

X

**SOLÁRNÍ NABÍJEČ LIION ČLÁNKŮ SE SLEDOVÁNÍM BODU
MAXIMÁLNÍHO VÝKONU SOLÁRNÍHO ČLÁNKU**

Luděk Tomíšek

ČVUT V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektrotechnologie

1 Úvod

Žijeme v době, kdy je elektrická energie z rozvodné sítě dostupná na každém rohu, ale existuje ještě nespočet míst, kde bychom síťovou zásuvku hledali marně. Přenosná elektronická zařízení jsou dnes běžným doplňkem každého člověka. Jsou to mobilní telefony, hudební a video přehrávače, notebooky, kamery, fotoaparáty, GPS navigace či nářadí a jsou napájená převážně z akumulátorů. V současné době jsou pro mobilní zařízení nejpoužívanější akumulátory Li-Ion a to pro svoji vysokou kapacitu při malých rozměrech a nízkou váhu.

Pokud se ale delší dobu pohybujeme v oblasti, kde není ona pohodlná síťová zásuvka a my nemáme kde svůj „mobil“ nabít, můžeme využít alternativního zdroje energie, jakým je sluneční záření.

Tato diplomová práce pojednává o návrhu a realizaci solárního nabíječe Li-Ion akumulátorů se sledováním bodu maximálního výkonu solárního článku. Pojem „sledováním bodu maximálního výkonu“ znamená zatěžování solárního článku tak, aby jeho výkon byl maximální i při změnách intenzity ozáření.

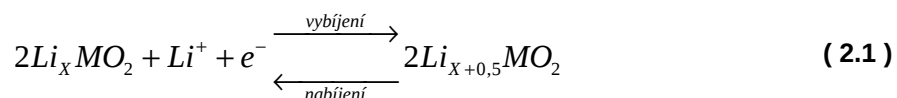
2 Li-Ion akumulátory a jejich nabíjení

Lithiový článek byl vynalezen v polovině šedesátých let. Nejprve jako článek primární a po mnoha pokusech i jako sekundární – dobíjitelný (akumulátor). Vývojem materiálů používaných pro výrobu kladné a záporné elektrody se kvalita akumulátorů zlepšovala až k současným parametrům.

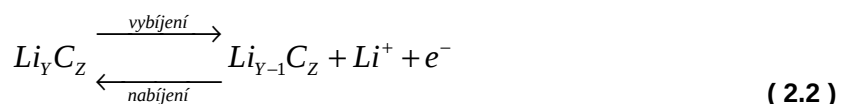
2.1 Princip činnosti

Název Li-Ion vznikl spojením chemické značky lithia - Li, které je základním materiálem článku a slova iont – Ion a to proto, že při nabíjení se ionty Li^+ přesouvají z kladné elektrody na zápornou a při vybíjení naopak. Jako materiál záporné elektrody se používá směs uhlíku obohaceného lithiem a polyolefiny. Pro kladnou elektrodu se používají materiály LiCoO_2 , $\text{Li}_x\text{Mn}_2\text{O}_4$, LiNiO_2 , LiV_2O_5 a další. Elektrolyt může být kapalný, gelový nebo polymerový. Nejčastěji používaným elektrolytem je LiPF_6 rozpuštěný v nepolárním rozpouštědle (uhlovodíky, chloroform, benzen apod.). Elektrochemické děje lze zjednodušeně popsat následujícími rovnicemi.

Pro kladnou elektrodu:



A pro zápornou elektrodu:



2.2 Základní charakteristiky

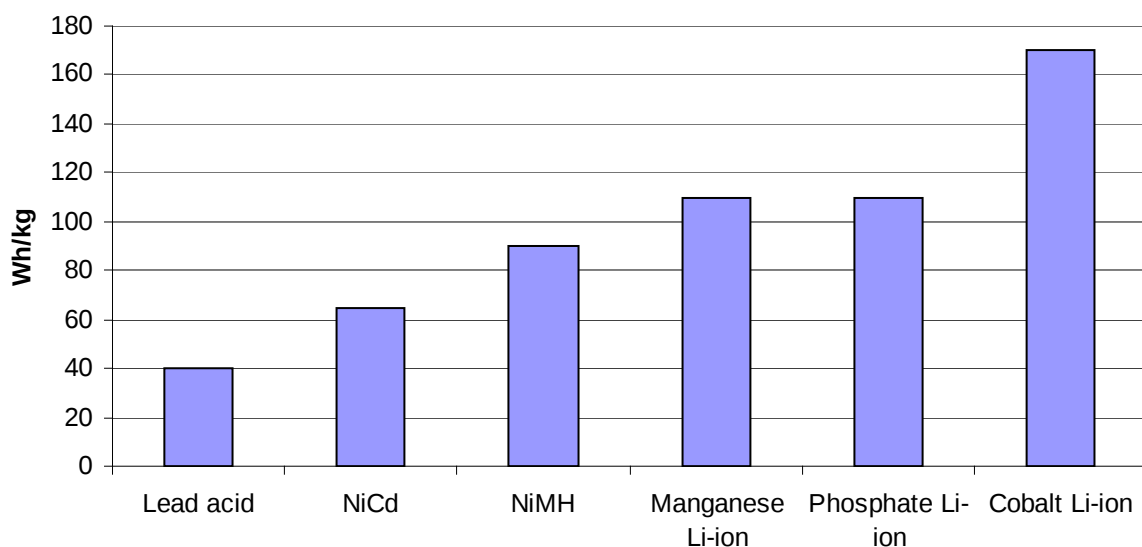
Jmenovité napětí Li-Ion akumulátorů je 3,7 V. Díky tomu v porovnání s ostatními typy akumulátorů jako jsou NiCd a NiMH dokážou uchovat mnohem více energie. Například akumulátor NiMH velikosti 4/3AF má jmenovité napětí 1,2 V a kapacitu 4500 mAh, dodá tedy energii 5400 mWh, oproti tomu akumulátor Li-Ion stejné velikosti i při kapacitě 2000 mAh dodá energii 7400 mWh.

Tyto akumulátory mají dále v porovnání s ostatními typy:

- nižší hmotnost
- delší životnost (500 až 1500 cyklů)
- malé samovybíjení (okolo 8% za měsíc)
- nemají paměťový efekt

Další parametry mohou být v závislosti na druhu použití pokládány za nevýhody.

- Maximální nabíjecí proud $1,5 \times C_p$
- Maximální vybíjecí proud $2 \times C_p$
- Pokles napětí v průběhu vybíjení
- Velký vnitřní odpor v porovnání s NiCd a NiMH
- Při poklesu napětí pod povolenou mez dochází k trvalému znehodnocení akumulátoru
- Při překročení dovoleného napětí při nabíjení dochází k destrukci akumulátoru



Obr. 2.1: Porovnání hustot energií (přepřacováno z [4])

Konečné nabíjecí napětí může být v závislosti na složení kladné elektrody v rozsahu 4 až 4,3 V. Většina akumulátorů Li-Ion je vybavena elektronikou, která zasáhne při případném přebíjení nebo podvybíjení.

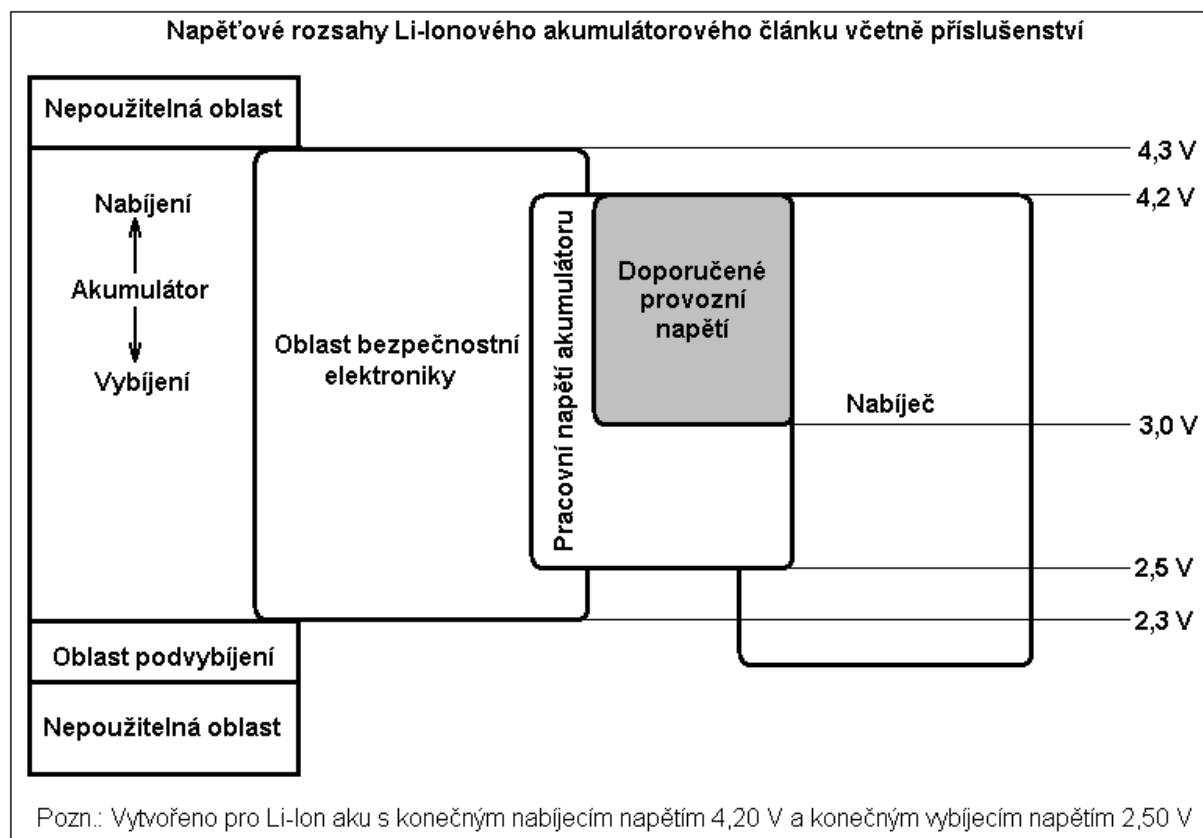
Jak již bylo zmíněno v úvodu, Li-Ion akumulátory se dnes využívají zejména v komerčních přenosných zařízeních, a proto jde další vývoj stále kupředu k lepším parametrům. Velké úsilí je vynakládáno i při vývoji akumulátorů pro dopravní prostředky, zejména elektromobily. Li-ionové akumulátory se vyrábějí především ve

dvou tvarových variantách a to jsou válcové a prizmatické. Vznik prizmatických byl podnícen zejména výrobci mobilních telefonů.

2.3 Provoz Li-Ion akumulátorů

Při návrhu spotřebičů používající akumulátorové články Li-Ion se nelze spolehnout na obecně známé hodnoty konečných napětí při vybíjení (2,5 V) a při nabíjení (4,15 V). Každý výrobce používá různé materiály a tak se liší i parametry akumulátorů. Při konstrukci jak spotřebičů tak i nabíječů je tedy třeba brát ohled na konkrétní katalogové údaje použitého akumulátoru, aby byl optimálně využíván.

Překračování napětí na akumulátoru při nabíjení způsobuje jeho nevratné poškození a při hrubém překročení maximálního napětí může způsobit vznik požáru či explozi. Překračování dolní hranice pracovního napětí vede k snížení životnosti akumulátoru. Pokud akumulátor není vybaven ochrannou elektronikou již od výroby je třeba ho doplnit obvody, které zajistí jeho odpojení v případě podvybíjení či přebíjení.



Obr. 2.2: Napět'ové rozsahy Li-Ion akumulátoru a jeho příslušenství (převzato z [1])

2.4 Metody nabíjení Li-Ion akumulátorů

Obecně má průběh nabíjení akumulátorů vliv na většinu jejich vlastností, a to zejména na životnost.

Veličiny, které mají největší vliv na životnost akumulátorů jsou:

- Maximální nabíjecí / vybíjecí proud
- Maximální napětí při nabíjení
- Minimální napětí při vybíjení
- Doba nabíjení
- Teplota (při nabíjení, skladování, vybíjení)

Překračováním mezních hodnot uvedených veličin vede buď k postupnému nebo jednorázovému trvalému zhoršení parametrů nebo poškození.

Pro nabíjení Li-Ionových akumulátorů je nejvhodnější použít metodu CCCV (Constant Current followed by Constant Voltage), označovanou také jako IU. Jedná se o postup, kdy se akumulátor nabíjí nejprve konstantním proudem a až dosáhne maximálního napětí (nejčastěji 4,15 V), pak nabíjení přejde do fáze, kdy se na akumulátoru udržuje konstantní napětí až do doby, kdy nabíjecí proud klesne pod stanovenou hodnotu.

Nabíjení konstantním proudem

nabíjení	proud [x C _P]	doba [h]	teplota [°C]
normální	0,1	12 až 16	0 až 50
zrychlené	0,3	4 až 8	5 až 50
rychlé	0,5	1 až 2	10 až 40
velmi rychlé*	1 až 4	¼ až 1	-
trvalé	0,05 až 0,06(0,1)	-	-
konzervační	0,025 až 0,05	-	-

Tab. 2.1: Přehled režimů proudových nabíjení (pro všechny druhy hermetických akumulátorů)

(* pro Li-ion akumulátory $I_{MAX} = 1,0$ až $1,5 \times C_P$!)

V tabulce 2.1 je uveden přehled možných metod nabíjení hermetických akumulátorů konstantním proudem. Při nabíjení akumulátorů Li-Ion je však třeba dodržet maximální nabíjecí proud a ten je uváděn v rozmezí 1 až 1,5 x C_P .

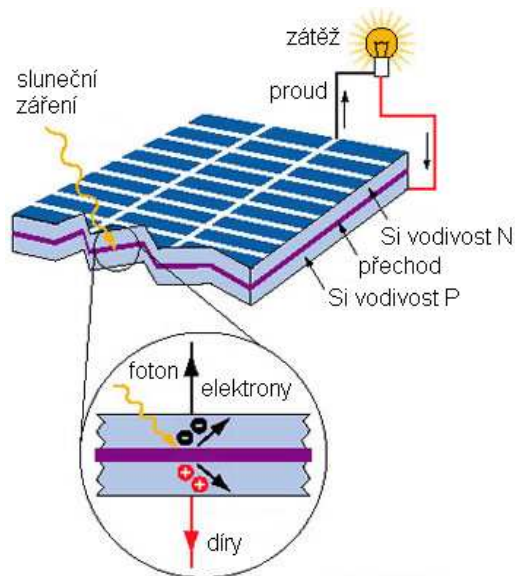
Nabíjení konstantním napětím

Poté, co při fázi nabíjení konstantním proudem naroste napětí akumulátoru na předepsanou hodnotu, se na akumulátoru udržuje toto napětí a proud postupně klesá. Když proud klesne pod předem stanovenou hodnotu, je nabíjení ukončeno. Velikost proudu, při které by mělo dojít k ukončení nabíjení je doporučováno volit v rozmezí 0,015 až 0,02 x C_P .

3 Fotovoltaické články

3.1 Princip činnosti

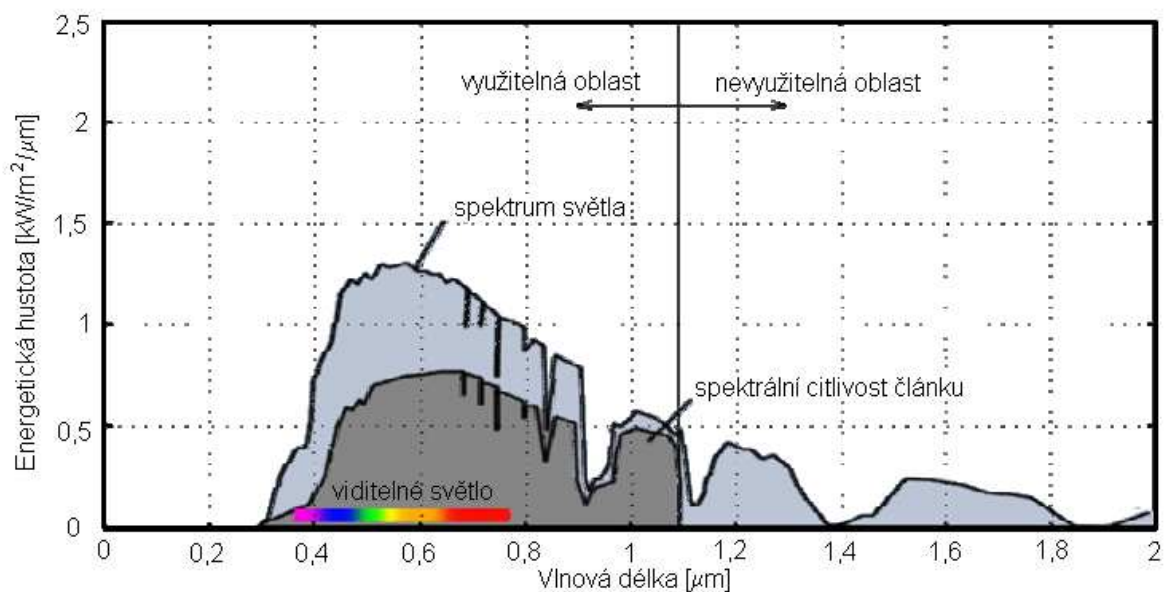
Fotovoltaické (FV) články pro svou činnost využívají fotovoltaického jevu, který byl objeven Alexandrem Edmundem Becquerelem. Ten zjistil, že dopadem slunečního záření na polovodič dochází k pohlcování světelných částic (fotonů) a uvolňování elektronů. V polovodiči vzniká volný elektrický náboj, pár elektron-díra, a ten je možno z polovodiče odvádět jako elektrickou energii.



Obr. 3.1: Základní princip fotovoltaického jevu (přepřacováno z [5])

3.2 Spektrální citlivost

Nejčastějším materiálem pro výrobu FV článků je křemík. Ten je však schopen absorbovat světlo s vlnovou délkou kratší než 1,1 mikrometru, což odpovídá energii fotonů větší než 1,12 eV. Četnost fotonů o určité energii ale není ve spektru světla rozložena rovnoměrně. Na obrázku 3.2 je vidět spektrum dopadající slunečního záření a spektrální citlivost FV článku. Je zde vyznačena i hranice schopnosti absorpce světla křemíkem.

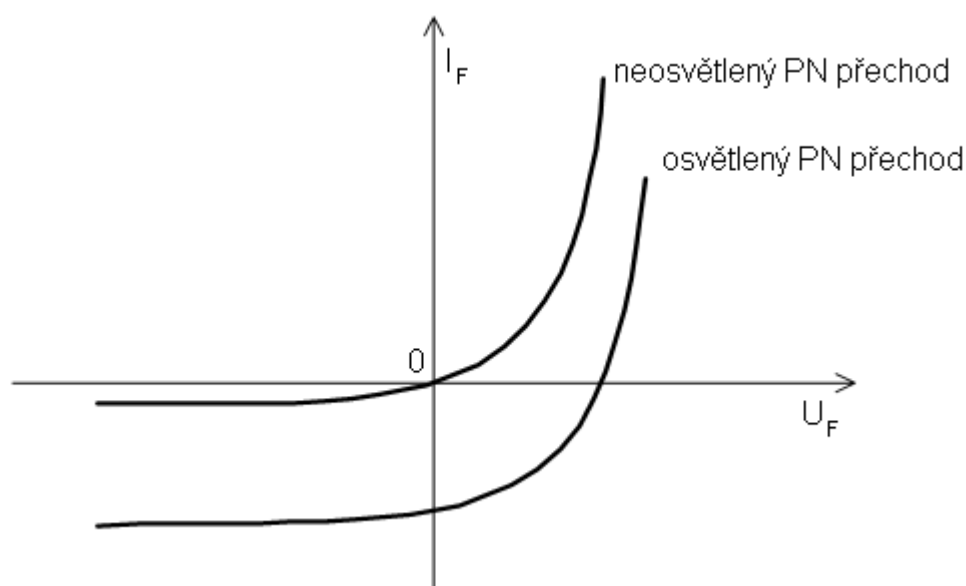


Obr. 3.2: Spektrum slunečního záření a spektrální citlivost FV článku (převzato z [6])

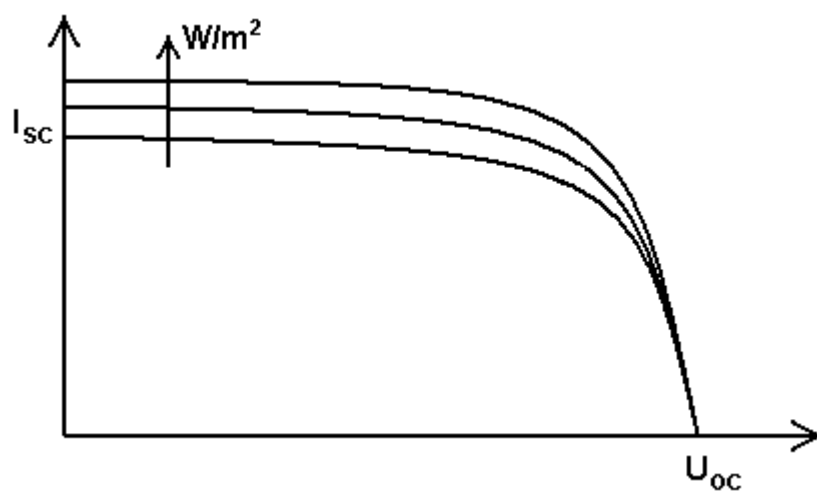
Z obrázku 3.2 je patrné, že fotovoltaický článek není schopen přeměnit veškerou energii z dopadajícího světla na elektrickou energii. Účinnost běžně dostupných FV článků pohybuje okolo 15%.

3.3 Voltampérová charakteristika

Fotovoltaický článek je v podstatě polovodičová dioda. Jeho voltampérová charakteristika je tedy totožná s charakteristikou PN přechodu (obrázek 3.3). Pracovní oblast FV článku je, na rozdíl od diody, ve čtvrtém kvadrantu kde, pokud je osvětlen, se chová jako zdroj.



Obr. 3.3: VA charakteristika PN přechodu



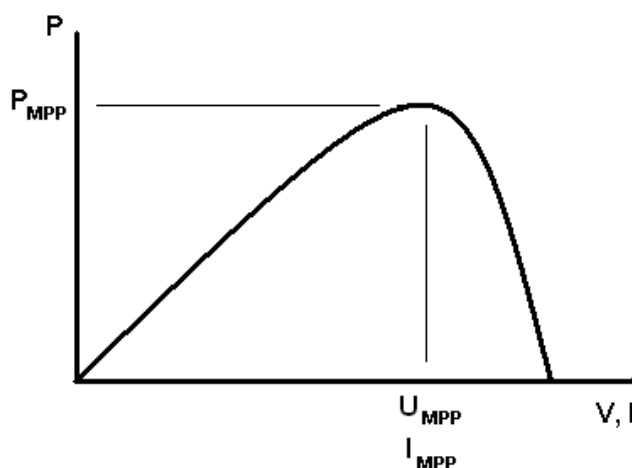
Obr. 3.4: VA charakteristika FV článku

Na obrázku 3.3 je VA charakteristika FV článku v pracovní oblasti. Je zde i vidět jak se mění při změně intenzity dopadajícího světelného záření. Napětí U_{oc} je napětí naprázdno, proud I_{sc} je proudem nakrátko.

4 Metody sledování bodu maximálního výkonu solárního panelu

Sledování bodu maximálního výkonu (MPPT) je důležitou částí solárních systémů, protože pomáhá zvýšit efektivitu přeměny sluneční energie na energii elektrickou. Bod maximálního výkonu je nutné sledovat, protože volt-ampérová charakteristika fotovoltaického (FV) článku se v čase mění v závislosti na podmínkách prostředí (osvětlení, teplota). Je vyvinuto několik metod jak lze provést sledování bodu maximálního výkonu. Při výběru vhodné metody jak pro tuto tak i pro jiné práce jsou rozhodujícími kritérii:

- Komplikovanost řešení
- Potřebné senzory
- Rychlost přeběhu
- Cena
- Meze efektivnosti
- Složitost implementace
- Oblíbenost



Obr. 4.1: Výkonová charakteristika FV článku

Na obrázku 4.1 je typická výkonová charakteristika FV článku. Úkolem MPPT metod je automaticky najít napětí U_{MPP} nebo proud I_{MPP} , při kterém je výkon P_{MPP} dodávaný FV článkem maximální a to i při měnících se podmínkách. Většina metod pro MPPT reaguje na obě změny podmínek, jak teploty, tak i intenzity ozáření, ale některé jsou užitečnější pokud je teplota přibližně konstantní. Většina metod také reaguje na změny způsobené stárnutím FV článků.

V následujícím textu uvedu několik metod MPPT s principálním popisem funkce, které připadají pro realizaci nabíječe v úvahu.

4.1 Hill-Climbing, Perturb and Observe (P&O)

Tato metoda je díky své snadné implementaci nejběžněji používaná k MPPT. P&O v překladu znamená „odchýlení a vyhodnocení.“ Algoritmus mění pracovní napětí známým směrem a potom vyhodnotí $\frac{dP}{dU}$.

Je-li

$$\frac{dP}{dU} > 0, \quad (4.1)$$

pak směr změny napětí je tím správným k dosažení bodu maximálního výkonu (maximum power point – MPP) a další změna napětí bude ve stejném směru. Naopak je-li derivace

$$\frac{dP}{dU} < 0, \quad (4.1)$$

pak změna napětí byla směrem od MPP a další změna bude opačným směrem. Chování algoritmu popisuje tabulka 4.1.

odchylka	změna výkonu	následující odchylka
kladná	kladná	kladná
kladná	záporná	záporná
záporná	kladná	záporná
záporná	záporná	kladná

Tab. 4.1: Chování algoritmu P&O

Jak je vidět na obrázku 4.1, změna pracovního napětí FV článku způsobuje i změnu výkonu. Nevýhodou této metody hledání je tedy stálá oscilace kolem MPP a při rychlých změnách intenzity ozáření může docházet ke krokům špatným směrem. Existují i různé variace základního P&O, které byly vyvinuty k minimalizování těchto nevýhod. Jedná se například o průměrování několika vzorků nebo o proměnlivý krok nastavování pracovního napětí FV článku. Pro realizaci této metody MPPT je zapotřebí alespoň jedno napěťové čidlo a pokud připojený měnič neumožňuje měřit proud pak ještě jedno proudové čidlo. Výpočtem se pak získá výkon. Tato metoda se

typicky realizuje digitálně pomocí mikroprocesoru, ale je možné je i analogové provedení (např. analogový násobič, operačního zesilovač a klopný obvod).

4.2 Incremental Conductance

Incremental Conductance (INC, IncCord), neboli přírůstková vodivost je algoritmus, který se snaží překonat nedokonalosti P&O využitím faktu, že směrnice výkonové charakteristiky FV článku je v MPP nulová, nalevo od MPP je kladná a napravo záporná.

To lze zapsat takto:

- $\frac{dP}{dU} = 0$ v MPP

(4.2)

- $\frac{dP}{dU} < 0$ napravo od MPP

(4.3)

- $\frac{dP}{dU} > 0$ nalevo od MPP

(4.4)

Zároveň platí

$$\frac{dP}{dU} = \frac{d(U \cdot I)}{dU} = I + U \frac{dI}{dU} \cong I + U \frac{\Delta I}{\Delta U} \quad (4.5)$$

a díky tomu je možno vztahy uvedené výše přepsat do tvaru:

- $\frac{\Delta I}{\Delta U} = -\frac{I}{U}$ v MPP

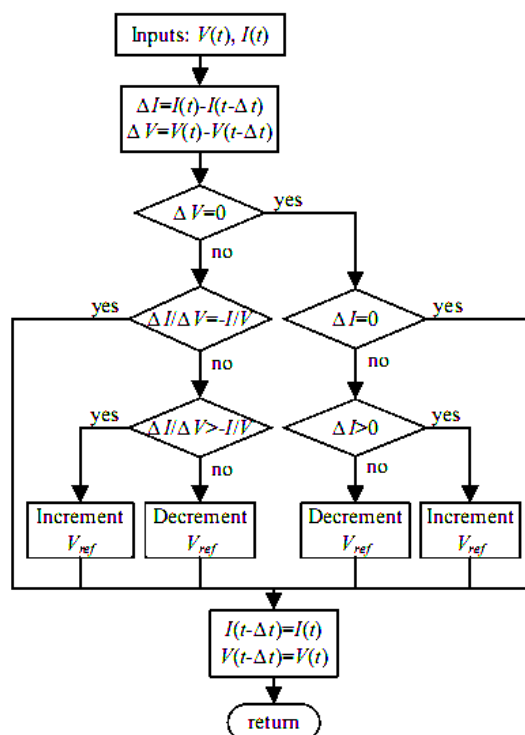
(4.6)

- $\frac{\Delta I}{\Delta U} < -\frac{I}{U}$ napravo od MPP

(4.7)

- $\frac{\Delta I}{\Delta U} > -\frac{I}{U}$ nalevo od MPP

(4.8)



Obr. 4.2: Vývojový diagram INC

MPP potom může být vyhledán pouhým porovnáním okamžité vodivosti

$$G = \frac{I}{U} \quad (4.9)$$

a přírůstkové vodivosti

$$\Delta G = \frac{\Delta I}{\Delta U}. \quad (4.10)$$

Na obrázku 4.2 je vývojový diagram algoritmu INC, U_{ref} je napětí, při kterém FV článek pracuje. Algoritmus zvyšuje nebo snižuje napětí U_{ref} tak aby byl dosažen MPP. Velikost přírůstku napětí určuje jak rychle bude MPP vysledován. Rychle sledování může být dosaženo velkými přírůstky, ale systém potom nebude pracovat přesně v MPP a bude kolem MPP oscilovat. Při volbě velikosti přírůstku tedy musí být zvolen kompromis.

Nepříliš patrnou, ale efektivní cestou jak vykonávat metodu INC je použít okamžitou a přírůstkovou hodnotu vodivosti ke generování chybového signálu

$$e = \frac{I}{U} + \frac{dI}{dU}$$

(4.11)

ze vztahu (4.2) víme, že v MPP se $e \rightarrow 0$. Potom už stačí pouze jednoduchý proporcionálně integrační (PI) kontrolér k regulaci e na nulu. K měření okamžitých hodnot napětí a proudu FV článku jsou potřeba dva senzory. Pro realizaci této metody se hodí digitální signálový procesor a mikrokontrolér, který dokáže snadno uchovat předchozí hodnoty napětí a proudu a provede celý algoritmus rozhodování.

4.3 Fractional Open-Circuit Voltage

Metoda je také nazývána Constant Voltage (CV), protože využívá téměř lineární závislosti napětí U_{MPP} a napětí naprázdno U_{OC} (open circuit) při změnách teploty i intenzity ozáření.

$$U_{MPP} \approx k_1 \cdot U_{OC}$$

(4.12)

Kde k_1 je konstanta úměrnosti a je závislá na charakteristice FV článku. Její hodnotu je potřeba vypočítat předem při různých intenzitách ozáření a teplotách. Obvykle se hodnoty k_1 pohybuje v rozmezí 0,71 až 0,78. Poté co je známe k_1 , lze hodnotu U_{MPP} vypočítat ze vztahu (4.12). Napětí U_{OC} se získává periodicky měřením při současném vypnutí připojeného měniče. Toto vypínání měniče způsobuje dočasné výpadky výkonu. Tato nevýhoda se ale dá odstranit použitím dalšího FV článku, který je použit pouze pro měření U_{OC} . Tento článek by měl svými charakteristikami odpovídat FV článku výkonovému. Napětí U_{MPP} je pak vypočteno ze vztahu výše. Reference [2] uvádí, že napětí generované PN přechodem diody je přibližně 75% U_{OC} . Pokud by nám tedy nezáleželo na přesné poloze pracovního bodu v MPP, pak by již nebylo nutné článek odpojovat a měřit na něm napětí U_{OC} .

Protože vztah (4.12) je pouze aproximací, FV článek technicky nikdy nepracuje v MPP. V závislosti na aplikaci článku to může být postačující. Metoda konstantního napětí není příliš přesná, ale je velmi jednoduchá. Její implementace do systému je levná, protože není zapotřebí jakýkoli mikrokontrolér. Tato metoda také není příliš věrohodná pokud dojde k částečnému zastínění některých FV článků. Částečné

zastínění způsobí vznik vícenásobných lokálních maxim výkonu. Tuto metodu lze realizovat jak analogově tak i digitálně. Je potřeba pouze jedno napěťové čidlo.

4.4 Fractional Short-Circuit Current

Fractional Short-Circuit Current podobně jako Open-Circuit využívá přibližně lineární závislost proudu I_{MPP} a proudu nakrátko I_{SC} FV článku.

$$I_{MPP} \approx k_2 \cdot I_{SC} \quad (4.13)$$

kde k_2 je konstanta úměrnosti, kterou potřeba předem stanovit. Její hodnota se typicky pohybuje v rozmezí 0,78 až 0,92. Získání hodnoty I_{SC} je však obtížnější než u metody konstantního napětí. Pro jeho měření je potřeba do obvodu zařadit proudové čidlo a spínač, který bude FV článek periodicky zkratovat. To zvýší počet součástek i cenu. Pro lepší nalezení MPP lze tyto dvě metody Short-Circuit a Open-Circuit použít zároveň.

4.5 Ripple Correlation Control (RCC)

Pokud je FV článek připojen k měniči, pak spínací procesy tohoto měniče vytvářejí zvlnění napětí a proudu FV článku. Jako následek toho je i průběh výkonu článku zvlněný. Metoda RCC využívá tohoto zvlnění k sledování MPP. RCC koreluje derivaci výkonu

$$\dot{p} = \frac{dp(t)}{dt} \quad (4.14)$$

s derivací proudu

$$\dot{i} = \frac{di(t)}{dt} \quad (4.15)$$

nebo napětí

$$\dot{u} = \frac{du(t)}{dt} \quad (4.16)$$

tak, aby gradient výkonu byl nulový, což je v MPP. V návaznosti na obrázek 4.1 víme, že pokud napětí u nebo proud i rostou ($\dot{u} > 0$ nebo $\dot{i} > 0$) a výkon p roste také ($\dot{p} > 0$), potom se pracovní bod nachází před (pod) MPP ($U < U_{MPP}$ nebo $I < I_{MPP}$). Na druhou stranu, pokud napětí u nebo proud i rostou a výkon p klesá ($\dot{p} < 0$), pak je pracovní bod FV článku za (nad) MPP ($U > U_{MPP}$ nebo $I > I_{MPP}$).

Zkombinováním těchto poznatků vidíme, že hodnota $\ddot{p}u$ nebo $\ddot{p}i$ je

- kladná nalevo od MPP
- záporná napravo od MPP
- nulová v bodě maximálního výkonu.

Pokud bude připojený měnič typu BOOST, pak zvyšováním výkonového poměru zvýší i proud cívky, který je stejný jako proud FV článku, ale zároveň sníží napětí FV článku. Proto vstupem pro řízení výkonového poměru je

$$d(t) = -k_3 \int \ddot{p}u dt \quad (4.17)$$

nebo

$$d(t) = k_3 \int \ddot{p}i dt \quad (4.18)$$

kde k_3 je kladná konstanta. Řízení výkonového poměru tímto způsobem zajistí, že MPP bude sledován spojitě. K realizaci tohoto způsobu MPPT jsou zapotřebí dvě informace, a to jsou napětí a proud. Budou tedy potřeba dvě čidla. Pro sledování MPP není potřeba znát žádný parametr připojeného FV článku. Realizaci lze provést analogově.

Dále uvádím přehledovou tabulku, kde jsou uvedeny souhrnné informace o zde popsaných metodách MPPT a i dalších, jejichž popis by dalece přesáhnul rozsah této práce.

Metoda MPPT	Závisí na FV panelu?	Přesný MPP?	Analog x Digital	Periodické ladění?	Rychlost vyhledání MPP	Komplikovanost řešení	Měřené veličiny
Hill-climbing/P&O	Ne	Ano	Obě	Ne	Proměnlivá	Malá	Napětí, Proud
IncCond	Ne	Ano	Digital	Ne	Proměnlivá	Střední	Napětí, Proud
Fractional V_{OC}	Ano	Ne	Obě	Ano	Střední	Malá	Napětí
Fractional I_{SC}	Ano	Ne	Obě	Ano	Střední	Střední	Proud
Fuzzy Logic Control	Ano	Ano	Digital	Ano	Vysoká	Velká	Volitelné
Neural Network	Ano	Ano	Digital	Ano	Vysoká	Velká	Volitelné
RCC	Ne	Ano	Analog	Ne	Vysoká	Malá	Napětí, Proud
Current Sweep	Ano	Ano	Digital	Ano	Nízká	Velká	Napětí, Proud
DC Link Capacitor Droop Control	Ne	Ne	Obě	Ne	Střední	Malá	Napětí
Load I or V Maximization	Ne	Ne	Analog	Ne	Vysoká	Malá	Napětí, Proud
DP/dV or dP/dI Feedback Control	Ne	Ano	Digital	Ne	Vysoká	Střední	Napětí, Proud
Array Reconfiguration	Ano	Ne	Digital	Ano	Nízká	Velká	Napětí, Proud
Linear Current Control	Ano	Ne	Digital	Ano	Vysoká	Střední	Int. ozáření
IMMP & VMPP Computation	Ano	Ano	Digital	Ano	-	Střední	Int. ozáření, Teplota
State/based Computation	Ano	Ano	Obě	Ano	Vysoká	Velká	Napětí, Proud
OCC MPPT	Ano	Ne	Obě	Ano	Vysoká	Střední	Proud
BFV	Ano	Ne	Obě	Ano	-	Malá	Žádné
LRCM	Ano	Ne	Digital	Ne	-	Velká	Napětí, Proud
Slide Control	Ne	Ano	Digital	Ne	Vysoká	Střední	Napětí, Proud

tabulka 4.1: hlavní charakteristiky metod MPPT (převzato z [2])

5 Návrh solárního MPPT Li-ion nabíječe

Ještě před návrhem samotného obvodu pro zajištění nabíjení bylo třeba zamyslet se nad tím z jakého solárního panelu bude napájen a do jakého akumulátoru bude pracovat.

5.1 Fotovoltaický panel

Pro realizaci solárního nabíječe byl použit cestovní solární panel ze soupravy **TPS-956 Solar Battery Charger Kit** od firmy Shenzhen Topray Solar Co. Ltd.

Základní údaje

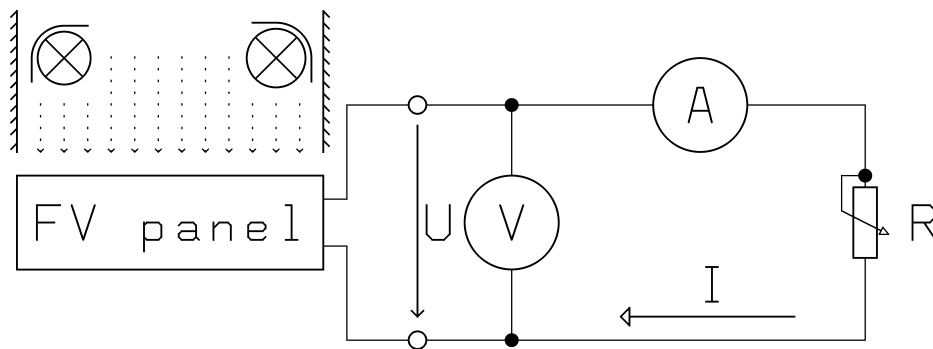
Solární panel je zabudován v textilním pouzdře spolu s nabíječem dvanácti sériově spojených akumulátorů NiMH. Technické parametry udávané výrobcem:

- Výkon: $P = 4 \text{ W}$
- Proud: $I = 250 \text{ mA}$
- Plocha panelu: $S = 0,04 \text{ m}^2$

Jednoduchým výpočtem dle vztahu $U = P / I$ lze dopočítat že jmenovité napětí článku by mělo být $U = 16 \text{ V}$.

VA charakteristika

Umístění FV článku, při měření jeho voltampérové charakteristiky do venkovních prostor na přímé sluneční záření by vedlo k velkým chybám měření vlivem kolísající teploty článku a intenzity dopadajícího záření. Proto byl FV článek umístěn do fotovoltaické komory, kde je zajištěno stále osvětlení dvěma halogenovými žárovkami a celkovém příkonu 1 kW bez možnosti regulace. Stabilizaci teploty zajišťuje ventilátor. Komora je částečně odstíněna od slunečního záření.

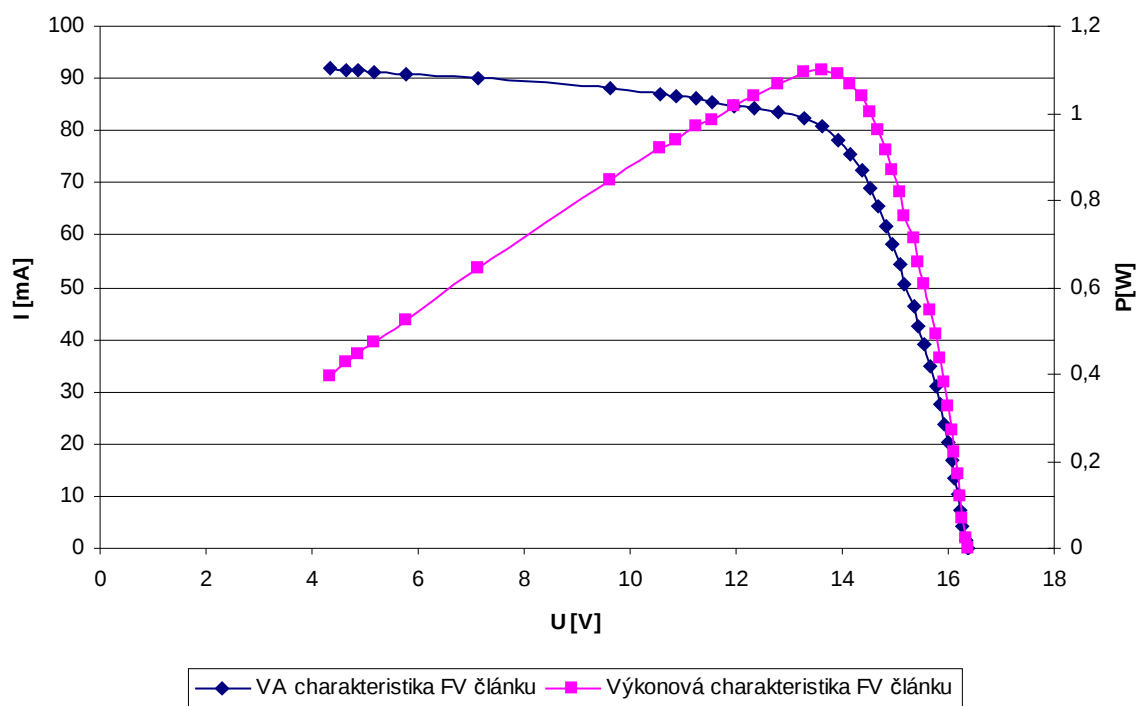


Obr. 5.1: Schéma zapojení pro měření VA charakteristiky FV panelu

Použité přístroje:

- V Digitální multimetr METEX M-4660A, rozsah 20 V
- I Digitální multimetr METEX M-4660A, rozsah 200 mA
- R Potenciometr 33 k Ω , 3,5 k Ω , 500 Ω , 100 Ω

Naměřené závislosti:



Obr. 5.2: Voltampérová a výkonová charakteristika použitého fotovoltaiického článku

V grafu je zobrazena voltampérová a výkonová charakteristika použitého fotovoltaiického panelu. Tabulku s naměřenými hodnotami lze nalézt v příloze.

Výsledky pro laboratorní podmínky jsou:

- Maximální výkon $P_{MAX} = 1,1 \text{ W}$
- $U_{MPP} = 13,63 \text{ V}$
- $I_{MPP} = 80,7 \text{ mA}$
- $I = 323 \text{ W/m}^2$

Pro návrh reálného nabíječe pracujícího v reálných podmínkách je ale podstatné zjistit maximální dosažitelné napětí U_{OC} , maximální proud I_{SC} a výkon P_{MPP} v bodě jeho maxima. Jak již bylo napsáno dříve, v reálných podmínkách nelze zajistit stálost intenzity dopadajícího záření a teploty, proto jsem změřil pouze potřebné hodnoty napětí, proudu a výkonu.

Měření proudu I_{SC} : Na výstup solárního panelu jsem připojil ampérmetr nastavený na rozsah 20 A. Solární článek jsem vystavil přímému slunečnímu záření a měnil jeho úhel náklonu tak, abych dosáhl maximálního možného zkratového proudu přes ampérmetr.

Výsledek měření: $I_{SC} = 220 \text{ mA}$, $T = 53 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Měření napětí: Postup byl proveden shodně jako při měření zkratového proudu s tím rozdílem, že na výstup solárního panelu byl připojen voltmetr.

Výsledek měření : $U_{OC} = 19 \text{ V}$, $T = 53 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Měření maximálního výkonu: Protože metoda měření výkonu pomocí voltmetru, ampérmetru a proměnného rezistoru nepodávala okamžitou informaci o výkonu, bylo třeba ji upravit. Na místo proměnného rezistoru byl použit DC/DC měnič v snižujícím zapojení s možností ruční regulace střídý spínání, zatížený rezistorem známé velikosti. Velikost napětí na zatěžovacím rezistoru pak byla úměrná výkonu dodávaného solárním panelem a bylo tak možné okamžitě zjistit zda panel pracuje v bodě maximálního výkonu. Měření jsem tedy provedl tak, že jsem solární panel nastavil přibližně kolmo k slunci a změnou střídý spínání měniče jsem se snažil dosáhnout maximálního napětí na zátěži. Při dosažení maximálního napětí jsem odečetl hodnotu napětí U_{MPP} a proudu I_{MPP} .

Výsledek měření : $U_{MPP} = 15,6 \text{ V}$, $I_{MPP} = 200 \text{ mA}$

Maximální výkon $P_{MPP} = 3,25 \text{ W}$, $T = 53 \text{ }^{\circ}\text{C}$

5.2 Li-ion akumulátor

Jako zátěž pro nabíječ je použit lithiový akumulátor, který je složen ze dvou paralelně spojených článků, který není vybaven žádnou ochrannou elektronikou. Každý článek má jmenovité napětí $U = 3,7 \text{ V}$ a kapacitu $C_P = 2000 \text{ mAh}$. Protože katalogové údaje nejsou dostupné byly zvoleny následující maximální hodnoty veličin:

- $U_{MAX} = 4,15 \text{ V}$ (maximální napětí)
- $I_{MAX} = 4 \text{ A}$ (maximální nabíjecí proud)

5.3 Shrnutí dosavadních poznatků – základní údaje

Zdrojem elektrické energie je solární panel o maximálním: výkonu $P = 4 \text{ W}$, proudu $I = 250 \text{ mA}$ a napětí $U = 20 \text{ V}$. Zátěží je Li-ionový akumulátor o maximálním napětí $U = 4,15 \text{ V}$ a maximálním nabíjecím proudu $I = 4 \text{ A}$.

Výkonová bilance

Pro splnění zadání této diplomové práce je nezbytné, aby fotovoltaický článek pracoval v bodě maximálního výkonu. Proto je nežádoucí regulovat nabíjecí proud akumulátoru, protože pak by FV článek nepracoval při maximálním výkonu. Jedinými omezujícími podmínkami je maximální napětí akumulátoru a maximální nabíjecí proud.

Základní analýzu výkonů tedy provedu pro dva případy:

- Akumulátor je vybitý
 - o teoreticky maximální možný výkon článku je

$$P_{MAX} = U_{OC} \cdot I_{SC} = 20 \cdot 0,25 = 5 \text{ W}$$

(5.1)

- o napětí vybitého článku předpokládáme $U_{BMIN} = 2,5 \text{ V}$
- o pokud by nabíječ pracoval beze ztrát, dokázal by při výstupním napětí $U_{OUT} = 2,5 \text{ V}$ dodat výstupní proud

$$I_{OUT} = P_{MAX} / U_{BMIN} = 5 / 2,5 = 2 \text{ A}$$

(5.2)

- o výstupní proud nabíječe v tomto případě nepřesahuje maximální nabíjecí proud akumulátoru

- Akumulátor je téměř nabitý
 - o maximální teoreticky možný výkon FV článku je $P_{MAX} = 5 \text{ W}$
 - o napětí téměř nabitého článku předpokládáme $U_{BMAX} = 4,15 \text{ V}$
 - o pokud by nabíječ pracoval bere ztrát, dokázal by při výstupním napětí $U_{OUT} = 4,15 \text{ V}$ dodat výstupní proud

$$I_{OUT} = P_{MAX} / U_{BMAX} = 5 / 4,15 = 1,2 \text{ A}$$

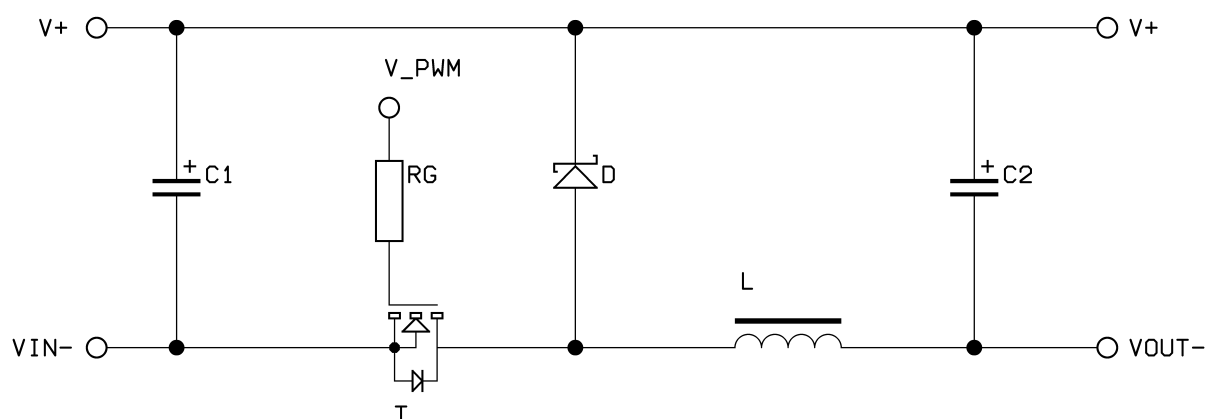
(5.3)

- o i v tomto případě maximální výstupní proud nabíječe nepřekročí maximální nabíjecí proud

Z těchto poznatků tedy vyplývá, že akumulátor není třeba chránit před překročením maximálního nabíjecího proudu. Vzhledem k tomu, že maximální napětí solárního článku převyšuje maximální napětí akumulátoru je nutná ochrana proti jeho překročení.

5.4 Návrh digitálně řízeného nabíječe

Z uvedených poznatků je zřejmé že nabíječ bude muset snižovat vstupní napětí $U_{IN} < 20 \text{ V}$ na výstupní napětí na výstupní napětí $U_{OUT} < 4,2 \text{ V}$. Pro řešení tohoto jsem se rozhodl použít snižující spínaný měnič (Step-Down, Buck), který bude řízen pulzním šířkově modulovaným signálem (PWM) z mikroprocesoru, který bude také vyhodnocovat údaje potřebné k sledování bodu maximálního výkonu FV panelu a údaj o napětí na akumulátoru.



Obr. 5.3: Schéma zapojení snižujícího měniče

Popis funkce měniče

Na vstupní svorky V+ a VIN- je připojeno vstupní napětí a na svorky V+ a VOUT- je připojena zátěž. Kondenzátor C_1 je nabit na hodnotu vstupního napětí. Při sepnutí tranzistoru T začne obvodem procházet proud, který má dvě složky. První složka je nabíjecí proud kondenzátoru C_2 a druhou složkou je proud zátěží. Obě tyto složky se prochází přes cívku L, ta ve svém okolí průchodem proudu vytváří magnetické pole (nabuzuje se). Rozepnutím tranzistoru T by proud zanikl. Cívka ale nedovolí skokovou změnu proudu a začne spotřebovávat energii uloženou ve svém magnetickém poli. Přejde do stavu, kdy se chová jako zdroj proudu. Tento proud se nemůže uzavřít přes zdroj připojený na vstup. Dioda D je polarizována v propustném směru a proud generovaný cívkou L se uzavře přes zátěž. Regulace výstupního napětí se docílí změnou střídý spínání. Při střídě spínání $s = 100\%$ je vstupní napětí převedeno přímo na výstup a snižováním střídý se výstupní napětí snižuje.

Pro řízení měniče jsem zvolil mikroprocesor ST7FLITEUS5 od firmy ST Microelectronics (STM). Jde o osmibitový procesor s maximálním napájecím napětím 5 V. Disponuje šesti vstupy / výstupy PA.0 až PA.6 z nichž PA.0 může být použit ke generování PWM signálu. Porty PA.0, PA.1, PA.2, PA.4, PA.5 mohou být využity k analogově digitálnímu převodu. Port PA.3 může plnit pouze funkci výstupu nebo RESET.

Spínací frekvenci PWM signálu jsem zvolil 40 kHz. Při této frekvenci je možno měnit střídu spínání (Duty Ratio) v 111 krocích.

Výpočet parametrů součástek

Cívka L:

Indukčnost cívky lze vyjádřit ze vztahu

$$U_L = L \cdot \frac{dI}{dt}.$$

(5.4)

Vztah pro výpočet indukčnosti tedy je

$$L = U_L \cdot \left(\frac{dI}{dt} \right)^{-1}.$$

(5.5)

Maximální napětí U_L na cívce L je dáno rozdílem vstupního a výstupního napětí. Maximální napětí na vstupu měniče je $U_{INMAX} = 20V$ a minimální napětí na výstupu je $U_{OUTMIN} = 2,5V$. Rozdíl těchto napětí je $U_L = U_{INMAX} - U_{OUTMIN} = 20 - 2,5 = 17,5 V$.

Jestliže je frekvence spínání $f = 40 \text{ kHz}$ pak doba periody

$$T = 1 / f = 1 / 40\,000 = 25 \mu s.$$

Regulace střídavy s bude probíhat v 111 krocích, nejkratší doba sepnutí tedy bude

$$T_1 = T / 111 = 225 \text{ ns}.$$

Maximální vstupní proud I_{IN} může být až $0,25 A$. To znamená že maximální proud cívkou bude, předpokládáme-li činitel plnění $\delta = 50 \%$,

$$I_{LMAX} = 2 \cdot I_{IN} / \delta = 2 \cdot 0,25 / 0,5 = 1 A$$

(5.6)

Velikost potřebné cívky pak vypočítáme ze vztahu

$$L = \frac{U_L}{I_{LMAX}} \cdot \frac{T}{2} = \frac{17,5}{1} \cdot \frac{25 \cdot 10^{-6}}{2} = 220 \mu H$$

(5.7)

Výpočet vstupního filtračního kondenzátoru:

Jak se při dalším postupu ukázalo, je vhodné navrhnout vstupní filtrační kondenzátor tak, aby zvlnění vstupního napětí bylo menší než je jeden stupeň rozlišení A/D převodníku mikroprocesoru. Pro analogově digitální převod je použito 8 bitů z 10. Rozlišitelná úroveň je tedy 20 mV ($5 V / 256$). Vstupní napětí do mikroprocesoru bylo třeba vydělit čtyřmi, aby bylo zaručeno rozmezí vstupního napětí 0 až $5 V$. Maximální rozkmit vstupního napětí tudíž musí být do $U_{BR} = 80 \text{ mV}$. Maximální odebíraný proud je 250 mA . Pro výpočet je třeba stanovit koeficient zvlnění k . Ten jsem odhadl na $k = 20$.

Hodnota vstupní kapacity pak bude:

$$C_1 = \frac{k \cdot I}{U_{BR}} = 20 \cdot 0,25 / 0,08 = 62,5 \mu F$$

(5.8)

V praxi je samozřejmě lepší kapacitu kondenzátoru předdimenzovat.

Výpočet vstupního filtračního kondenzátoru:

Pro výpočet výstupního filtračního kondenzátoru lze použít zjednodušeného vztahu

$$C_2 = \frac{0,5 \cdot T \cdot I}{U_{BR}} = 0,5 \cdot 25 \cdot 10^{-6} \cdot 1,2 / 0,05 = 300 \mu F$$

(5.9)

kde hodnotu jsem zvolil hodnotu $U_{BR} = 0,05 \text{ V}$, maximální odebíraný proud $I = 1,2 \text{ A}$ a T je perioda spínání.

Schottkyho dioda:

Maximální napěťové namáhání diody je $U_R = U_{IN} + U_{OUT} = 20 + 4,2 = 24,2 \text{ V}$.

Maximální proud diodou lze určit podle maximálního proudu cívky L .

Vybral jsem schottkyho diodu 1N5818, která má trvalý proud v propustném směru $I_{FAV} = 3 \text{ A}$, špičkový neopakovatelný proud $I_{FSM} = 80 \text{ A}$ a maximální opakovatelné napětí v závěrném směru $U_{RRM} = 40 \text{ V}$. Navíc se tato dioda pyšní velmi malým napětím v propustném směru a zanedbatelnými ztrátami při spínání.

Spínací tranzistor:

Pro spínání jsem použil unipolární tranzistor STB16NF06L od firmy STM. Je to výkonový, polem řízený tranzistor s vodivým kanálem typu N. Výrobce udává následující parametry:

- $U_{DS} = 60 \text{ V}$ (maximální napětí Drain-Source)
- $I_D = 16 \text{ A}$ (maximální proud Drainem)
- $R_{DS(on)} = 0,09 \Omega$ (odpor Source-Drain v sepnutém stavu)
- $C_{ISS} = 345 \text{ pF}$ (vstupní kapacita řídící elektrody)

Tranzistor je konstruován tak, že jeho spínání je možné provádět 5V logickým signálem. Řídící elektrodu (gate) je tedy možno připojit přímo k výstupu mikroprocesoru pouze přes rezistor, který omezuje maximální nabíjecí proud řídící elektrody. Pokud by byl použit tranzistor, který neumožňuje spínání logickým signálem, znamenalo by to nutnost připojení procesoru přes obvod zvaný Gate Driver, který by zajišťoval, optimální spínání tranzistoru. Většina těchto obvodů však pracuje s napájecím napětím 15 V. Musel by se přidat napájecí zdroj, který by z vstupního či výstupního napětí konvertoru vytvářel konstantní napájecí napětí pro Gate Driver. V důsledku by to vedlo ke zvýšení vlastní spotřeby nabíječe a tím ke zhoršení jeho účinnosti. Tento tranzistor byl vybrán také pro svou nízkou vstupní kapacitu.

Sledování bodu maximálního výkonu – verze A

Jako metodu pro sledování maximálního výkonu jsem zvolil Perturb & Observe, protože její implementace by neměla být obtížná, pracuje se pouze základními veličinami a není zapotřebí počítat jejich derivace.

Pro připomenutí uvádím, že tato metoda sleduje změnu výkonu v závislosti na změně napětí solárního panelu. V závislosti na změně pak rozhoduje zda je třeba provést krok směrem kupředu či zpět.

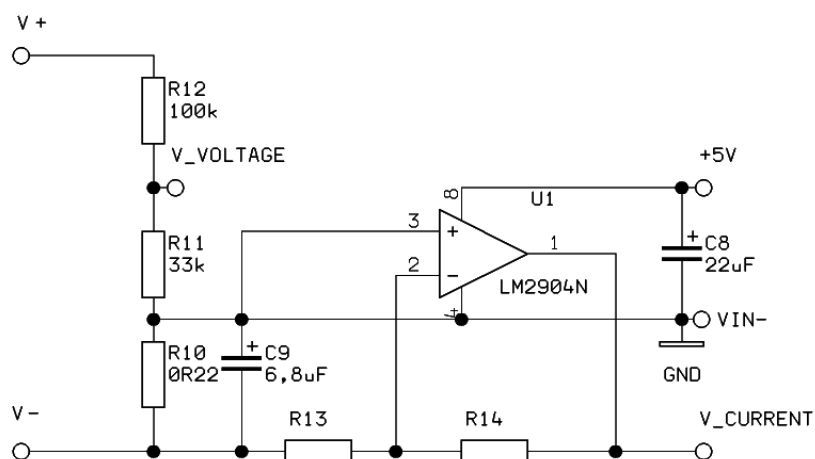
Pro zjištění výkonu dodávaného solárním panelem je zapotřebí snímat jeho napětí a proud.

Snímání napětí:

Pro snímání napětí jsem zvolil nejjednodušší řešení. Tím je odporový dělič připojený na vstupní svorky nabíječe, který vydělí vstupní napětí tak, aby bylo na vstupu mikroprocesoru zajištěno maximální napětí 5 V. Jestliže je na vstupu maximální napětí 20 V, pak dělič musí vstupní napětí vydělit čtyřmi. Tomu nejlépe odpovídají hodnoty rezistorů $R_{12} = 10 \text{ k}\Omega$ a $R_{11} = 3,3 \text{ k}\Omega$. Na výstup děliče je připojen kondenzátor, pro zlepšení filtrace, výstupního napětí.

Snímání proudu – verze 1:

Do cesty proudu se zařadí rezistor o malé hodnotě odporu. Úbytek napětí na tomto rezistoru se bude přivádět na vstup operačního zesilovače a ten jej bude zesilovat, tak aby bylo na jeho výstupu zajištěno maximální napětí 5 V, které se pak přivede do mikroprocesoru. Hodnotu snímacího rezistoru jsem zvolil $R_{10} = 0,22 \text{ }\Omega$. Nastavené zesílení OZ tedy musí být $A = -5 / (R_{10} \times 0,25) = 5 / (0,22 \times 0,25) = 90,9$. Zesílení OZ se vypočítá dle vztahu $A = -R_{14} / R_{13}$. Rezistory po výpočtu zvolil: $R_{13} = 12 \text{ k}\Omega$ a $R_{14} = 1 \text{ M}\Omega$.

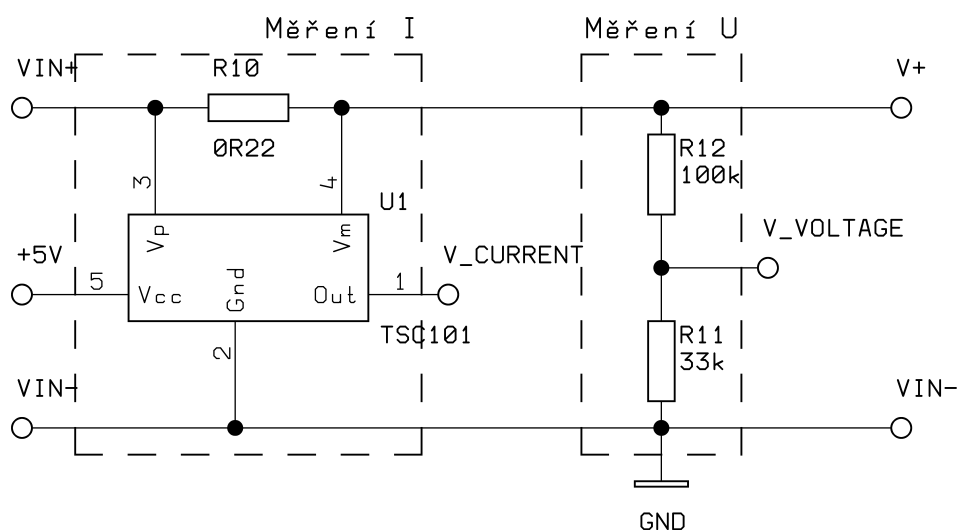


Obr. 5.4: Schéma zapojení bloku pro měření napětí a proudu

Svorka V_VOLTAGE je výstupem děliče napětí a svorka V_CURRENT je výstup OZ odkud se získává údaj o proudu pro mikroprocesor. Na napájecí vývody OZ je připojen blokovací kondenzátor C₈.

Snímání proudu – verze 2:

Druhá varianta snímání proudu pracuje v principu stejně jako varianta první. Proud je opět snímán jako úbytek napětí na sériově zařazeném rezistoru. Zesílení napětí se již však neděje pomocí operačního zesilovače, ale pomocí integrovaného obvodu k tomu účelu určenému. Jde o obvod TSC101 od firmy STM. Dle katalogového listu jde o High side current sense amplifier, který má od výroby nastavené zesílení na stanovenou hodnotu. V tomto případě jde o zesílení 100 V/V. Obvod umí pracovat v širokém rozsahu napájecích i snímaných napětí.



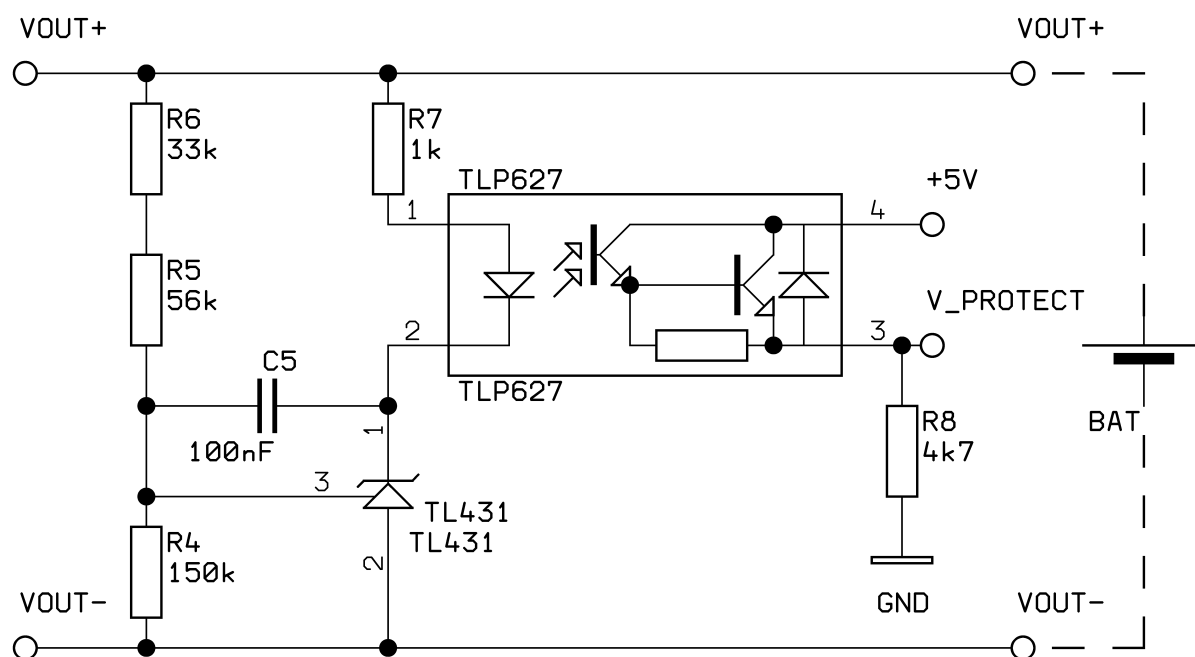
Obr. 5.5: Schéma zapojení obvodu pro měření vstupního napětí a proudu

Sledování bodu maximálního výkonu – verze B

Druhá metoda hledání maximálního výkonu vyvstala v průběhu pokusů na první verzi. Dá se předpokládat, že napětí na akumulátoru se v průběhu nabíjení příliš nemění a v měřítku času, kdy se akumulátor nabíjí ho lze považovat za konstantní. Regulaci nabíjení na maximální možný výkon solárního článku, lze tedy provádět na základě údaje o nabíjecím proudu. Tato metoda je v literatuře zmiňována jako „Load I or V maximization“. V tomto případě jde o maximalizaci proudu (LCM – Load Current Maximization). Algoritmus řízení je stejný jako u Perturb&Observe s tím rozdílem že se zde pracuje pouze s velikostí proudu, nikoli výkonu. Díky tomu je možno vypustit vstupní dělič napětí a program mikroprocesoru se tím zkrátí. Schéma zapojení obvodu pro měření výstupního (nabíjecího) proudu je stejné jako schéma obvodu pro měření vstupního proudu na obrázku 5.5. Obvod však není zapojen na vstupu nabíječe, ale na jeho výstupu.

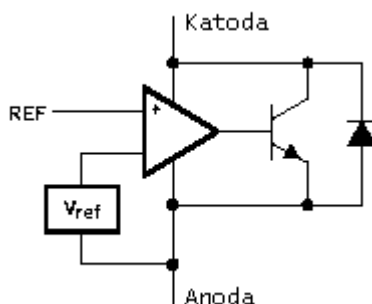
Omezení výstupního napětí

Pro omezení výstupního napětí jsem navrhl obvod v zapojení na obrázku 5.6. Tento obvod přímo neomezuje výstupní napětí, ale pouze mikroprocesoru poskytuje informaci o dosažení maximální napěťové úrovně na výstupu. Program procesoru je ošetřen tak, aby v případě obdržení této informace snížil střídu spínání a zastavil vyhledávání maxima výkonu.



Obr. 5.6: Schéma zapojení ochranného obvodu

V zapojení je použit obvod TL431 (dále jako obvod). To je třísvorkový napěťový regulátor s nastavitelným výstupním napětím. Dále je použit ještě optočlen TLP627, který zajišťuje galvanické oddělení výstupu nabíječe od řídicího mikroprocesoru. Obvod TL431 lze zjednodušeně nazvat jako „zenerova diody s nastavitelným napětím“.

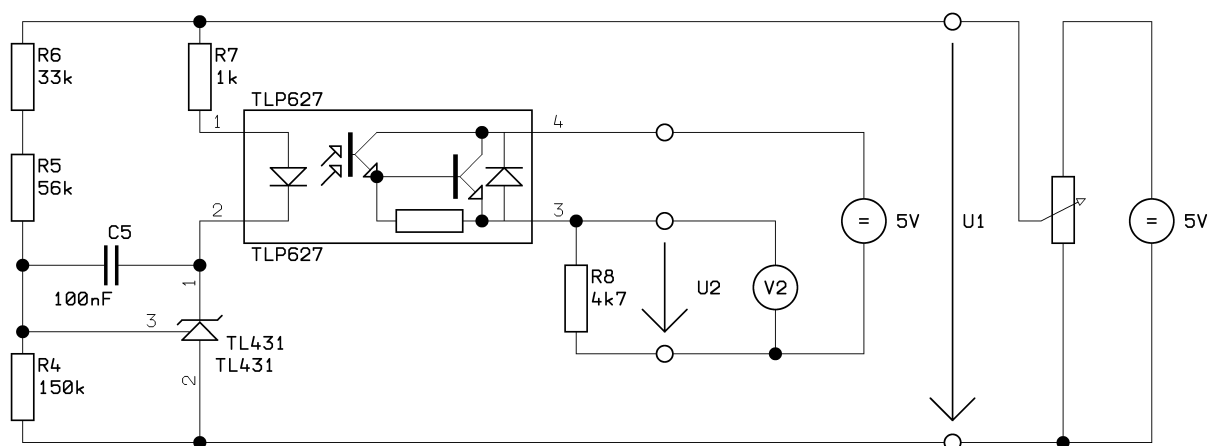


Obr. 5.7: principiální schéma funkce TL431

Funkce obvodu lze popsat pomocí principiálního schématu funkce na obrázku 5.7. Obvod porovnává napětí na řídicí elektrodě s vnitřní referencí a je-li vstupní napětí vyšší pak je sepnut tranzistor mezi anodou (2) a katodou (1).

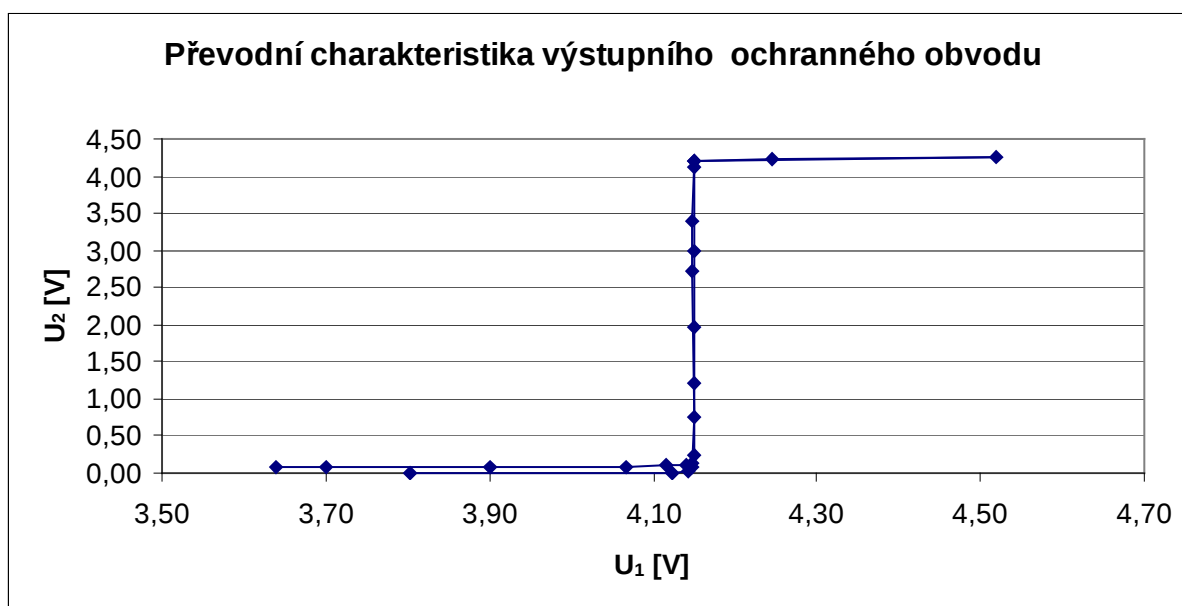
Napěťový dělič složený z rezistorů R_4 až R_6 bylo třeba navrhnout tak, aby při výstupním napětí nabíječe 4,15 V bylo na řídicí elektrodě obvodu právě 2,5 V, což je napětí vnitřní napěťové reference. Jeli napětí na výstupu vyšší než 4,15, je i napětí na řídicí elektrodě vyšší než 2,5 V. Obvod je ve vodivém stavu a tudíž se rozsvítí i LE dioda optočlenu a ten převede signál k procesoru.

Ověření funkce:



Obr. 5.8: Schéma zapojení pro ověření funkce výstupního omezovacího obvodu

Tabulka naměřených hodnot je v příloze.

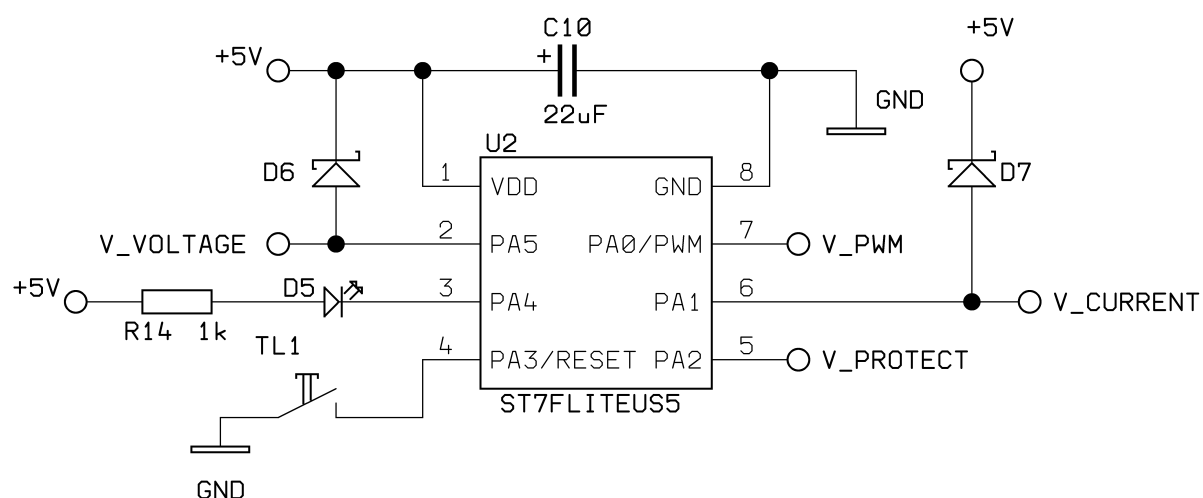


Obr. 5.9: Převodní charakteristika výstupního ochranného obvodu

Pro přesnější nastavení byl odporový dělič doplněn ještě dalším rezistorem o odporu $R = 560 \, \Omega$, který je zapojen mezi R_5 a R_6 sériově.

Mikroprocesor

Schéma zapojení mikroprocesoru je na obrázku 5.10. Vývody č. 1 a č. 8 slouží pro napájení.

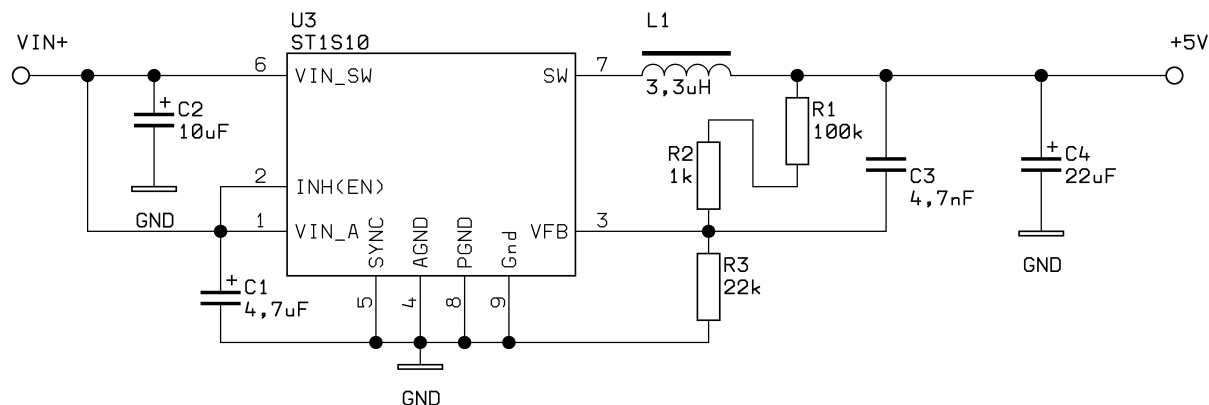


Obr. 5.10: Schéma zapojení řídicího obvodu (mikroprocesoru)

Vývody č. 2 (PA.5), č.6 (PA.1) slouží jako analogové vstupy pro údaje o napětí na FV panelu a vstupním / výstupním proudu nabíječe. Jsou opatřeny ochrannými schottkyho diodami, které jsou při správné funkci polarizovány závěrně. Vývod č. 7 (PA0/PWM) je výstup PWM signálu, č. 5 (PA.2) je logický vstup pro signál od výstupního ochranného obvodu. Vývod č. 3 slouží pro indikaci stavu nabíjení a č. 4 je pro restart mikroprocesoru. Diody D₆ a D₇ slouží jako přepěťová ochrana vstupů mikroprocesoru.

Napájení zdroj

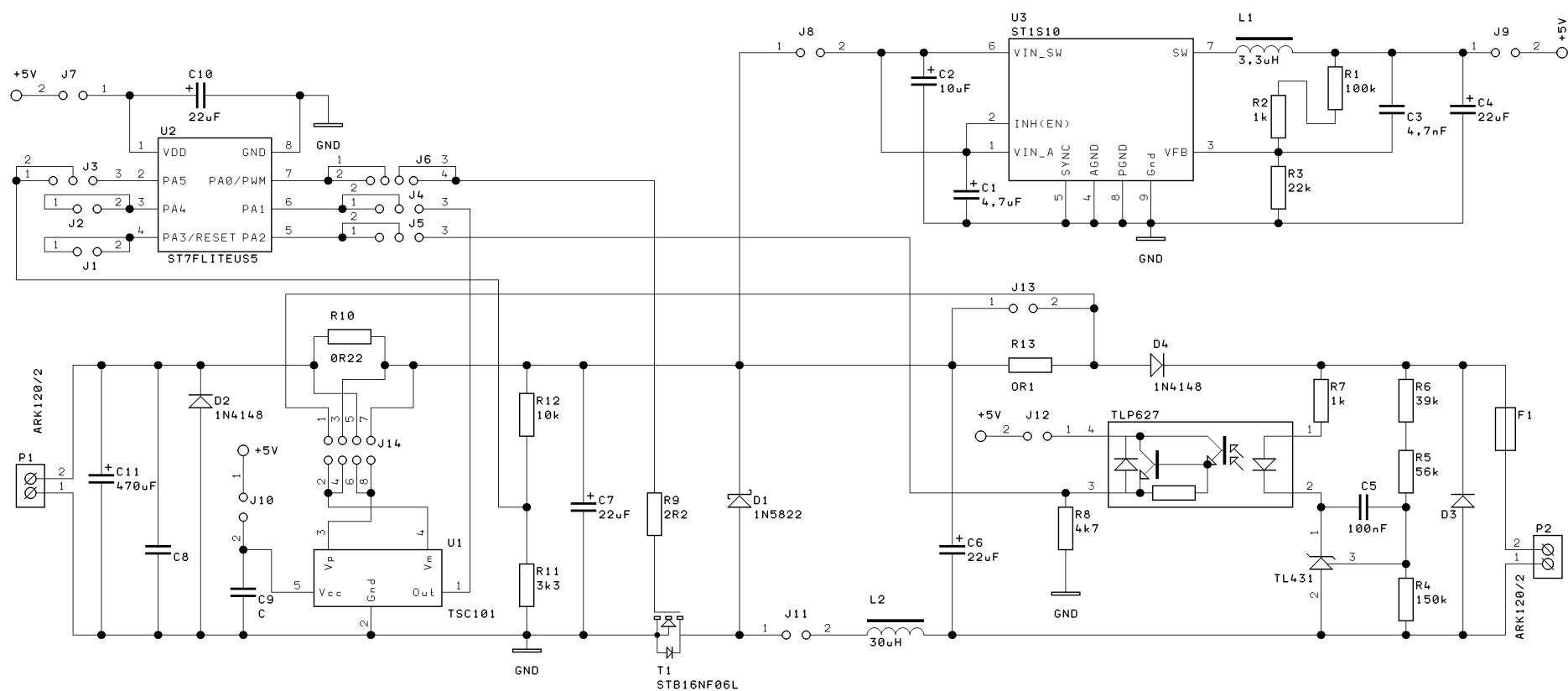
Protože, převod A/D převodníku mikroprocesoru závisí na velikosti napájecího, je důležité, aby bylo napájecí napětí konstantní. Dále je třeba napájet výstupní část optočlenu a proudové čidlo. Pro realizaci jsem použil doporučené zapojení obvodu ST1S10 (obrázek 5.11) od firmy STM. Jde o Step-Down (snižující) regulátor, jehož maximální vstupní napětí je 20 V a výstupní napětí je nastavitelné dělicím poměrem děliče napětí zapojeným na výstupu zdroje. Vnitřní referenční napětí zpětné vazby je 0,8 V. Celý zdroj je napájen přímo z FV článku.



Obr. 5.11: Schéma zapojení napájecího zdroje s obvodem ST1S10

5.5 Realizace nabíječe

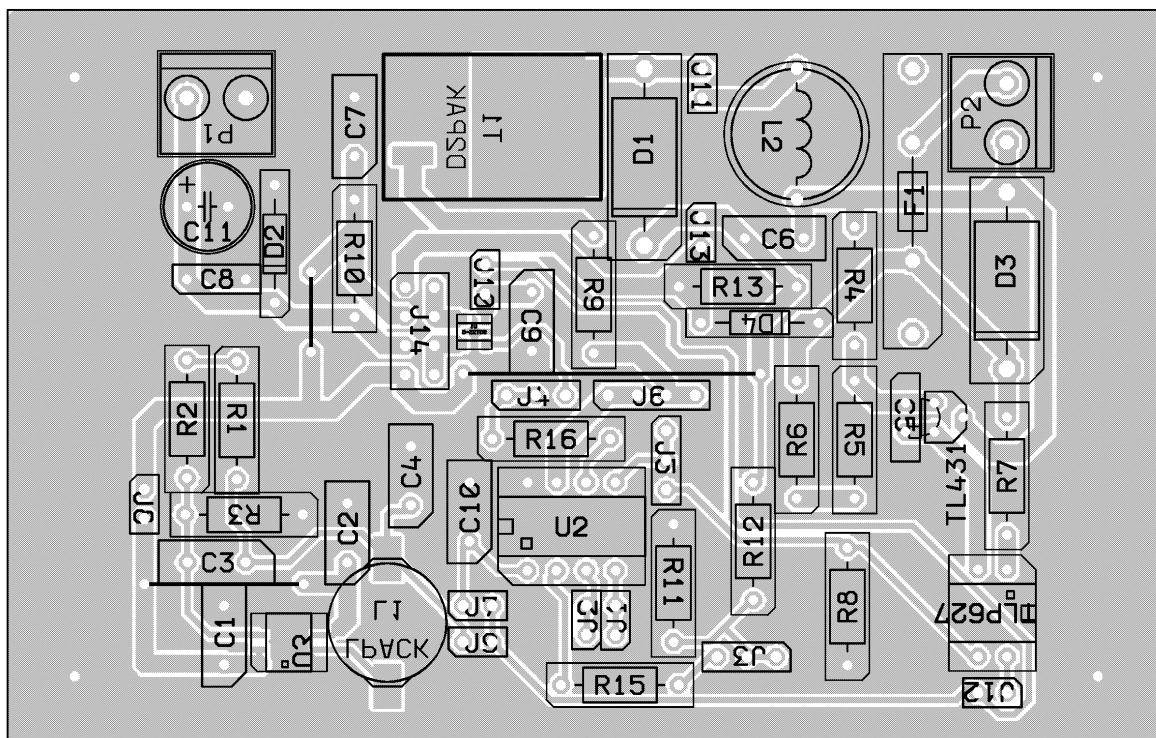
Realizaci nabíječe na DPS jsem se rozhodl provést tak, proud je možno snímat na vstupní nebo na výstupní straně a zároveň je snímáno napětí na vstupu. Tím je zajištěna možnost provádět vyhledávání bodu maximálního výkonu metodou Perturb&Observe (P&O) nebo Load Current Maximization (LCM). Na desce je možné pomocí propojek přerušit některých spojů, aby bylo umožněno sledování některých průběhů. Deska je dále navržena pro možnost zapojení pojistky na výstup a spolu s diodou D_3 dohromady tvoří ochranu proti přepólování akumulátoru. Deska není navržena pro zapojení LE diody pro indikaci stavu nabíjení, pro resetovací tlačítko a pro ochranné diody na vývodech č.2 a č.6 mikroprocesoru. Vstup desky je možno osadit diodou D_2 , která slouží jako ochrana proti přepólování FV panelu. Návrh desky plošných spojů je v příloze. Na další straně následuje schéma zapojení realizované desky plošných spojů.



Obr. 5.12: Schéma zapojení realizované na DPS

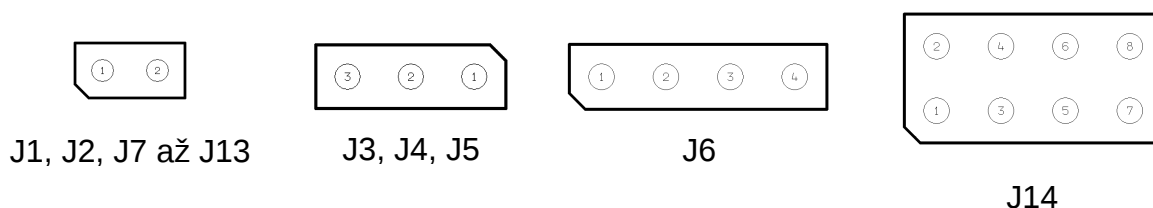
Nastavení propojek

Pro správnou funkci realizovaného obvodu solárního nabíječe, je třeba správně nastavit kombinaci propojek umístěných na desce plošných spojů pod označením Jxx (kde xx je pořadové číslo).



Obr. 5.13: Rozmístění součástek na DPS

Rozmístění vývodů



Propojka	Význam (slouží k...)
J1	připojení resetovacího tlačítka
J2	LED pro indikaci stavu nabíjení
J3	přivedení signálu o vstupním napětí do mikroprocesoru
J4	přivedení signálu o vstupním / výstupním proudu do mikroprocesoru
J5	přivedení signálu o výstupním napětí do mikroprocesoru
J6	výstup PWM signálu pro spínání T_1

J7	odpojení mikroprocesoru od napájecího napětí 5 V
J8	odpojení napájecího zdroje od vstupního napětí nabíječe
J9	odpojení všech spotřebičů od napájecího napětí 5 V
J10	odpojení proudového čidla od napájecího napětí 5 V
J11	sledování průběhu proudu cívkou L_2
J12	odpojení optočlenu od napájecího napětí 5 V
J13	zkratování snímacího rezistoru R_{13} na výstupu nabíječe
J14	výběr snímaného proudu, zkratování snímacího rezistoru na vstupu nabíječe

Volba snímaného proudu:

Vstupní proud – spojit piny J14: 3-4, 5-6; J13: 1-2

Výstupní proud – spojit piny J14: 1-2, 7-8, 3-5; rozpojit J13: 1-2

5.6 Řízení nabíječe

Řízení nabíječe se sledováním bodu maximálního výkonu provádí mikroprocesor popsany v kapitole 5.4.

Vstupními veličinami pro regulaci jsou: napětí FV článku U a proud FV článku I .

Výstupní veličinou je střída s spínání tranzistoru T_1 .

Algoritmus Perturb & Observe

Algoritmus získává ze vstupů údaje o napětí na vstupu a vstupním proudu. Je využíváno pouze 8 bitů z celkových 10 bitů A/D převodníku. Následně je vstupní proud porovnán s hodnotou minimální pro ukončení nabíjení, je-li aktuální hodnota vyšší než minimální je rozsvícena LED pro indikaci nabíjení.

Vynásobením vstupních dat je získán údaj o výkonu dodávaném FV panelem. Tato hodnota je porovnána s předchozí hodnotou a pokud je shledána jako vyšší, provede se úprava střídý spínání stejným směrem jako v předchozím kroku. Je-li aktuální hodnota nižší než předchozí, pak je střída upravena opačným směrem. Po úpravě střídý je předchozí hodnota výkonu nahrazena aktuální hodnotou.

Objeví-li se na vstupu PA.2 v průběhu nabíjení signál (log. 1) o dosažení maximálního výstupního napětí, přejde algoritmus do druhé části a sníží střidu spínání o jeden stupěň. Pokud signál na PA.2 klesne na log. 0, pak program běží ve

vyčkávací smyčce. Jakmile se opět objeví signál o dosažení maximálního napětí, pak je opět snížena střída spínání o jeden stupeň. Toto pokračuje až do doby, kdy je údaj o vstupním proudu z A/D převodníku menší než předem stanovená hodnota odpovídající reálné hodnotě vstupního proudu $I = 0,05 \times C_p$. To je hodnota pro ukončení nabíjení.

Frekvence PWM signálu je přibližně 40 kHz a umožňuje regulaci střídavy v 111 krocích. Počáteční hodnota střídavy s je nastavena o dva kroky vyšší než je minimální střída. Průběh nabíjení je indikován rozsvícenou LEDkou. Po ukončení nabíjení se LEDka rozblíká s periodou přibližně 2 vteřiny. Kód programu je na přiloženém CD.

Algoritmus Load Current Maximalization

Tento algoritmus jsem vytvořil úpravou algoritmu Perturb & Observe. Na začátku jsou opět nastaveny potřebné parametry mikroprocesoru. Program začíná přečtením údaje o výstupním proudu, který je i proudem nabíjecím. Tento údaj je nejprve porovnán s hodnotou odpovídající proudu pro ukončení nabíjení, pokud je přečtená hodnota vyšší pak je rozsvícena LEDka (připojená na PA.4) pro signalizaci nabíjení.

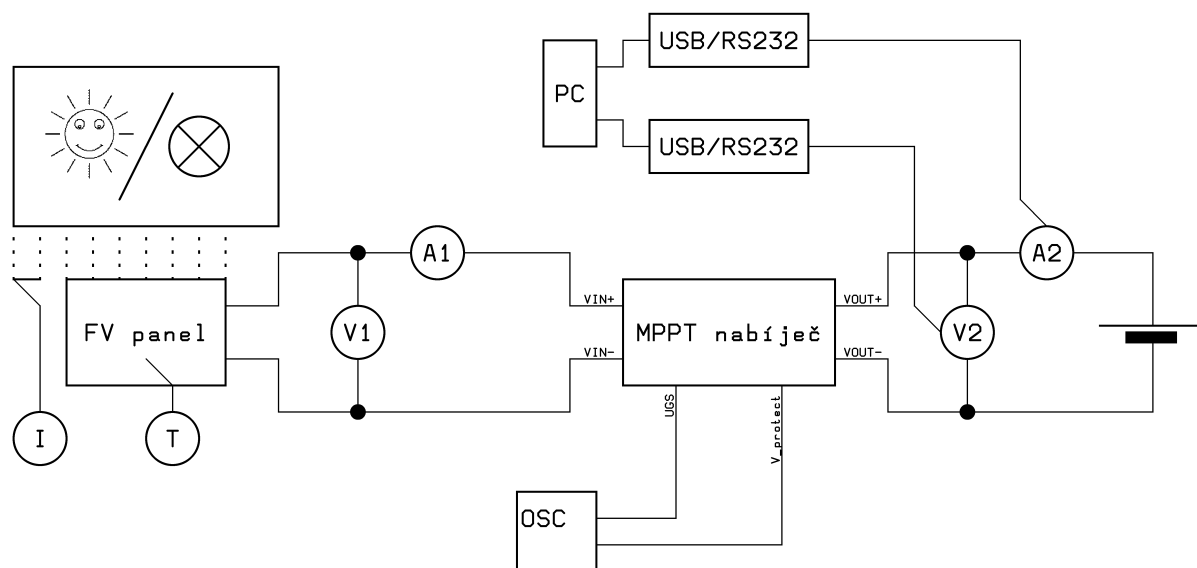
Algoritmus odečtením předchozí hodnoty proudu od nové zjistí, zda je nová hodnota vyšší. Pokud vyšší je, pak provede úpravu střídavy stejným směrem jako v předchozím kroku. Je-li nižší pak provede úpravu střídavy opačným směrem než v předchozím kroku.

Objeví-li se na vstupu PA.2 v průběhu nabíjení signál (log. 1) o dosažení maximálního výstupního napětí, přejde algoritmus do druhé části a sníží střídu spínání o jeden stupeň. Pokud signál na PA.2 klesne na log. 0, pak program běží ve vyčkávací smyčce. Jakmile se opět objeví signál o dosažení maximálního napětí, pak je opět snížena střída spínání o jeden stupeň. Toto pokračuje až do doby, kdy je údaj o vstupním proudu z A/D převodníku menší než předem stanovená hodnota odpovídající reálné hodnotě vstupního proudu $I = 0,05 \times C_p$. To je hodnota pro ukončení nabíjení.

Průběh nabíjení je indikován rozsvícenou LEDkou. Po ukončení nabíjení se LEDka rozblíká s periodou přibližně 2 vteřiny. Kód programu je na přiloženém CD.

5.7 Ověření funkce nabíječe

Fotovoltaický panel byl umístěn ve fotovoltaické komoře, která byla osazena nejprve dvěma, později čtyřmi halogenovými žárovkami, každá o příkonu 500 W. Pro ověření funkce v reálných podmínkách jsem provedl i měření ve venkovního prostoru (dvůr FEL) na provizorním měřicím stanovišti. Zapojení měřicích přístrojů bylo v laboratorních i reálných podmínkách stejné. Mikroprocesor byl řízen algoritmem LCM.



Obr. 5.14: Schéma zapojení sestavy měřicích přístrojů

Použité přístroje:

I1 - Pyranometr Mini-KLA SN 00087, i.č.Z2-11316

T - Digitální multimetr M890G, teplota, i.č. Z2 7093

V1 - digitální multimetr METEX M-4640A, 20 V, H101-64680

A1 - digitální multimetr METEX M-4640A, 200 mA, 20A, H101-64681

V2 - digitální multimetr METEX M-4660A, 20 V, H101-Z2-10232

A2 - digitální multimetr METEX M-4660A, 20 A, H101-Z2-11037

OSC - digitální paměťový osciloskop Tektronix TDS 1002

USB/RS232 - převodník rozhraní

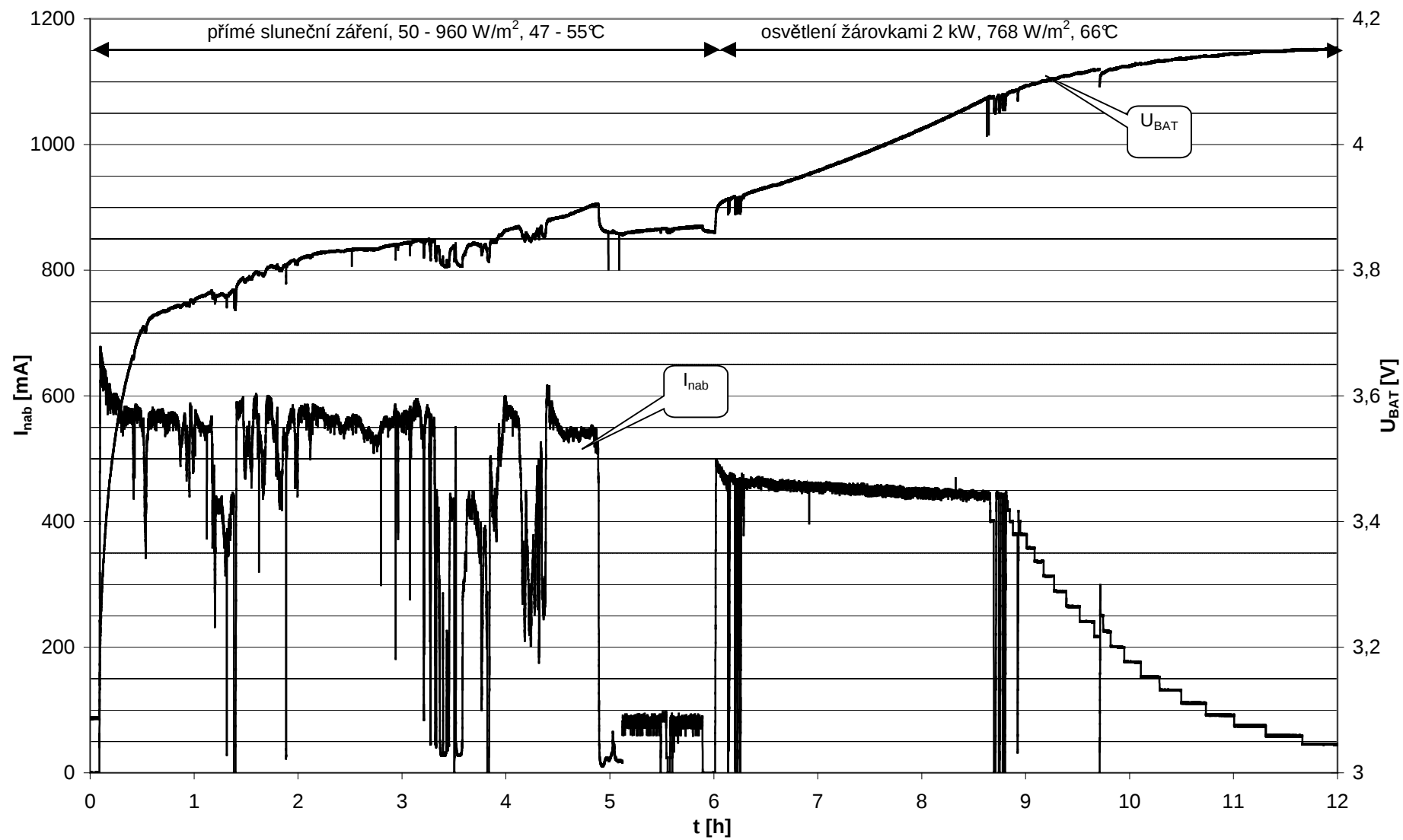
PC – osobní počítač vybavený softwarem Metex Control Client

Průběh nabíjení

Na obrázku 5.15 je průběh nabíjení li-ionového akumulátoru o kapacitě $C_p = 4000 \text{ mA}$. Napětí akumulátoru naprázdno před zahájením nabíjení bylo $U = 3 \text{ V}$. První část průběhu je zaznamenána ve venkovních prostorách při osvětlení slunečním zářením proměnlivé intenzity, teplota byla přibližně konstantní. Z důvodu nepřízně počasí, byla druhá část průběhu získána v laboratoři, při osvětlení čtyřmi halogenovými žárovkami při stálé intenzitě celkového dopadajícího záření $I = 768 \text{ W/m}^2$ a stálé teplotě $T = 67 \text{ }^\circ\text{C}$. Měření bylo provedeno ve dnech 15. – 16.5. a 19.5.2008.

Ze získaného průběhu nabíjení je vidět, že v první hodině nabíjení je dojde k relativně velké změně napětí na akumulátoru vzhledem k zbývajícím době měření. Nabíjecí proud akumulátoru v části, kdy byl FV panel osvětlen slunečním zářením, byl velmi závislý na intenzitě dopadajícího záření a několikrát došlo k přerušení nabíjení. Nejvyššího nabíjecího proudu $I_{\text{nab}} = 678 \text{ mA}$ bylo dosaženo právě v prvních momentech nabíjení, kdy byl akumulátor téměř vybitý. Do zhruba šesti hodiny nabíjení docházelo k postupnému zvyšování napětí U_{AKU} akumulátoru. Průběh nabíjení po šesti hodině probíhal v laboratoři se stálou intenzitou dopadajícího záření. To je patrné z průběhu nabíjecího proudu, který má přibližně konstantní hodnotu. Dochází pouze k jeho nepatrnému snižování vlivem vzrůstajícího napětí U_{AKU} .

Od 9. hodiny nabíjení se napětí akumulátoru začalo blížit konečné hodnotě $U_{\text{AKU}} = 4,15 \text{ V}$ a tak zasáhl výstupní ochranný obvod. Sledování bodu maximálního výkonu bylo zastaveno, střída spínání byla snížena o jeden krok a tím byl i snížen nabíjecí proud. Dále docházelo k snižování střídavy spínání až do doby kdy, nabíjecí proud klesl pod 40 mA a nabíjení bylo ukončeno.



Obr. 5.15: Průběh nabíjení Li-ion akumulátoru

Energetická bilance

Maximální energie uchovaná v akumulátoru: 14,8 Wh

Energie dodaná akumulátoru v průběhu nabíjení: **16,28 Wh**

Výkonová bilance

Protože jsem PC používal pouze k uchování hodnot pouze výstupních veličin, měřeních na vstupní straně jsem udělal namátkově jen několik.

datum a čas	I [W/m ²]	T [°C]	U_1 [V]	I_1 [A]	U_2 [V]	I_2 [A]	P_1 [W]	P_2 [W]	η [%]
15.5.2008 10.17	866	40	15,00	0,20	3,29	0,66	3,03	2,17	71,66%
15.5.2008 10.32	890	49	13,39	0,23	3,63	0,58	3,07	2,10	68,62%
15.5.2008 11.15	896	52	13,30	0,22	3,76	0,55	2,89	2,07	71,65%
15.5.2008 12.01	800	52	13,90	0,19	3,80	0,45	2,64	1,71	64,75%
15.5.2008 13.19	960	56	13,20	0,24	3,85	0,59	3,19	2,27	71,07%
15.5.2008 13.34	140	50	4,36	0,04	3,81	0,03	0,17	0,11	65,55%
15.5.2008 15.17	50	35	4,20	0,03	3,86	0,02	0,12	0,07	62,33%

Tab. 5.1: naměřené hodnoty

Z naměřených hodnot je vidět, že účinnost nabíječe se i při nízkých intenzitách osvětlení pohybuje v rozmezí 60 – 72 %.

Vlastní spotřeba

Při sledování bodu maximálního výkonu jsem změřil vlastní spotřebu nabíječe.

- výkon dodávaný FV panelem : 2,7 W (13,3 V x 203 mA)
- výkon odebíraný napájecím zdrojem: 147 mW (13,3 V x 11,1 mA)
- výkon dodávaný do akumulátoru: 1,84 W (3,917 V x 470 mA)

Výkony odebírané z napájecího zdroje:

- celkový odebíraný výkon: 44 mW (5 V x 8,8 mA)
- optočlen: 25,5 mW (5 V x 5,1 mA)
- proudové čidlo: 14,75 mW (5 V x 2,95 mA)
- mikroprocesor: 19 mW (5 V x 3,8 mA)

Napájecí zdroj tedy pracuje s účinností přibližně 30 % a z celkového příkonu spotřebovává 5,5 %.

Zhodnocení měření

V průběhu měření v reálných slunečních podmínkách se objevili nedostatky použitého algoritmu řízení nabíječe. Jednalo se o stavy, kdy byla intenzita ozáření nedostatečná. Algoritmus postupně zvětšoval střidu spínání a tím se pracovní bod FV panelu dostal do části charakteristiky, kdy změna střidy spínání vyvolala změnu výstupního proudu nabíječe takovou, že ji A/D převodník nedokázal vyhodnotit. Tento nedostatek vyřešila změna řídicího algoritmu tak, že po překročení dané hodnoty střidy se krok změny střidy změnil z jednoho kroku na tři kroky najednou. Tím se dosáhne detekovatelné změny výstupního proudu.

Dále bylo třeba odladit hodnotu proudu pro ukončení nabíjení a upravit velikost snímacího rezistoru na výstupní straně nabíječe, protože navržená hodnota byla příliš velká a při vysokých výstupních proudech bylo na výstupu proudového čidla konstantní napětí přibližně 4,2 V, které nebylo výstupním proudem ovlivněno. Nová navržená hodnota snímacího odporu je $R_{13} = 0,073 \Omega$.

Účinnost nabíječe se pohybovala v rozmezí 60 až 72 %. Pokud by nebylo použito tohoto nabíječe a akumulátor o jmenovitém napětí $U = 3,7 \text{ V}$ by byl připojen přímo k použitému FV panelu, pak by bylo využito zhruba 30 % maximálního výkonu panelu. Hodnota indukčnosti cívky L_2 byla upravena na 33 μH , protože hodnota střidy se v provozu pohybuje v okolí $s = 10 \%$.

Hodnota konečného napětí na akumulátoru byla ovlivněna vložením ampérmetru na výstup nabíječe. Jeho odpor byl nezanedbatelný a úbytek napětí na něm způsobil chybnou rozhodovací úroveň výstupního ochranného obvodu. Ampérmetr by tedy měl být vřazen ještě před tímto obvodem.

Účinnost použitého napájecího zdroje není příliš dobrá, to je způsobeno příliš malým odběrem z něj. Pokud by ale byl použit stabilizátor napětí 7805, jeho účinnost by byla přibližně stejná. Nevýhodou použití stabilizátor 7805 je jeho ztrátové napětí, které je nejméně $U_{\text{DROP}} = 2 \text{ V}$. To by znamenalo že minimální vstupní napětí by bylo $U_1 = 7 \text{ V}$.

6 Závěr

Při prvním ohledání možných způsobů řešení daného zadání, po prostudování literatury [2] se jako nejelegantnější způsob hledání bodu maximálního výkonu jevila metoda Ripple Correlation Control (RCC). Po detailnějším nastudování problematiky RCC jsem se rozhodl od této metody upustit a sledování maxima výkonu realizovat metodou Perturb & Observe (P&O). Při prvních pokusech, kdy byl obvod zapojen v nepájivém poli, byl pro snímání napětí na FV panelu použit odporový dělič a pro snímání proudu snímací rezistor a operační zesilovač. Zapojení v nepájivém poli však nebylo pro MPPT výhodné z hlediska stability. Vstupní údaje pro mikroprocesor neodpovídaly skutečným hodnotám a tak se mi obvod nepodařilo uvést do stavu, kdy by sám reguloval. Realizací snižující měniče s mikroprocesorem na desce plošných spojů spolu s mi podařilo dosáhnout zlepšení. Obvod byl již stabilnější a byl schopen samostatné regulace. Měřicí obvody byly dále realizovány v nepájivém poli. Informaci o vstupním proudu již zajišťovalo proudové čidlo TSC101. Z výsledků pokusů a měření na tomto obvodu jsem došel k závěru, že výkon je maximální právě tehdy, když je nabíjecí proud akumulátoru maximální. Tato metoda je v literatuře [2] uvedena jako Load Current Maximization (LCM).

Celý obvod jsem tedy realizoval na (v této práci uvedené) desce plošných spojů, která umožňuje sledování bodu maximálního výkonu jak metodou P&O, tak i LCM. Stačí pouze změnit kombinaci propojek a vyměnit řídicí algoritmus mikroprocesoru. Výhodou použití metody LCM je možnost snímání výstupního proudu. Toho může být využito v případě potřeby omezení nabíjecího proudu. Oba algoritmy jsou přiloženy na CD.

Pro realizaci napájení obvodem ST1S10 jsem se rozhodl proto, že při pokusech se stabilizátorem 7805 a poklesu vstupního napětí pod 7 V již mikroprocesor neměl konstantní napájecí napětí a tedy i výsledky analogově digitálního převodu nebyly věrohodné. Nízká účinnost použitého obvodu pro napájení mikroprocesoru a proudového čidla, je způsobena malým odběrem z něj. Zlepšením účinnosti napájení by však přidalo maximálně 5 % celkové účinnosti nabíječe.

Zvýšení celkové účinnosti nabíječe by bylo možné dosáhnout pečlivějším návrhem a výběrem použitých součástek.

Spínací proces snižujícího měniče do obvodu nabíječe zavádí rušení, které může mít rozhodující vliv na měřené veličiny. Vliv tohoto rušení jsem se pokusil omezit

použitím průměrování naměřených hodnot. Účinnost tohoto opatření se však nikterak neprojevila a dále jsem průměrování nepoužíval. Omezení rušení jsem dosáhl až připojením filtračních kondenzátorů na výstupy děliče napětí a proudového čidla. Při měření průběhu nabíjení jsem zjistil maximální výstupní proud, ten byl přibližně 700 mA. Velikost snímacího rezistoru tedy bylo třeba upravit na nižší hodnotu tak, aby se proudové čidlo nedostávalo do stavu saturace. Snížení odporu snímacího rezistoru, však vede ke zvýšení citlivosti na rušení. Nejvhodnějším řešením by tedy bylo ponechat stávající snímací rezistor a použít proudové čidlo s nižším zesílením. Pro návrh nabíječe jsou rozhodující parametry FV panelu a nabíjeného akumulátoru. Při změně FV panelu je třeba změnit dělicí poměr vstupního děliče napětí a vstupní snímací rezistor dimenzovat na maximální proud FV panelu (v případě použití P&O). V případě použití metody LCM, je třeba správně dimenzovat výstupní snímací rezistor. Nabíječ je realizován pro Li-ionové akumulátory (akumulátorové balíky) s jmenovitým napětím nižším než je napětí bodu maximálního výkonu FV panelu. Pokud by tato podmínka neměla být dodržena, pak by bylo třeba změnit topologii použitého měniče ze snižujícího (buck) na zvyšující (boost) nebo kombinaci obou. Dle mého názoru, při zlepšení stability obvodu je tento nabíječ hromadně reprodukovatelný.

SEZNAMY

Použitá literatura

- [1] MAREK, Jiří, STEHLÍK, Luděk. *Hermetické akumulátory v praxi*. 1. vyd. Praha : BEN, 2004. 142 s. ISBN 80-86230-34-4.
- [2] T. Eswam and P. L. Chapman, "Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, in press.
- [4] BUCHMANN , Isidor . *BatteryUniversity.com* [online]. 2003-2005 , 2006 [cit. 2008-05-08]. Dostupný z WWW: <<http://www.batteryuniversity.com>>.
- [5] IEA. *PV Industry Production*. (August 2005); Solarbuzz, LLC. (2006). 2006 [cit. 2008-05-08]. Dostupný z WWW: <<http://www.maproyalty.com/solar.html>>.
- [6] Macháček, Zdeněk. *Monitorování a vyhodnocení činnosti fotovoltaického systému na ČVUT-FEL*. 2003. Praha

Seznam zkratek

MPPT...maximum power point tracking (sledování bodu maximálního výkonu)

FV...foto-voltaický

P&O... Perturb & Observe (metoda vyhledávání maximálního výkonu)

LCM... Load Current Maximum (metoda vyhledávání maximálního výkonu)

RCC...Ripple Correlation Control (metoda vyhledávání maximálního výkonu)

CP...kapacita akumulátoru [Ah]

VA...volt-ampérová (charakteristika)

OZ...operační zesilovač

A/D...analogově digitální (převod)

Seznam příloh

<i>Příloha I</i> -	Voltampérová a výkonová charakteristika fotovoltaického článku.....	50
<i>Příloha II</i> -	Převodní charakteristika výstupního ochranného obvodu.....	50
<i>Příloha III</i> -	návrh DPS	51
<i>Příloha IV</i> -	osazovací plánec.....	51
<i>Příloha V</i> -	seznam použitých součástek	52
<i>Příloha VI</i> -	některé zajímavé průběhy	53
<i>Příloha VII</i> -	vývojový diagram P&O Algoritmu	54
<i>Příloha VIII</i> -	vývojový diagram LCM algoritmu.....	55

PŘÍLOHY

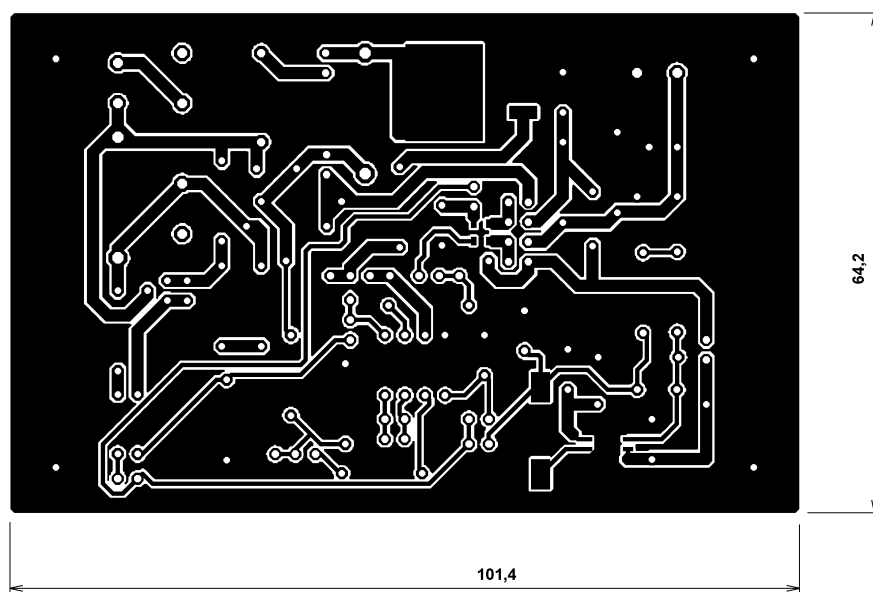
Příloha I - Voltampérová a výkonová charakteristika fotovoltaického článku

U [V]	I[mA]	P[W]
16,37	0,02	0,00
16,34	1,37	0,02
16,28	4,35	0,07
16,23	7,38	0,12
16,18	10,40	0,17
16,12	13,55	0,22
16,06	16,84	0,27
16,00	20,27	0,32
15,93	23,83	0,38
15,85	27,52	0,44
15,76	31,21	0,49
15,65	35,04	0,55
15,55	38,90	0,60
15,44	42,54	0,66
15,35	46,47	0,71
15,18	50,40	0,77
15,08	54,24	0,82
14,96	58,10	0,87
14,83	61,82	0,92
14,68	65,40	0,96
14,54	69,00	1,00
14,36	72,33	1,04
14,16	75,35	1,07
13,93	78,20	1,09
13,63	80,70	1,10
13,30	82,40	1,10
12,81	83,40	1,07
12,35	84,10	1,04
11,96	84,80	1,01
11,54	85,37	0,99
11,23	86,28	0,97
10,86	86,47	0,94
10,57	87,00	0,92
9,63	88,00	0,85
7,13	90,00	0,64
5,78	90,94	0,53
5,17	91,34	0,47
4,86	91,74	0,45
4,65	91,57	0,43
4,33	91,81	0,40

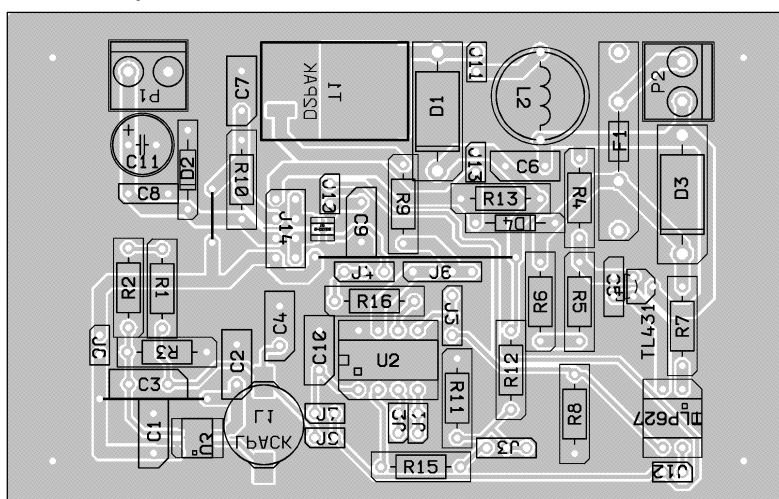
Příloha II - Převodní charakteristika výstupního ochranného obvodu

U ₁ [V]	U ₂ [V]
3,64	0,09
3,70	0,09
3,90	0,09
4,07	0,09
4,12	0,10
4,14	0,12
4,15	0,15
4,15	0,25
4,15	1,22
4,15	1,96
4,15	3,00
4,15	4,11
4,15	4,20
4,25	4,23
4,52	4,25
4,15	4,20
4,15	3,39
4,15	2,73
4,15	0,76
4,15	0,08
4,14	0,04
4,12	0,01
3,80	0,01

Příloha III - návrh DPS



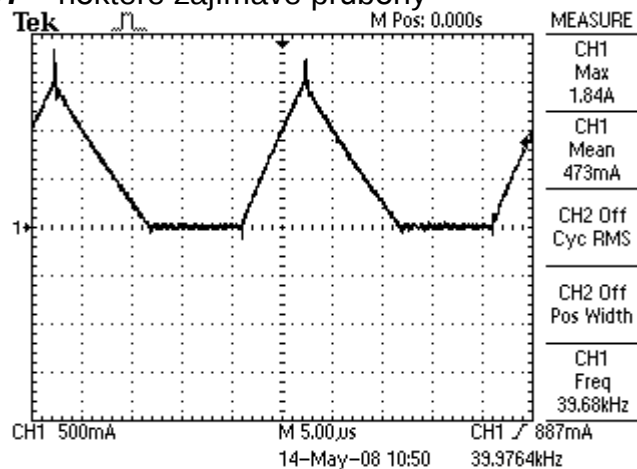
Příloha IV - osazovací plán



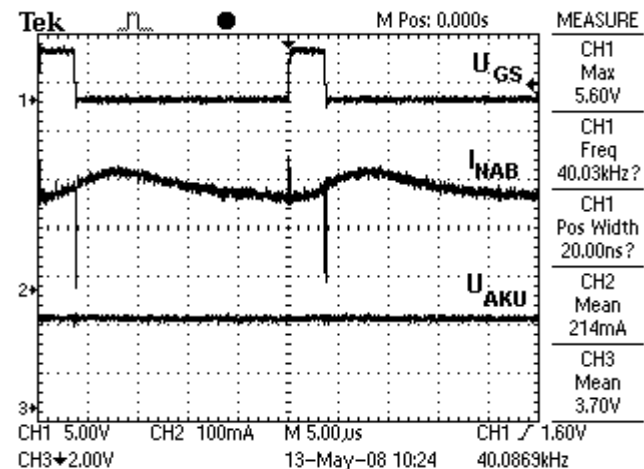
Příloha V - seznam použitých součástek

Součástka	Hodnota	Pouzdro	Umístění
C1 - C4	4,7uF	CK50C	TOP
C5	100nF	CK25C	TOP
C6 - C10	4,7uF	CK50C	TOP
C11	470uF	CR80	TOP
D1, D3	1N5822	DO201AD	TOP
D2	1N4148	DO35	TOP
D4	1N4148	DO35	TOP
J1, J2	J2.1	S1G2	TOP
J3, J4, J5	J3.1	S1G3	TOP
J6	J4.1	S1G4	TOP
J7 - J13	J2.1	S1G2	TOP
J14	J2.4	S2G4	TOP
L2	30uH	CR180	TOP
P1, P2	ARK120/2	ARK120	TOP
R1	100k	R100	TOP
R2	1k	R100	TOP
R3	22k	R100	TOP
R4	150k	R100	TOP
R5	56k	R100	TOP
R6	39k	R100	TOP
R7	1k	R100	TOP
R8	4k7	R100	TOP
R9	2R2	R100	TOP
R10	0R22	R100	TOP
R11	33k	R100	TOP
R12	100k	R100	TOP
R13	0R1	R100	TOP
R15,R16	100R	R100	TOP
TL431	TL431	TO92	TOP
TLP627	TLP627	DIP4	TOP
U2	ST7FLITEUS5	DIP8	TOP
L1	3,3uH	LPACK	BOT
T1	STB16NF06L	D2PAK	BOT
U1	TSC101	SOT23-5	BOT
U3	ST1S10	POWERSO-8	BOT

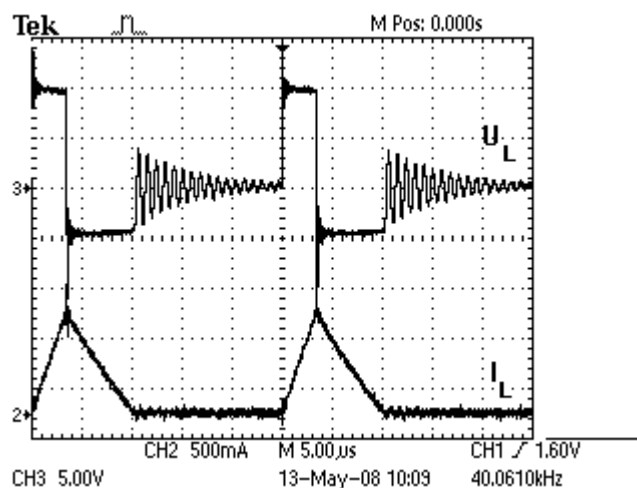
Příloha VI - některé zajímavé průběhy



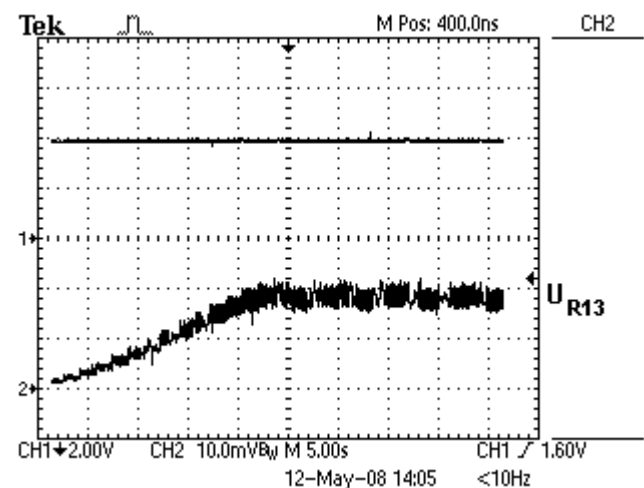
Obr. 6.1: Průběh proudu cívky L_2 – I_{L2}



Obr. 6.2: Průběh U_{GS} , I_{NAB} a U_{AKU}

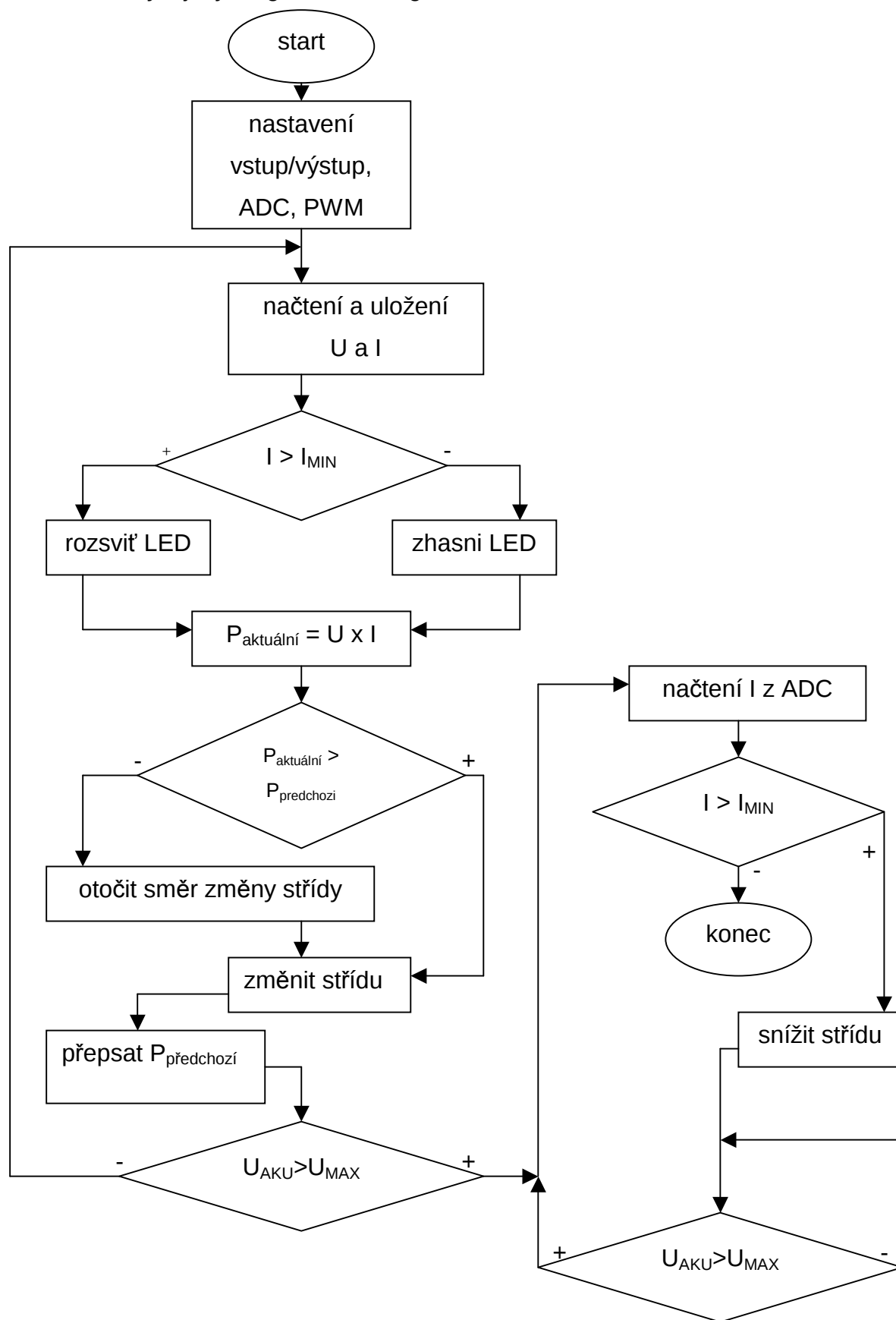


Obr. 6.3: Průběh napětí U_L a proudu I_L cívky L_2



Obr. 6.4: Náběh napětí na R_{13} při zapnutí nabíječe

Příloha VII - vývojový diagram P&O Algoritmu



Příloha VIII - vývojový diagram LCM algoritmu

