



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra elektrotechnologie**

System pro zatížení experimentálního PV panelu

System for loading of the experimental PV panel

Diplomová práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektroenergetika

Vedoucí práce: Ing. Pavel Hrzina Ph.D.

Bc. Petr David

Praha 2015

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektroenergetiky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Petr David**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Elektroenergetika

Název tématu: **Systém pro zatížení experimentálního PV panelu**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Navrhněte systém pro zatížení testovaného PV modulu v oblasti bodu maximálního výkonu.
- 2) Návrh realizujte, ověřte funkci a případně zapracujte vzniklé změny.
- 3) Výstupem práce bude hotový výrobek schopný dlouhodobé činnosti ve venkovním prostředí.

Seznam odborné literatury:

- [1] Systém pro zatížení experimentálního FV panelu, Petr David, Individuální projekt ČVUT FEL 2014
- [2] Datové listy použitých součástek a další technické informace.

Vedoucí: Ing. Pavel Hrzina, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2014/2015



doc. Ing. ~~Pavel Mach~~, CSc.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 11. 3. 2014

Prohlášení

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

V Praze dne 5.1.2015

podpis

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu diplomové práce panu Ing. Pavlu Hrzinovi, Ph.D. za pomoc s realizací a návrhem této práce.

Abstrakt

Cílem této diplomové práce je navrhnout a sestavit systém pro zatížení testovaného fotovoltaického (FV) panelu schopného dlouhodobé činnosti ve venkovním prostředí. Úkolem systému je sledování bodu maximálního výkonu FV panelu (Maximum power point tracking) pomocí vhodné metody.

Klíčová slova

Fotovoltaický panel, MPP, MPPT metody, DC měnič

Abstrakt

The aim of this master thesis is to design and construct a system for load tested photovoltaic (PV) panel capable of operating for long periods outdoors. The task of tracking the maximum power point of the PV panel (Maximum Power Point Tracking) using appropriate methods.

Keywords

Photovoltaic panel, MPP, MPPT methods, DC converter

Obsah

Úvod	9
1 Fotovoltaický článek.....	10
2. Maximum power point tracker - MPPT.....	13
2.1 Perturb and Observe (P&O)	16
2.2 Incremental Conductance (INC).....	18
2.3 Fractional Open-Circuit Voltage	20
2.4 Fractional Short-Circuit Current.....	21
2.5 Fuzzy Logic Controll.....	21
2.6 Neural Network	23
2.7 Ripple Correlation Controll (RCC)	24
2.8 Current Sweep	25
2.9 Load Current or Load Voltage Maximization	26
2.10 DC-Link Capacitor Droop Voltage	27
2.11 dP/dV or dP/dI Feedback Control	28
2.12 Ostatní metody MPPT	29
3. MPPT regulátor -návrh	31
3.1 Fotovoltaický panel	32
3.2 DC/DC měnič	32
3.3 MPPT regulátor	39
3.3.1 Invertující zesilovač napětí.....	39
3.3.2 Invertující zesilovač proudu	40
3.3.3 Analogová násobička.....	40
3.3.4 Derivační zesilovač.....	41
3.3.5 Napěťový komparátor.....	42
3.3.6 XOR hradlo	43
3.3.7 Klopný obvod D (FLIP-FLOP)	43
3.3.8 Oscilátor hodinového impulsu.....	44
3.4 Funkce obvodu	45
3.5 Vlastní napájení MPPT	47

4. Praktická část.....	49
4.1 DC měnič.....	49
4.2 MPPT regulátor	51
4.3 Napájení MPPT regulátoru.....	53
4.4 Ověření funkce MPPT	54
4.5 Konstrukce zařízení	58
Závěr.....	60
Použitá literatura	62
Seznam obrázků.....	64
Seznam tabulek.....	66
Seznam zkratk.....	67
Přílohy	68
Příloha A - Seznam součástek	69
Příloha B - Návrh napájení z FV panelu	72
Příloha C - Solární simulátor	74
Příloha D - Obsah přiloženého CD	75

Úvod

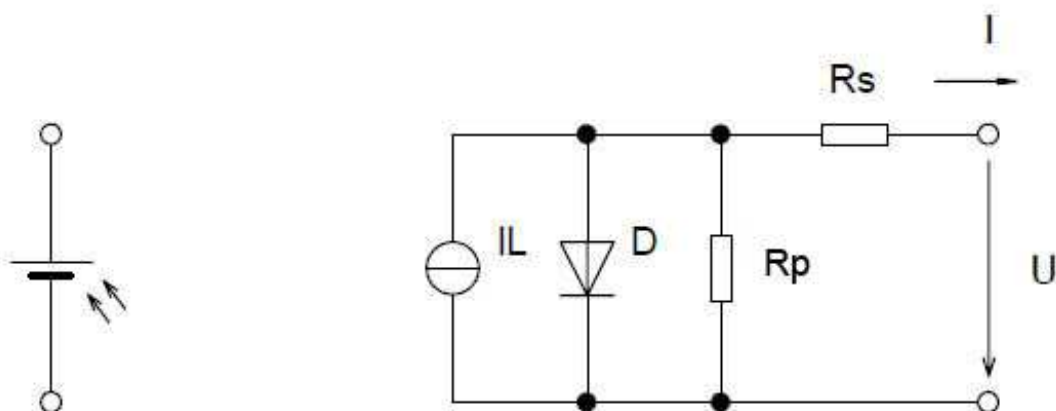
V dnešní době zaujímají fotovoltaické systémy jeden z hlavních zdrojů „Zelené energie“ naší planety. Solární energie díky nulové produkci oxidu uhličitého získává vysoké uplatnění ve výrobě čisté elektrické energie. Vlivem vysoké poptávky po energii, výrobci a inženýři pracují na nových metodách jak systém konverze udělat co nejefektivnější. Jednoduchý, rychlý a cenově přístupný MPP sledovač je tak jedním z cílů zlepšující efektivitu získávání elektrické energie v závislosti na změnách klimatických podmínek pro provoz panelů v pracovním bodě.

Náplní práce je studium metod vyhledávání bodu maximálního výkonu (MPP) fotovoltaického panelu. Jejich vzájemné porovnání v náročnosti a implementaci. Následně je zvolena jedna z metod a použita pro vlastní návrh systému pro sledování MPP experimentálního fotovoltaického panelu. Práce navazuje na předchozí individuální projekt a rozvíjí jeho poznatky ve formě návrhu samostatného systému a jeho realizace. Výstupem práce by měl být hotový výrobek, odolný klimatickým podmínkám, na kterém budou měřeny a vyhodnoceny testované typy fotovoltaických panelů. Navržený MPP tracker bude sloužit jako zátěž fotovoltaického modulu při venkovních testech životnosti modulů.

1 Fotovoltaický článek

Princip činnosti fotovoltaického článku (FVČ) je založen na fotoelektrickém jevu, při kterém jsou uvolňovány elektrony z látky vlivem dopadajícího elektromagnetického záření. Absorpce je způsobena interakcí dopadajícího světla (fotonů) spolu s částicemi hmoty (elektrony a jádry). V případě interakce s vázanými elektrony dochází ke vzniku volných nosičů náboje. Pro funkci FVČ je důležité, aby při této interakci vznikl pár elektron - díra. Pokud by zmiňovaný materiál byl z kovu, došlo by ihned k rekombinaci a vzniklý náboj by se nedal z FVČ odvést. Pro tento účel se využívají polovodiče, kde je vzniklý náboj separován vnitřním polem PN přechodu. [1]

Strukturu FVČ můžeme modelovat pomocí náhradního obvodu znázorněného na obr.1.1. Osvícená plocha přechodu PN generuje proud o proudové hustotě J_{PV} , kde oblast typu P je nabíjena kladným potenciálem a oblast typu N záporným. Tím dochází k tomu, že je přechod PN polarizován v propustném směru, kde část vygenerovaného proudu protéká zpět diodou D. Technologický postup výroby zavádí do procesu určité nedokonalosti přechodu PN, reprezentované svodovým odporem R_p a vliv odporu materiálu a proudových sběračů zastoupeného sériovým odporem R_s . Výstupní napětí FVČ je tak nižší o úbytek na sériovém odporu oproti napětí na diodě D.[1]



Obr.1.1 Náhradní model FVČ, převzato z [2]

Na základě výše uvedeného náhradního modelu FVČ lze pro výstupní proud napsat rovnici (1.1) skládající se ze tří částí, I_L - proud generovaný fotovoltaickým jevem, I_D - proud tekoucí diodou a I_P - svodový proud.

$$I = I_L - I_D - I_P \quad [A] \quad (1.1)$$

po vyjádření :

$$I = A_{ill} J_{PV} - I_{01} \left[\exp\left(e \frac{U + R_S I}{n_1 k T} \right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp\left(e \frac{U + R_S I}{n_2 k T} \right) - 1 \right] - \frac{U + R_S I}{R_P} \quad (1.2)$$

kde: A_{ill} - ozářená plocha [m^2]

J_{PV} - proudová hustota ozářené plochy [A/m^2]

I_{01} - proud tekoucí diodou [A]

U - výstupní napětí článku [V]

I - výstupní proud článku [A]

R_S - sériový odpor článku [Ω]

R_P - paralelní odpor (svod) článku [Ω]

T - termodynamická teplota [K]

k - Boltzmannova konstanta [JK^{-1}]

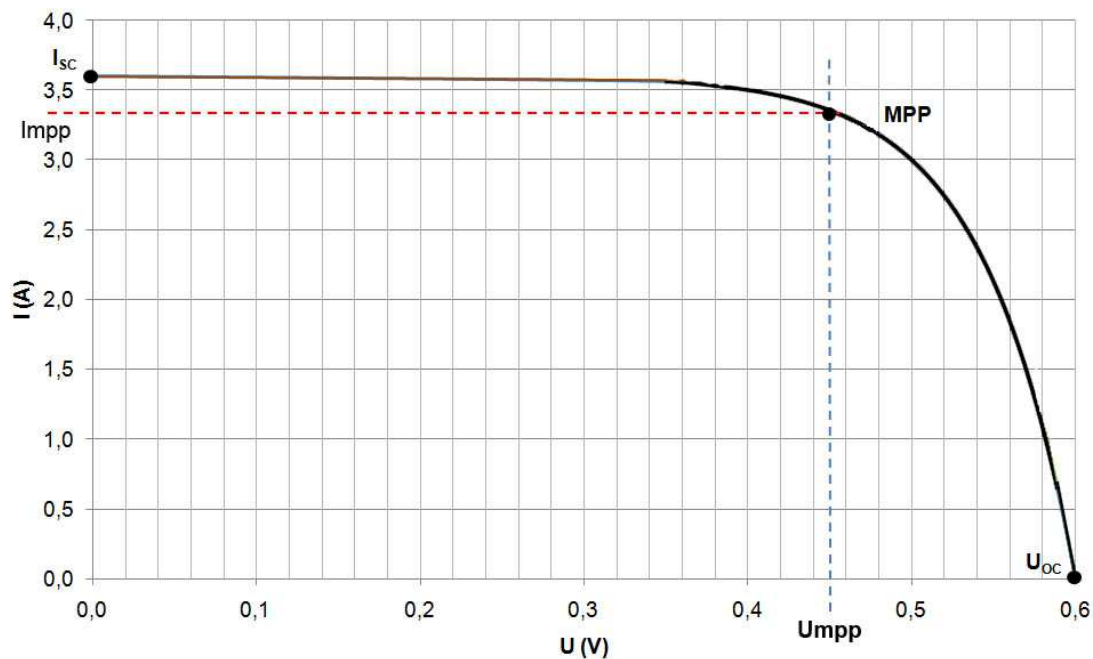
n - koeficient respektující kvalitu diody z pohledu materiálového složení [-]

Voltampérová charakteristika FVČ

Voltampérová charakteristika vyjadřuje funkci o činnosti fotovoltaického článku (obr.1.2). Mezi hraniční veličiny v grafu patří napětí naprázdno U_{oc} a proud nakrátko I_{sc} . Napětí naprázdno vyjadřuje maximální napětí, kterého může článek dosáhnout, pokud na něm není připojena žádná zátěž. Proud nakrátko představuje maximální zkratový proud, který může článek dodávat při dané intenzitě ozáření. K určení výkonu FVČ nám slouží součin proudu a napětí. Pro každý článek existuje pracovní bod na charakteristice, na kterém je výstupní výkon nejvyšší. Tento bod je označován jako bod maximálního výkonu

MPP popsaný napětím U_{MPP} a proudem I_{MPP} . Výkon FVČ je ovlivněn intenzitou dopadajícího záření, spektrálním složením světla a teplotou článku. Pro výpočet maximálního výkonu můžeme tedy napsat rovnici (1.3).[1]

$$P = U_{MPP} \cdot I_{MPP} \quad [W] \quad (1.3)$$



Obr. 1.2 V-A charakteristika FVČ, převzato z [2]

Mezi další charakteristické pracovní hodnoty FVČ patří:

Činitel plnění FF (Fill Factor), podíl maximálního výkonu v bodě MPP a maximálního definovaného výkonu pomocí napětí naprázdno a proudu nakrátko.

$$FF = \frac{U_{MPP} \cdot I_{MPP}}{U_{OC} \cdot I_{SC}} \quad [-] \quad (1.4)$$

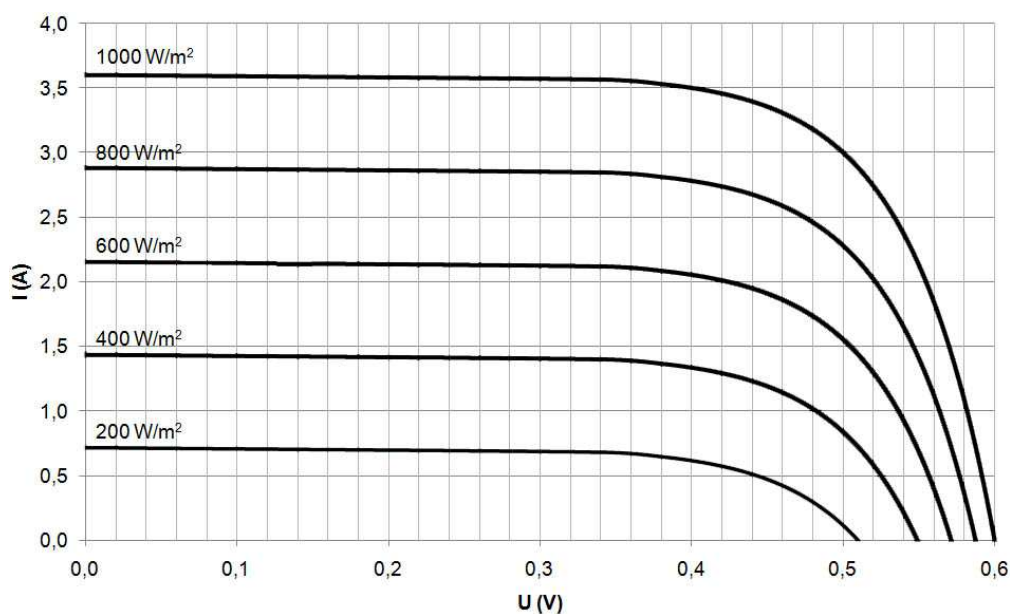
Účinnost η , podíl maximálního výkonu článku v bodě MPP a výkonu dopadajícího slunečního záření.

$$\eta = \frac{U_{MPP} \cdot I_{MPP}}{P_{IN}} \quad [-] \quad (1.5)$$

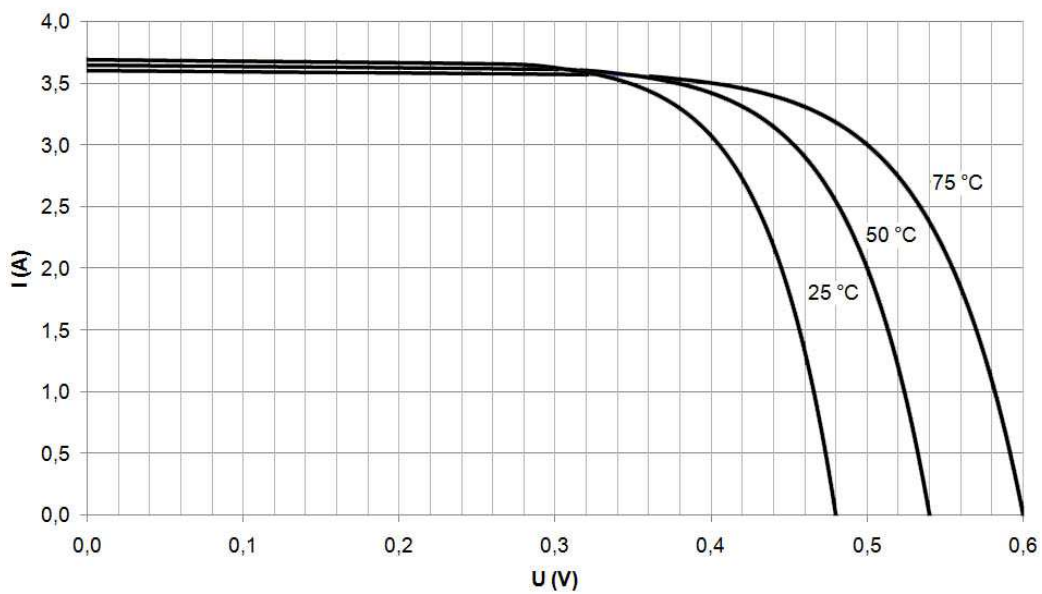
2. Maximum power point tracker - MPPT

Maximum power point tracking (MPPT) neboli sledování bodu maximálního výkonu se používá v obvodech fotovoltaických systémů (FV) k maximalizaci výstupního výkonu tím, že se nepřetržitě sleduje bod maximálního výkonu (MPP), který je závislý na intenzitě ozáření a teplotě.

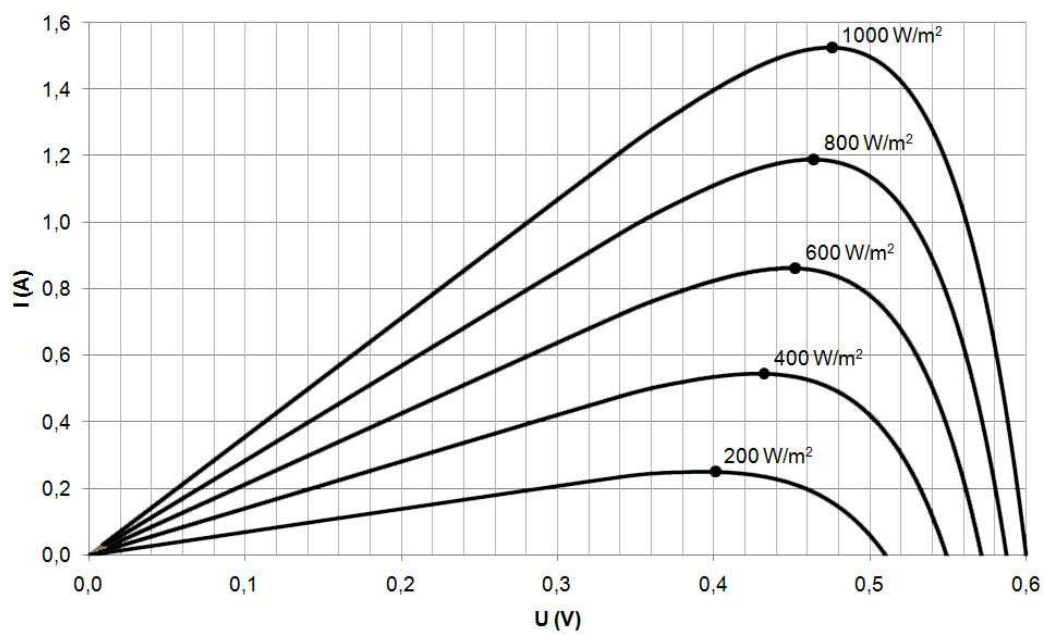
FV pole v rámci ustáleného záření vykazuje V-A charakteristiky s jedinečným bodem, tzv. bodem maximálního výkonu (MPP), kde dochází k produkci maximálního výstupního výkonu. Jelikož vlivem ozáření a teploty dochází k neustálému posunu bodu MPP, je nutné tento výkon neustále sledovat, aby se pro aktuální dané podmínky získal co největší výkon. Závislost bodu maximálního výkonu na intenzitě ozáření je uvedena na obr. 2.1, závislost na teplotě na obr. 2.2. Závislosti výkonové charakteristiky jsou zobrazeny na obr. 2.3 a obr. 2.4. Je třeba poznamenat, že při částečném zastínění FV panelu, je v některých případech možné vznik více lokálních maxim, celkově však existuje pouze jeden pravdivý bod MPP. Většina MPPT technik reaguje na změny jak ozáření, tak i změny teploty, některé jsou však mnohem účinnější, zvláště nemění-li se teplota. Další vlastností hledání MPP je reakce na změny v poli důsledkem jeho stárnutí. Konstruují se také systémy (techniky), které obsahují otevřenou smyčku pro pravidelné doladování systému. [3]



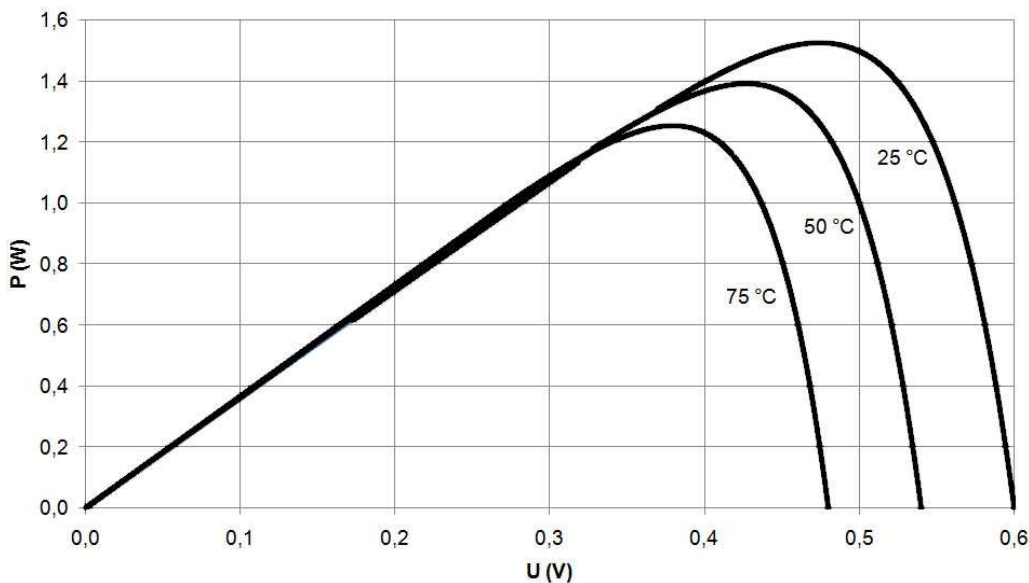
Obr.2.1 V-A charakteristika FVČ pro různé intenzity ozáření, převzato z [2]



Obr. 2.2 Vliv teploty na V-A charakteristiku FVČ, převzato z [2]



Obr.2.3 Výkonové charakteristiky FVČ pro různé intenzity ozáření, převzato z [2]



Obr. 2.4 Vliv teploty na výkonovou charakteristiku FV panelu, převzato z [2]

Problémy při hledání MPP

Sledování polohy pracovního bodu (MPP) přispívá ke zvýšení efektivity přeměny sluneční energie na energii elektrickou. Princip metody MPPT je nalézt hodnotu napětí U_{MPP} či proudu I_{MPP} v závislosti na změnách intenzity dopadajícího ozáření a teploty. Výstupní signál z MPPT obvodů potom slouží například k řízení DC měniče. Některé metody MPPT jsou efektivnější při konstantní teplotě, jiné dokáží zase reagovat na změny způsobené stárnutím FV článku. [3]

Kritéria pro výběr metody MPPT:

- Komplikovanost řešení
- Potřebné snímače (senzory)
- Rychlost přeběhu (reakční doba)
- Cena
- Mez efektivity
- Složitost implementace

2.1 Perturb and Observe (P&O)

P&O algoritmus patří mezi nejčastěji používanou metodu MPPT díky jejímu snadnému provedení. V překladu doslova znamená „odchýlení a vyhodnocení.“ Její algoritmus je založen na změně pracovního napětí známým směrem a vyhodnocení derivace výkonu podle napětí. [3]

$$\frac{dP}{dU} \cong \frac{\Delta P}{\Delta U} \quad (2.1)$$

Polarita derivace výkonu podle napětí rozhoduje o změně směru další změny pracovního napětí následovně:

a) Kladná derivace, udává, že směr změny napětí je správný k dosažení MPP, další změna bude v témže směru.

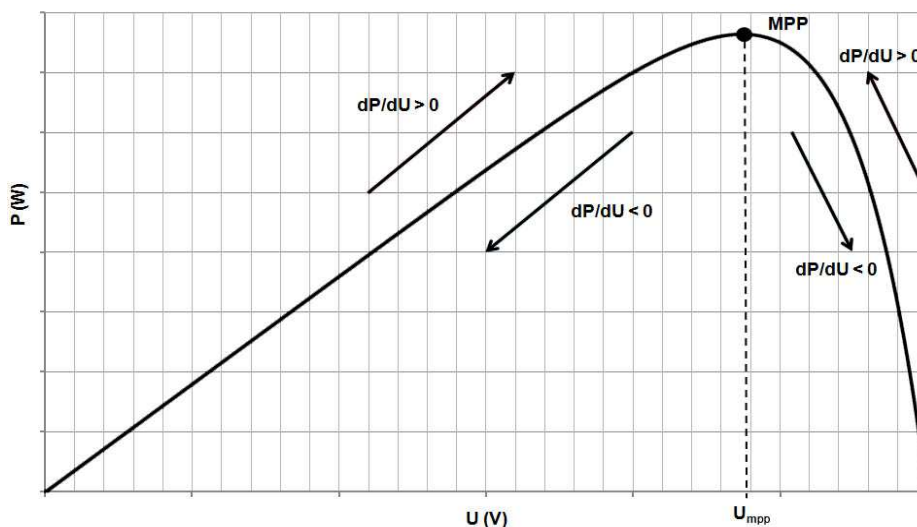
$$\frac{dP}{dU} \cong \frac{\Delta P}{\Delta U} > 0 \quad (2.2)$$

b) Záporná derivace, udává, že změna napětí je směrem od MPP → nesprávný směr, další změna bude opačným směrem.

$$\frac{dP}{dU} \cong \frac{\Delta P}{\Delta U} < 0 \quad (2.3)$$

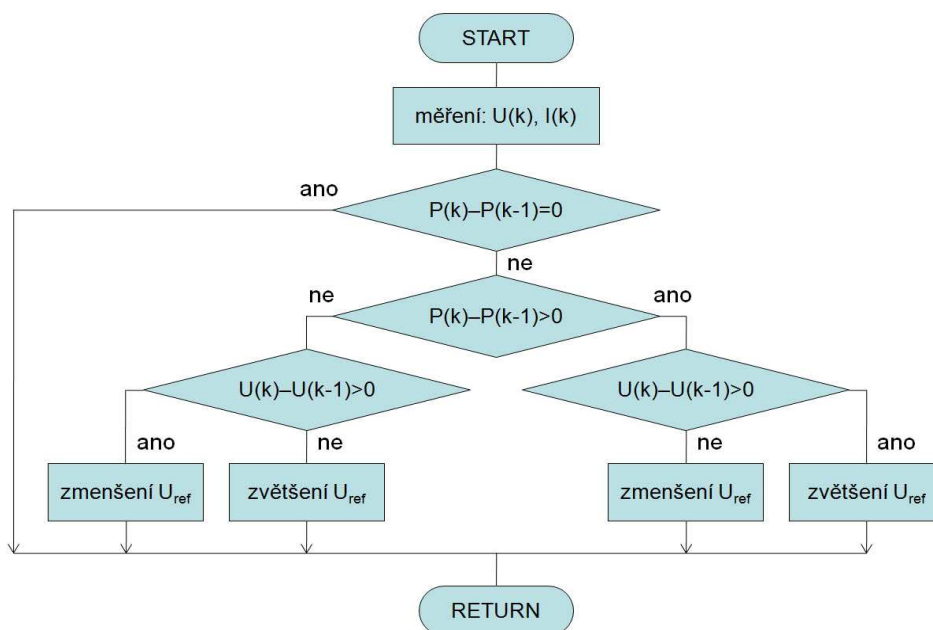
Tab.1. Chování algoritmu P&O

odchylka U	změna P	následující odchylka U
+	+	+
+	-	-
-	+	+
-	-	+



Obr. 2.5 Chování algoritmu P&O, převzato z [2]

Na obr. 2.5 je vidět změna napětí FVČ způsobená změnou výkonu. Nevýhodou této metody je stálá oscilace v okolí MPP, což při rychlých změnách intenzity osvětlení může vytvořit nesprávnou konvergenci. Odstranění této nevýhody je možné například průměrem několika naměřených hodnot či volbou nerovnoměrného kroku nastavení pracovního napětí FVČ. Pro realizaci metody MPP je zapotřebí alespoň jednoho napěťového čidla (senzoru) a možnost měření proudu pro výpočet výkonu. Metoda se realizuje nejčastěji digitálně pomocí mikroprocesoru, lze ji však implementovat i analogově. Na obr. 2.6 je uveden vývojový diagram algoritmu. [3]



Obr.2.6 Vývojový diagram algoritmu P&O (U_{ref} je napětí při kterém FVP pracuje) , převzato z [2]

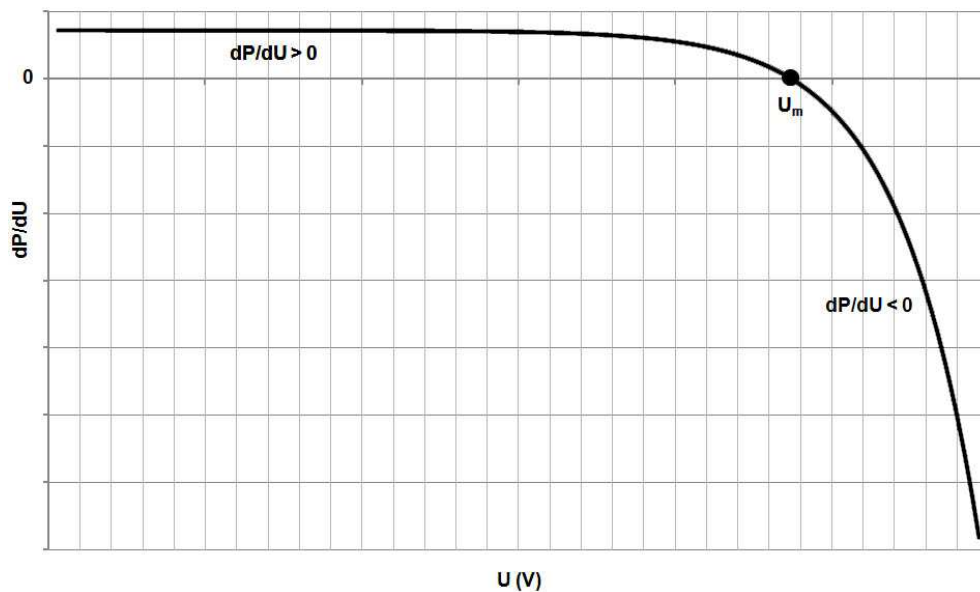
2.2 Incremental Conductance (INC)

Incremental Conductance, neboli metoda přírůstkové vodivosti vychází ze skutečnosti, že směrnice derivace výkonové charakteristiky FV článku v bodě MPP je nulová, nalevo od MPP je kladná a napravo záporná (obr. 2.7) . [3]

$$\frac{dP}{dU} \cong \frac{\Delta P}{\Delta U} = 0 \rightarrow \text{v MPP} \quad (2.4)$$

$$\frac{dP}{dU} \cong \frac{\Delta P}{\Delta U} < 0 \rightarrow \text{napravo od MPP} \quad (2.5)$$

$$\frac{dP}{dU} \cong \frac{\Delta P}{\Delta U} > 0 \rightarrow \text{nalevo od MPP} \quad (2.6)$$



Obr.2.7 Hodnota a polarita směrnice (derivace) výkonu podle napětí, převzato z [2]

Dále platí vztah:

$$\frac{dP}{dU} = \frac{d(U \cdot I)}{dU} = I + U \cdot \frac{dI}{dU} \cong I + U \cdot \frac{\Delta I}{\Delta U} \quad (2.7)$$

Tímto lze přepsat vztahy uvedené výše do následujících tvarů:

$$\frac{\Delta I}{\Delta U} = -\frac{I}{U} \rightarrow \text{v MPP} \quad (2.8)$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta U} < -\frac{I}{U} \rightarrow \text{napravo od MPP} \quad (2.9)$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta U} > -\frac{I}{U} \rightarrow \text{nalevo od MPP} \quad (2.10)$$

Poloha MPP je potom vyhledávána porovnáním okamžité a přírůstkové vodivosti.

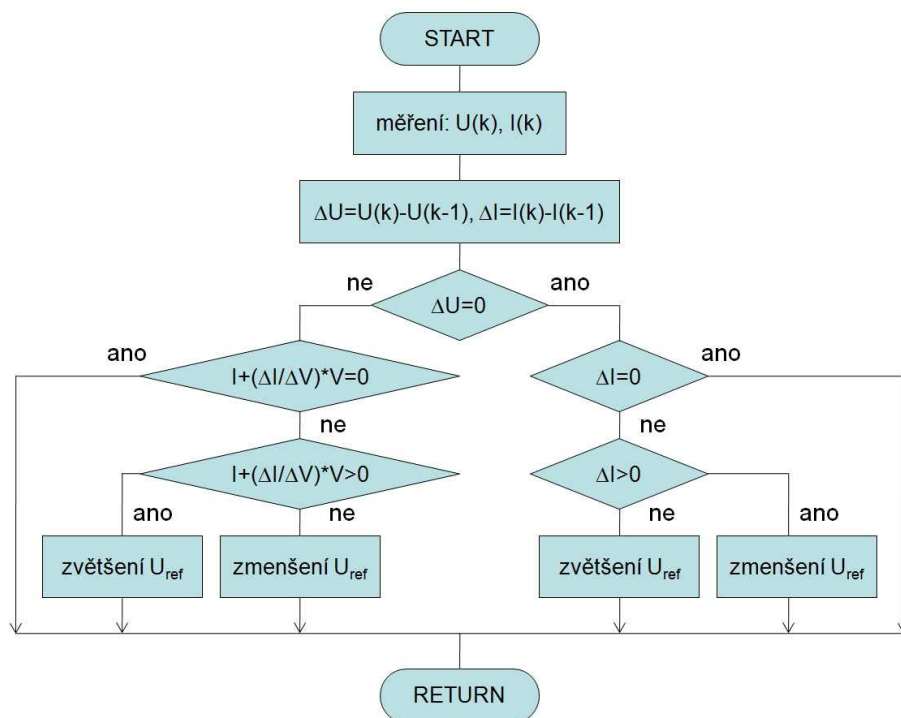
$$G = \frac{I}{U} \quad \Delta G = \frac{\Delta I}{\Delta U} \quad (2.11) \quad (2.12)$$

Princip algoritmu je takový, že zvyšuje či snižuje napětí U_{ref} tak, aby byla dosažena hodnota MPP. Velikost přírůstku napětí určuje, jak rychle bude poloha MPP nalezena. Rychlého sledování je možné docílit velkými přírůstky, ale na úkor toho, že systém nebude pracovat přesně v MPP a bude oscilovat v jeho okolí. Musíme tedy při volbě přírůstku zvolit určitý kompromis. [3]

Jako účinná cesta při použití metody INC se ukazuje použití okamžité a přírůstkové metody pro generování chybového signálu.

$$e = \frac{I}{U} + \frac{dI}{dU} \text{ v MPP } e \rightarrow 0 \quad (2.13)$$

Pro regulaci e na nulu potom postačuje PI regulátor (proporcionálně integrační) zastoupený digitálním mikrokontrolérem. K realizaci metody je zapotřebí dvou snímačů (měření napětí a proudu FV panelu). INC mechanismus se snaží překonat omezení metody P&O, pomocí INC algoritmu je tedy možné zjistit kdy bylo MPP dosaženo a tím může být odchylka zastavena. Zatímco u P&O metody provozní bod osciluje kolem MPP. INC metoda je složitější na hardware a software, což vede ke zvýšení doby výpočtu. Obě metody P&O a INC mohou být zaměněny během časových intervalů charakteristických pro změny atmosférických podmínek. Na obr. 2.8 je uveden vývojový diagram metody INC. [3]



Obr. 2.8 Vývojový diagram algoritmu INC (U_{ref} je napětí při kterém FVP pracuje) , převzato z [2]

2.3 Fractional Open-Circuit Voltage

Metoda Open-Circuit Voltage (napětí naprázdno) využívá téměř lineárního vztahu mezi napětím U_{MPP} a napětím naprázdno FV článku U_{OC} při různých změnách intenzity ozáření a teploty. Vztah mezi oběma napětími je dán rovnicí:

$$U_{MPP} \approx k_1 \cdot U_{OC} \quad \text{kde} \quad 0,71 < k_1 < 0,78 \quad (2.14)$$

- konstanta k_1 je závislá na typu použitého FV panelu (vlastnostech)
- U_{OC} se měří pravidelně v okamžiku vypnutí napájení měniče
- nevýhodou je dočasná ztráta výkonu

Napětí generovaného přechodu PN diody je přibližně 75% U_{OC} , tím se eliminuje potřeba měření U_{OC} a výpočtu U_{MPP} . Jakmile se U_{MPP} přiblíží, uzavřená smyčka měniče může být použita k dosažení požadované hodnoty napětí. Tato metoda je pouze orientační, FV pole technicky nikdy nepůsobí v MPP, může nastat problém při částečném zastínění

FV panelů. Je velmi jednoduchá a snadno se zavádí, neboť nevyžaduje nutně DSP nebo mikrokontrolér ovládání, lze ji tedy sestavit analogově pomocí jednoho napěťového senzoru. [3]

2.4 Fractional Short-Circuit Current

Short-Circuit Current (proud nakrátko) využívá obdobně jako Open-Circuit téměř lineární závislosti proudu I_{MPP} a proudu nakrátko I_{SC} při změnách intenzity ozáření a teploty. Uvedená závislost je dána vztahem:

$$I_{MPP} \approx k_2 \cdot I_{SC} \quad \text{kde} \quad 0,78 < k_2 < 0,92 \quad (2.15)$$

- konstanta k_2 se určí z charakteristiky FV panelu

Měření I_{SC} během provozu je problematické. Přídavný přepínač musí být obvykle umístěn do výkonového měniče a pravidelně spojuje FV pole nakrátko, tak aby bylo možné pomocí I_{SC} senzoru měřit. Tím dochází k navýšení komponentů a nákladů. Většina FV systémů využívajících fractional I_{SC} vyžaduje DSP. Metodu Short-Circuit současně s metodou Open-Voltage lze použít k věrohodnějšímu nalezení MPP. [3]

2.5 Fuzzy Logic Controll

Metoda Fuzzy Logic Controll je závislá na použití mikrokontrolérů založených na fuzzy řízení. Fuzzy logika se skládá ze tří fází:

- Fuzzification
- Rule Base Table (pravdivostní tabulky)
- Defuzzification

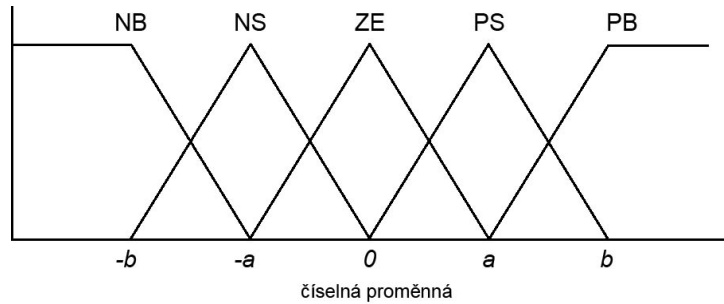
Fuzzification

Číselné vstupní veličiny jsou převedeny na jazykové proměnné na základě funkce příslušnosti. Vstupy jsou chyby E a změna chyby je ΔE .

$$E(n) = \frac{P(n) - P(n-1)}{U(n) - U(n-1)} \quad \Delta E(n) = E(n) - E(n-1) \quad (2.16) \quad (2.17)$$

Fuzzification používá pět úrovní:

- NB (negative big)
- NS (negative small)
- ZE (zero)
- PS (positive small)
- PB (positive big)



Rule Base Table

Fuzzy logika výstupu regulátoru je obvykle změna střídy ΔD z napájecího měniče, její hodnota může být nalezena v tabulce pravidel viz tab. 2. [3]

Tab. 2 Pravdivostní tabulka, převzato z [3]

$E / \Delta E$	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	ZE	ZE	NB	NB	NB
NS	ZE	ZE	NS	NS	NS
ZE	NS	ZE	ZE	ZE	PS
PS	PS	PS	PS	ZE	ZE
PB	PB	PB	PB	ZE	ZE

Př: E je PB a ΔE je ZE, pak chceme zvýšit poměr střídy, který je ΔD a měl by být PB k dosažení MPP.

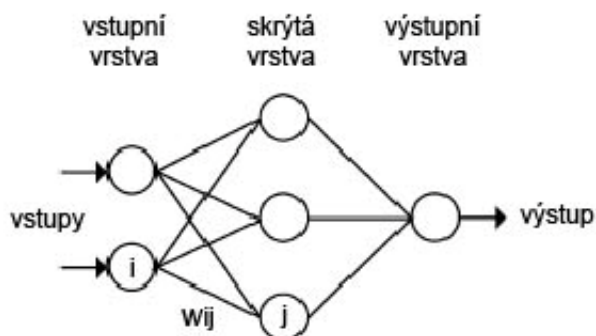
Defuzification

Výstup z Fuzzy logiky je převeden z jazykové proměnné zpět do číselné proměnné za využití funkce příslušnosti. Tím získáme analogový signál, který řídí výkonový měnič k MPP. Účinnost metody je závislá na znalostech uživatele, záleží především na výběru správného chybového výpočtu a práci s pravdivostní tabulkou. [3]

2.6 Neural Network

Spolu s Fuzzy logikou přišla další technika provádějící MPPT dobře přizpůsobitelná pro mikrokontroléry. Neural Network se obvykle skládá ze tří vrstev:

- vstupní
- skrytá
- výstupní



Vstupními proměnnými mohou být:

- parametry FV panelu jako je U_{oc} a I_{sc}
- atmosférická data jako je záření a teplota či jejich kombinace

Výstup je obvykle jeden nebo více referenčních signálů. Chceme-li určit MPP, w_{ij} je třeba pečlivě stanovit pomocí vzdělávacího procesu. FV panely mají různé vlastnosti, Neural Network musí být tedy speciálně navržena pro dotyčný FV systém se kterým bude používána. [3]

2.7 Ripple Correlation Control (RCC)

Je-li FV pole připojeno k výkonovému měniči, jeho spínání zavádí do systému napěťové a proudové zvlnění z FV pole. Metoda RCC využívá tohoto zvlnění k provedení MPPT. RCC koreluje derivaci časově měnícího se výkonu s časovou derivací proudu nebo napětí FV pole a řídí napájení přechodu k nule. [3]

$$\text{Derivace výkonu} \quad p^* = \frac{dp(t)}{dt} \quad (2.18)$$

$$\text{s derivací proudu} \quad i^* = \frac{di(t)}{dt} \quad (2.19)$$

$$\text{nebo napětí} \quad u^* = \frac{du(t)}{dt}. \quad (2.20)$$

Platí pokud $u^* > 0$ nebo $i^* > 0$:

- $p^* > 0 \rightarrow (U < U_{MPP} \text{ nebo } I < I_{MPP}) \rightarrow$ napravo od MPP
- $p^* < 0 \rightarrow (U > U_{MPP} \text{ nebo } I > I_{MPP}) \rightarrow$ nalevo od MPP

Kombinací těchto poznatků dostáváme pro hodnotu $p^* i^*$ nebo $p^* u^*$:

- (+) nalevo od MPP
- (-) napravo od MPP
- (0) v MPP

Pokud je výkonový měnič zapojen jako zvyšující (Boost Converter), zvyšuje poměr střídny \rightarrow zvyšuje proud cívky, který je stejný jako proud FV pole, ale zároveň snižuje napětí FV pole. Vstup pro řízení výkonového poměru je dán vztahem :

$$d(t) = k_3 \int p^* i^* dt \quad \text{nebo} \quad d(t) = -k_3 \int p^* u^* dt \quad (2.21) \quad (2.22)$$

- kde k_3 je konstanta úměrnosti

Metoda RCC přesně a rychle sleduje MPP, a to i při měnící se úrovni ozáření FV panelu. Jedná se o spojitě sledování MPP. K realizaci je zapotřebí snímače proudu a napětí. Metodu lze implementovat za pomoci levných (jednoduchých) analogových obvodů. Další výhodou je, že RCC metoda nevyžaduje předchozí informace o vlastnostech FV pole, lze ji tedy použít v různých FV zařízeních. Čas potřebný k přiblížení k MPP je omezen spínací frekvencí výkonového měniče a zisku RCC obvodu. [3]

2.8 Current Sweep

Metoda používá pro přeměnu proudové křivky FV pole tak, že I-V charakteristiky FV pole se získávají aktualizací v určených časových intervalech. Funkce vybraná pro započítí průběhu je dána :

$$f(t) = k_4 \frac{df(t)}{dt} \quad \rightarrow \quad f(t) = C \exp[t / k_4] \quad \rightarrow \quad f(t) = I_{MAX} \exp[-t / \tau] \quad (2.23)$$

Proud lze snadno získat pomocí vybíjecího proudu přes kondenzátor :

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) = u(t) \cdot f(t) \quad (2.24)$$

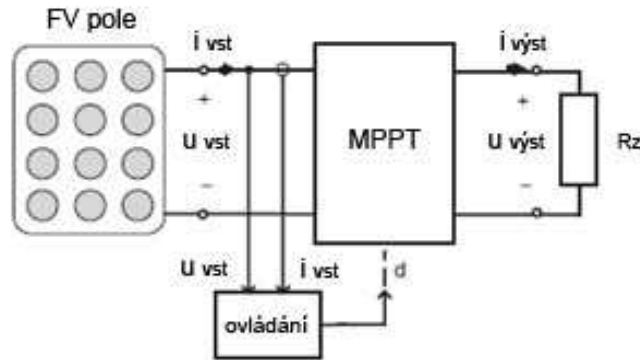
$$\text{V MPP :} \quad \frac{dp(t)}{dt} = u(t) \cdot \frac{df(t)}{dt} + f(t) \cdot \frac{du(t)}{dt} = 0 \quad (2.25)$$

$$\frac{dp(t)}{dt} = [u(t) + k_4 \cdot \frac{du(t)}{dt}] \cdot \frac{df(t)}{dt} = 0 \quad \rightarrow \quad \frac{dp(t)}{dt} = u(t) + k_4 \cdot \frac{du(t)}{dt} = 0$$

Metoda se realizuje pomocí analogového výpočtu. Cyklus trvá 50ms, což má za následek určitou ztrátu výkonu. Poukazuje se na to, že tato technika MPPT je použitelná pouze v případě, kdy příkon sledovací jednotky je nižší než zvýšený výkon. [3]

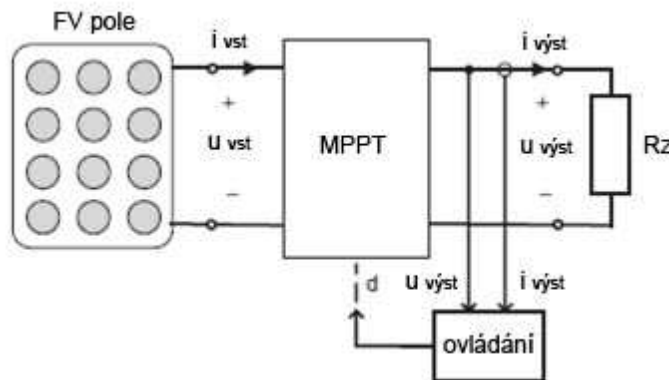
2.9 Load Current or Load Voltage Maximization

Na obr. 2.9 je uvedeno tradiční ovládání MPPT pomocí vstupních parametrů.



Obr. 2.9 Ovládání MPPT pomocí vstupních parametrů, převzato z [3]

Na obr. 2.10 je uvedeno navrhované ovládání přes výstupní parametry. Výhodou je, že výstupní parametry předchozího zobrazení jsou snímány pro účely ochrany, tím pádem v novém zobrazení nevznikají žádné dodatečné náklady. [3]



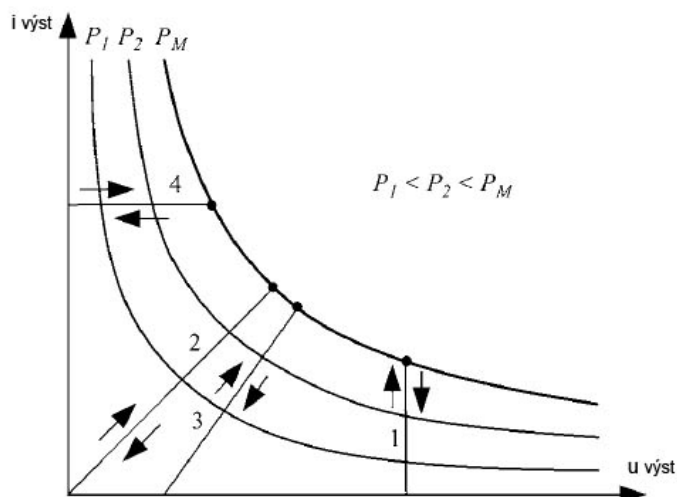
Obr.2.10 Ovládání MPPT pomocí výstupních parametrů, převzato z [3]

Většina zátěží je napěťového, proudového, odporového či kombinace předešlých typů (obr.2.11).

- napěťová zátěž $\rightarrow i_{vyst}$: maximální \rightarrow výstupní výkon : maximální
- proudová zátěž $\rightarrow u_{vyst}$: maximální \rightarrow výstupní výkon : maximální
- jiná zátěž $\rightarrow i_{vyst}$ nebo u_{vyst} musí být použity
- totéž platí pro nelineární zatížení, pokud nevykazují zápornou impedanci

Rozdílné typy zátěží :

- 1- napěťový zdroj
- 2- odporová zátěž
- 3- odporová a zdroj napětí
- 4- proudový zdroj

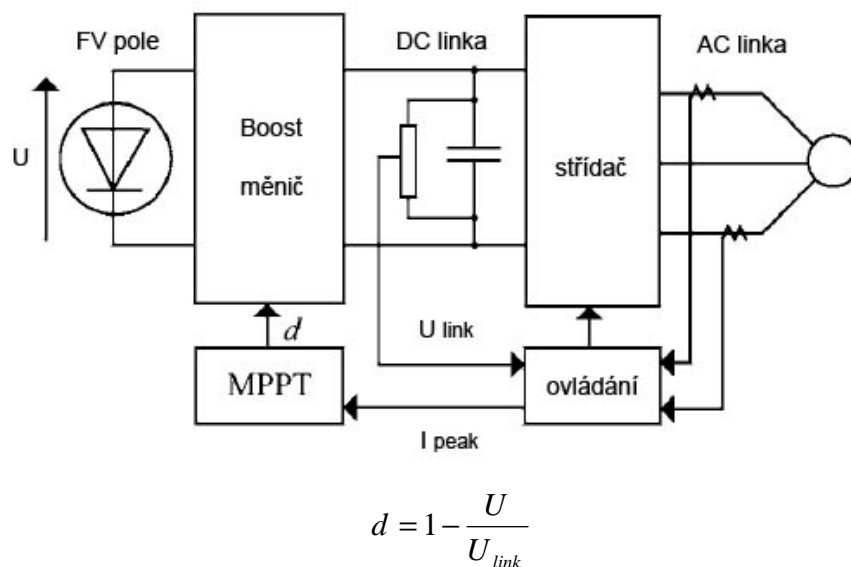


Obr. 2.11 Typy zátěží, převzato z [3]

Výhodou metody je snímání jednoho výstupního parametru. Není zapotřebí multiplifier (násobička), tím dochází k zjednodušení hardware (analog) a algoritmu (digital). Nevýhodou je, že provozu v MPP se téměř nikdy nedosáhne, díky předpokladu metody založené na bezeztrátovém výkonovém měniči. [3]

2.10 DC-Link Capacitor Droop Voltage

Jedná se o metodu speciálně navrženou pro práci s FV systémem, který je připojen paralelně s linkou AC systému. Příklad blokového zapojení je uveden na obr. 2.12 .

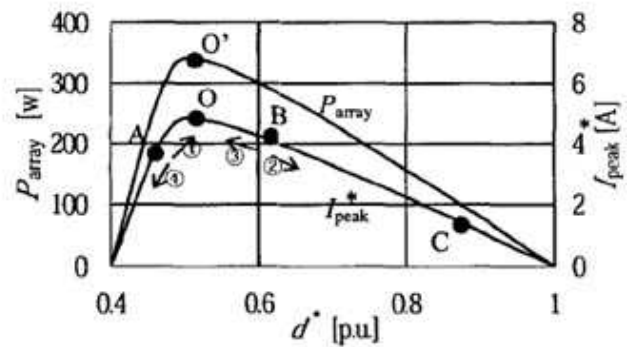


Obr. 2.12 Blokové zapojení DC-Link Capacitor Droop Voltage, převzato z [2]

Princip činnosti je založen na udržování konstantní hodnoty U_{link} (podle aktuálního ovládacího prvku na AC). Změna střídavé $d^* \rightarrow$ změna $P_{pole} \rightarrow$ změna výstupního výkonu měniče \rightarrow změna hodnoty I_{peak}^* (aktuální funkce střídače). Jestliže d^* maximalizuje I_{peak}^* znamená to MPP. [3]

Pracovní body v obr.	Aktuální stav		Provozní směr d^*
	I_{peak}^*	d^*	
1	kladný	zvyšující	setrvá
2	záporný	zvyšující	obráti se
3	kladný	snižující	setrvá
4	záporný	snižující	obráti se

Ovládání směru d^* MPPT:

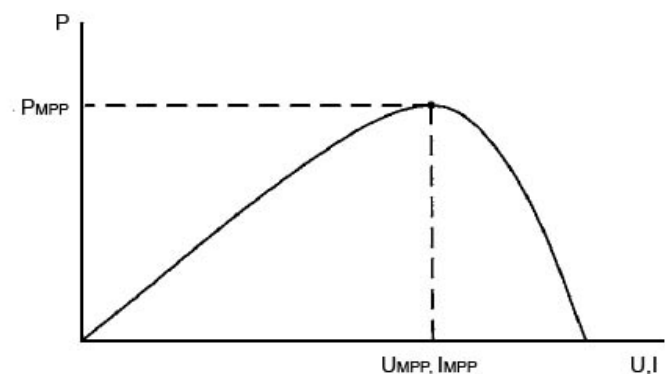


Systém vedení AC proudu se vrací zpět, aby se zabránilo poklesu U_{link} a d je optimalizováno, aby I_{peak}^* bylo na maximu, čímž se dosáhne MPP. DC-Link Capacitor Drop nevyžaduje výpočet výkonu FV pole. Její reakce se zhoršuje v porovnání s přímou metodou. Může být snadno realizována analogovými OZ a rozhodovacími logickými jednotkami. [3]

2.11 dP/dV or dP/dI Feedback Control

Metoda čte napětí a proud FV pole. Vypočítává sklon (dP/dU nebo dP/dI) křivek FV panelu pomocí DSP či mikrokontroléru. Vypočítaný sklon přivádí zpět do výkonového měniče a některý ovládací prvek řídí na nulu. Znaménko vypočítaného sklonu je uloženo v posledních několika cyklech. Na základě těchto příznaků je střída poměru výkonu měniče buď zvyšována, nebo snižována do MPP. [3]

- $\frac{dP}{dU} = 0 \rightarrow$ v MPP
- $\frac{dP}{dU} > 0 \rightarrow$ nalevo od MPP
- $\frac{dP}{dU} < 0 \rightarrow$ napravo od MPP



Odběr vzorků a převod dat je použit s následným digitálním rozdělením výkonu a napětí k přiblížení k dP/dU . Derivace dP/dI je pak společně s aditivním ziskem použita pro zlepšení přechodové charakteristiky. Napětí FV panelu je pravidelně zvyšováno nebo snižováno a $\Delta P/\Delta U$ je porovnáváno s mezní chybou, dokud není dosaženo MPP. [3]

2.12 Ostatní metody MPPT

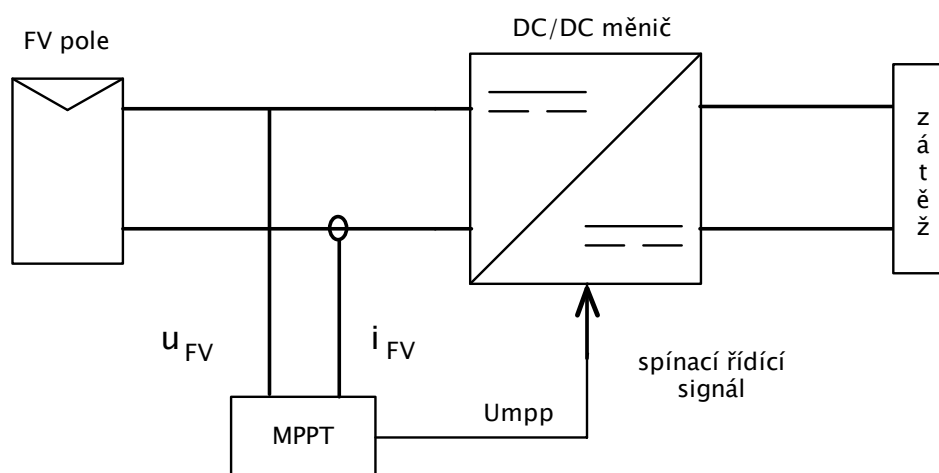
Existuje další nespočet metod, pomocí kterých se dá zjišťovat a udržovat poloha MPP (State-based MPPT, OCC MPPT, BFV, LRCM, ...). Ty jsou však nad rámec této práce. Seznam těch nejdůležitějších spolu s jejich základními vlastnostmi je uveden v následující tabulce.

Tab. 3 Přehled metod MPPT a jejich parametrů, převzato z [3]

Metoda MPPT	Závislost na FV panelu	Pravdivé MPPT	Analog x Digital	Periodické ladění	Rychlost vyhledávání MPP	Složitost implementace	Snímané veličiny
Hill-climbing/P&O	Ne	Ano	Obojí	Ne	Proměnlivá	Nízká	Napětí, proud
IncCond	Ne	Ano	Digital	Ne	Proměnlivá	Střední	Napětí, proud
Fractional <i>VOC</i>	Ano	Ne	Obojí	Ano	Střední	Nízká	Napětí
Fractional <i>ISC</i>	Ano	Ne	Obojí	Ano	Střední	Střední	Proud
Fuzzy Logic Kontrol	Ano	Ano	Digital	Ano	Vysoká	Vysoká	Volitelné
Neural Network	Ano	Ano	Digital	Ano	Vysoká	Vysoká	Volitelné
RCC	Ne	Ano	Analog	Ne	Vysoká	Nízká	Napětí, proud
Current Sweep	Ano	Ano	Digital	Ano	Nízká	Vysoká	Napětí, proud
DC Link Capacitor Droop Control	Ne	Ne	Obojí	Ne	Střední	Nízká	Napětí
Load <i>I</i> or <i>V</i> Maximization	Ne	Ne	Analog	Ne	Vysoká	Nízká	Napětí, proud
DP/dV or dP/dI Feedback Control	Ne	Ano	Digital	Ne	Vysoká	Střední	Napětí, proud
Array Reconfiguration	Ano	Ne	Digital	Ano	Nízká	Vysoká	Napětí, proud
Linear Current Kontrol	Ano	Ne	Digital	Ano	Nízká	Střední	Intenzita záření
IMMP & VMPP Computation	Ano	Ano	Digital	Ano	-	Střední	Intenzita záření, teplota
State/based Computation	Ano	Ano	Obojí	Ano	Vysoká	Vysoká	Napětí, proud
OCC MPPT	Ano	Ne	Obojí	Ano	Vysoká	Střední	Proud
BFV	Ano	Ne	Obojí	Ano	-	Nízká	-
LRCM	Ano	Ne	Digital	Ne	-	Vysoká	Napětí, proud
Slide Kontrol	Ne	Ano	Digital	Ne	Střední	Střední	Napětí, proud

3. MPPT regulátor -návrh

MPPT se používá pro získání maximálního výkonu z FV panelů a přenosu této energie k zátěži. DC/DC měnič funguje jako rozhraní mezi zátěží a FV moduly. Změna pracovního cyklu - impedance zátěže, vyvolá změnu pracovní polohy měniče tak, aby přenos výkonu byl maximální. Blokové schéma uspořádání je uvedeno na obr. 3.1.



Obr. 3.1 Blokové schéma systému

Po rešerši metod sledování MPP v předešlé kapitole, byla na základě požadavků zadání práce zvolena metoda RCC- ripple correlation controll. Jak je uvedeno výše, metoda je nezávislá na typu použitého FV panelu, nalezení MPP je pravdivé, její implementace se provádí analogově, rychlost vyhledávání je vysoká a složitostí se řadí mezi lehce proveditelné.

Jako inspirace pro návrh MPPT regulátoru byl použit elektronický dokument "Simple maximum power point tracker for photovoltaic arrays" od David C. Hamilla a Yan Hong Lima [4]. Samotný návrh se bude skládat z DC měniče, MPPT regulátoru, a díky nezávislé činnosti zařízení na vnějším napájení i na zdroji pro vlastní spotřebu z FV panelu. Postupně budou popsány jednotlivé bloky zařízení, včetně vysvětlení jejich činnosti.

3.1 Fotovoltaický panel

Pro účely měření a ověření funkčnosti navrženého zařízení bude použit FV panel o parametrech 12V / 4W - na tento panel bude dimenzován jak DC měnič, tak samotná zátěž. Pomocí dosazení a změny vstupních a výstupních hodnot ve vzorcích (3.1) až (3.28) lze DC měnič přepočítat na libovolný průmyslově vyráběný FV panel. V praxi to znamená velikost výstupního napětí přes 200V u tenkovrstvých panelů a výkonu přes 300W u panelů z krystalického křemíku.

Parametry FV panelu 12V / 4W :

$$U_{OC} = 21V$$

$$I_{SC} = 320mA$$

$$U_{MPP} = 17,5V$$

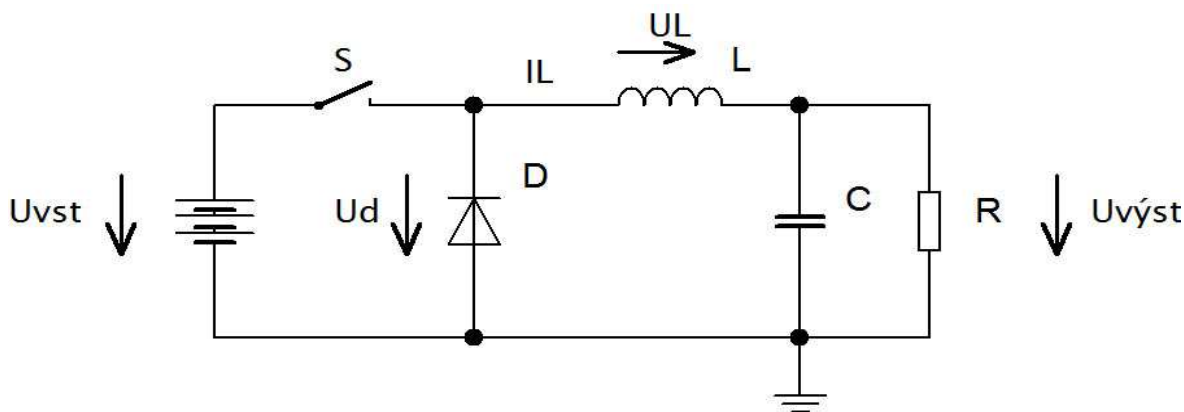
$$I_{MPP} = 230mA$$

3.2 DC/DC měnič

Z hlediska možnosti volby měniče je možné využít tři základní typy:

- Zvyšující měnič (Boost converter, step-up)
- Snižující měnič (Buck converter, step-down)
- Invertující měnič (Buck-Boost converter)

Pro naše požadavky připadají v úvahu měniče zvyšující či snižující. Jelikož námi zvolená metoda MPPT (RCC) nevyžaduje předchozí znalosti o vlastnostech FV panelu, bude z hlediska optimalizace vhodné zvolit snižující měnič. Princip činnosti tohoto měniče je uvedeno na obr. 3.2 .

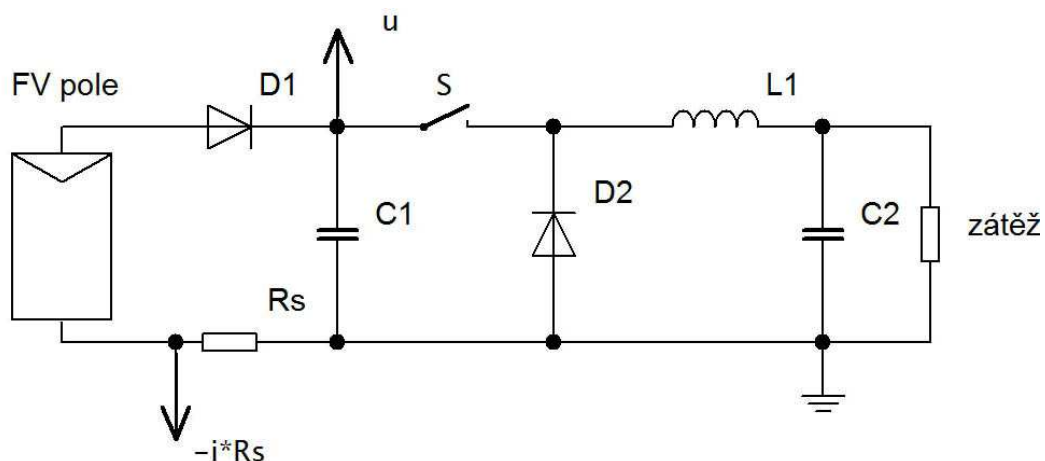


Obr. 3.2 Typické zapojení snižujícího měniče

Snižující měnič můžeme popsat dvěma režimy. Režimem, kdy je spínací prvek sepnut, a režimem, kdy je spínací prvek rozeprt. Spínacím prvkem rozumíme spínač S (tranzistor). Pokud je tranzistor sepnut, je napájecí zdroj připojen k obvodu a proud je do zátěže dodáván přes cívku L . V tomto režimu se cívka chová jako spotřebič a je na ní úbytek napětí UL . Zároveň se nabíjí kondenzátor C proudem IC a napětí UC se zvyšuje. Velikost výstupního napětí může dosáhnout maximálně vstupního napětí $Uvst$.

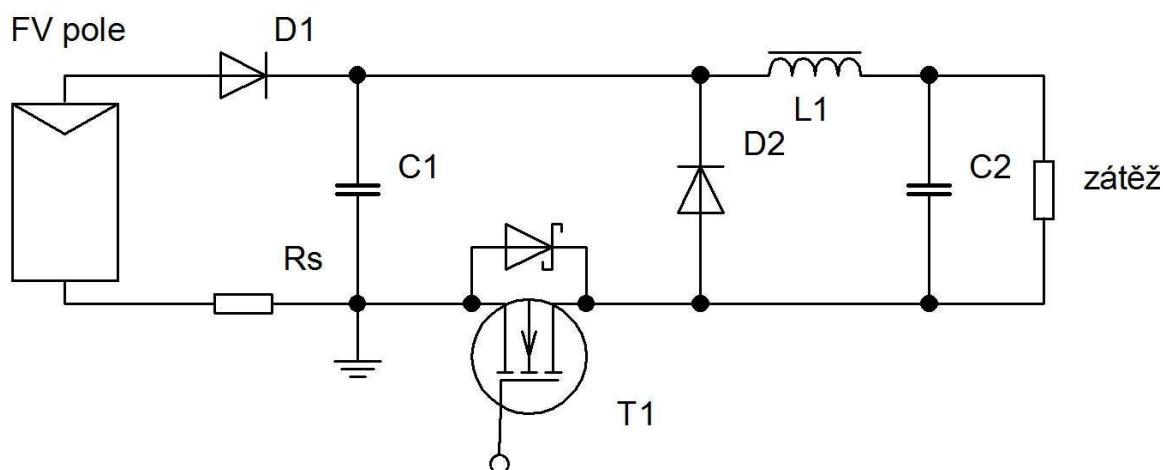
Režim, kdy je tranzistor vypnut, má za následek odpojení vstupního napětí. Cívka se začne chovat jako zdroj a snaží se udržet směr a velikost proudu IL , polarita napětí UL se tedy obrátí. Zároveň se k tomuto proudu přičte proud kondenzátoru C , který se tak začne vybíjet, obvod je uzavřen přes diodu D . Výstupní napětí v tomto režimu klesá. Budeme-li zvyšovat kapacitu kondenzátoru C , snížíme tím zvlnění výstupního napětí.

Na obr. 3.3 je uvedeno zapojení snižujícího měniče spolu s FV panelem a body pro měření napětí a proudu.



Obr. 3.3 Snižující měnič s FV panelem

Vzhledem k tomu, že jako spínač je použit mosfet tranzistor s kanálem N, je nutné schéma na obr. 3.3 překreslit. Pokud bychom chtěli použít původní zapojení, nastala by obtíž s buzením tranzistoru, mosfet totiž není žádnou z elektrod spojen se zemí, což by vyžadovalo plovoucí buzení tranzistoru. Jednodušší variantou je přesunout spínací tranzistor do záporné větve jak je uvedeno na obr. 3.4 .



Obr. 3.4 Upravené schéma snižujícího měniče

Návrh a výpočet obvodu snižujícího měniče:

Vstupní napětí U_1 z FV panelu je v rozsahu $7 - 21V$, v závislosti na intenzitě ozáření FV panelu. Horní mez je stanovena maximálním napětím naprázdno $U_{oc} = 21V$ a dolní mez $U_{1_min} = 7V$ je omezující parametr druhého DC měniče určeného pro napájení obvodů MPPT. Výstupní napětí U_2 je stanoveno na $5V$.

$$U_1 = 7 - 21V \quad (3.1)$$

$$U_2 = 5V \quad (3.2)$$

Velikost zvlnění ΔU_{2_max} při napájení elektronického zařízení je stanovena na 20% výstupního napětí, v našem případě bude silně dostačující, jelikož na výstupu je zapojena pouze odporová zátěž.

$$\Delta U_{2_max} = 0,2 \cdot 5 = 1V \quad (3.3)$$

Spínací kmitočet byl stanoven na hodnotu $f = 12kHz$. Perioda spínání T:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{12 \cdot 10^3} = 8,33 \cdot 10^{-5} s = 83,3 \mu s \quad (3.4)$$

Výpočet rozsahu střídání S pro ideální spínač:

$$S_{\max} = \frac{U_2}{U_{1_{\min}}} = \frac{5}{7} = 0,714 = 71,4\% \text{ periody T} \quad (3.5)$$

$$S_{\min} = \frac{U_2}{U_{1_{\max}}} = \frac{5}{21} = 0,238 = 23,8\% \text{ periody T} \quad (3.6)$$

Výpočet rozsahů spínání:

$$\text{pro } S_{\max} : \quad t_{on_{\max}} = T \cdot S_{\max} = 8,33 \cdot 10^{-5} \cdot 0,714 = 59,5 \mu s \quad (3.7)$$

$$t_{off_{\max}} = T \cdot (1 - S_{\max}) = 8,33 \cdot 10^{-5} \cdot (1 - 0,714) = 23,8 \mu s \quad (3.8)$$

$$\text{pro } S_{\min} : \quad t_{on_{\min}} = T \cdot S_{\min} = 8,33 \cdot 10^{-5} \cdot 0,238 = 19,8 \mu s \quad (3.9)$$

$$t_{off_{\min}} = T \cdot (1 - S_{\min}) = 8,33 \cdot 10^{-5} \cdot (1 - 0,238) = 63,5 \mu s \quad (3.10)$$

Výpočet odporu zátěže R_Z při předpokladu výstupního proudu $I_{20} = 1A$:

$$R_Z = \frac{U_{20}}{I_{20}} = \frac{5}{1} = 5 \Omega \quad (3.11)$$

Výpočet zvlnění výstupního proudu bez vyhlazovacího kondenzátoru:

$$\Delta I_{L_{\text{bez}_C}} = \Delta I_{2_{\text{bez}_C}} = \frac{\Delta U_2}{R_Z} = \frac{1}{5} = 0,2A = 200mA \quad (3.12)$$

Výpočet indukčnosti cívky:

$$L_{\min} = \frac{\Delta U_{1_{\max}}}{4 \cdot \Delta I_{L_{\text{bez}_C}} \cdot f} = \frac{21}{4 \cdot 0,2 \cdot 12 \cdot 10^3} = 2,187mH \text{ zvolena hodnota } 2,2mH \quad (3.13)$$

Skutečné maximální výstupní zvlnění proudu bez vyhlazovacího kondenzátoru, spočtené podle skutečné zvolené hodnoty indukčnosti:

$$\Delta I_{L_bez_C} = \frac{U_{1_max}}{4 \cdot L \cdot f} = \frac{21}{4 \cdot 2,2 \cdot 10^{-3} \cdot 12 \cdot 10^3} = 199mA \quad (3.14)$$

Výpočet minimální kapacity vyhlazovacího kondenzátoru C_{out} :

$$C_{out} = \frac{\Delta I_{L_bez_C} \cdot T}{8 \cdot \Delta U_{2_max}} = \frac{0,2 \cdot 8,33 \cdot 10^{-5}}{8 \cdot 0,2} = 11\mu F \cong 22\mu F \quad (3.15)$$

Výpočet impedance X_c :

$$X_c = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot c} = \frac{1}{2\pi \cdot 12 \cdot 10^3 \cdot 22 \cdot 10^{-6}} = 0,6\Omega \quad (3.16)$$

→ kondenzátor s nízkou hodnotou ESR

Kontrola rezonance:

$$C \gg \frac{1}{4\pi^2 \cdot f^2 \cdot L} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (12 \cdot 10^3)^2 \cdot 2,2 \cdot 10^{-3}} = 80nF \quad (3.17)$$

Velikost výstupního kondenzátoru musí mnohonásobně převyšovat velikost vypočítané kapacity.

Nyní je třeba spočítat a vhodně dimenzovat velikost použitých součástek. Především se jedná o spínací tranzistor T, blokující diodu D a indukčnost L. Dále je nutné vybrat vhodné kondenzátory na vstupu a výstupu měniče s malou hodnotou sériového odporu ESR.

Dimenzování součástek:

Tranzistor T

$$U_{DS_min} = U_{1_max} = 21V \quad (3.18)$$

$$I_{DS_min} = I_{20} + \frac{1}{2} \Delta I_{L_bez_C} = 1 + 0,5 \cdot 0,2 = 1,1A \quad (3.19)$$

Efektivní proud tranzistorem

$$I_{D_ef} = I_{20} \cdot \sqrt{S_{max}} = 1 \cdot \sqrt{0,714} = 0,844A \quad (3.20)$$

Statické ztráty na tranzistoru

$$R_{DS(on)} = 0,03\Omega \quad \text{při} \quad U_{GS} = 10V \quad (3.21)$$

$$P_{Ts} = I_{D_ef}^2 \cdot R_{DS(on)} = 0,844^2 \cdot 0,03 = 214mW \quad (3.22)$$

Podle vypočítaných a daných hodnot byl zvolen MOSFET tranzistor s N-kanálem BUZ11. Podle katalogových údajů umožňuje rychlé spínání $t_{D_on} = 40ns$ při $R_{DS(on)} = 0,03\Omega$.

Tranzistor je dimenzován s dostatečnou rezervou, podle vztahu (3.18) musí tranzistor umožnit sepnout napětí 21V, tranzistor však může spínat napětí do 50V. Proud protékající tranzistorem je dle vztahu (3.20) 0,844A, tranzistor je schopen přenést proud až 33A. Výkonová ztráta je rovna 214mW což pouzdru TO220 nečiní nikterak velké oteplení.

Dioda D

$$U_{D_min} = U_{1_max} = 21V \quad (3.23)$$

$$I_{F_min} = I_{20} + \frac{1}{2} \Delta I_{L_bez_C} = 1 + 0,5 \cdot 0,2 = 1,1A \quad (3.24)$$

Při dimenzování diody je nutné vzít v předpoklad, že musí snést závěrné napětí U_D uvedené ve vztahu (3.23), proud vypočítaný ve vztahu (3.24) a brát v ohled i rychlost spínání tranzistoru. Pro splnění výše uvedených předpokladů byla vybrána schottkyho dioda 1N5822, umožňující velmi rychlé spínání při závěrném napětí $U_D = 40V$ a maximálním protékajícím proudem $I_F = 3A$. Úbytek napětí na diodě po odečtení z grafu v katalogovém listu byl stanoven na $U_{FM} = 0,4V$ při protékajícím proudu $I_F = 1A$.

Cívka L

Při dimenzování indukčnosti je nutné brát v ohled velikost protékajícího proudu, hodnoty rezonančního kmitočtu a velikost vnitřního odporu cívky, který by měl být co nejnižší. Byla vybrána cívka s indukčností $L = 2,2mH$ na feritovém jádře s proudem $I_F = 1A$ a vnitřním odporem $R_{DC} = 1,2\Omega$.

Nyní máme zvolené skutečné hodnoty součástek a je možné přepočítat hodnotu střídý v závislosti na skutečných hodnotách úbytků napětí na součástkách pomocí vztahu pro skutečné výstupní napětí měniče.

$$U_2 = (U_1 - U_{T_sat}) \cdot s - U_{DF} \cdot (1 - s) \quad (3.25)$$

U_{T_sat} - úbytek napětí na otevřeném tranzistoru

U_{DF} - úbytek napětí na diodě v propustném směru

$$S_R = \frac{U_2 + U_{DF}}{U_1 - U_{T_sat} + U_{DF}} \quad (3.26)$$

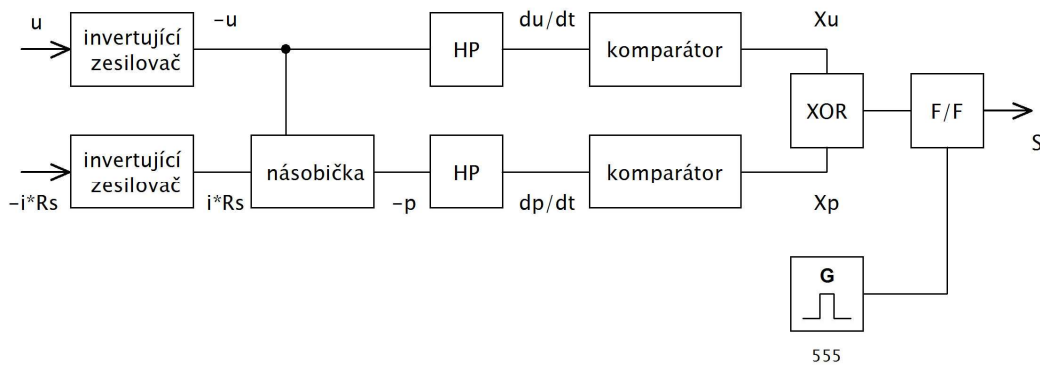
$$S_R = \frac{U_2 + U_{DF}}{U_{1_min} - U_{T_sat} + U_{DF}} = \frac{5 + 0,4}{7 - 0,03 + 0,4} = 0,733 \cong 73,3\% \quad (3.27)$$

$$S_R = \frac{U_2 + U_{DF}}{U_{1_max} - U_{T_sat} + U_{DF}} = \frac{5 + 0,4}{21 - 0,03 + 0,4} = 0,253 \cong 25,3\% \quad (3.28)$$

Vypočítaná nová hodnota střídý se oproti původním hodnotám uvedených ve vztazích (3.5) a (3.6) liší v obou dvou případech o 2%.

3.3 MPPT regulátor

Jak už bylo popsáno výše, samotný MPPT regulační obvod je založen na studii “Simple maximum power point tracker for photovoltaic arrays” od David C. Hamilla a Yan Hong Lima. Obvod na obr. 3.5 se skládá z napěťového snímače (invertující zesilovač), snímače proudu (snímací rezistor a invertující zesilovač), analogové násobičky, dvou horních propustí (derivační zesilovače), dvou komparátorů, logického obvodu XOR a Flip-flop obvodu. Zapojení je dále doplněno o oscilátor použitý jako zdroj obdélníkového průběhu.

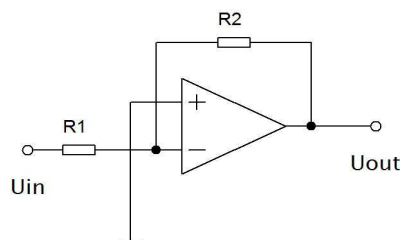


Obr. 3.5 Blokové schéma MPPT

3.3.1 Invertující zesilovač napětí

Snímání napětí FV panelu je provedeno pomocí invertujícího zesilovače uvedeného na obr. 3.6 . Velikost odporů byla stanovena na hodnoty $R_1 = 100k\Omega$ a $R_2 = 22k\Omega$ pro dosažení vysoké vstupní impedance na vstup analogové násobičky. Výstupní napětí zesilovače je dáno vztahem:

$$U_{out} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot U_{in} = -\frac{22 \cdot 10^3}{100 \cdot 10^3} \cdot U_{FV} = 0,22U_{FV} \quad [V] \quad (3.29)$$

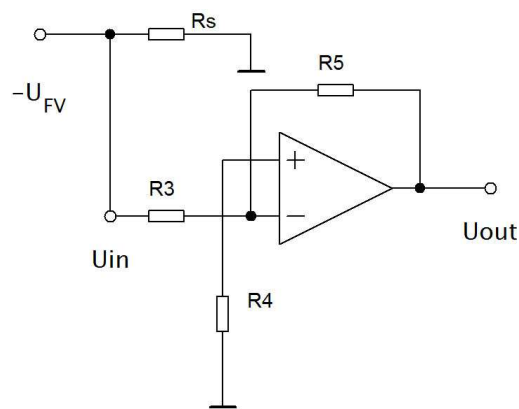


Obr. 3.6 Zapojení invertujícího zesilovače (napětí)

3.3.2 Invertující zesilovač proudu

K získání informace o velikosti proudu FV panelu (obr. 3.7) je použit snímací odpor o hodnotě $R_S = 0,47\Omega$. Na vstup invertujícího OZ je přiveden záporný proud panelu $-I_R$ vynásobený hodnotou snímacího rezistoru R_S . Velikost odporů $R_3 = 1k\Omega$ a $R_5 = 27k\Omega$. Výstupní napětí je dáno vztahem:

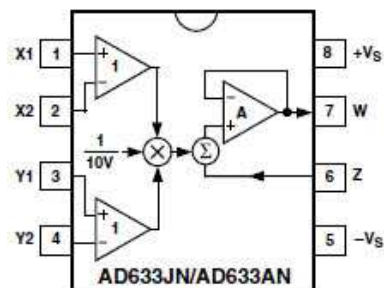
$$U_{OUT} = R_S \cdot I_R \cdot \frac{R_5}{R_3} = 0,47 \cdot I_R \cdot \frac{27 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^3} = 12,69 I_R \quad [V] \quad (3.30)$$



Obr. 3.7 Zapojení invertujícího zesilovače (proud)

3.3.3 Analogová násobička

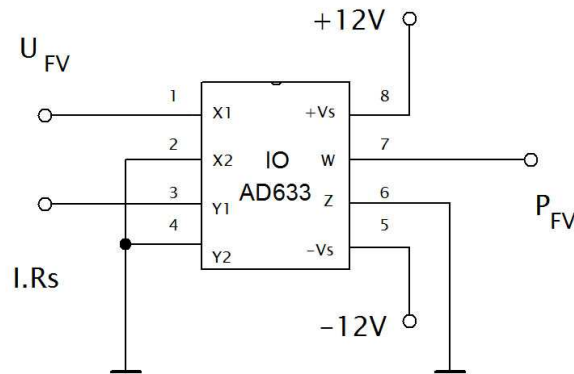
Analogová násobička (multiplikátor) slouží k vyhodnocení dvou analogových signálů ze vstupů na výstup. V tomto zapojení je násobička použita k výpočtu výkonu FV panelu vynásobením napětí a proudu panelu. Dle katalogového listu se násobička skládá ze dvou rozdílových vstupů X a Y doplněné vysoko impedanční svorkou Z (obr. 3.8).



Obr. 3.8 Vnitřní struktura AD633, převzato z [5]

Napětí panelu je přivedeno na vstupní svorku X_1 , proud pole na svorku Y_1 . Piny X_2, Y_2 a Z jsou připojeny k zemi. Skutečné zapojení je uvedeno na obr. 3.9, kde součin vstupních pinů je dán vztahem:

$$W = \frac{(X_1 - X_2) \cdot (Y_1 - Y_2)}{10} + Z = \frac{(0,22U_{FV} - 0) \cdot (12,69I_{FV} - 0)}{10} + 0 = 2,79P_{FV} [W] \quad (3.31)$$



Obr. 3.9 Zapojení analogové násobičky

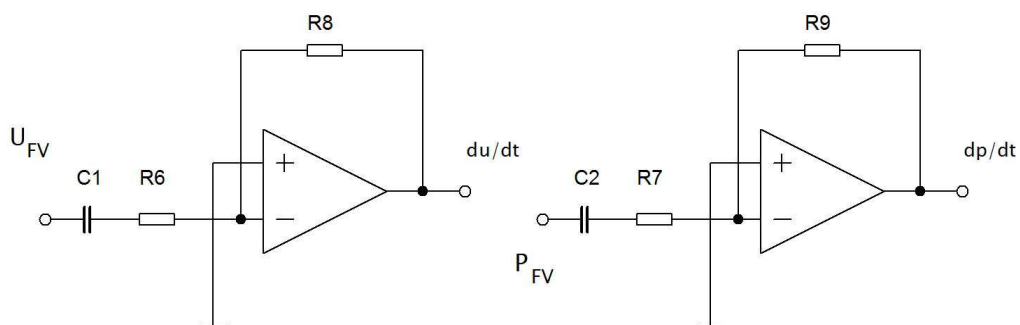
3.3.4 Derivační zesilovač

Jedná se o zapojení OZ, kde na vstupních svorkách je připojen kondenzátor a do zpětné vazby je zapojen rezistor (obr. 3.10). V MPPT obvodu slouží zapojení jako horní propust měřeného napětí a vypočítaného výkonu. Jedná se o filtr prvního řádu, kde výstupní napětí a výkon je dán vztahem :

$$U_{out} = -RC \cdot \frac{du(t)}{dt} = -R_8 C_1 \cdot \frac{du(t)}{dt} \quad [V] \quad (3.32)$$

$$U_{out} = -RC \cdot \frac{dp(t)}{dt} = -R_9 C_2 \cdot \frac{dp(t)}{dt} \quad [V] \quad (3.33)$$

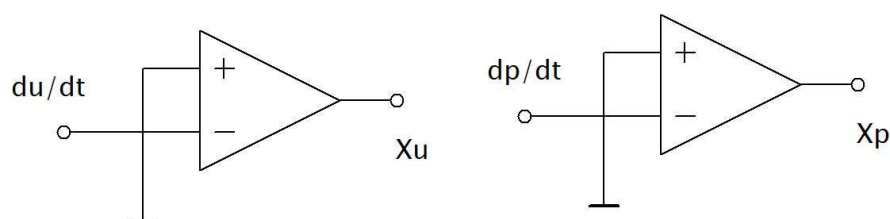
Derivační zesilovač reaguje na změny parametrů pole a slouží pro vyhodnocení hodnot pro sledování MPP. Velikost rezistorů $R_8, R_9 = 4,7k\Omega$, kondenzátorů $C_1, C_2 = 33nF$.



Obr. 3.10 Zapojení derivačních zesilovačů

3.3.5 Napět'ový komparátor

Napět'ový komparátor slouží k porovnání dvou napětí nebo proudů na svém vstupu a přepíná svůj výstup podle toho, který ze vstupů má větší hodnotu. V uvedeném zapojení je přiveden výstup z derivačních zesilovačů du/dt a dp/dt na vstup komparátorů. Derivační napětí jsou porovnávána se zemí, jako komparátor je použit obvod LM393, díky své rychlé odezvě a dobrým provozním parametrům. Schéma zapojení komparátorů je uvedeno na obr. 3.11 .



Obr. 3.11 Zapojení komparátorů

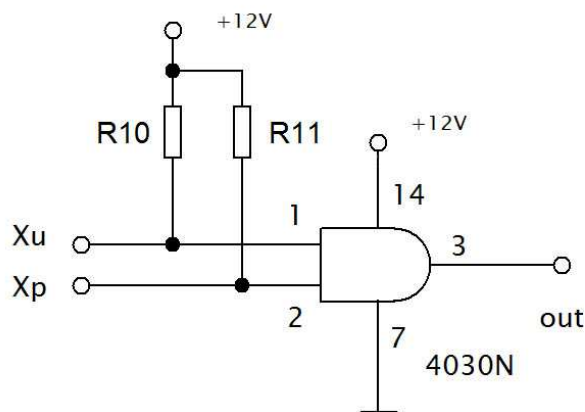
Komparátor vytváří na svém výstupu log 1 v případě, kdy vstupní hodnota je větší než nula (potenciál země). Log 0 v případě, když vstupní hodnota je nižší než nula. Stav výstupů X_u a X_p je uveden v tab. 4.

Tab. 4 Stav výstupů komparátorů

X_u	$du/dt > 0$	$du/dt < 0$
	1	0
X_p	$dp/dt > 0$	$dp/dt < 0$
	1	0

3.3.6 XOR hradlo

Výstup z komparátorů je vyveden na XOR logický obvod. Mezi komparátory a vstupy XOR hradla jsou paralelně připojeny k napájení posilovací odpory $R_{10}, R_{11} = 4,7k\Omega$, sloužící ke zvýšení energie pro řízení hradla (obr. 3.12). V tab. 5 je též uvedena pravdivostní tabulka hradla.



Obr. 3.12 Zapojení hradla s posilovacími odpory

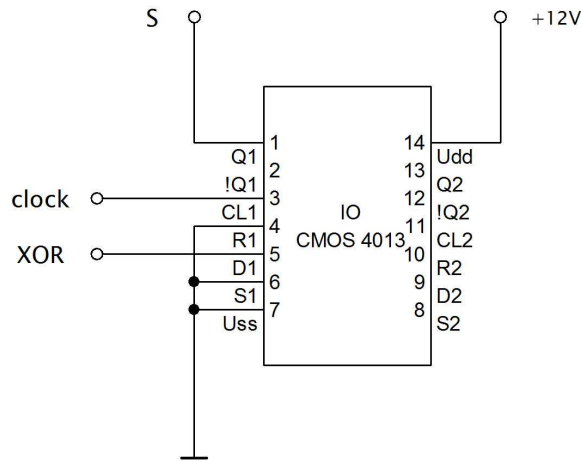
Tab. 5 Pravdivostní tabulka hradla XOR

X_u	X_p	out
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

3.3.7 Klopný obvod D (FLIP-FLOP)

Jedná se o elektronický obvod, který má dva stabilní stavy a tím je schopen obsluhovat jeden bit paměti. Bývá řízen hodinovým signálem. Výstup klopného obvodu Q sleduje zpoždění vstupu D. Výstup klopného obvodu přejde na stav vstupu D v okamžiku náběžné

hrany hodinového impulsu. Zapojení obvodu je uvedeno na obr. 3.13 spolu s pravdivostní tabulkou (tab. 6).



Obr. 3.13 Zapojení KO-D (Flip-Flop)

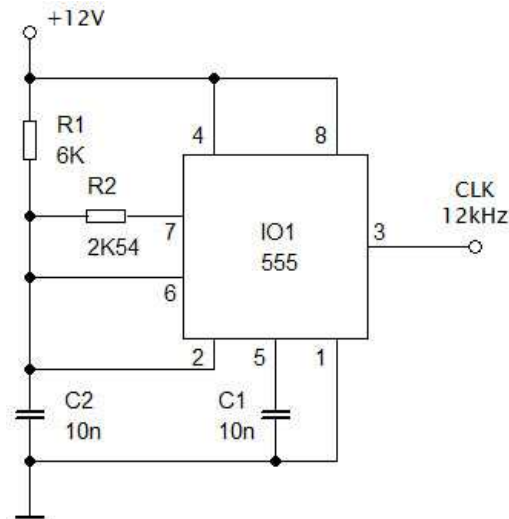
Tab. 6 Pravdivostní tabulka D-F/F

clock	D	$Q_n + 1$
náběžná hrana	X	Q_n
sestupná hrana	0	0
sestupná hrana	1	1

Vstupy SET (S) a RESET (R) klopného obvodu musí být připojeny na úroveň log 0, aby Flip-Flop fungoval k produkci vstupu D, na který je připojen výstup ze vstupu XOR hradla taktovaného frekvencí hodinového impulsu (clock) $1/T$ (12kHz). Výstupem Q je řízen (spínán) mosfet tranzistor DC měniče.

3.3.8 Oscilátor hodinového impulsu

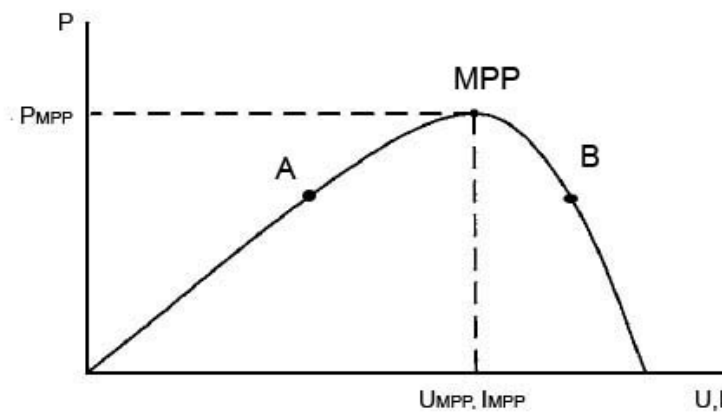
K vytvoření taktovacího impulsu pro řízení klopného obvodu D bylo použito zapojení s integrovaným obvodem SA555 pracujícího jako astabilní klopný obvod (oscilátor) obdélníkového průběhu se střídou 50% a frekvencí přibližně 12kHz. Velikost externích součástek $R_{12}, R_{13} + R_{14}, C_3, C_4$ byla vypočítána pomocí programu dostupného z [6]. Schéma zapojení je uvedeno na obr. 3.14.



Obr. 3.14 Astabilní klopný obvod s časovačem SA555

3.4 Funkce obvodu

Tato podkapitola vysvětluje jak pracuje obvod ve sledování MPP. Na obr. 3.16 je zobrazena P-U,I charakteristika pro vysvětlení funkce obvodu.



Obr. 3.16 P-U,I charakteristika FV panelu

Popis funkce:

Bod A, $U < U_{MPP}$

a) Derivace du/dt je záporná a derivace dp/dt je také negativní, když p ustupuje od MPP. Spínač (tranzistor) se rozezne, kondenzátor se nabíjí, čímž napětí U roste směrem k U_{MPP} .

b) Napětí U se nyní zvyšuje nad U_{MPP} , derivace du/dt je kladná a derivace dp/dt je také kladná, zatímco p roste směrem k MPP. Spínač se rozezne, kondenzátor se nabíjí, dochází ke zvýšení napětí U k U_{MPP} .

Bod B, $U > U_{MPP}$

a) Derivace du/dt je kladná a derivace dp/dt je záporná, zatímco p ustupuje od MPP. Spínač se uzavírá, dochází k vybíjení kondenzátoru, napětí U klesá směrem k U_{MPP} .

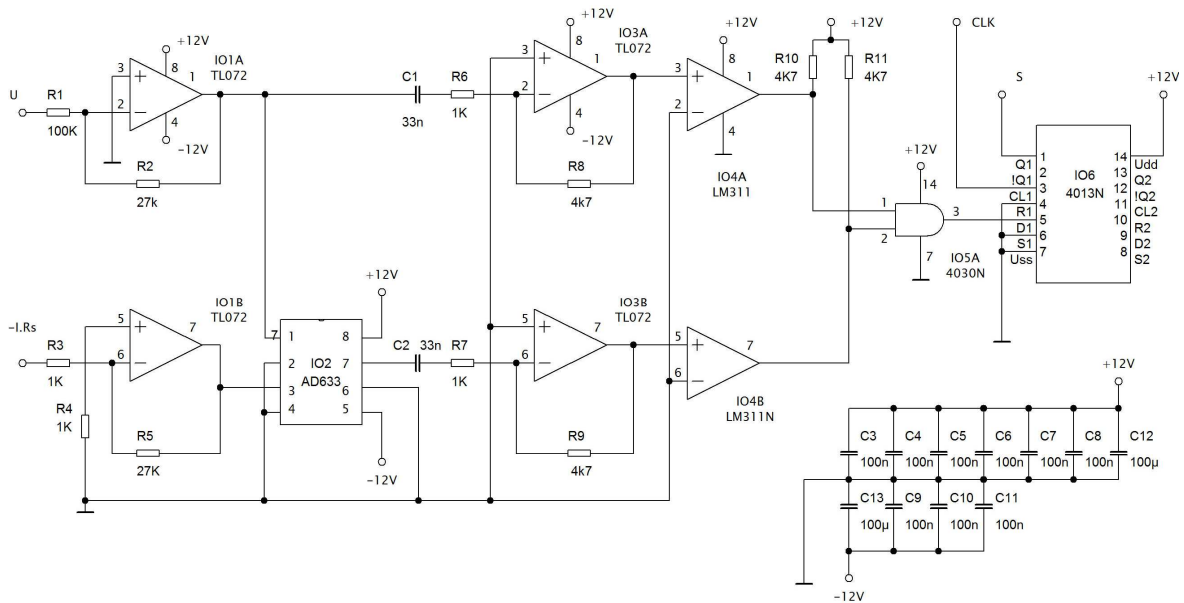
b) Napětí U nyní klesá směrem k U_{MPP} , derivace du/dt je záporná a derivace dp/dt je pozitivní, zatímco p roste směrem k MPP. Spínač se uzavírá, vybíjí se kondenzátor, což vede k poklesu napětí U směrem k U_{MPP} .

V následující tabulce jsou shrnuty všechny stavy MPPT.

Tab. 7 Stavy MPPT [4]

Stav	du/dt	dp/dt	X_u	X_p	C	S	Spínač	Napětí
$U \leq U_{MPP}$	> 0	> 0	1	1	nabíjí se	0	otevře se	Roste
$U \leq U_{MPP}$	≤ 0	≤ 0	0	0	nabíjí se	0	otevře se	Roste
$U > U_{MPP}$	≤ 0	> 0	0	1	vybíjí se	1	zavře se	Klesá
$U > U_{MPP}$	> 0	≤ 0	1	0	vybíjí se	1	zavře se	Klesá

Na obr. 3.17 je uvedeno kompletní schéma MPPT regulátoru



Obr. 3.17 Kompletní schéma MPPT regulátoru

3.5 Vlastní napájení MPPT

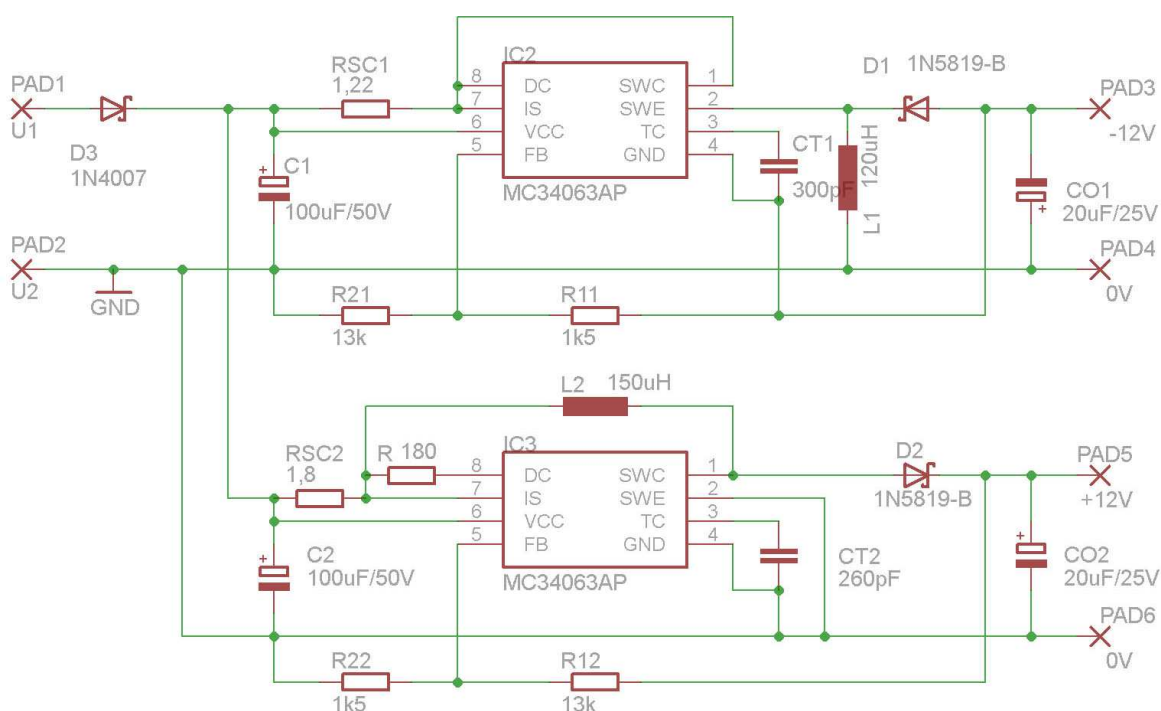
Jak již bylo uvedeno, MPPT regulátor by měl být schopen samostatné činnosti bez napájení vnějším zdrojem. Pro napájení zařízení je proto použit testovaný FV panel. V závislosti na použití OZ a především analogové násobičky a s tím spjatého symetrického napájení, byl pro obvod MPPT navržen DC měnič o výstupním symetrickém napětí $\pm 12V$.

Předpokládaná spotřeba obvodů MPPT regulátoru dle katalogových listů:

- TL072 napájení $\pm 12V$ napájecí proud $2,5mA$
- NE555 napájení $+12V$ napájecí proud $10mA$
- LM393 napájení $+12V$ napájecí proud $2,5mA$
- AD633 napájení $\pm 12V$ napájecí proud $6mA$
- 4030N napájení $+12V$ napájecí proud $4mA$
- 4013N napájení $+12V$ napájecí proud $4mA$

Po sečtení jednotlivých odběrů vychází pro napětí +12V napájecí proud 25mA a pro napětí -12V napájecí proud 9mA.

Při návrhu výkonové části snižujícího měniče, byla jako spodní hranice napětí z FV panelu stanovena hodnota $U_{1_min} = 7V$. K získání symetrického napětí jsou použity dva spínané regulátory napětí MC34063AP jenž dokáží pracovat se vstupním napětím 3–40V. První regulátor pracuje jako zvyšující měnič a druhý jako invertující. Na obr. 3.18 je uvedeno schéma navrhovaného DC měniče.



Obr. 3.18 Schéma DC měniče pro napájení MPPT

K výpočtu parametrů externích součástek v závislosti na vypočtené spotřebě MPPT regulátoru byl použit online program dostupný z [7] a katalogový list obvodu MC34063AP.

4. Praktická část

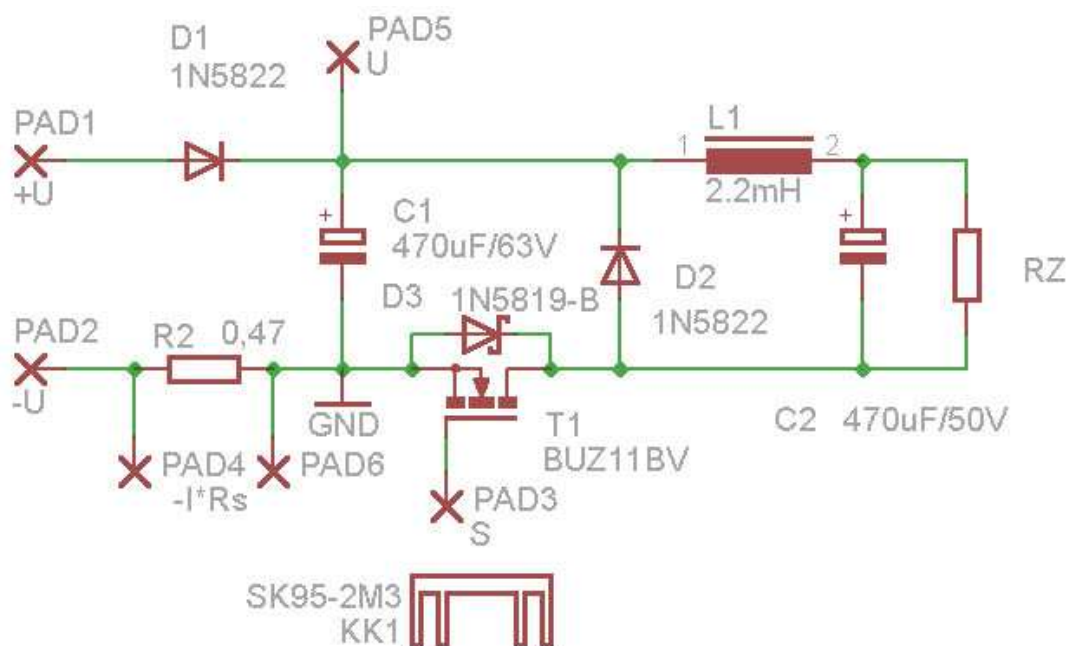
Pro realizaci jednotlivých plošných spojů byl použit návrhový systém Eagle. Program se skládá ze tří modulů, které umožňují vytvoření potřebné dokumentace k navrhovaným elektronickým obvodům [8]:

- návrh schématu - schématický editor - SCH E
- návrh plošného spoje - editor plošného spoje - E PCB
- automatický návrh plošného spoje – AUTOROUTER

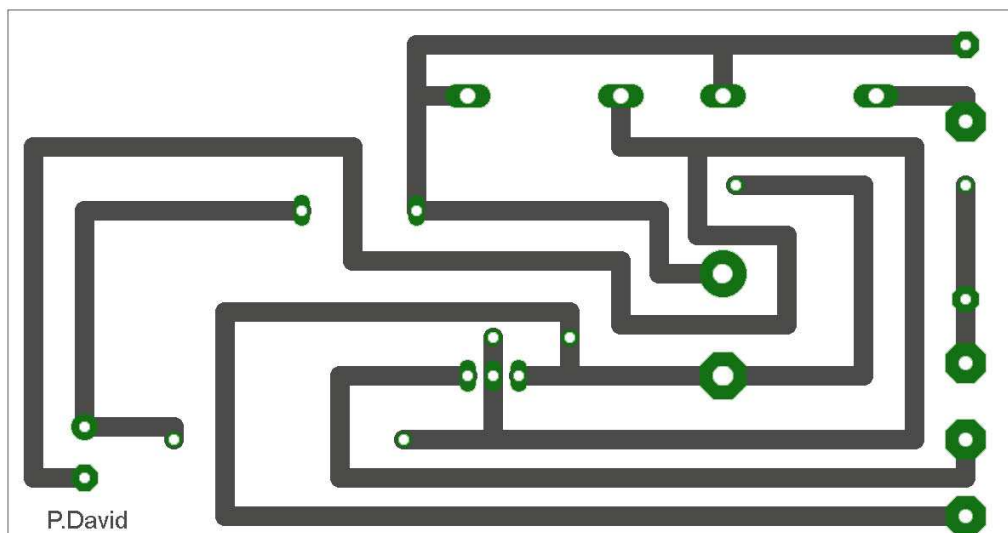
K vytvoření schématu je nejprve nutné vybrat příslušné součástky z knihovny NS Eagle. Velikost jednotlivých součástek je uvedena v příloze A. Pro výběr reálných součástek jsme použili katalog firmy GM Electronic 2014.

4.1 DC měnič

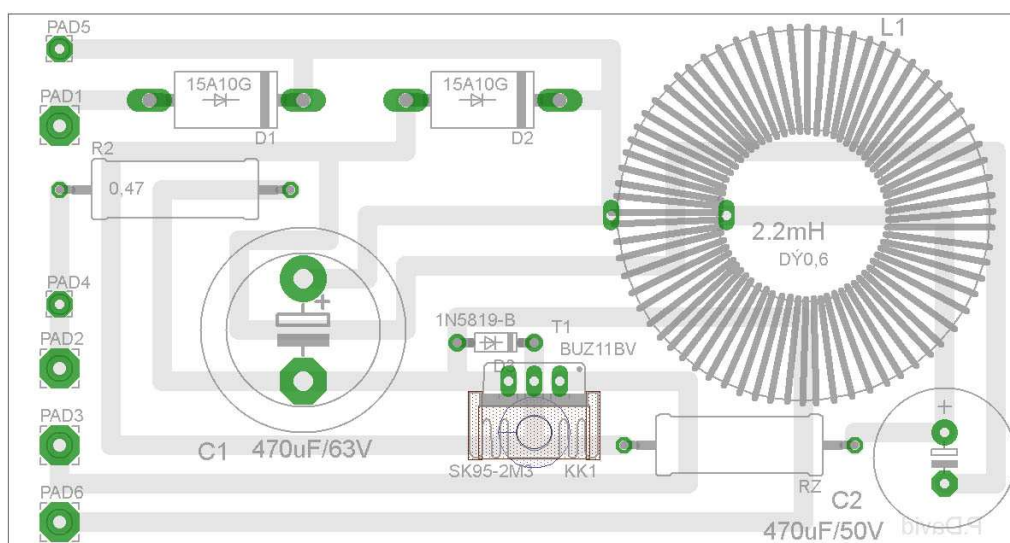
Schéma obvodu je znázorněno na obr. 4.1, deska spojů na obr. 4.2 a rozložení součástek na obr. 4.3 .



Obr. 4.1 Schéma DC měniče



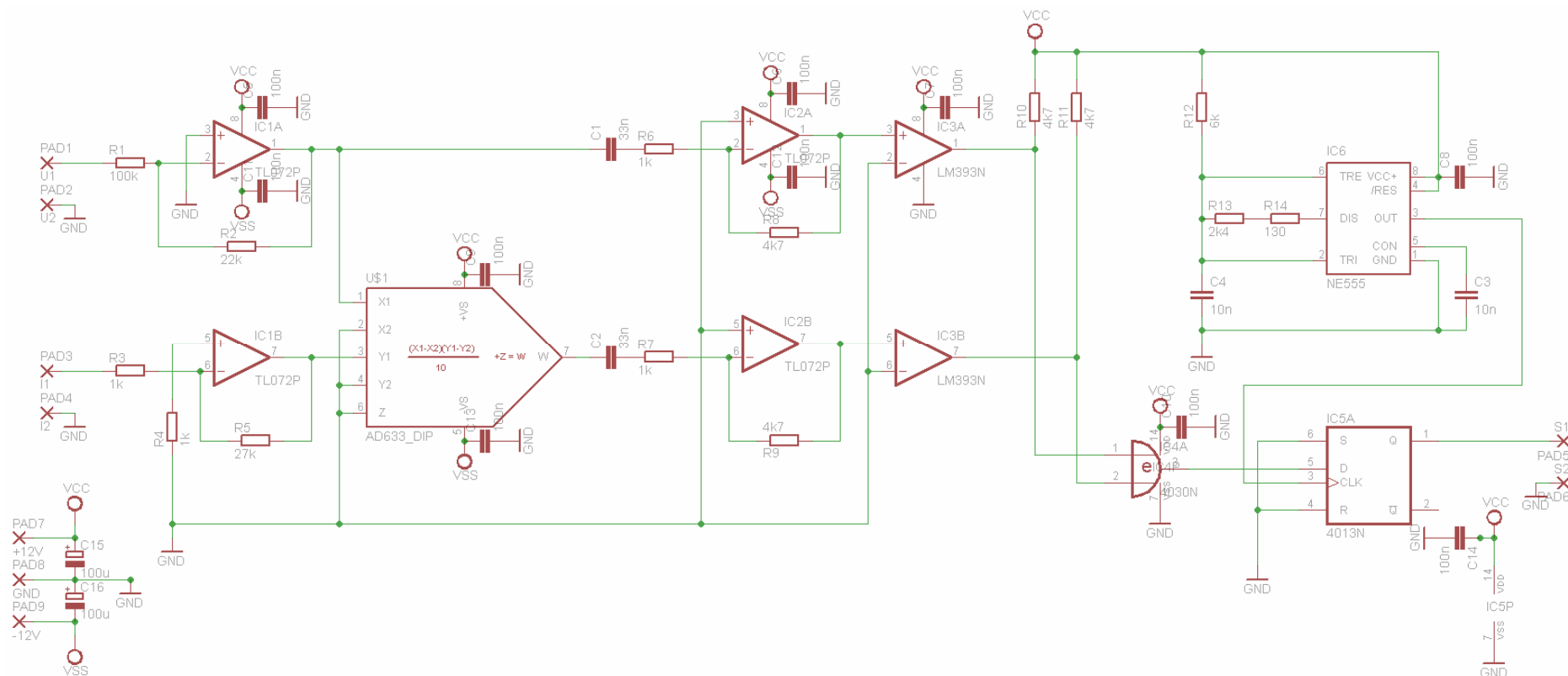
Obr. 4.2 Pohled na desku DC měniče ze strany spojů



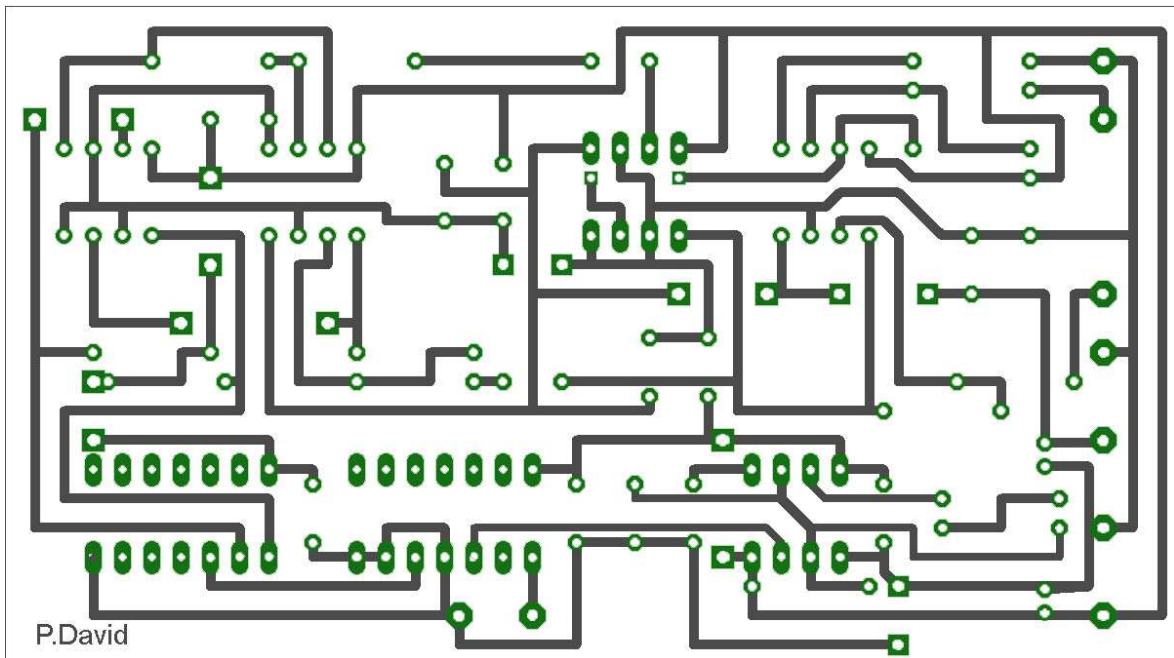
Obr. 4.3 Pohled na desku DC měniče ze strany součástek

4.2 MPPT regulátor

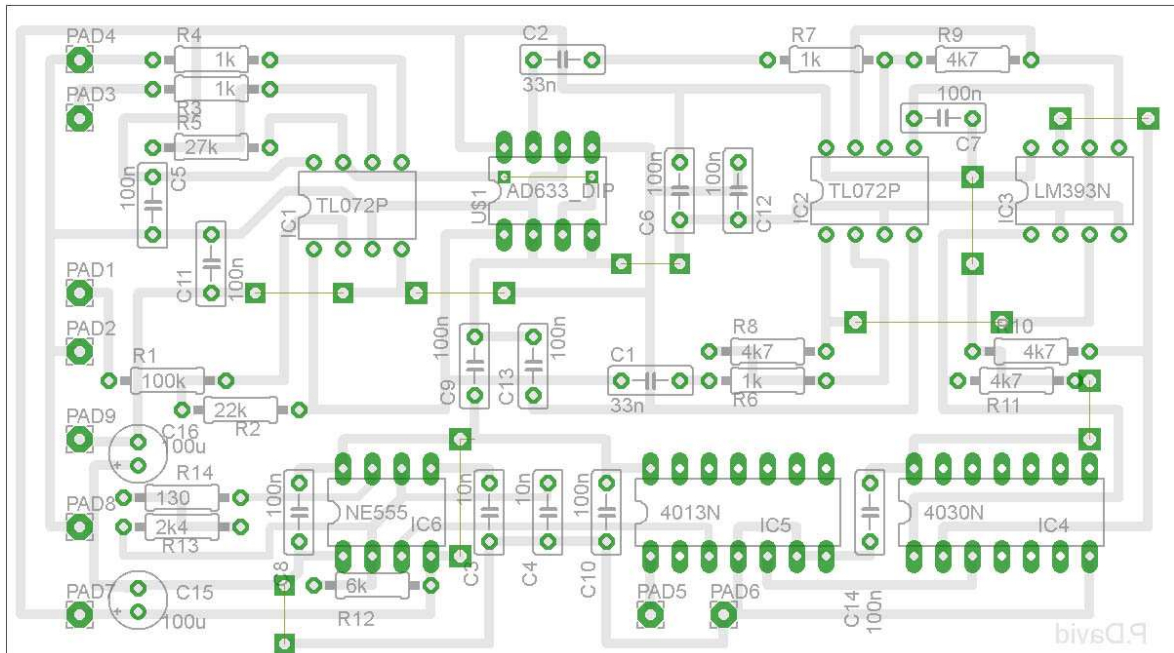
Schéma obvodu je znázorněno na obr. 4.4 , deska spojů na obr. 4.5 a rozložení součástek na obr. 4.6 .



Obr. 4.4 Schéma zapojení MPPT regulátoru



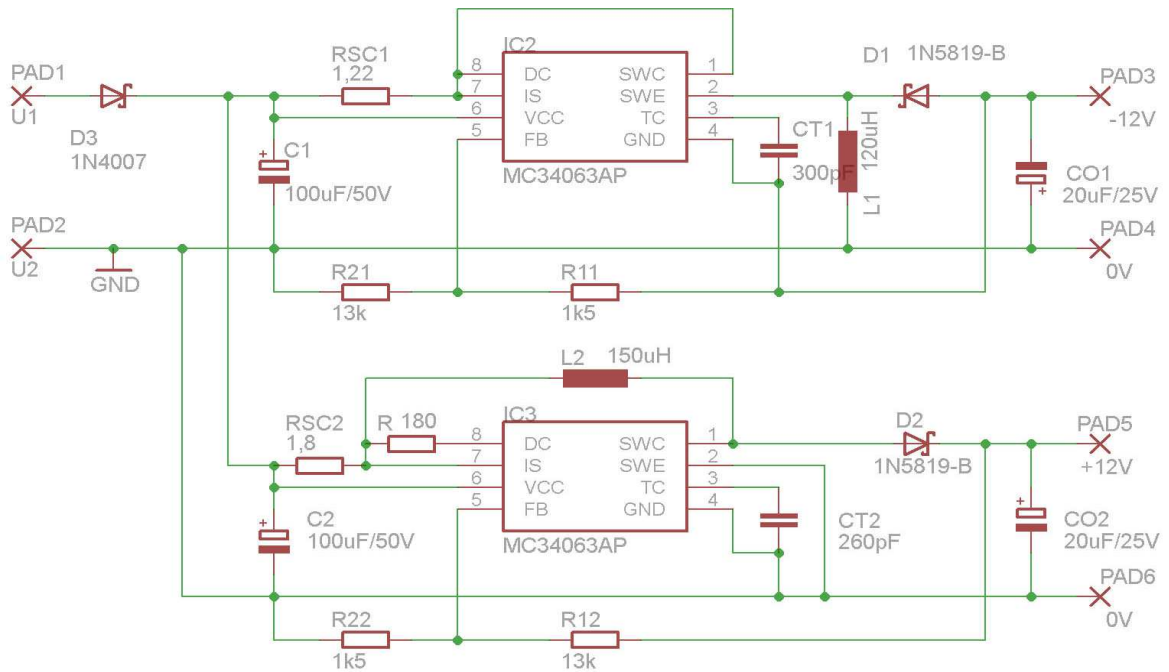
Obr. 4.5 Pohled na desku MPPT regulátoru ze strany spojů



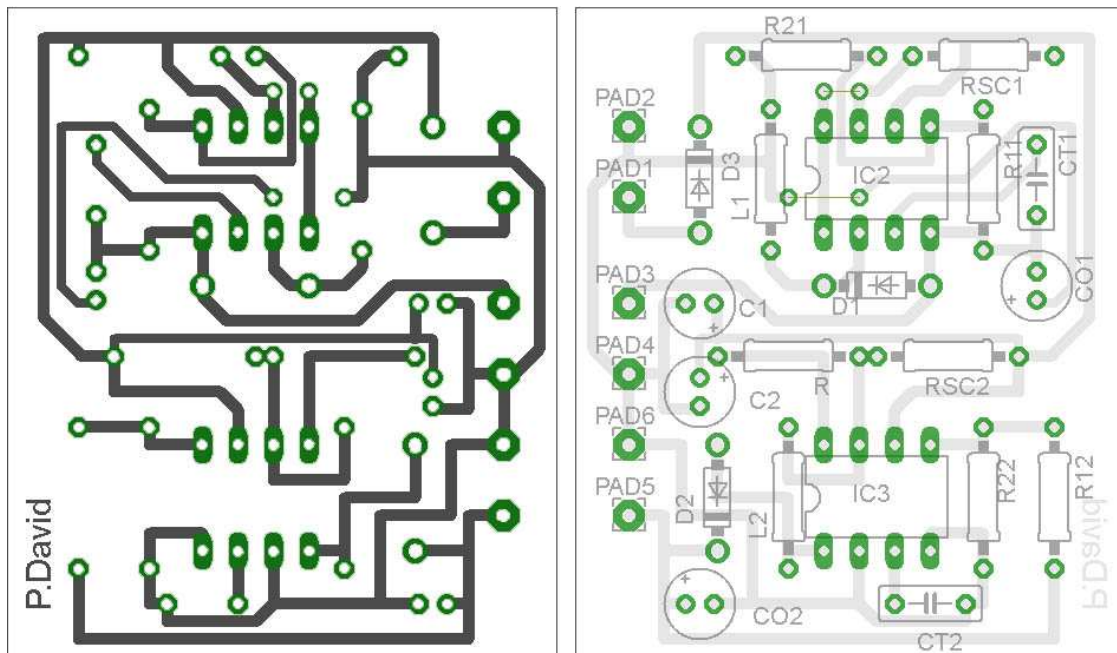
Obr. 4.6 Pohled na desku MPPT regulátoru ze strany součástek

4.3 Napájení MPPT regulátoru

Schéma obvodu je znázorněno na obr.4.7, deska spojů a rozložení součástek na obr.4.8.



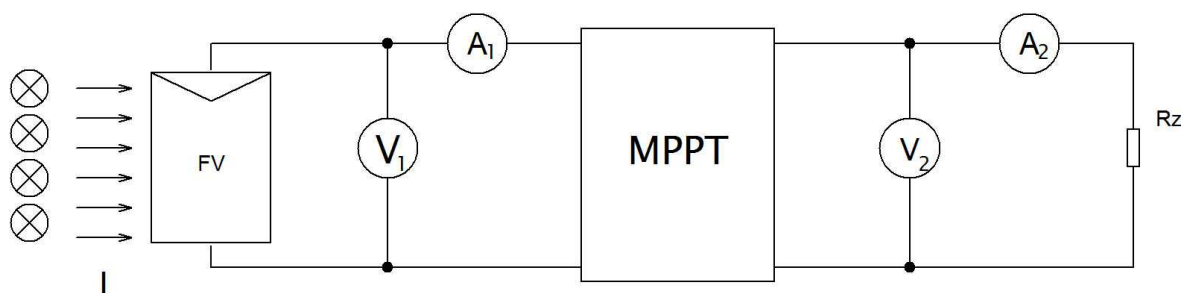
Obr. 4.7 Schéma zapojení DC měničů pro napájení MPPT regulátoru



Obr. 4.8 Pohled na desku DC měničů pro napájení MPPT regulátoru ze strany spojů a ze strany součástek

4.4 Ověření funkce MPPT

Fotovoltaický systém byl umístěn v solárním simulátoru osazeném čtyřmi halogenovými lampami o celkovém příkonu $900W$ ($I = 900W/m^2$). Schéma zapojení systému je uvedeno na obr. 4.9. Solární simulátor (příloha C) je vybaven řadou kombinujících karet, vytvářejících různá zapojení jednotlivých článků. Pro měřicí účely bylo zvoleno zapojení karet 72S a 36S-2P. Dále bylo použito i kontinuální halogenové lampy o příkonu $500W$ ($I = 500W/m^2$) za použití FV panelu Conrad12V/4W, kde zapojení systému bylo totožné. K měření V-A a V-P charakteristiky byl použit přístroj PROVA 210-solar module analyser. Měření bylo nejprve provedeno za použití externího napájení MPPT regulátoru a poté s vlastním napájením z měřeného FV panelu.



Obr. 4.9 Zapojení měřicího systému

Použité přístroje:

V_1, A_1 - Prova 210 - solar module analyser

V_2 - digitální multimeter METEX M-3630D

A_2 - digitální multimeter METEX M-3630D

Karta 72S - 72 článků zapojených v sérii

Karta 36S-2P - 72 článků, 4 sériové řetězce, každý řetězec 2 paralelní větve po 9 člancích

Naměřené a vypočtené hodnoty:

Tab. 10 FV panel Conrad 12V/5W

Conrad 12V/4W			
Prova 210	$U_{OC} = 19,27V$	$I_{SC} = 0,135A$	$P_{MAX} = 2,195W$
	$U_{MPP} = 16,44V$	$I_{MPP} = 0,134A$	
M-3630D	$U_2 = 5,35V$	$I_2 = 0,383A$	$P_{Rz} = 2,049W$
$\eta = 0,93$			
Napájení z FV panelu			
M-3630D	$U_2 = 8,78V$	$I_2 = 0,061A$	$P_{Rz} = 0,535W$

Tab. 8 FV panel - zapojení 72S

Karta 72S			
Externí napájení			
Prova 210	$U_{OC} = 35,88V$	$I_{SC} = 0,524A$	$P_{MAX} = 13,81W$
	$U_{MPP} = 29,29V$	$I_{MPP} = 0,472A$	
M-3630D	$U_2 = 13,44V$	$I_2 = 0,963A$	$P_{Rz} = 12,94W$
$\eta = 0,93$			
Napájení z FV panelu			
M-3630D	$U_2 = 12,03V$	$I_2 = 0,852A$	$P_{Rz} = 10,25W$

Tab. 9 FV panel - zapojení 36S-2P

Karta 36S-2P			
Externí napájení			
Prova 210	$U_{OC} = 18,47V$	$I_{SC} = 1,044A$	$P_{MAX} = 13,82W$
	$U_{MPP} = 15,45V$	$I_{MPP} = 0,905A$	
M-3630D	$U_2 = 12,79V$	$I_2 = 0,965A$	$P_{Rz} = 12,35W$
$\eta = 0,89$			
Napájení z FV panelu			
M-3630D	$U_2 = 12,08V$	$I_2 = 0,911A$	$P_{Rz} = 11,01W$

Vlastní spotřeba - výkonová bilance

Při sledování bodu maximálního výkonu byla změřena vlastní spotřeba zařízení :

Conrad 12V/4W

1) externí napájení

- výkon dodávaný FV panelem: 2,195W
- výkon odebíraný MPPT regulátorem: 0,38W
- výkon dodávaný do zátěže: 2,049W

2) napájení z FV panelu

- výkon dodávaný FV panelem: 2,195W
- výkon odebíraný napájecími DC měniči: 1,65W
- výkon odebíraný MPPT regulátorem: 0,38W
- výkon dodávaný do zátěže: 0,535W

Karta 72S

1) externí napájení

- výkon dodávaný FV panelem: 13,81W
- výkon odebíraný MPPT regulátorem: 0,38W
- výkon dodávaný do zátěže: 12,94W

2) napájení z FV panelu

- výkon dodávaný FV panelem: 13,81W
- výkon odebíraný napájecími DC měniči: 2,93W
- výkon odebíraný MPPT regulátorem: 0,38W
- výkon dodávaný do zátěže: 10,25W

Karta 36S-2P

1) externí napájení

- výkon dodávaný FV panelem: 13,82W
- výkon odebíraný MPPT regulátorem: 0,38W
- výkon dodávaný do zátěže: 12,35W

2) napájení z FV panelu

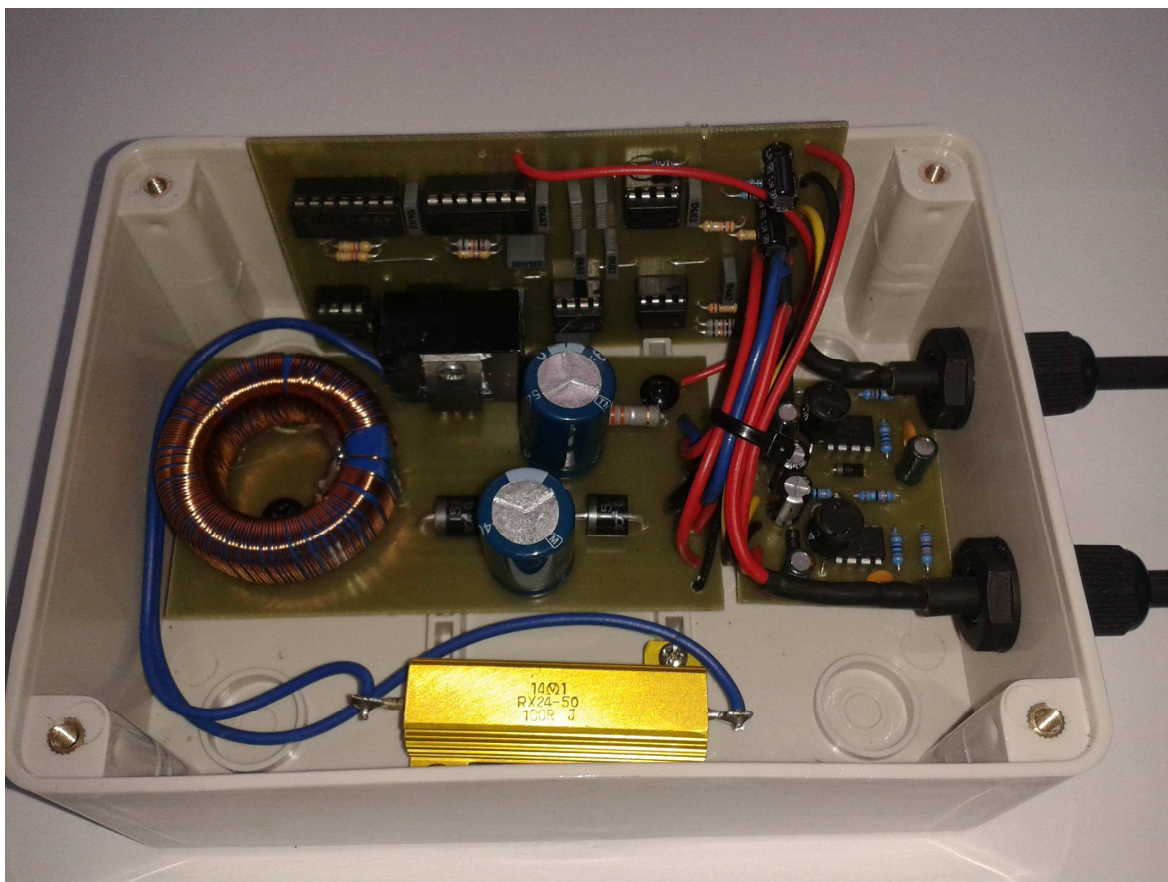
- výkon dodávaný FV panelem: 13,82W
- výkon odebíraný napájecími DC měniči: 1,55W
- výkon odebíraný MPPT regulátorem: 0,38W
- výkon dodávaný do zátěže: 11,01W

Z naměřených a vypočítaných hodnot je patrné, že při napájení zařízení z externího zdroje je účinnost vyhledání MPP vysoká, pohybuje se v okolí 93%. Je nutné brát ohled na výkonové ztráty snižujícího měniče, jako je úbytek na blokující diodě, akumulací indukčnosti a spínacího tranzistoru v sepnutém režimu, které nám snižují celkovou účinnost zařízení.

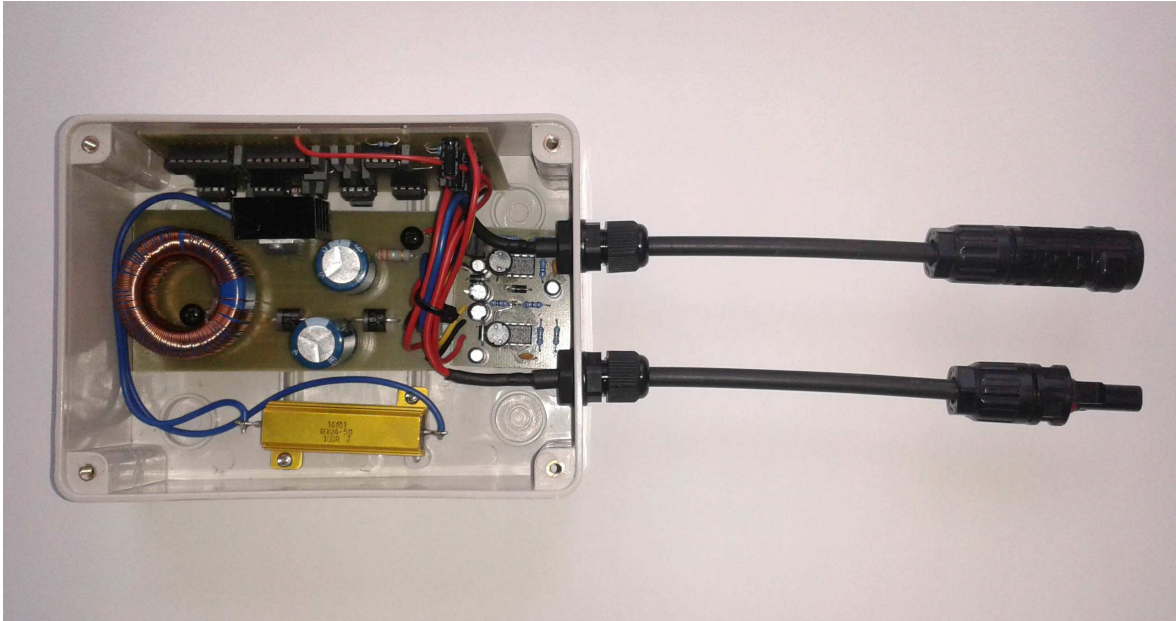
Z naměřených a vypočítaných hodnot při napájení z testovaného FV panelu je patrné, že nebyla zvolena vhodná volba pro vytvoření symetrického napájení MPPT regulátoru. Vlastní spotřeba MPPT regulátoru činí $U = +12V$, $I = 23mA$, $P = 0,27W$ a pro záporné napětí $U = -12V$, $I = 9mA$, $P = 0,11W$. DC měniče pro vytvoření symetrického napájení spolu s vlastní spotřebou MPPT regulátoru odebírají z testovaného panelu proud $I = 100mA$, což představuje u FV panelů malých výkonů značný proud. S ohledem na tuto skutečnost byl teoreticky navržen nový DC měnič pro napájení vlastní spotřeby zařízení, který nepřesahuje odebíraný proud $I = 50mA$ a zároveň je schopen pracovat v rozsahu FV panelů o jmenovitém výstupním napětí $U = 14 - 250V$ a tím řeší i otázku možnosti připojení jakéhokoliv komerčně vyráběného panelu na trhu. (příloha B)

4.5 Konstrukce zařízení

Konečné zařízení je složeno ze třech samostatných bloků: napájecí část, MPPT regulátor a DC měnič. Pro účely návrhu plošných spojů byl použit návrhový systém Eagle, samostatné plošné spoje byly poté vyfrézovány pomocí CNC frézky. Vzhledem k tomu, že zařízení má být schopné dlouhodobé činnosti ve venkovním prostředí, byly parametry součástek vybírány v teplotním rozsahu $t = -25^{\circ}\text{C}$ až 75°C , veškeré plošné spoje byly nadále opatřeny po osazení ochranou vrstvou rychleschnoucím průsvitným akrylátovým lakem (plastik 70-super), který zabraňuje působení vlhkosti a atmosférických vlivů. Celé zařízení bylo poté umístěno do plastové průmyslové krabičky IP65 U-01-40. Do krabičky byly vyvrtány dva otvory o průměru 12mm pro umístění kabelových průchodek IP68 o vnitřním průměru 8,3mm. Kabelovými průchodkami byly prostrčeny solární kabely o délce 20cm na koncích opatřené konektory pro solární panely MC-4. Vnitřní uspořádání přípravku je uvedeno na obr. 4.10 a na obr. 4.11.



Obr. 4.10 Vnitřní uspořádání přípravku



Obr. 4.11 Vnitřní uspořádání přípravku - celkový pohled

Závěr

V této práci byl nejprve probrán princip činnosti FVČ, jeho náhradní schéma spolu s matematickým popisem a vysvětlením jednotlivých parametrů. Dále byly popsány všechny charakteristické parametry, jimiž lze každý FV panel popsat a zobrazeny typické průběhy charakteristik FVČ.

Následující částí teoretického rozboru bylo provést rešerši metod hledání bodu maximálního výkonu MPPT, problematiku vyhledávání a složitost implementace. Celkem bylo popsáno 11 nejpoužívanějších metod a zbylé metody byly uvedeny v závěru kapitoly pomocí shrnující tabulky spolu s popsány metodami.

Po rešerši metod sledování bodu maximálního výkonu byla pro praktickou realizaci vybrána metoda RCC - ripple correlation controll. Díky možnosti sestavit zařízení pomocí jednoduchých analogových obvodů a nízké náročnosti implementace ale především i na nezávislosti na parametrech FV panelu. Návrh byl rozdělen do tří částí. V první části se jednalo o zjištění parametrů testovaného FV panelu. S parametry FV panelu úzce souvisela i druhá část - DC měnič. Pro návrh byl zvolen snižující měnič, jehož parametry byly zvoleny a vypočteny v závislosti na testovaném FV panelu. V souladu s možností připojení libovolného FV panelu, lze tyto parametry jednoduše přepočítat pomocí výše uvedených vzorců. Následující část návrhu se týkala MPPT regulátoru, byly popsány a znázorněny jednotlivé části obvodu spolu s jejich samostatnou funkcí a následně i jako celek. Poslední návrhovou částí bylo umožnit činnost celého zařízení nezávisle na externím napájení. Zařízení tedy muselo být schopno pracovat pouze z napájení zprostředkovaného testovaným FV panelem.

Poslední bodem práce byl praktický návrh plošných spojů jednotlivých bloků zařízení pomocí programu Eagle, jejich následné osazení, oživení a ošetření proti atmosférickým vlivům. Celý výrobek byl pak umístěn do průmyslové krabičky s odpovídajícím stupněm krytí IP.

Na finálním výrobku bylo provedeno měření a ověření činnosti celého zařízení. Kromě testovaného panelu bylo díky navrženým parametrům DC měniče možné otestovat ještě dvě sady FV panelů pomocí solárního simulátoru.

Z naměřených hodnot bylo zjištěno, že zvolená forma návrhu pro napájení MPPT regulátoru z FV panelu má pro panely nízkých výkonů vysoký proudový odběr, po změření činila tato hodnota $100mA$, což pro testovaný panel Conrad $12V / 4W$ bylo v námi použité kombinaci halogenového zdroje osvětlení o intenzitě $I = 500W / m^2$ na hranici generovaného proudu. Pro měření byl tedy použit i externí zdroj napětí. Odběr proudu samostatného regulátoru byl pro kladné napájení $23mA$ a pro záporné napětí $9mA$. Zbývající dvě kombinace FV panelů byly změřeny pomocí napájení z testovaného FV panelu a pro porovnání i za použití externího zdroje. Z naměřených a vypočítaných hodnot je patrné, že zařízení pracuje v MPP s maximální účinností 93%.

S ohledem na vyšší spotřebu napájecího obvodu napájeného z FV panelu, byl proveden nový teoretický návrh. Nově navržený měnič má 2x nižší spotřebu než původní a díky širokému rozsahu vstupního napětí pokryje celou škálu průmyslově vyráběných FV panelů.

Použitá literatura

1. MASTNÝ, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jan MACHÁČEK, Michal PTÁČEK, Lukáš RADIL, Tomáš BARTOŠÍK a Tomáš PAVELKA. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 254 s. ISBN 978-80-01-04937-2.
2. BANNERT, Petr. *Praktika z fotovoltaiky* [online]. 2008 [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: http://is.muni.cz/el/1441/jaro2011/FY2BP_EkO/um/praktika_z_fotovoltaiky.pdf
3. T. Eram, P.L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 2, pp. 439-449, June 2007.
4. Y. H. Lim and D. Hamill, "Simple maximum power point tracker for photovoltaic arrays," *Electronics Letters*, vol. 36, pp. 997-999, May 2000.
5. Katalogový list AD633 [online]. [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD633.pdf
6. Free 555 Timer Calculator. [online]. [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: http://www.schematica.com/555_timer_design/555_timer_free.html
7. MC34063 Calculator Online & Step-Down, Step-Up, Inverter. [online]. [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: <http://www.bobtech.ro/tutoriale/componente-electronice/43-calculator-online-mc34063a-mc34063-step-down-step-up-inverter>
8. JURÁNEK, Antonín a Miroslav HRABOVSKÝ. *EAGLE pro začátečníky: uživatelská a referenční příručka*. 2. vyd. Praha: BEN-technická literatura, 2007. ISBN 80-7300-213-2.

9. 2-transistor Black Regulator. [online]. [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: <http://www.romanblack.com/smpps/smpps.htm>
10. KREJČIŘÍK, Alexandr. *Spínané zdroje s časovačem 555*. Praha: BEN - technická literatura, 1999, 127 s. ISBN 80-860-5676-7.

Seznam obrázků

- Obr. 1.1 Náhradní model FVČ, převzato z [2]
- Obr. 1.2 V-A charakteristika FVČ, převzato z [2]
- Obr. 2.1 V-A charakteristika FVČ pro různé intenzity ozáření, převzato z [2]
- Obr. 2.2 Vliv teploty na V-A charakteristiku FVČ, převzato z [2]
- Obr. 2.3 Výkonové charakteristiky FVČ pro různé intenzity ozáření, převzato z [2]
- Obr. 2.4 Vliv teploty na výkonovou charakteristiku FV panelu, převzato z [2]
- Obr. 2.5 Chování algoritmu P&O, převzato z [2]
- Obr. 2.6 Vývojový diagram algoritmu P&O (U_{ref} napětí při kterém FVP pracuje) [2]
- Obr. 2.7 Hodnota a polarita směrnice (derivace) výkonu podle napětí, převzato z [2]
- Obr. 2.8 Vývojový diagram algoritmu INC (U_{ref} je napětí při kterém FVP pracuje)
- Obr. 2.9 Ovládání MPPT pomocí vstupních parametrů, převzato z [3]
- Obr. 2.10 Ovládání MPP pomocí výstupních parametrů, převzato z [3]
- Obr. 2.11 Typy zátěží, převzato z [3]
- Obr. 2.12 Blokové zapojení DC-Link Capacitor Droop Voltage, převzato z [2]
- Obr. 3.1 Blokové schéma systému
- Obr. 3.2 Typické zapojení snižujícího měniče
- Obr. 3.3 Snižující měnič s FV panelem
- Obr. 3.4 Upravené schéma snižujícího měniče
- Obr. 3.5 Blokové schéma MPPT
- Obr. 3.6 Zapojení invertujícího zesilovače (napětí)
- Obr. 3.7 Zapojení invertujícího zesilovače (proud)
- Obr. 3.8 Vnitřní struktura AD633, převzato z [5]
- Obr. 3.9 Zapojení analogové násobičky
- Obr. 3.10 Zapojení derivačních zesilovačů
- Obr. 3.11 Zapojení komparátorů
- Obr. 3.12 Zapojení hradla s posilovacími odpory
- Obr. 3.13 Zapojení KO-D (Flip-Flop)
- Obr. 3.14 Astabilní klopný obvod s časovačem SA555
- Obr. 3.15 Blokové schéma MPPT
- Obr. 3.16 P-U,I charakteristika FV panelu

- Obr. 3.17 Kompletní schéma MPPT regulátoru
- Obr. 3.18 Schéma DC měniče pro napájení MPPT
- Obr. 4.1 Schéma DC měniče
- Obr. 4.2 Pohled na desku DC měniče ze strany spojů
- Obr. 4.3 Pohled na desku DC měniče ze strany součástek
- Obr. 4.4 Schéma zapojení MPPT regulátoru
- Obr. 4.5 Pohled na desku MPPT regulátoru ze strany spojů
- Obr. 4.6 Pohled na desku MPPT regulátoru ze strany součástek
- Obr. 4.7 Schéma zapojení DC měničů pro napájení MPPT regulátoru
- Obr. 4.8 Pohled na desku DC měničů pro napájení MPPT regulátoru ze strany spojů
a ze strany součástek
- Obr. 4.9 Zapojení měřícího systému
- Obr. 4.10 Vnitřní uspořádání přípravku
- Obr. 4.11 Vnitřní uspořádání přípravku - celkový pohled
- Obr. 5.1 Zapojení snižujícího měniče
- Obr. 5.2 Zapojení invertujícího měniče
- Obr. 5.3 Pracoviště solárního simulátoru
- Obr. 5.4 Zapojení karet 72S a 36S-2P FV panelu

Seznam tabulek

Tab. 1	Chování algoritmu P&O
Tab. 2	Pravdivostní tabulka, převzato z [3]
Tab. 3	Přehled metod MPPT a jejich parametrů, převzato z [3]
Tab. 4	Stavy výstupů komparátorů
Tab. 5	Pravdivostní tabulka hradla XOR
Tab. 6	Pravdivostní tabulka D-F/F
Tab. 7	Stavy MPPT [4]
Tab. 8	FV panel - zapojení 72S
Tab. 9	FV panel - zapojení 36S-2P
Tab. 10	FV panel Conrad 12V/4W
Tab. 11	Seznam součástek DC měnič
Tab. 12	Seznam součástek MPPT regulátor
Tab. 13	Seznam součástek napájení MPPT regulátoru

Seznam zkratek

FV	-	fotovoltaický
MPP	-	maximum power point
MPPT	-	maximum power point tracking
FVČ	-	fotovoltaický článek
P&O	-	perturb and observe
INC	-	incremental conductance
PI	-	proporcionálně integrační
DSP	-	digitální signálový procesor
RCC	-	ripple correlation controll
KO	-	klopný obvod
IP	-	ingress protection (stupeň krytí)

Přílohy

- A Seznam součástí
- B Návrh napájení z FV panelu
- C Solární simulátor
- D Obsah přiloženého CD

Příloha A - Seznam součástek

Tab. 11 Seznam součástek DC měnič

Označení	Vypočítaná, zadaná hodnota	Katalog GM (pouzdro)	Orientační cena [Kč]
C1	470uF/63V	12,5x20 RM5	10,00
C2	470uF/50V	12,5x20 RM5	7,30
D1	1N5822	1N5822	2,80
D2	1N5822	1N5822	2,80
D3	1N5819	1N5819	2,20
L1	2,2mH	DTMSS-40/2.2/1.2-V	99,00
T1	BUZ11	BUZ11	22,00
R2	0,47Ω/2W	RR W2 E00.47	3,40
Rz	15Ω/50W	RR W50 15R TYCO	60,00
Celkem			210,-Kč

Tab. 12 Seznam součástek MPPT regulátor

Označení	Vypočítaná, zadaná hodnota	Katalog GM (pouzdro)	Orientační cena [Kč]
C1	33nF/100V	CF2-33N/J	1,68
C2	33nF/100V	CF2-33N/J	1,68
C3	10nF/100V	CF2-10N/J	1,68
C4	10nF/100V	CF2-10N/J	1,68
C5	100nF/100V	CF1-100N/J	1,68
C6	100nF/100V	CF1-100N/J	1,68
C7	100nF/100V	CF1-100N/J	1,68
C8	100nF/100V	CF1-100N/J	1,68
C9	100nF/100V	CF1-100N/J	1,68
C10	100nF/100V	CF1-100N/J	1,68
C11	100nF/100V	CF1-100N/J	1,68
C12	100nF/100V	CF1-100N/J	1,68
C13	100nF/100V	CF1-100N/J	1,68
C14	100nF/100V	CF1-100N/J	1,68
C15	100uF/25V	6,3x11 RM2,5	1,68

C16	100uF/25V	6,3x11 RM2,5	1,68
IC1	TL072	TL072	9,00
IC2	TL072	TL072	9,00
IC3	LM393N	LM393	7,00
IC4	4030N	4030 DIP14	5,00
IC5	4013N	4013 DIL14	9,00
IC6	NE555	NE555	6,00
R1	100k	RRU 100R 0207	2,24
R2	22k	RRU 22R 0207	2,24
R3	1k	RRU 1K 0207	2,24
R4	1k	RRU 1K 0207	2,24
R5	27k	RRU 27K 0207	2,24
R6	1k	RRU 1K 0207	2,24
R7	1k	RRU 1K 0207	2,24
R8	4k7	RRU 4K7 0207	2,24
R9	4k7	RRU 4K7 0207	2,24
R10	4k7	RRU 4K7 0207	2,24
R11	4k7	RRU 4K7 0207	2,24
R12	6k	RR 6K 0207	2,24
R13	2k4	RR 2K4 0207	2,24
R14	130	RR 130R 0207	2,24
US1	AD633	AD633JNZ	193
Celkem			297,-Kč

Tab. 13 Seznam součástek napájení MPPT regulátoru

Označení	Vypočítaná, zadaná hodnota	Katalog GM (pouzdro)	Orientační cena [Kč]
C1	100uF/16V	HIT-ECR 5x11 RM2	1,12
C2	100uF16V	HIT-ECR 5x11 RM2	1,12
C3	10uF/50V	HIT-ECR 5x11 RM2	1,12
C01	22uF/25V	HIT-ECR 5x11 RM2	1,12
C02	22uF/25V	HIT-ECR 5x11 RM2	1,12
CT1	330pF/100V	CK 330p/100V	1,68
CT2	270pF/100V	CK 27p/100V	1,68

D1	1N5819	1N5819	2,20
D2	1N5819	1N5819	2,20
D3	1N4007	1N4007	1,20
IC2	MC34063AP	MC34063AP1 DIP8	12,70
IC3	MC34063AP	MC34063AP1 DIP8	12,70
L1	330uH	09P-331K	13,00
L2	330uH	09P-331K	13,00
R	180	RRU 180R 0207	2,24
R11	1k5	RRU 1K5 0207	2,24
R12	13k	RRU 13K 0207	2,24
R21	13k	RRU 13K 0207	2,24
R22	1k5	RRU 1K5 0207	2,24
RSC1	1,22	RRU 1R22 0207	2,24
RSC2	1,8	RRU 1R8 0207	2,24
Celkem			82,-Kč

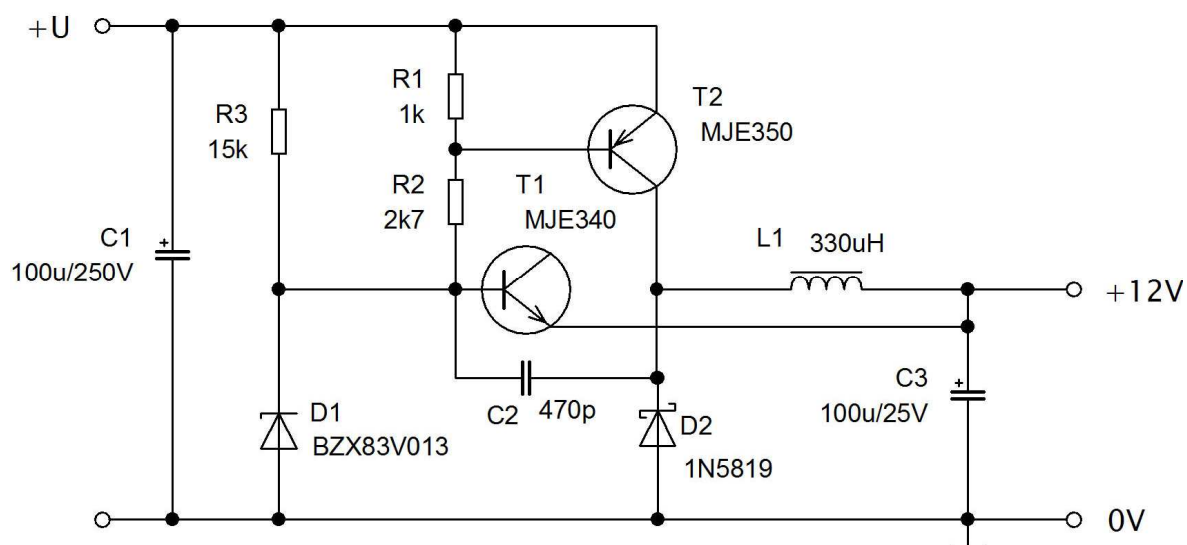
Tab. 14 Konstrukční materiál

Označení	Katalog GM (pouzdro)	Orientační cena [Kč]
Plastová krabička	IP65 U-01-40	93,00
MC 4 PLUS lisovaný 0,8m	MC 4 PLUS	29,00
MC 4 MINUS lisovaný 0,8m	MC 4 MINUS	29,00
Celkem		151,-Kč

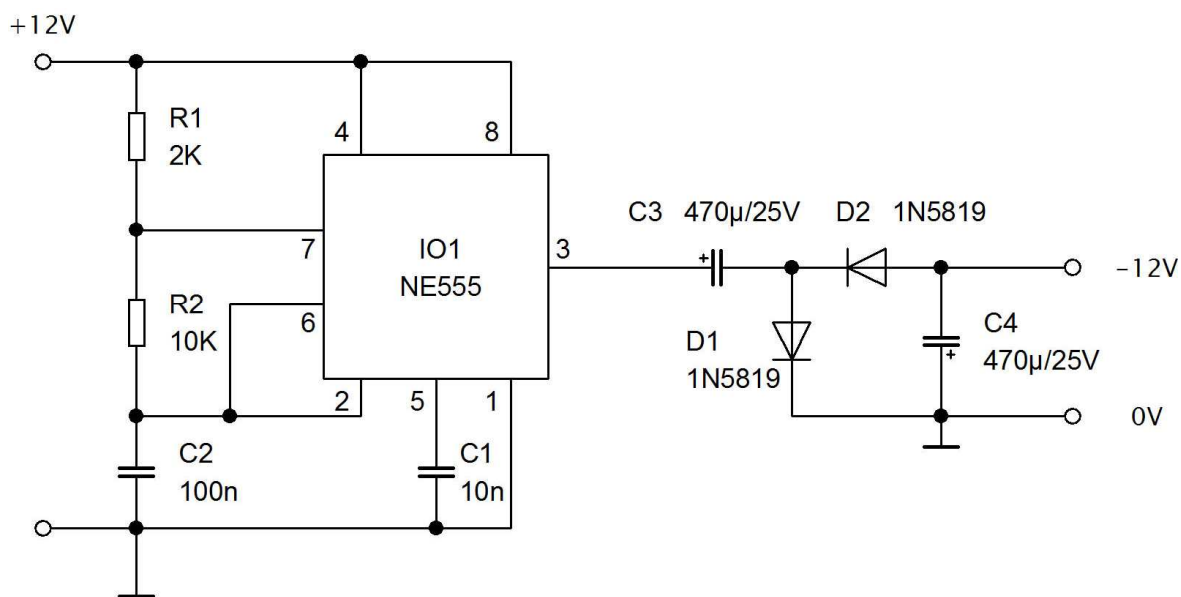
Celková cena zhotoveného výrobku činí 740Kč.

Příloha B - Návrh napájení z FV panelu

Na obr. 5.1 je uvedeno zapojení snižujícího měniče pracujícího v širokém rozmezí vstupního napětí [9] , omezení velikosti vstupního napětí je dáno vhodnou volbou tranzistorů, v našem případě jsou zvoleny tranzistory s velikostí napětí $U_{CE} = 300V$. K vytvoření záporného napětí je použit známý obvod NE555 pracující jako prostý invertor (nábojová pumpa) zapojený podle obr. 5.2 . Velikost výstupního napětí by měla být v absolutní hodnotě velikost vstupního napětí. Ve skutečnosti je výstupní napětí závislé na odebraném proudu a úbytcích napětí na koncových tranzistorech obvodu 555 spolu s úbytky na diodách D1 a D2. Výstupní napětí bude tak mít hodnotu kolem 10V.[10]



Obr. 5.1 Zapojení snižujícího měniče



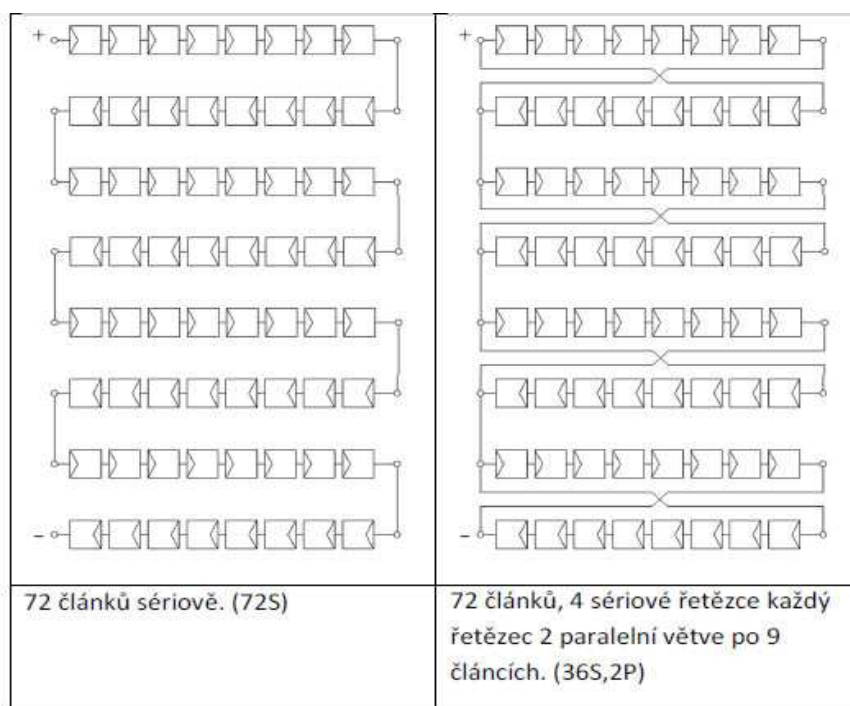
Obr. 5.2 Zapojení invertujícího měniče

K ověření výsledků návrhu byla provedena simulace pomocí programu Micro-Cap 10. Celková spotřeba zařízení i s připojeným MPPT regulátorem činila 48mA. Tento návrh napájení z FV panelu má tak 2x nižší spotřebu než původní navrhovaná forma napájení. Díky tomu lze systém použít i pro FV panely s nízkými hodnotami výstupního proudu. Jedinou nevýhodou je nutnost napětí minimálně 14V na výstupu FV panelu díky hodnotě symetrického napájení $\pm 12V$.

Příloha C - Solární simulátor



Obr. 5.3 Pracoviště solárního simulátoru



Obr. 5.4 Zapojení karet 72S a 36S-2P FV panelu

Příloha D - Obsah přiloženého CD

K této práci je přiloženo CD, na kterém je soubor *David_Petr.pdf*: Tento dokument.