodami. U jednoho článku se mění zastínění, ostatní jsou plně ozářeny ($E = 574 \text{ W/m}^2$, $T = 30 \text{ K}$) [11] | 36 |
| Obrázek 21: Paralelní zapojení FVČ [7] | 37 |
| Obrázek 22: V-A charakteristika sériově a paralelně zapojených FVČ - U model [1] | 37 |
| Obrázek 23: V-A charakteristika sériově a paralelně zapojených FVČ - I model [1] | 38 |
| Obrázek 24: Sériově - paralelní zapojení FVČ [7] | 38 |
| Obrázek 25: Schématické znázornění využití MATLABu [5] | 39 |
| Obrázek 26: Uživatelské rozhraní MATLAB Desktop [5] | 42 |
| Obrázek 27: Základní plocha GUI | 43 |
| Obrázek 28: Úvodní obrazovka programu | 44 |

| | |
|--|----|
| Obrázek 29: O aplikaci..... | 45 |
| Obrázek 30: Okno programu pro simulování dvou - diodového modelu | 46 |
| Obrázek 31: Okno programu pro simulování dvou - diodového modelu s rozvinutým členem | 47 |
| Obrázek 32: Simulace panelu..... | 48 |
| Obrázek 33: Pracoviště pro měření fotovoltaického článku | 49 |
| Obrázek 34: Porovnání V-A charakteristiky naměřeného a simulovaného FVČ | 50 |
| Obrázek 35: Porovnání P-V charakteristiky naměřeného a simulovaného článku | 51 |
| Obrázek 36: Simulace FVČ na změně intenzity záření..... | 52 |
| Obrázek 37: Simulace FVČ se změnou teploty | 53 |
| Obrázek 38: Simulace pro 4 sériově zapojené FVČ | 54 |
| Obrázek 39: Simulace zapojení 4 paralelně zapojených FVČ | 55 |
| Obrázek 40: Simulace 4 paralelně zapojených FVČ s napětím 4 sériově zapojených FVČ.... | 56 |

SEZNAM TABULEK

| | |
|---|----|
| Tab. 1: Účinnosti jednotlivých typů fotovoltaických článků [9] | 15 |
| Tab. 2: Parametry pro teplotní závislost různých fotovoltaických modulů [11]..... | 20 |
| Tab. 3: Parametry pro různé dvou-diodové FV moduly [11]..... | 30 |
| Tab. 4: Tabulka konstant pro výpočty [14]..... | 48 |
| Tab. 5: Použité přístroje | 49 |
| Tab. 6: Tabulka změřených referenčních hodnot..... | 50 |
| Tab. 7: Výchozí hodnoty pro simulaci FVČ | 56 |

SEZNAM PŘÍLOH

| | |
|---|----|
| Příloha 1: Naměřené hodnoty, $E=1074,1 \text{ W/m}^2$ | 65 |
| Příloha 2: Simulované hodnoty, $E = 1000 \text{ W/m}^2$ | 68 |

Příloha 1: Naměřené hodnoty, $E=1074,1 \text{ W/m}^2$

| U [V] | I [A] | P [W] | U [V] | I [A] | P [W] | U [V] | I [A] | P [W] |
|--------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| -0,185 | 2,461 | -0,454 | 0,153 | 2,445 | 0,375 | 0,325 | 2,123 | 0,690 |
| -0,173 | 2,462 | -0,427 | 0,164 | 2,442 | 0,401 | 0,328 | 2,101 | 0,690 |
| -0,177 | 2,459 | -0,434 | 0,164 | 2,439 | 0,401 | 0,333 | 2,073 | 0,689 |
| -0,180 | 2,456 | -0,442 | 0,160 | 2,438 | 0,390 | 0,336 | 2,049 | 0,689 |
| -0,167 | 2,456 | -0,411 | 0,159 | 2,438 | 0,387 | 0,338 | 2,039 | 0,688 |
| -0,150 | 2,458 | -0,368 | 0,166 | 2,438 | 0,405 | 0,338 | 2,042 | 0,690 |
| -0,140 | 2,458 | -0,344 | 0,182 | 2,435 | 0,442 | 0,338 | 2,048 | 0,692 |
| -0,141 | 2,457 | -0,345 | 0,197 | 2,431 | 0,478 | 0,339 | 2,044 | 0,692 |
| -0,145 | 2,455 | -0,357 | 0,206 | 2,423 | 0,499 | 0,342 | 2,020 | 0,691 |
| -0,147 | 2,454 | -0,359 | 0,206 | 2,419 | 0,499 | 0,345 | 1,994 | 0,688 |
| -0,136 | 2,454 | -0,333 | 0,203 | 2,419 | 0,490 | 0,349 | 1,970 | 0,687 |
| -0,118 | 2,455 | -0,290 | 0,202 | 2,420 | 0,489 | 0,350 | 1,960 | 0,686 |
| -0,100 | 2,457 | -0,246 | 0,208 | 2,419 | 0,503 | 0,351 | 1,962 | 0,688 |
| -0,090 | 2,458 | -0,220 | 0,221 | 2,412 | 0,532 | 0,351 | 1,965 | 0,690 |
| -0,090 | 2,456 | -0,221 | 0,233 | 2,401 | 0,558 | 0,352 | 1,959 | 0,690 |
| -0,094 | 2,455 | -0,231 | 0,240 | 2,389 | 0,572 | 0,355 | 1,938 | 0,687 |
| -0,096 | 2,453 | -0,236 | 0,240 | 2,384 | 0,573 | 0,357 | 1,912 | 0,683 |
| -0,086 | 2,453 | -0,211 | 0,239 | 2,385 | 0,569 | 0,360 | 1,889 | 0,680 |
| -0,068 | 2,455 | -0,166 | 0,237 | 2,388 | 0,566 | 0,362 | 1,877 | 0,679 |
| -0,050 | 2,457 | -0,122 | 0,243 | 2,385 | 0,578 | 0,363 | 1,875 | 0,680 |
| -0,039 | 2,457 | -0,095 | 0,252 | 2,371 | 0,598 | 0,363 | 1,877 | 0,682 |
| -0,041 | 2,455 | -0,099 | 0,261 | 2,354 | 0,613 | 0,364 | 1,872 | 0,682 |
| -0,046 | 2,453 | -0,112 | 0,266 | 2,339 | 0,622 | 0,367 | 1,846 | 0,678 |
| -0,047 | 2,452 | -0,114 | 0,267 | 2,335 | 0,622 | 0,370 | 1,820 | 0,673 |
| -0,035 | 2,452 | -0,086 | 0,266 | 2,337 | 0,622 | 0,373 | 1,793 | 0,669 |
| -0,016 | 2,454 | -0,040 | 0,267 | 2,338 | 0,623 | 0,374 | 1,781 | 0,667 |
| 0,001 | 2,456 | 0,003 | 0,270 | 2,333 | 0,630 | 0,375 | 1,780 | 0,668 |
| 0,011 | 2,456 | 0,027 | 0,278 | 2,310 | 0,643 | 0,375 | 1,782 | 0,669 |
| 0,010 | 2,454 | 0,024 | 0,285 | 2,289 | 0,651 | 0,377 | 1,777 | 0,669 |
| 0,006 | 2,452 | 0,016 | 0,290 | 2,270 | 0,657 | 0,379 | 1,759 | 0,666 |
| 0,006 | 2,451 | 0,014 | 0,291 | 2,265 | 0,659 | 0,381 | 1,733 | 0,660 |
| 0,017 | 2,451 | 0,041 | 0,290 | 2,268 | 0,658 | 0,383 | 1,709 | 0,655 |
| 0,039 | 2,453 | 0,095 | 0,290 | 2,270 | 0,659 | 0,385 | 1,695 | 0,652 |
| 0,056 | 2,454 | 0,138 | 0,293 | 2,263 | 0,663 | 0,386 | 1,693 | 0,653 |
| 0,068 | 2,454 | 0,168 | 0,298 | 2,244 | 0,669 | 0,386 | 1,693 | 0,654 |
| 0,067 | 2,452 | 0,166 | 0,304 | 2,219 | 0,674 | 0,387 | 1,689 | 0,654 |
| 0,063 | 2,450 | 0,154 | 0,308 | 2,198 | 0,676 | 0,389 | 1,672 | 0,650 |
| 0,062 | 2,449 | 0,151 | 0,309 | 2,191 | 0,677 | 0,391 | 1,646 | 0,644 |
| 0,071 | 2,449 | 0,174 | 0,308 | 2,197 | 0,677 | 0,393 | 1,623 | 0,638 |
| 0,089 | 2,450 | 0,218 | 0,308 | 2,203 | 0,679 | 0,395 | 1,608 | 0,634 |
| 0,107 | 2,451 | 0,261 | 0,310 | 2,198 | 0,681 | 0,396 | 1,604 | 0,635 |
| 0,117 | 2,450 | 0,288 | 0,314 | 2,176 | 0,683 | 0,396 | 1,604 | 0,635 |
| 0,117 | 2,448 | 0,287 | 0,319 | 2,148 | 0,684 | 0,397 | 1,599 | 0,635 |
| 0,113 | 2,446 | 0,276 | 0,323 | 2,125 | 0,685 | 0,399 | 1,583 | 0,631 |
| 0,112 | 2,445 | 0,273 | 0,324 | 2,117 | 0,686 | 0,401 | 1,559 | 0,625 |
| 0,120 | 2,446 | 0,293 | 0,324 | 2,122 | 0,688 | 0,403 | 1,535 | 0,619 |
| 0,137 | 2,445 | 0,335 | 0,324 | 2,127 | 0,689 | 0,404 | 1,519 | 0,614 |

| U [V] | I [A] | P [W] | U [V] | I [A] | P [W] | U [V] | I [A] | P [W] |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| 0,405 | 1,514 | 0,614 | 0,464 | 0,879 | 0,408 | 0,516 | 0,215 | 0,111 |
| 0,406 | 1,513 | 0,614 | 0,466 | 0,861 | 0,401 | 0,517 | 0,200 | 0,103 |
| 0,407 | 1,508 | 0,614 | 0,467 | 0,849 | 0,396 | 0,518 | 0,185 | 0,096 |
| 0,408 | 1,494 | 0,610 | 0,467 | 0,841 | 0,393 | 0,520 | 0,170 | 0,088 |
| 0,410 | 1,470 | 0,602 | 0,468 | 0,833 | 0,390 | 0,521 | 0,156 | 0,081 |
| 0,412 | 1,445 | 0,596 | 0,469 | 0,821 | 0,385 | 0,522 | 0,139 | 0,072 |
| 0,414 | 1,430 | 0,592 | 0,471 | 0,803 | 0,378 | 0,523 | 0,125 | 0,065 |
| 0,415 | 1,425 | 0,591 | 0,472 | 0,784 | 0,370 | 0,524 | 0,111 | 0,058 |
| 0,415 | 1,423 | 0,591 | 0,473 | 0,766 | 0,362 | 0,525 | 0,089 | 0,047 |
| 0,416 | 1,418 | 0,590 | 0,474 | 0,753 | 0,357 | 0,526 | 0,075 | 0,039 |
| 0,418 | 1,402 | 0,586 | 0,475 | 0,742 | 0,353 | 0,528 | 0,058 | 0,030 |
| 0,419 | 1,378 | 0,578 | 0,476 | 0,733 | 0,349 | 0,529 | 0,043 | 0,023 |
| 0,421 | 1,355 | 0,571 | 0,477 | 0,720 | 0,344 | 0,530 | 0,029 | 0,015 |
| 0,423 | 1,339 | 0,566 | 0,479 | 0,696 | 0,333 | 0,531 | 0,015 | 0,008 |
| 0,424 | 1,330 | 0,564 | 0,481 | 0,677 | 0,325 | 0,531 | 0,004 | 0,002 |
| 0,424 | 1,327 | 0,563 | 0,482 | 0,656 | 0,317 | 0,532 | -0,006 | -0,003 |
| 0,425 | 1,321 | 0,562 | 0,483 | 0,644 | 0,311 | 0,533 | -0,018 | -0,010 |
| 0,428 | 1,300 | 0,556 | 0,483 | 0,634 | 0,306 | 0,534 | -0,032 | -0,017 |
| 0,429 | 1,277 | 0,548 | 0,485 | 0,624 | 0,303 | 0,536 | -0,055 | -0,029 |
| 0,431 | 1,251 | 0,540 | 0,486 | 0,612 | 0,298 | 0,537 | -0,070 | -0,037 |
| 0,433 | 1,234 | 0,534 | 0,487 | 0,595 | 0,290 | 0,538 | -0,085 | -0,046 |
| 0,434 | 1,227 | 0,532 | 0,489 | 0,576 | 0,282 | 0,539 | -0,101 | -0,054 |
| 0,434 | 1,223 | 0,531 | 0,490 | 0,560 | 0,274 | 0,540 | -0,115 | -0,062 |
| 0,435 | 1,217 | 0,530 | 0,491 | 0,547 | 0,268 | 0,541 | -0,128 | -0,069 |
| 0,436 | 1,203 | 0,525 | 0,492 | 0,537 | 0,264 | 0,542 | -0,141 | -0,076 |
| 0,438 | 1,181 | 0,517 | 0,493 | 0,526 | 0,259 | 0,543 | -0,154 | -0,084 |
| 0,440 | 1,159 | 0,510 | 0,494 | 0,513 | 0,253 | 0,544 | -0,169 | -0,092 |
| 0,441 | 1,142 | 0,504 | 0,495 | 0,496 | 0,246 | 0,545 | -0,186 | -0,101 |
| 0,442 | 1,133 | 0,501 | 0,496 | 0,479 | 0,238 | 0,546 | -0,202 | -0,110 |
| 0,443 | 1,129 | 0,500 | 0,497 | 0,463 | 0,230 | 0,547 | -0,216 | -0,118 |
| 0,444 | 1,122 | 0,498 | 0,499 | 0,450 | 0,224 | 0,548 | -0,229 | -0,125 |
| 0,445 | 1,109 | 0,493 | 0,499 | 0,439 | 0,219 | 0,549 | -0,240 | -0,132 |
| 0,447 | 1,088 | 0,486 | 0,500 | 0,427 | 0,214 | 0,550 | -0,253 | -0,139 |
| 0,448 | 1,067 | 0,478 | 0,501 | 0,414 | 0,208 | 0,551 | -0,268 | -0,148 |
| 0,450 | 1,049 | 0,471 | 0,503 | 0,398 | 0,200 | 0,552 | -0,286 | -0,158 |
| 0,451 | 1,039 | 0,468 | 0,504 | 0,381 | 0,192 | 0,553 | -0,303 | -0,167 |
| 0,451 | 1,034 | 0,467 | 0,505 | 0,366 | 0,185 | 0,554 | -0,318 | -0,176 |
| 0,452 | 1,027 | 0,464 | 0,506 | 0,352 | 0,178 | 0,555 | -0,329 | -0,183 |
| 0,453 | 1,014 | 0,460 | 0,507 | 0,340 | 0,172 | 0,556 | -0,340 | -0,189 |
| 0,455 | 0,994 | 0,452 | 0,508 | 0,328 | 0,167 | 0,557 | -0,352 | -0,196 |
| 0,456 | 0,973 | 0,444 | 0,509 | 0,315 | 0,160 | 0,558 | -0,367 | -0,205 |
| 0,458 | 0,955 | 0,437 | 0,510 | 0,300 | 0,153 | 0,559 | -0,385 | -0,215 |
| 0,459 | 0,944 | 0,433 | 0,511 | 0,283 | 0,145 | 0,560 | -0,403 | -0,226 |
| 0,460 | 0,937 | 0,431 | 0,512 | 0,268 | 0,137 | 0,560 | -0,419 | -0,235 |
| 0,460 | 0,930 | 0,428 | 0,514 | 0,254 | 0,130 | 0,561 | -0,430 | -0,241 |
| 0,462 | 0,918 | 0,424 | 0,514 | 0,241 | 0,124 | 0,563 | -0,440 | -0,248 |
| 0,463 | 0,899 | 0,416 | 0,515 | 0,229 | 0,118 | 0,564 | -0,451 | -0,254 |

| U [V] | I [A] | P [W] |
|-------|--------|--------|
| 0,565 | -0,470 | -0,266 |
| 0,566 | -0,489 | -0,277 |
| 0,566 | -0,507 | -0,287 |
| 0,568 | -0,530 | -0,301 |
| 0,569 | -0,541 | -0,308 |
| 0,570 | -0,554 | -0,316 |
| 0,571 | -0,565 | -0,322 |
| 0,572 | -0,580 | -0,332 |
| 0,573 | -0,599 | -0,343 |
| 0,574 | -0,618 | -0,355 |
| 0,575 | -0,635 | -0,365 |
| 0,576 | -0,646 | -0,372 |
| 0,577 | -0,654 | -0,377 |
| 0,578 | -0,663 | -0,383 |
| 0,579 | -0,678 | -0,392 |
| 0,580 | -0,698 | -0,405 |
| 0,580 | -0,719 | -0,417 |
| 0,581 | -0,736 | -0,428 |
| 0,582 | -0,747 | -0,435 |
| 0,583 | -0,754 | -0,440 |
| 0,584 | -0,763 | -0,446 |
| 0,585 | -0,777 | -0,455 |
| 0,586 | -0,798 | -0,468 |
| 0,587 | -0,819 | -0,481 |
| 0,588 | -0,837 | -0,492 |
| 0,589 | -0,848 | -0,499 |
| 0,590 | -0,855 | -0,504 |
| 0,591 | -0,862 | -0,509 |
| 0,592 | -0,876 | -0,518 |
| 0,593 | -0,896 | -0,531 |
| 0,593 | -0,919 | -0,545 |
| 0,594 | -0,938 | -0,557 |
| 0,595 | -0,949 | -0,565 |
| 0,596 | -0,955 | -0,569 |
| 0,597 | -0,961 | -0,574 |
| 0,598 | -0,974 | -0,582 |

Příloha 2: Simulované hodnoty, $E = 1000 \text{ W/m}^2$

| U [V] | I [A] | P [W] | U [V] | I [A] | P [W] | U [V] | I [A] | P [W] |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0,000 | 3,001 | 0,000 | 0,046 | 2,999 | 0,138 | 0,092 | 2,997 | 0,276 |
| 0,001 | 3,001 | 0,003 | 0,047 | 2,999 | 0,141 | 0,093 | 2,997 | 0,279 |
| 0,002 | 3,001 | 0,006 | 0,048 | 2,999 | 0,144 | 0,094 | 2,997 | 0,282 |
| 0,003 | 3,001 | 0,009 | 0,049 | 2,999 | 0,147 | 0,095 | 2,996 | 0,285 |
| 0,004 | 3,001 | 0,012 | 0,05 | 2,999 | 0,150 | 0,096 | 2,996 | 0,288 |
| 0,005 | 3,001 | 0,015 | 0,051 | 2,998 | 0,153 | 0,097 | 2,996 | 0,291 |
| 0,006 | 3,001 | 0,018 | 0,052 | 2,998 | 0,156 | 0,098 | 2,996 | 0,294 |
| 0,007 | 3,000 | 0,021 | 0,053 | 2,998 | 0,159 | 0,099 | 2,996 | 0,297 |
| 0,008 | 3,000 | 0,024 | 0,054 | 2,998 | 0,162 | 0,1 | 2,996 | 0,300 |
| 0,009 | 3,000 | 0,027 | 0,055 | 2,998 | 0,165 | 0,101 | 2,996 | 0,303 |
| 0,010 | 3,000 | 0,030 | 0,056 | 2,998 | 0,168 | 0,102 | 2,996 | 0,306 |
| 0,011 | 3,000 | 0,033 | 0,057 | 2,998 | 0,171 | 0,103 | 2,996 | 0,309 |
| 0,012 | 3,000 | 0,036 | 0,058 | 2,998 | 0,174 | 0,104 | 2,996 | 0,312 |
| 0,013 | 3,000 | 0,039 | 0,059 | 2,998 | 0,177 | 0,105 | 2,996 | 0,315 |
| 0,014 | 3,000 | 0,042 | 0,06 | 2,998 | 0,180 | 0,106 | 2,996 | 0,318 |
| 0,015 | 3,000 | 0,045 | 0,061 | 2,998 | 0,183 | 0,107 | 2,996 | 0,321 |
| 0,016 | 3,000 | 0,048 | 0,062 | 2,998 | 0,186 | 0,108 | 2,996 | 0,324 |
| 0,017 | 3,000 | 0,051 | 0,063 | 2,998 | 0,189 | 0,109 | 2,996 | 0,327 |
| 0,018 | 3,000 | 0,054 | 0,064 | 2,998 | 0,192 | 0,11 | 2,996 | 0,330 |
| 0,019 | 3,000 | 0,057 | 0,065 | 2,998 | 0,195 | 0,111 | 2,996 | 0,333 |
| 0,020 | 3,000 | 0,060 | 0,066 | 2,998 | 0,198 | 0,112 | 2,996 | 0,336 |
| 0,021 | 3,000 | 0,063 | 0,067 | 2,998 | 0,201 | 0,113 | 2,996 | 0,339 |
| 0,022 | 3,000 | 0,066 | 0,068 | 2,998 | 0,204 | 0,114 | 2,996 | 0,341 |
| 0,023 | 3,000 | 0,069 | 0,069 | 2,998 | 0,207 | 0,115 | 2,996 | 0,344 |
| 0,024 | 3,000 | 0,072 | 0,07 | 2,998 | 0,210 | 0,116 | 2,996 | 0,347 |
| 0,025 | 3,000 | 0,075 | 0,071 | 2,998 | 0,213 | 0,117 | 2,995 | 0,350 |
| 0,026 | 3,000 | 0,078 | 0,072 | 2,998 | 0,216 | 0,118 | 2,995 | 0,353 |
| 0,027 | 3,000 | 0,081 | 0,073 | 2,997 | 0,219 | 0,119 | 2,995 | 0,356 |
| 0,028 | 3,000 | 0,084 | 0,074 | 2,997 | 0,222 | 0,12 | 2,995 | 0,359 |
| 0,029 | 2,999 | 0,087 | 0,075 | 2,997 | 0,225 | 0,121 | 2,995 | 0,362 |
| 0,030 | 2,999 | 0,090 | 0,076 | 2,997 | 0,228 | 0,122 | 2,995 | 0,365 |
| 0,031 | 2,999 | 0,093 | 0,077 | 2,997 | 0,231 | 0,123 | 2,995 | 0,368 |
| 0,032 | 2,999 | 0,096 | 0,078 | 2,997 | 0,234 | 0,124 | 2,995 | 0,371 |
| 0,033 | 2,999 | 0,099 | 0,079 | 2,997 | 0,237 | 0,125 | 2,995 | 0,374 |
| 0,034 | 2,999 | 0,102 | 0,08 | 2,997 | 0,240 | 0,126 | 2,995 | 0,377 |
| 0,035 | 2,999 | 0,105 | 0,081 | 2,997 | 0,243 | 0,127 | 2,995 | 0,380 |
| 0,036 | 2,999 | 0,108 | 0,082 | 2,997 | 0,246 | 0,128 | 2,995 | 0,383 |
| 0,037 | 2,999 | 0,111 | 0,083 | 2,997 | 0,249 | 0,129 | 2,995 | 0,386 |
| 0,038 | 2,999 | 0,114 | 0,084 | 2,997 | 0,252 | 0,13 | 2,995 | 0,389 |
| 0,039 | 2,999 | 0,117 | 0,085 | 2,997 | 0,255 | 0,131 | 2,995 | 0,392 |
| 0,04 | 2,999 | 0,120 | 0,086 | 2,997 | 0,258 | 0,132 | 2,995 | 0,395 |
| 0,041 | 2,999 | 0,123 | 0,087 | 2,997 | 0,261 | 0,133 | 2,995 | 0,398 |
| 0,042 | 2,999 | 0,126 | 0,088 | 2,997 | 0,264 | 0,134 | 2,995 | 0,401 |
| 0,043 | 2,999 | 0,129 | 0,089 | 2,997 | 0,267 | 0,135 | 2,995 | 0,404 |
| 0,044 | 2,999 | 0,132 | 0,09 | 2,997 | 0,270 | 0,136 | 2,995 | 0,407 |
| 0,045 | 2,999 | 0,135 | 0,091 | 2,997 | 0,273 | 0,137 | 2,995 | 0,410 |

| | | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0,138 | 2,995 | 0,413 | 0,184 | 2,992 | 0,551 | 0,23 | 2,990 | 0,688 |
| 0,139 | 2,994 | 0,416 | 0,185 | 2,992 | 0,554 | 0,231 | 2,990 | 0,691 |
| 0,14 | 2,994 | 0,419 | 0,186 | 2,992 | 0,557 | 0,232 | 2,990 | 0,694 |
| 0,141 | 2,994 | 0,422 | 0,187 | 2,992 | 0,560 | 0,233 | 2,990 | 0,697 |
| 0,142 | 2,994 | 0,425 | 0,188 | 2,992 | 0,563 | 0,234 | 2,990 | 0,700 |
| 0,143 | 2,994 | 0,428 | 0,189 | 2,992 | 0,566 | 0,235 | 2,990 | 0,703 |
| 0,144 | 2,994 | 0,431 | 0,19 | 2,992 | 0,568 | 0,236 | 2,990 | 0,706 |
| 0,145 | 2,994 | 0,434 | 0,191 | 2,992 | 0,571 | 0,237 | 2,990 | 0,709 |
| 0,146 | 2,994 | 0,437 | 0,192 | 2,992 | 0,574 | 0,238 | 2,990 | 0,712 |
| 0,147 | 2,994 | 0,440 | 0,193 | 2,992 | 0,577 | 0,239 | 2,990 | 0,715 |
| 0,148 | 2,994 | 0,443 | 0,194 | 2,992 | 0,580 | 0,24 | 2,990 | 0,718 |
| 0,149 | 2,994 | 0,446 | 0,195 | 2,992 | 0,583 | 0,241 | 2,990 | 0,721 |
| 0,15 | 2,994 | 0,449 | 0,196 | 2,992 | 0,586 | 0,242 | 2,990 | 0,723 |
| 0,151 | 2,994 | 0,452 | 0,197 | 2,992 | 0,589 | 0,243 | 2,990 | 0,726 |
| 0,152 | 2,994 | 0,455 | 0,198 | 2,992 | 0,592 | 0,244 | 2,990 | 0,729 |
| 0,153 | 2,994 | 0,458 | 0,199 | 2,992 | 0,595 | 0,245 | 2,989 | 0,732 |
| 0,154 | 2,994 | 0,461 | 0,2 | 2,992 | 0,598 | 0,246 | 2,989 | 0,735 |
| 0,155 | 2,994 | 0,464 | 0,201 | 2,992 | 0,601 | 0,247 | 2,989 | 0,738 |
| 0,156 | 2,994 | 0,467 | 0,202 | 2,992 | 0,604 | 0,248 | 2,989 | 0,741 |
| 0,157 | 2,994 | 0,470 | 0,203 | 2,991 | 0,607 | 0,249 | 2,989 | 0,744 |
| 0,158 | 2,994 | 0,473 | 0,204 | 2,991 | 0,610 | 0,25 | 2,989 | 0,747 |
| 0,159 | 2,994 | 0,476 | 0,205 | 2,991 | 0,613 | 0,251 | 2,989 | 0,750 |
| 0,16 | 2,993 | 0,479 | 0,206 | 2,991 | 0,616 | 0,252 | 2,989 | 0,753 |
| 0,161 | 2,993 | 0,482 | 0,207 | 2,991 | 0,619 | 0,253 | 2,989 | 0,756 |
| 0,162 | 2,993 | 0,485 | 0,208 | 2,991 | 0,622 | 0,254 | 2,989 | 0,759 |
| 0,163 | 2,993 | 0,488 | 0,209 | 2,991 | 0,625 | 0,255 | 2,989 | 0,762 |
| 0,164 | 2,993 | 0,491 | 0,21 | 2,991 | 0,628 | 0,256 | 2,989 | 0,765 |
| 0,165 | 2,993 | 0,494 | 0,211 | 2,991 | 0,631 | 0,257 | 2,989 | 0,768 |
| 0,166 | 2,993 | 0,497 | 0,212 | 2,991 | 0,634 | 0,258 | 2,989 | 0,771 |
| 0,167 | 2,993 | 0,500 | 0,213 | 2,991 | 0,637 | 0,259 | 2,989 | 0,774 |
| 0,168 | 2,993 | 0,503 | 0,214 | 2,991 | 0,640 | 0,26 | 2,989 | 0,777 |
| 0,169 | 2,993 | 0,506 | 0,215 | 2,991 | 0,643 | 0,261 | 2,989 | 0,780 |
| 0,17 | 2,993 | 0,509 | 0,216 | 2,991 | 0,646 | 0,262 | 2,989 | 0,783 |
| 0,171 | 2,993 | 0,512 | 0,217 | 2,991 | 0,649 | 0,263 | 2,989 | 0,786 |
| 0,172 | 2,993 | 0,515 | 0,218 | 2,991 | 0,652 | 0,264 | 2,988 | 0,789 |
| 0,173 | 2,993 | 0,518 | 0,219 | 2,991 | 0,655 | 0,265 | 2,988 | 0,792 |
| 0,174 | 2,993 | 0,521 | 0,22 | 2,991 | 0,658 | 0,266 | 2,988 | 0,795 |
| 0,175 | 2,993 | 0,524 | 0,221 | 2,991 | 0,661 | 0,267 | 2,988 | 0,798 |
| 0,176 | 2,993 | 0,527 | 0,222 | 2,991 | 0,664 | 0,268 | 2,988 | 0,801 |
| 0,177 | 2,993 | 0,530 | 0,223 | 2,991 | 0,667 | 0,269 | 2,988 | 0,804 |
| 0,178 | 2,993 | 0,533 | 0,224 | 2,990 | 0,670 | 0,27 | 2,988 | 0,807 |
| 0,179 | 2,993 | 0,536 | 0,225 | 2,990 | 0,673 | 0,271 | 2,988 | 0,810 |
| 0,18 | 2,993 | 0,539 | 0,226 | 2,990 | 0,676 | 0,272 | 2,988 | 0,813 |
| 0,181 | 2,993 | 0,542 | 0,227 | 2,990 | 0,679 | 0,273 | 2,988 | 0,816 |
| 0,182 | 2,992 | 0,545 | 0,228 | 2,990 | 0,682 | 0,274 | 2,988 | 0,819 |
| 0,183 | 2,992 | 0,548 | 0,229 | 2,990 | 0,685 | 0,275 | 2,988 | 0,822 |

| U [V] | I [A] | P [W] | U [V] | I [A] | P [W] | U [V] | I [A] | P [W] |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0,276 | 2,988 | 0,825 | 0,322 | 2,985 | 0,961 | 0,368 | 2,981 | 1,097 |
| 0,277 | 2,988 | 0,828 | 0,323 | 2,985 | 0,964 | 0,369 | 2,981 | 1,100 |
| 0,278 | 2,988 | 0,831 | 0,324 | 2,985 | 0,967 | 0,37 | 2,981 | 1,103 |
| 0,279 | 2,988 | 0,834 | 0,325 | 2,985 | 0,970 | 0,371 | 2,981 | 1,106 |
| 0,28 | 2,988 | 0,837 | 0,326 | 2,985 | 0,973 | 0,372 | 2,980 | 1,109 |
| 0,281 | 2,988 | 0,840 | 0,327 | 2,985 | 0,976 | 0,373 | 2,980 | 1,112 |
| 0,282 | 2,988 | 0,842 | 0,328 | 2,985 | 0,979 | 0,374 | 2,980 | 1,115 |
| 0,283 | 2,987 | 0,845 | 0,329 | 2,985 | 0,982 | 0,375 | 2,980 | 1,118 |
| 0,284 | 2,987 | 0,848 | 0,33 | 2,984 | 0,985 | 0,376 | 2,980 | 1,120 |
| 0,285 | 2,987 | 0,851 | 0,331 | 2,984 | 0,988 | 0,377 | 2,980 | 1,123 |
| 0,286 | 2,987 | 0,854 | 0,332 | 2,984 | 0,991 | 0,378 | 2,980 | 1,126 |
| 0,287 | 2,987 | 0,857 | 0,333 | 2,984 | 0,994 | 0,379 | 2,979 | 1,129 |
| 0,288 | 2,987 | 0,860 | 0,334 | 2,984 | 0,997 | 0,38 | 2,979 | 1,132 |
| 0,289 | 2,987 | 0,863 | 0,335 | 2,984 | 1,000 | 0,381 | 2,979 | 1,135 |
| 0,29 | 2,987 | 0,866 | 0,336 | 2,984 | 1,003 | 0,382 | 2,979 | 1,138 |
| 0,291 | 2,987 | 0,869 | 0,337 | 2,984 | 1,006 | 0,383 | 2,979 | 1,141 |
| 0,292 | 2,987 | 0,872 | 0,338 | 2,984 | 1,009 | 0,384 | 2,979 | 1,144 |
| 0,293 | 2,987 | 0,875 | 0,339 | 2,984 | 1,011 | 0,385 | 2,979 | 1,147 |
| 0,294 | 2,987 | 0,878 | 0,34 | 2,984 | 1,014 | 0,386 | 2,978 | 1,150 |
| 0,295 | 2,987 | 0,881 | 0,341 | 2,984 | 1,017 | 0,387 | 2,978 | 1,153 |
| 0,296 | 2,987 | 0,884 | 0,342 | 2,983 | 1,020 | 0,388 | 2,978 | 1,155 |
| 0,297 | 2,987 | 0,887 | 0,343 | 2,983 | 1,023 | 0,389 | 2,978 | 1,158 |
| 0,298 | 2,987 | 0,890 | 0,344 | 2,983 | 1,026 | 0,39 | 2,978 | 1,161 |
| 0,299 | 2,987 | 0,893 | 0,345 | 2,983 | 1,029 | 0,391 | 2,978 | 1,164 |
| 0,3 | 2,986 | 0,896 | 0,346 | 2,983 | 1,032 | 0,392 | 2,977 | 1,167 |
| 0,301 | 2,986 | 0,899 | 0,347 | 2,983 | 1,035 | 0,393 | 2,977 | 1,170 |
| 0,302 | 2,986 | 0,902 | 0,348 | 2,983 | 1,038 | 0,394 | 2,977 | 1,173 |
| 0,303 | 2,986 | 0,905 | 0,349 | 2,983 | 1,041 | 0,395 | 2,977 | 1,176 |
| 0,304 | 2,986 | 0,908 | 0,35 | 2,983 | 1,044 | 0,396 | 2,977 | 1,179 |
| 0,305 | 2,986 | 0,911 | 0,351 | 2,983 | 1,047 | 0,397 | 2,976 | 1,182 |
| 0,306 | 2,986 | 0,914 | 0,352 | 2,983 | 1,050 | 0,398 | 2,976 | 1,185 |
| 0,307 | 2,986 | 0,917 | 0,353 | 2,982 | 1,053 | 0,399 | 2,976 | 1,187 |
| 0,308 | 2,986 | 0,920 | 0,354 | 2,982 | 1,056 | 0,4 | 2,976 | 1,190 |
| 0,309 | 2,986 | 0,923 | 0,355 | 2,982 | 1,059 | 0,401 | 2,976 | 1,193 |
| 0,31 | 2,986 | 0,926 | 0,356 | 2,982 | 1,062 | 0,402 | 2,975 | 1,196 |
| 0,311 | 2,986 | 0,929 | 0,357 | 2,982 | 1,065 | 0,403 | 2,975 | 1,199 |
| 0,312 | 2,986 | 0,932 | 0,358 | 2,982 | 1,068 | 0,404 | 2,975 | 1,202 |
| 0,313 | 2,986 | 0,935 | 0,359 | 2,982 | 1,070 | 0,405 | 2,975 | 1,205 |
| 0,314 | 2,986 | 0,937 | 0,36 | 2,982 | 1,073 | 0,406 | 2,974 | 1,208 |
| 0,315 | 2,986 | 0,940 | 0,361 | 2,982 | 1,076 | 0,407 | 2,974 | 1,210 |
| 0,316 | 2,985 | 0,943 | 0,362 | 2,982 | 1,079 | 0,408 | 2,974 | 1,213 |
| 0,317 | 2,985 | 0,946 | 0,363 | 2,981 | 1,082 | 0,409 | 2,974 | 1,216 |
| 0,318 | 2,985 | 0,949 | 0,364 | 2,981 | 1,085 | 0,41 | 2,973 | 1,219 |
| 0,319 | 2,985 | 0,952 | 0,365 | 2,981 | 1,088 | 0,411 | 2,973 | 1,222 |
| 0,32 | 2,985 | 0,955 | 0,366 | 2,981 | 1,091 | 0,412 | 2,973 | 1,225 |
| 0,321 | 2,985 | 0,958 | 0,367 | 2,981 | 1,094 | 0,413 | 2,973 | 1,228 |

| U [V] | I [A] | P [W] | U [V] | I [A] | P [W] | U [V] | I [A] | P [W] |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0,414 | 2,972 | 1,231 | 0,46 | 2,945 | 1,355 | 0,506 | 2,821 | 1,427 |
| 0,415 | 2,972 | 1,233 | 0,461 | 2,944 | 1,357 | 0,507 | 2,815 | 1,427 |
| 0,416 | 2,972 | 1,236 | 0,462 | 2,943 | 1,359 | 0,508 | 2,809 | 1,427 |
| 0,417 | 2,971 | 1,239 | 0,463 | 2,941 | 1,362 | 0,509 | 2,803 | 1,427 |
| 0,418 | 2,971 | 1,242 | 0,464 | 2,940 | 1,364 | 0,51 | 2,797 | 1,426 |
| 0,419 | 2,971 | 1,245 | 0,465 | 2,939 | 1,367 | 0,511 | 2,790 | 1,426 |
| 0,42 | 2,970 | 1,248 | 0,466 | 2,938 | 1,369 | 0,512 | 2,783 | 1,425 |
| 0,421 | 2,970 | 1,250 | 0,467 | 2,936 | 1,371 | 0,513 | 2,776 | 1,424 |
| 0,422 | 2,970 | 1,253 | 0,468 | 2,935 | 1,374 | 0,514 | 2,769 | 1,423 |
| 0,423 | 2,969 | 1,256 | 0,469 | 2,933 | 1,376 | 0,515 | 2,761 | 1,422 |
| 0,424 | 2,969 | 1,259 | 0,47 | 2,932 | 1,378 | 0,516 | 2,753 | 1,421 |
| 0,425 | 2,968 | 1,262 | 0,471 | 2,930 | 1,380 | 0,517 | 2,745 | 1,419 |
| 0,426 | 2,968 | 1,264 | 0,472 | 2,929 | 1,382 | 0,518 | 2,736 | 1,417 |
| 0,427 | 2,968 | 1,267 | 0,473 | 2,927 | 1,385 | 0,519 | 2,727 | 1,415 |
| 0,428 | 2,967 | 1,270 | 0,474 | 2,925 | 1,387 | 0,52 | 2,718 | 1,413 |
| 0,429 | 2,967 | 1,273 | 0,475 | 2,924 | 1,389 | 0,521 | 2,708 | 1,411 |
| 0,43 | 2,966 | 1,276 | 0,476 | 2,922 | 1,391 | 0,522 | 2,698 | 1,408 |
| 0,431 | 2,966 | 1,278 | 0,477 | 2,920 | 1,393 | 0,523 | 2,688 | 1,406 |
| 0,432 | 2,965 | 1,281 | 0,478 | 2,918 | 1,395 | 0,524 | 2,677 | 1,403 |
| 0,433 | 2,965 | 1,284 | 0,479 | 2,916 | 1,397 | 0,525 | 2,665 | 1,399 |
| 0,434 | 2,964 | 1,287 | 0,48 | 2,914 | 1,399 | 0,526 | 2,654 | 1,396 |
| 0,435 | 2,964 | 1,289 | 0,481 | 2,911 | 1,400 | 0,527 | 2,641 | 1,392 |
| 0,436 | 2,963 | 1,292 | 0,482 | 2,909 | 1,402 | 0,528 | 2,629 | 1,388 |
| 0,437 | 2,963 | 1,295 | 0,483 | 2,907 | 1,404 | 0,529 | 2,615 | 1,384 |
| 0,438 | 2,962 | 1,298 | 0,484 | 2,904 | 1,406 | 0,53 | 2,602 | 1,379 |
| 0,439 | 2,962 | 1,300 | 0,485 | 2,902 | 1,407 | 0,531 | 2,587 | 1,374 |
| 0,44 | 2,961 | 1,303 | 0,486 | 2,899 | 1,409 | 0,532 | 2,572 | 1,369 |
| 0,441 | 2,961 | 1,306 | 0,487 | 2,897 | 1,411 | 0,533 | 2,557 | 1,363 |
| 0,442 | 2,960 | 1,308 | 0,488 | 2,894 | 1,412 | 0,534 | 2,541 | 1,357 |
| 0,443 | 2,959 | 1,311 | 0,489 | 2,891 | 1,414 | 0,535 | 2,524 | 1,350 |
| 0,444 | 2,959 | 1,314 | 0,49 | 2,888 | 1,415 | 0,536 | 2,506 | 1,343 |
| 0,445 | 2,958 | 1,316 | 0,491 | 2,885 | 1,416 | 0,537 | 2,488 | 1,336 |
| 0,446 | 2,957 | 1,319 | 0,492 | 2,881 | 1,418 | 0,538 | 2,469 | 1,328 |
| 0,447 | 2,957 | 1,322 | 0,493 | 2,878 | 1,419 | 0,539 | 2,450 | 1,320 |
| 0,448 | 2,956 | 1,324 | 0,494 | 2,875 | 1,420 | 0,54 | 2,429 | 1,312 |
| 0,449 | 2,955 | 1,327 | 0,495 | 2,871 | 1,421 | 0,541 | 2,408 | 1,303 |
| 0,45 | 2,954 | 1,329 | 0,496 | 2,867 | 1,422 | 0,542 | 2,386 | 1,293 |
| 0,451 | 2,953 | 1,332 | 0,497 | 2,863 | 1,423 | 0,543 | 2,362 | 1,283 |
| 0,452 | 2,953 | 1,335 | 0,498 | 2,859 | 1,424 | 0,544 | 2,338 | 1,272 |
| 0,453 | 2,952 | 1,337 | 0,499 | 2,855 | 1,425 | 0,545 | 2,313 | 1,261 |
| 0,454 | 2,951 | 1,340 | 0,5 | 2,851 | 1,425 | 0,546 | 2,287 | 1,249 |
| 0,455 | 2,950 | 1,342 | 0,501 | 2,846 | 1,426 | 0,547 | 2,260 | 1,236 |
| 0,456 | 2,949 | 1,345 | 0,502 | 2,841 | 1,426 | 0,548 | 2,232 | 1,223 |
| 0,457 | 2,948 | 1,347 | 0,503 | 2,837 | 1,427 | 0,549 | 2,202 | 1,209 |
| 0,458 | 2,947 | 1,350 | 0,504 | 2,832 | 1,427 | 0,55 | 2,172 | 1,194 |
| 0,459 | 2,946 | 1,352 | 0,505 | 2,826 | 1,427 | 0,551 | 2,140 | 1,179 |

| U [V] | I [A] | P [W] | U [V] | I [A] | P [W] |
|-------|--------|--------|-------|--------|--------|
| 0,552 | 2,107 | 1,163 | 0,598 | -2,528 | -1,512 |
| 0,553 | 2,072 | 1,146 | 0,599 | -2,759 | -1,653 |
| 0,554 | 2,036 | 1,128 | 0,6 | -2,999 | -1,800 |
| 0,555 | 1,998 | 1,109 | | | |
| 0,556 | 1,959 | 1,089 | | | |
| 0,557 | 1,919 | 1,069 | | | |
| 0,558 | 1,876 | 1,047 | | | |
| 0,559 | 1,832 | 1,024 | | | |
| 0,56 | 1,786 | 1,000 | | | |
| 0,561 | 1,738 | 0,975 | | | |
| 0,562 | 1,688 | 0,949 | | | |
| 0,563 | 1,636 | 0,921 | | | |
| 0,564 | 1,582 | 0,892 | | | |
| 0,565 | 1,526 | 0,862 | | | |
| 0,566 | 1,467 | 0,830 | | | |
| 0,567 | 1,406 | 0,797 | | | |
| 0,568 | 1,342 | 0,762 | | | |
| 0,569 | 1,275 | 0,726 | | | |
| 0,57 | 1,206 | 0,687 | | | |
| 0,571 | 1,134 | 0,647 | | | |
| 0,572 | 1,059 | 0,605 | | | |
| 0,573 | 0,980 | 0,562 | | | |
| 0,574 | 0,898 | 0,516 | | | |
| 0,575 | 0,813 | 0,468 | | | |
| 0,576 | 0,725 | 0,417 | | | |
| 0,577 | 0,632 | 0,365 | | | |
| 0,578 | 0,536 | 0,310 | | | |
| 0,579 | 0,435 | 0,252 | | | |
| 0,58 | 0,331 | 0,192 | | | |
| 0,581 | 0,222 | 0,129 | | | |
| 0,582 | 0,108 | 0,063 | | | |
| 0,583 | -0,010 | -0,006 | | | |
| 0,584 | -0,134 | -0,078 | | | |
| 0,585 | -0,263 | -0,154 | | | |
| 0,586 | -0,397 | -0,233 | | | |
| 0,587 | -0,537 | -0,315 | | | |
| 0,588 | -0,683 | -0,401 | | | |
| 0,589 | -0,835 | -0,492 | | | |
| 0,59 | -0,993 | -0,586 | | | |
| 0,591 | -1,158 | -0,684 | | | |
| 0,592 | -1,330 | -0,788 | | | |
| 0,593 | -1,510 | -0,895 | | | |
| 0,594 | -1,697 | -1,008 | | | |
| 0,595 | -1,892 | -1,126 | | | |
| 0,596 | -2,095 | -1,249 | | | |
| 0,597 | -2,307 | -1,378 | | | |