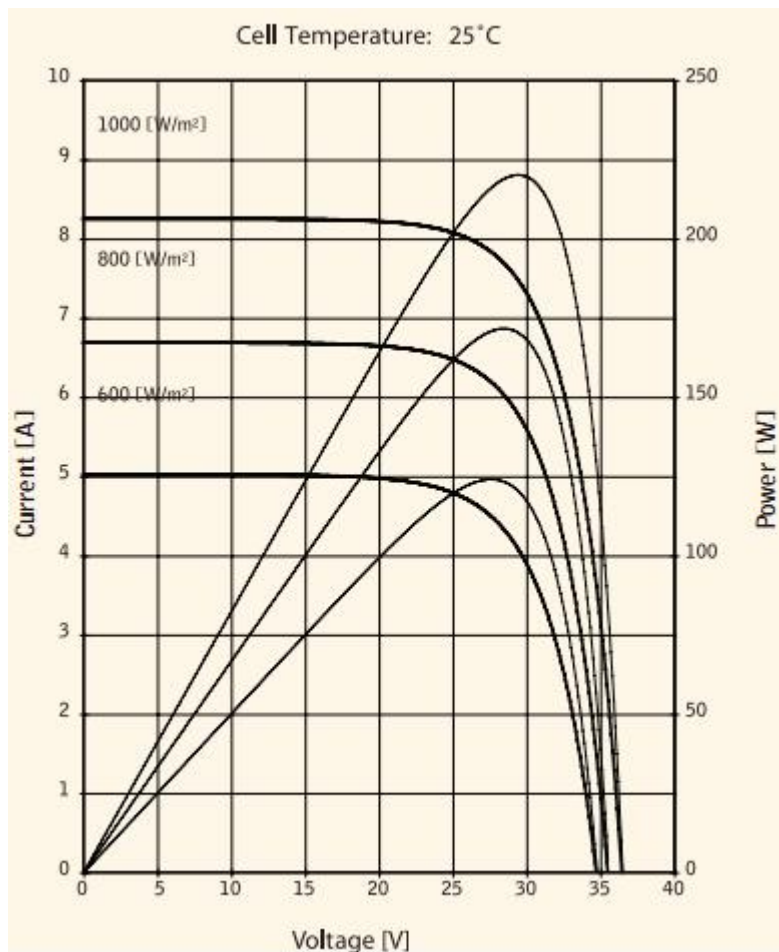


Solární optimalizovaný nabíječ baterie

Úvod

Podobně jako většina systémů generování energie, solární panely generují nejvíce energie, když mají optimální zátěž. Obr. 1 ukazuje voltampérovou charakteristiku typického solárního panelu (Sharp ND-224U1F) a výstupní výkon za různých světelných podmínek.



Obr. 1

Specifikace panelu zde:

http://www.ko4bb.com/Solar_Optimizer/Sharp_ND-224U1F_Specification.pdf

Solární panel se při velkém proudu chová jako zdroj konstantního proudu a jako zdroj konstantního napětí při malém proudu. Oblast přechodu je místem, kde můžeme získat nejvyšší výkon. Napětí a obzvláště proud v optimálním bodě se značně mění s množstvím světla dopadajícího na panel.

Solární panel je typicky používán pro nabíjení baterií, protože energie ze slunce je dostupná pouze přes den, ale elektřina je používána typicky hlavně během doby, kdy slunce nesvítí. Za dní s velkou oblačností je k dispozici pouze omezené množství energie dokonce i v poledne.

Baterie pracují při poměrně stabilním napětí, které v nejlepším případě může odpovídat optimálnímu napětí solárního panelu pouze za určitých podmínek.

Optimalizovaný nabíječ baterie musí být schopen určit bod maximálního výkonu (maximum power point, MPP) panelu za daných podmínek a přizpůsobit zátěž tak, aby odpovídala aktuálnímu vnitřnímu odporu panelu, přičemž musíme brát ohled na to, že MPP se mění během dne jako funkce množství světla dopadajícího na panel a jeho teploty.

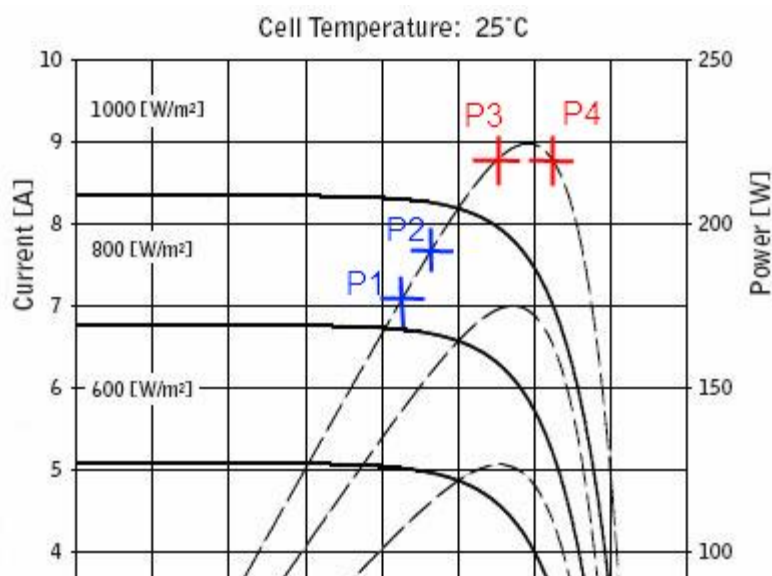
Naštěstí spínané regulátory, které se používají v nabíječkách baterií, mohou měnit zátěž, zatímco udržují správné napětí pro nabíjení baterie.

Vše, co je potřeba, je obvod, který dokáže najít bod maximálního výkonu a řídit nabíječ baterie.

Jak to funguje

Náš optimalizátor pracuje na principu „vyvolej poruchu a pozoruj účinek“ (Perturb and Observe, P&O).

Optimalizátor nabíjení průběžně monitoruje výkon panelu, zatímco po malých krocích mění zátěž. Když se při zvýšení zátěže zvětší výkon, kontrolér zvětší průměrnou zátěž. Když se výkon mezi dvěma kroky změny zátěže nezmění, panel pracuje přes MPP (viz obr. 2).



Obr. 2

Na obrázku výše body P1 a P2 odpovídají činnosti mimo optimální bod. Proud je velký, ale dodávaný výkon je menší, než kdyby zátěž byla o trochu menší (menší proud a vyšší napětí).

Když nabíječ pracuje mezi body P1 a P2, kontrolér dá nabíječi povel, aby zmenšil zátěž (zmenšil proud), aby se zvětšil dodávaný výkon. Nakonec se operační body dostanou do oblasti P3/P4, kde dodávaný výkon je v obou bodech stejný a kontrolér zůstane v této úrovni, dokud se nezmění množství světla nebo teplota panelu (nebo stav nabití baterie).

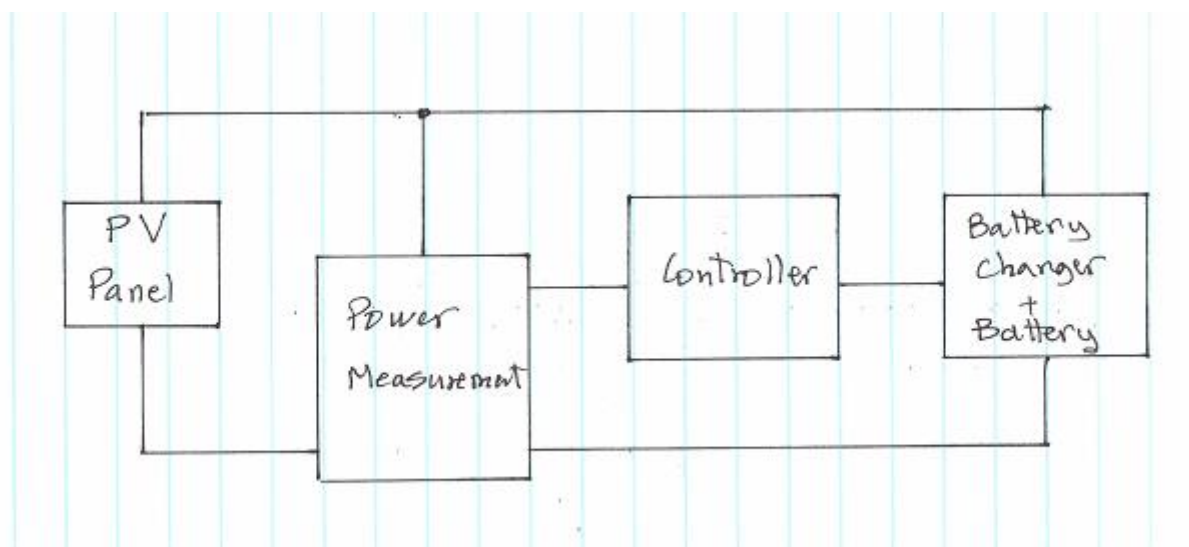
Na obrázku jsou body P1 a P2 (respektive P3/P4) od sebe dál, než je žádoucí, pouze pro ilustraci. Kdyby body byly od sebe tak daleko, kontrolér by nikdy nedokázal nastavit MPP. Můžete vidět, že body P3 a P4 jsou zhruba 5W pod MPP. Když se výkon bude měnit po menších krocích, body P3, P4 budou k sobě blíží a kontrolér bude pracovat velmi blízko MPP.

Nabíječ vytváří zátěž. V našem příkladě modulace představuje kolem 5% průměrné zátěže. Tato hodnota může být nastavena v závislosti na výkonu použitého panelu, citlivosti a dynamickém rozsahu obvodu monitorujícího výkon a jak blízko chcete být k bodu MPP. Typické hodnoty jsou několik procent.

Když jde při zvětšení zátěže výkon nahoru, průměrná zátěž se zvětší, a naopak.

Když malá změna zátěže nezpůsobí změnu výkonu jedním nebo druhým směrem, jsme „rozkročení“ nad bodem MPP.

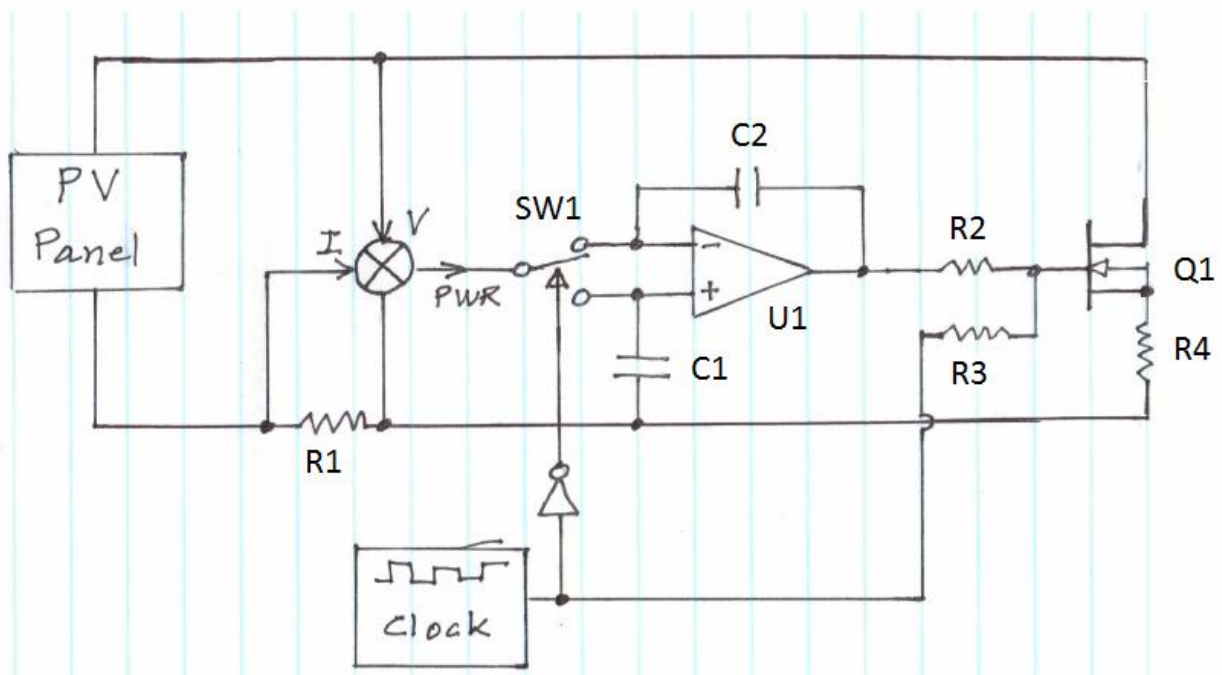
Obr. 3 ukazuje blokové schéma našeho kontroléru.



Obr. 3

Obr. 4 ukazuje zjednodušené schéma s více podrobnostmi, jak každý blok funguje.

PV Panel Optimizing Controller



Obr. 4

Ve schématu zleva:

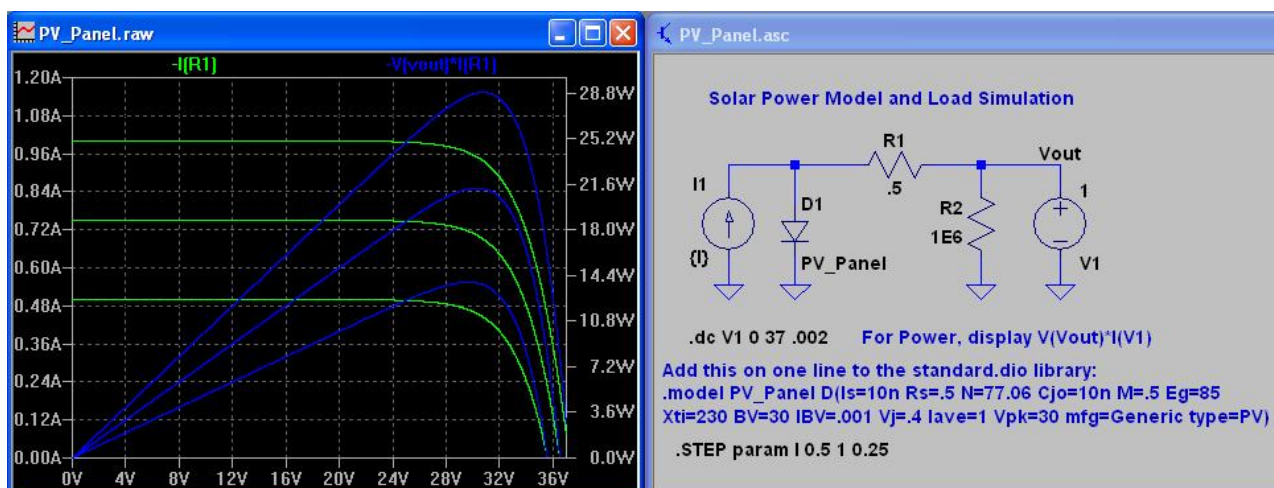
- Fotovoltaický panel dodávající energii
- Monitor výkonu kolem R1 a násobičky dodávají napěťový signál, který představuje výkon dodávaný panelem v závislosti na aktuálních světelných podmínkách, teplotě a zátěži.
- Obvod kolem hodin, SW1 a U1 optimalizuje řízení nabíjení.
- Obvod kolem R2, R3, R4 a Q1 představuje nabíječ baterie.

Solární panel

Model diody PV panelu byl vytvořen na základě informací v aplikační poznámce fy Intusoft (Ref [2]).

Podle této aplikační poznámky je fotovoltaický panel nasimulován pomocí speciální diody zapojené paralelně se zdrojem proudu.

Model byl vytvořen tak, aby se co nejvíce blížil tvaru VA charakteristiky PV panelu Sharp.



Kromě měřítka (tento model pracuje s proudem od 0,5 do 1A, zatímco panel Sharp je schopen při plném osvětlení dodat téměř 9A) se křivky shodují s charakteristikami v datasheetu Sharp docela dobře.

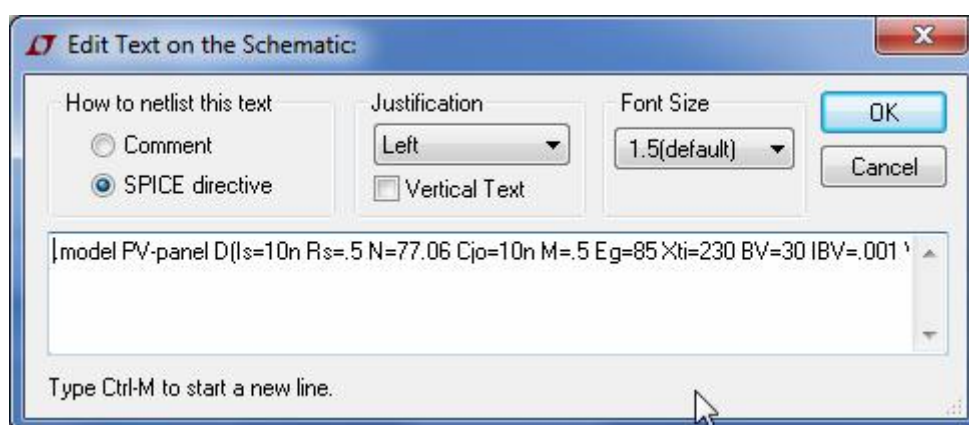
Zdroj V1 je použit pro rozmítání zátěže panelu a nakreslení VA křivky.

Různé stupně osvětlení jsou představovány změnou proudu zdroje I1. V této simulaci je zdroj proudu I1 krokován ve třech různých hodnotách s použitím direktivy `.STEP`.

Aby tento model fungoval, je třeba přidat model speciální diody PV-Panel do knihovny LT Spice.

Poznámka překladatele:

Model diody lze přidat přímo do schématu jednoduše tak, že komentář (modrý) se změní na SPICE direktivu (černý text) pomocí následujícího dialogu:



Model musí být zapsán v jednom řádku.

Abyste to provedli, přidejte následující text jako jeden řádek do souboru "standard.dio" v adresáři knihoven v instalačním adresáři LT Spice ("C:\Program Files\LTC\LTspice\lib\cmp"):

```
.model PV_Panel D(Is=10n Rs=.5 N=77.06 Cjo=10n M=.5 Eg=85 Xti=230 BV=30
IBV=.001 Vj=.4 Iave=1 Vpk=30 mfg=Generic type=PV)
```

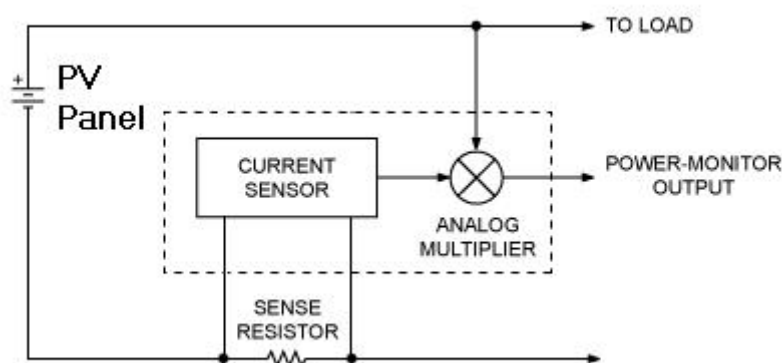
Tento model je pravděpodobně hrubě nepřesný s ohledem na skutečný výkon, zejména pokud jde o dostupný výkon a také o chování při různých teplotách, ale reprezentuje VA křivku dostatečně přesně při jedné teplotě na to, aby demonstroval činnost optimalizátoru kontroléru.

Na rozdíl od PV panelu Sharp, použitého na začátku článku, LT Spice model je navržen pro maximální proud 1A.

Pro více informací o SPICE modelu diody viz Ref. [\[3\]](#).

Monitor výkonu

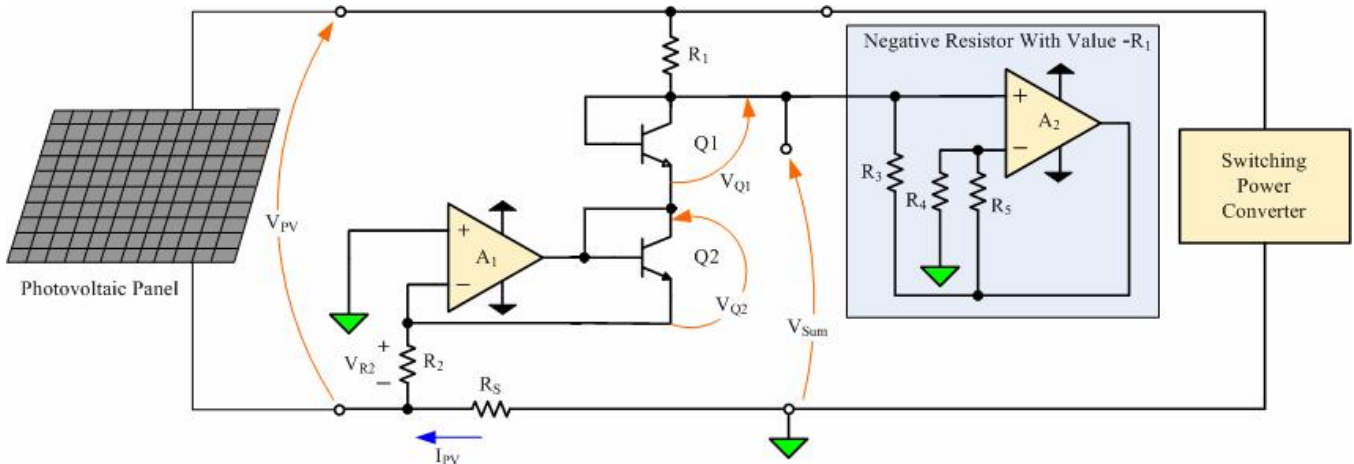
Potřebujeme být schopni měřit výkon, abychom našli MPP. Blokové schéma měřiče výkonu je na obr 5.



Obr. 5

Pro zjištění výkonu potřebujeme měřit napětí a proud a tyto veličiny spolu vynásobit. Násobení, prováděné pomocí analogové elektroniky, je poněkud obtížné. Jednou z cest je analogová data převést na logaritmické měřítko, sečíst je a opět převést pomocí exponenciálního zesilovače na lineární hodnotu. Zní to složitě, ale logaritmickou konverzi lze snadno provést pomocí bipolárního p-n přechodu. Je jednoduché převést logaritmickou hodnotu proudu na napětí a logaritmickou hodnotu napětí na napětí. Sečtením těchto dvou veličin získáme logaritmus výkonu.

To dělá následující obvod na obr. 6. Tento nápad jsem našel na tomto blogu (Ref [\[1\]](#)) a zjednodušil ho. Na uvedeném odkazu najdete podrobné vysvětlení funkce tohoto obvodu.



Obr. 6

Účelem záporného odporu kolem A2 je eliminovat vliv napětí na Q1, Q2. Bez toho by proud skrz Q1 byl roven $(V_{pv} - V_{sum})/R_1$. V_{q1} je logická hodnota V_{pv} , proud skrze něj by měl být roven V_{pv}/R_1 , takže člen V_{sum} musí být eliminován. Bez obvodu negativního odporu by monitor výkonu byl zatížen chybou, která by byla tím větší, čím by napětí z PV panelu bylo nižší. Avšak u panelů s napětím vyšším než 12V je chyba malá a může být pro účely stavby optimalizovaného nabíječe zanedbána (nezapomeňte, že nás zajímá pouze relativní výkon, nikoli absolutní), takže z naší simulace bude obvod záporného odporu vyřazen.

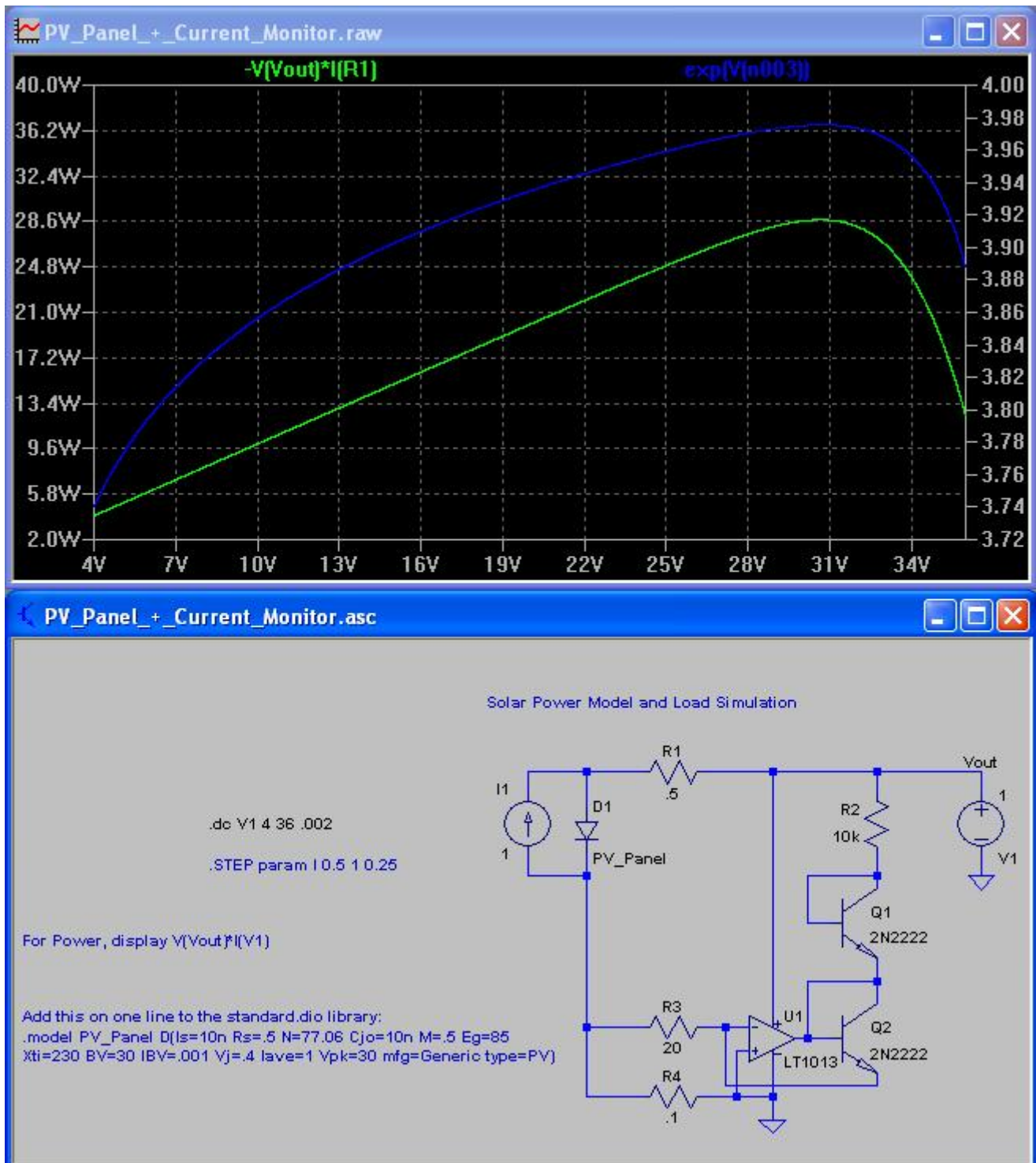
V_{sum} je napětí přímo úměrné logaritmu výkonu dodávanému panelem, nikoli lineárnímu výkonu. Avšak nás nezajímá měření skutečného výkonu, ale chceme jen vědět, kde je jeho vrchol, takže logaritmus funkce (nebo jakákoli monotónní funkce) nám to umožní.

R_s by měl mít velikost s ohledem na maximální proud panelu (8 až 10A pro tento panel). Jeho hodnota by měla být dostatečně malá, aby způsobil zanedbatelnou ztrátu výkonu. Hodnota $0,01\Omega$ toho dosáhne, zatímco napětí na tomto odporu je dostatečně velké, abychom offset A1 mohli zanedbat.

Hodnoty R_1 a R_2 nejsou kritické, avšak musí být zvoleny tak, aby součástky Q1, Q2 a A1 nebyly přetíženy. S maximálním proudem 5mA to bude fungovat. Takže pro zvolený panel by hodnota R_1 neměla být menší než $8k\Omega$ a R_2 by neměl být menší než asi 20Ω .

Solární panel a monitor výkonu

Tento model simuluje solární panel a monitor výkonu pro ověření odezvy ve skutečném obvodu.

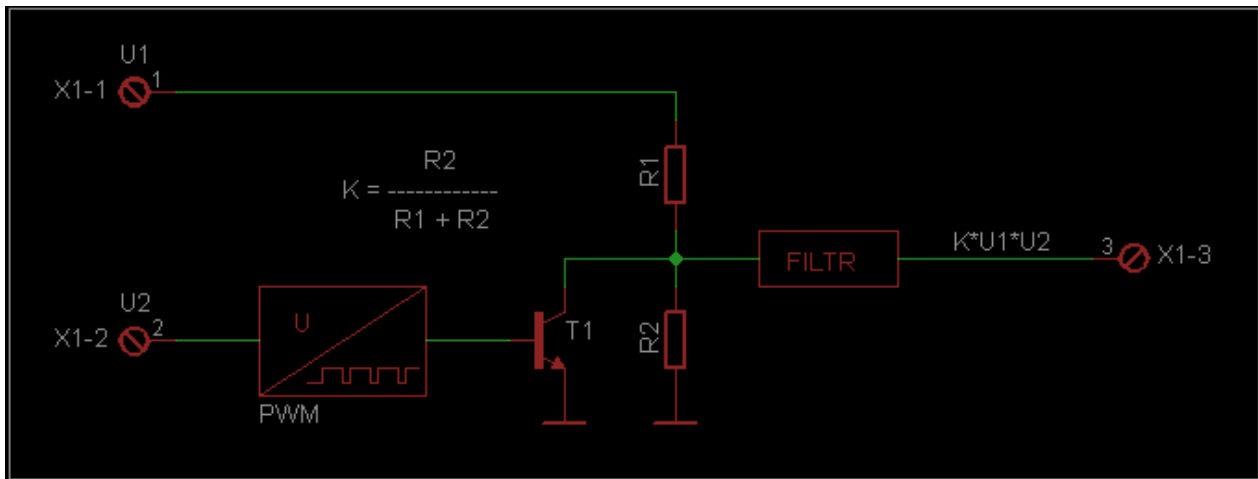


You can see that the Power Monitor's response deviates at low output voltages as predicted, but that the response near the maximum power point tracks the actual solar panel power pretty well. The most important is that the MPP be the same.

Poznámka překladatele:

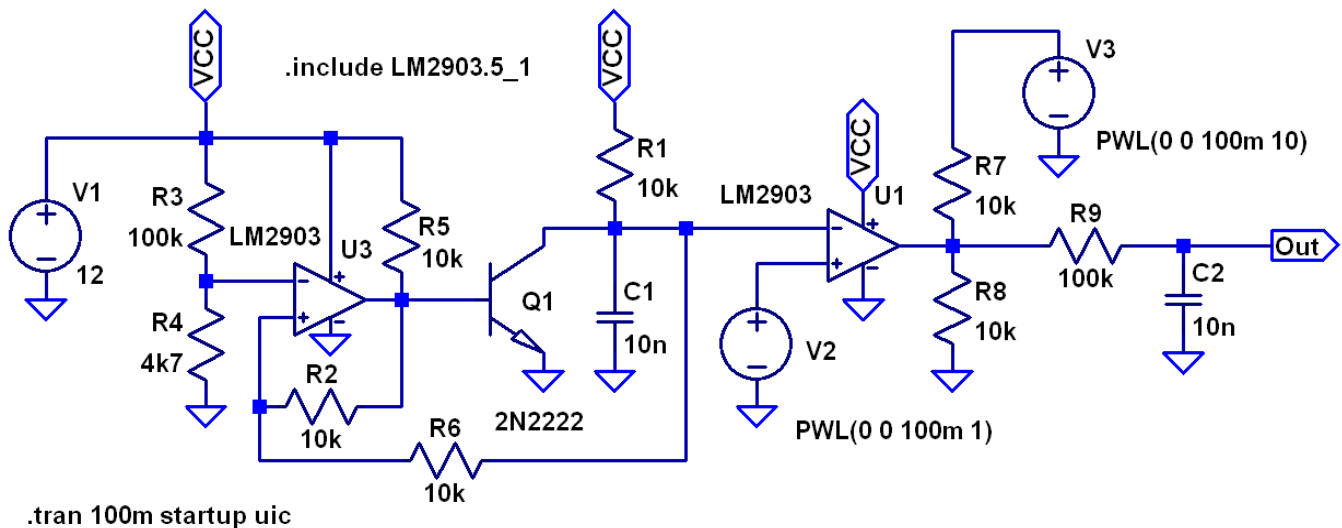
Nevím, jak se autorovi podařilo nasimulovat modrou křivku na obrázku výše. Mně se to nepodařilo, přestože jsem použil naprosto stejné součástky jako ve výše uvedeném schématu.

Proto jsem zapátral na internetu a zjistil, že lze poměrně jednoduše, přesně a elegantně realizovat násobičku pomocí šířkové modulace (PWM). Na obrázku dole je principiální blokové schéma:



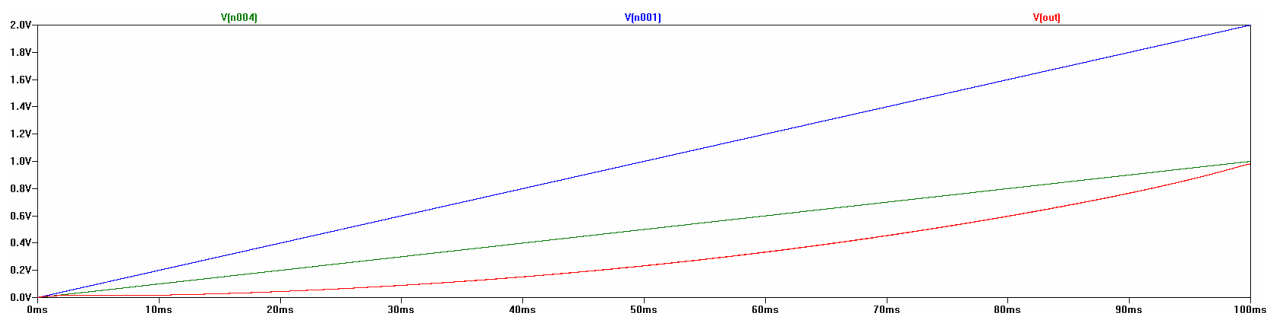
Obr. 1: Blokové schéma analogové násobičky s PWM

Princip je tak jednoduchý, že k němu není třeba žádný popis, protože je na první pohled zřejmý z obrázku. Na základě obr. 1 nyní navrhne obvodové řešení, nakreslíme schéma zapojení a provedeme simulaci.



Obr. 2: Obvodové schéma násobičky

Nyní se podíváme, jak to funguje. Obvod kolem komparátoru U3 tvoří zdroj pily. Napětí pilovitého průběhu odebíráme z kondenzátoru C1 a přivádíme ho na invertující vstup komparátoru U1. Toto napětí je porovnáváno s napětím V2, které tvoří první násobenou veličinu. Odpory R7, R8 jsou ekvivalentem děliče napětí R1, R2 z obvodu na obr. 1. Tranzistor T1 je tvořen tranzistorem uvnitř komparátoru LM2903. Napětí V3 je druhou násobenou veličinou. Nyní se podívejme na výsledek simulace:

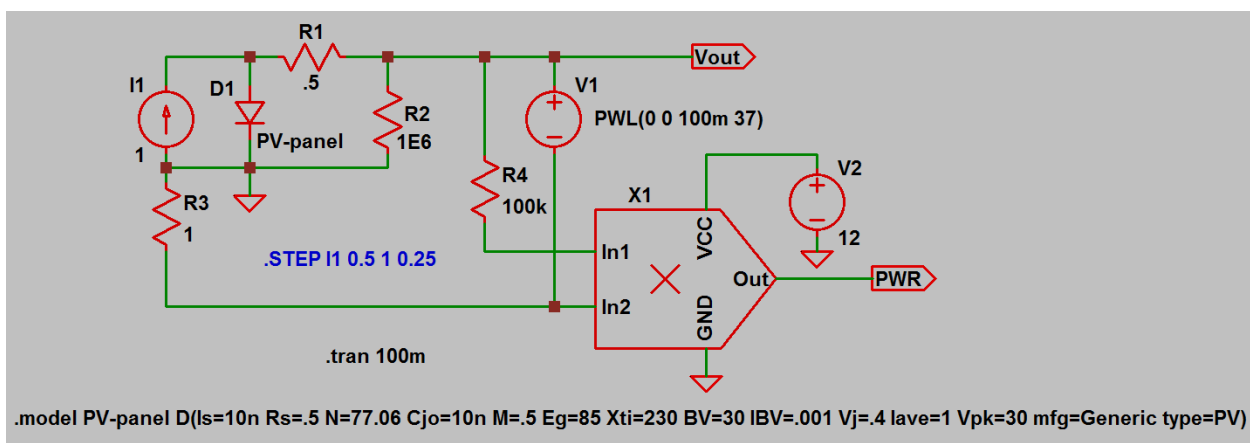


Obr. 3: Výsledek simulace násobičky

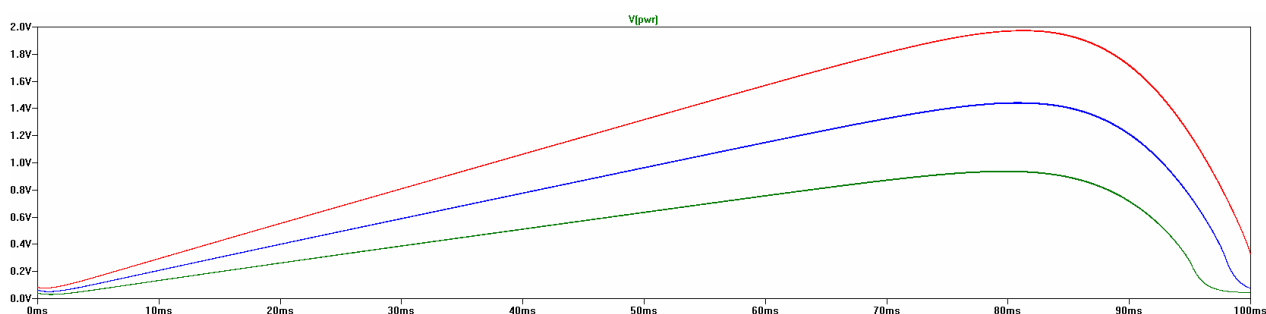
Všimněte si, že výstupní křivka (červená) má tvar paraboly a na konci téměř dosahuje hodnoty 1V, což dokazuje, že násobička funguje správně. (Malá záporná odchylka je způsobena zpožděním filtru.)

Ještě uveďme, že pomocí obvodu na obr. 2 lze realizovat maximálně dvoukvadrantovou násobičku. (Pro naše účely stačí jednkvadrantová.) Pokud je napětí V2 je v rozsahu 0 až 1V, platí vztah pro konstantu K na obr. 1.

Tuto násobičku použijeme pro změření výkonu odebíraného z PV panelu. Na obr. 4 máme schéma zapojení s modelem PV panelu, jehož zátěž simuluje zdroj V1, a analogovou násobičku pro měření výkonu panelu.



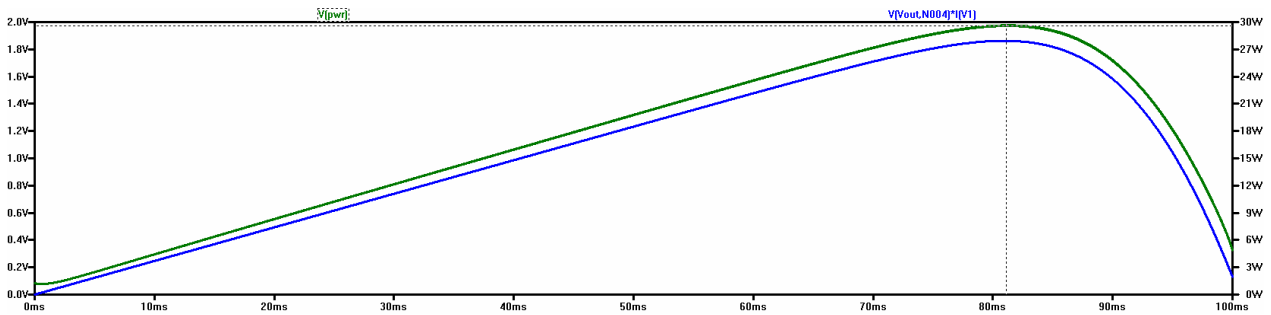
Obr. 4: Měření výkonu PV panelu



Obr. 5: Křivky výkonu PV panelu pro proměnnou zátěž a různá osvětlení panelu

Na obr. 5 máme výsledek simulace, kde jsou zobrazeny křivky výkonu pro 3 různé stupně osvětlení panelu, které je simulováno pomocí proudového zdroje I1.

Na dalším obrázku (obr. 6) máme porovnání výkonu vypočítaného násobičkou se skutečným výkonem odebíraným z PV panelu. Z obrázku je zřejmé, že tvar obou křivek je téměř identický.



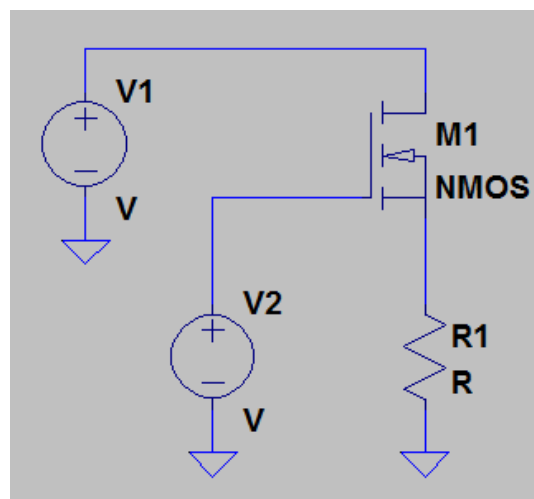
Obr. 6: Porovnání výkonu změřeného násobičkou se skutečným výkonem PW panelu

Spínaný nabíječ baterie

Konstrukce nabíječe baterie není pro tento experiment kritická. Může to být snižující měnič, pokud není požadováno galvanické oddělení. Stačí, když řekneme, že jakákoli topologie, kde zátěž (výstupní proud) může být programována vstupním napětím, bude fungovat. Náš řídicí obvod bude řídit vstup, aby se dosáhlo optimální zátěže solárního panelu, a tato zátěž se udržovala.

Modelování nabíječe baterie

Nyní potřebujeme jednoduchý obvod, který bude simulovat nabíječ baterie. Obvod musí být schopen odebírat proměnné množství proudu v závislosti na napětí. Tranzistor MOSFET a pevný odpor (pro omezení maximálního proudu) tuto práci zastane, jak ukazuje obr. 7.



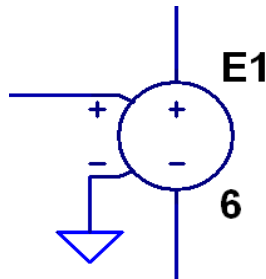
Obr. 7

Na tomto obrázku V1 je zdroj energie (v našem případě solární panel), V2 představuje náš řídicí obvod. Rezistor R1 by měl mít takovou velikost, aby omezil proud na maximální hodnotu (při odpovídajícím napětí), kterou budeme odebírat z panelu.

Ve skutečném obvodu (obr. 4) jsou pro řízení gate MOSFETu použity dva rezistory R2 a R3. Tyto dva rezistory řídí MOSFET s váženým průměrem napětí, které přichází z U1 a obdélníkový průběh přichází z hodin. Signál z hodin je použit pro modulaci napětí z kontroléru. R2 poskytuje průměrnou zátěž, chcete-li, a R3 poskytuje modulaci kolem ní. Tím, že R3 je 10x nebo 20x větší než R2, zajistíme, že modulace je malou částí průměrné zátěže.

Poznámka překladatele:

Použití tranzistoru MOSFET jako řízené zátěže je i pro demonstrační účely nepraktické, proto raději použijeme zdroj napětí řízený napětím:



Obr. 7: Zdroj napětí jako řízená zátěž

Kontrolér

Kontrolér (řídicí obvod) je složen z obvodu hodin, který generuje obdélníkový signál o střídění přibližně 50%. Obdélníkový signál řídí přímo vstup nabíječe baterie tím, že moduluje zátěž. Invertovaná kopie hodin řídí přepínač SW1. Fázování je takové, že když hodiny jsou v úrovni high (a napětí na gate MOSFETu je vyšší), přepínač SW1 připojí výstup monitoru výkonu na C1. Když jsou hodiny na úrovni low, C2 je připojen na monitor výkonu.

C2 a U1 tvoří integrátor, zatímco C1 a U1 tvoří vzorkovací obvod (sample and hold).

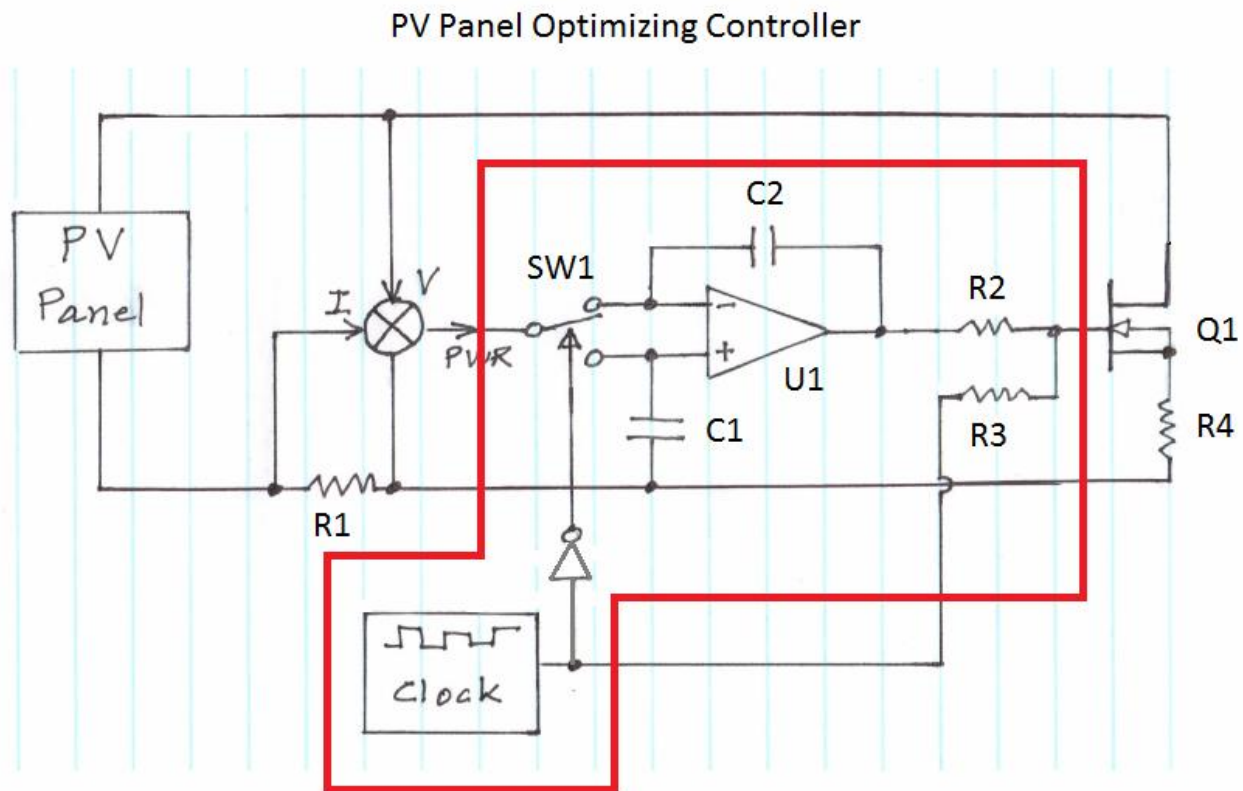
Když výstup monitoru výkonu je různý v závislosti na stavu hodin, výstup U1 bude tažen jedním nebo druhým směrem v závislosti ve které fázi hodin je poskytováno vyšší napětí (viz případ P1/P2 na obr. 2).

S odkazem na obr. 2, v případě P1/P2 P1 odpovídá stavu, kdy nabíječ odebírá více proudu (výstup hodin je high a SW1 je připojen na C1). P2 odpovídá menšímu proudu (ale vyššímu výkonu) a SW1 je připojen na C2.

Protože napětí na C2 je vyšší, výstup U1 bude tažen dolů, což sníží průměrnou zátěž PV panelu.

Nakonec výstup U1 poklesne dostatečně na to, aby kontrolér pracoval mezi body P3 a P4, což je kolem MPP.

Následující obrázek zvyrazňuje část kontroléru v celkovém schématu.



Kontrolér je složen z hodinového obvodu generujícího signál přibližně 1: 1.

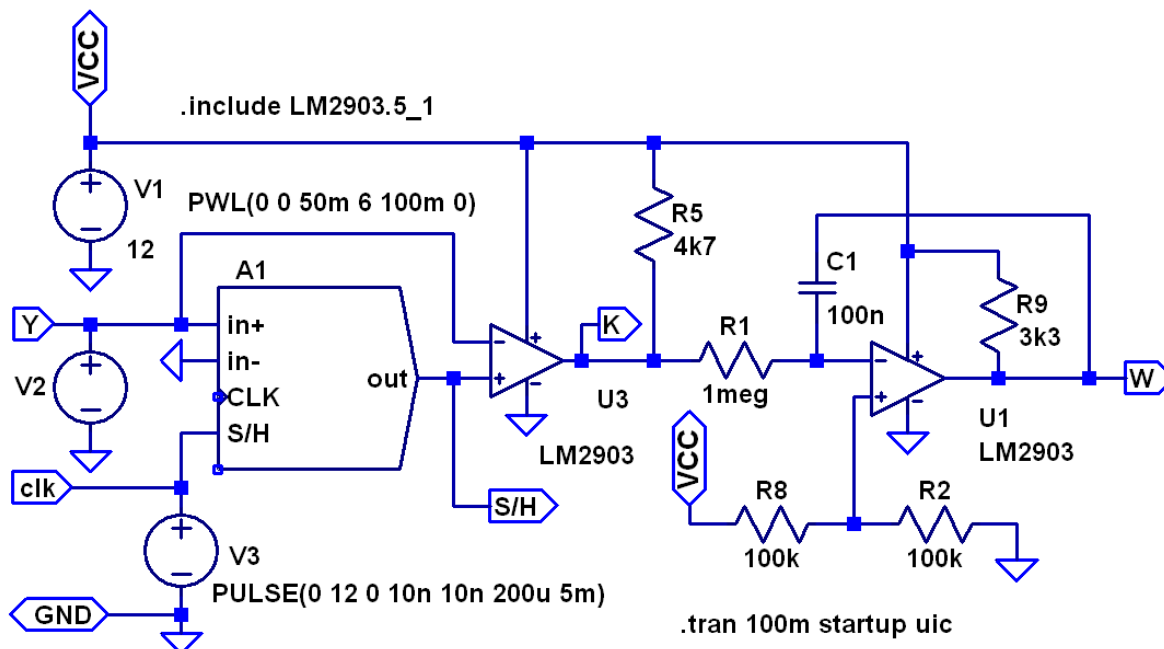
Hodiny přímo řídí nabíjecí obvod baterie a moduluje zátěž. Invertovaný hodinový signál řídí SW1. Fázování je takové, že když hodiny mají úroveň high (a napětí na gate MOSFETu je vyšší), SW1 připojí výstup monitoru na C1, takže C1 nabíjí na napětí z monitoru výkonu v době, kdy je zátěž větší (menší odpor). Když jsou hodiny v úrovni low a zátěž je menší (vyšší odpor), SW1 připojí na monitor výkonu C2.

Mohli bychom vrátit C2 na zem místo na výstup U1, ale návratem C2 na výstup U1 se z U1 stane integrátor. Integrátory je mnohem snazší stabilizovat v obvodech s uzavřenou smyčkou, takže to ušetří čas vývoje a několik součástek u hotového produktu.

C2 a U1 tvoří integrátor, zatímco C1 a U1 tvoří vzorkovací obvod.

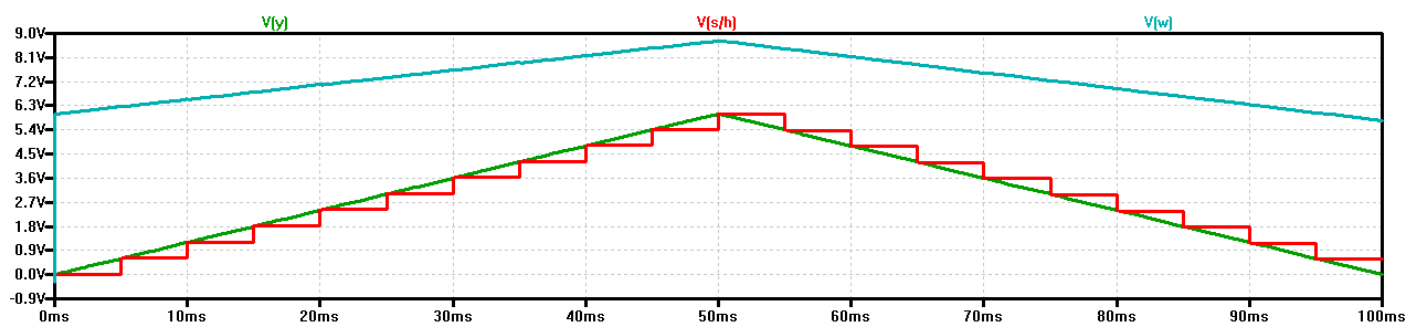
Poznámka překladatele:

Tento regulátor vypadá na první pohled jako jednoduché a efektivní řešení, ale nelíbí se mi nutnost při každém impulzu hodin cvičit se zátěží. Další nevýhodou je nutnost použít analogový přepínač, což v praxi obnáší integrovaný obvod minimálně se 14 vývody, přičemž se využije pouze část IO. Proto navrhne jiné řešení, které tyto nevýhody nemá. Naše řešení obsahuje - kromě zdroje hodin – vzorkovací zesilovač, komparátor a integrátor:



Obr. 8: Regulátor pro optimalizaci výkonu

Zdroj hodinového signálu nemá střídu 1: 1 jako v původním zapojení, ale generuje úzké kladné impulzy, které zapisují aktuální stav regulované veličiny Y do vzorkovacího zesilovače. Výstup vzorkovacího zesilovače A1 je připojen na jeden ze vstupů komparátoru U3. Na druhý vstup tohoto komparátoru je připojen přímo vstup Y. Jestliže tedy veličina Y stoupá, je na výstupu komparátoru nulové napětí a když Y klesá, je na výstupu U3 kladné maximální napětí. Výstup komparátoru je připojen na vstup integrátoru U1, který když je na jeho vstupu kladné napětí větší než napětí děliče R2, R8, tak na jeho výstupu napětí klesá a naopak. Rychlost změny napětí na výstupu integrátoru je dána integrační konstantou $R1 \cdot C1$. Na dalším obrázku vidíme, jak obvod funguje:



Obr. 9: simulace regulátoru z obr. 8

Jako vzorkovací zesilovač můžeme použít např. LF398, má pouzdro pouze s osmi vývody, stejně jako komparátor LM2903 se dvěma komparátory v jednom pouzdro.

Úplný LT Spice model kontroléru

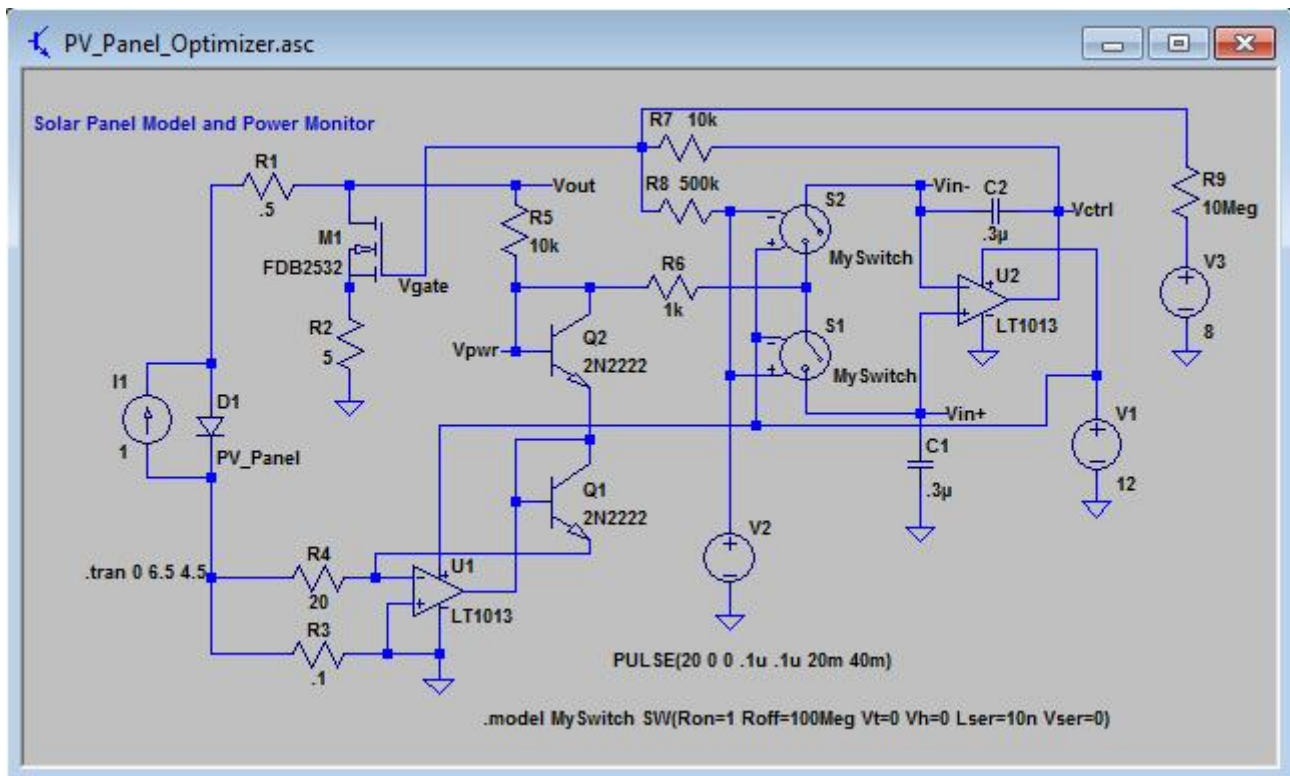
Figure 7 shows the LT Spice schematic of the model.

. Figure 7

(Click on the picture to download the LT Spice schematic file: Right-Click->Save Link As)

To simulate different illuminations, simply change the value of the current source (1A in the default file) to a lower value.

Figure 8 shows a Transient simulation of the model above.



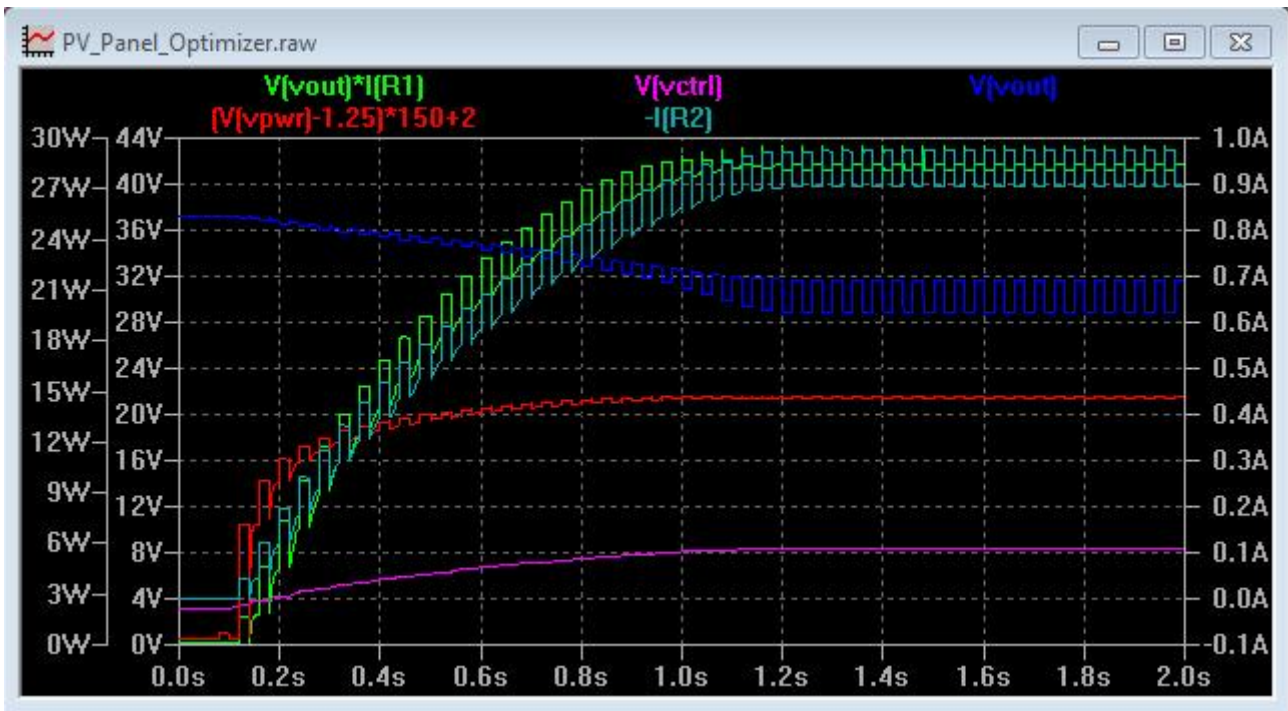


Figure 8

Here is what the traces represent:

- Green trace, $V(V_{out}) \cdot I(R1)$, represents the actual power delivered by the PV panel. This what we try to maximize.
- Red trace, $(V(V_{pwr}) - 1.25) \cdot 150 + 2$, represents the output from the power monitor, scaled so that variations can be seen on the graph. The voltage is actually very close to 1.25V for most of the operating range of the PV panel, so at a scale of 1:1, we could not see variations on the plot.
- Purple trace, $V(V_{ctrl})$, represents the output from the controller. A higher voltage represents a higher load.
- Light Blue trace, $-I(R2)$ is the absolute current coming from the PV panel.
- Blue trace, $V(V_{out})$ is the voltage across the PV panel.

You can see that as the controller ramps up after power up, the output power (both green and red traces) goes up and stabilize. After stabilization, the red trace (output of the power monitor) has no visible modulation in spite of the 150:1 scaling, while the green trace (actual power) has a little bit of modulation. That is probably due to the fact that, as explained above, the power monitor is not absolutely perfect. However, the small error (a fraction of a watt) would be negligible in an actual implementation.

Notes:

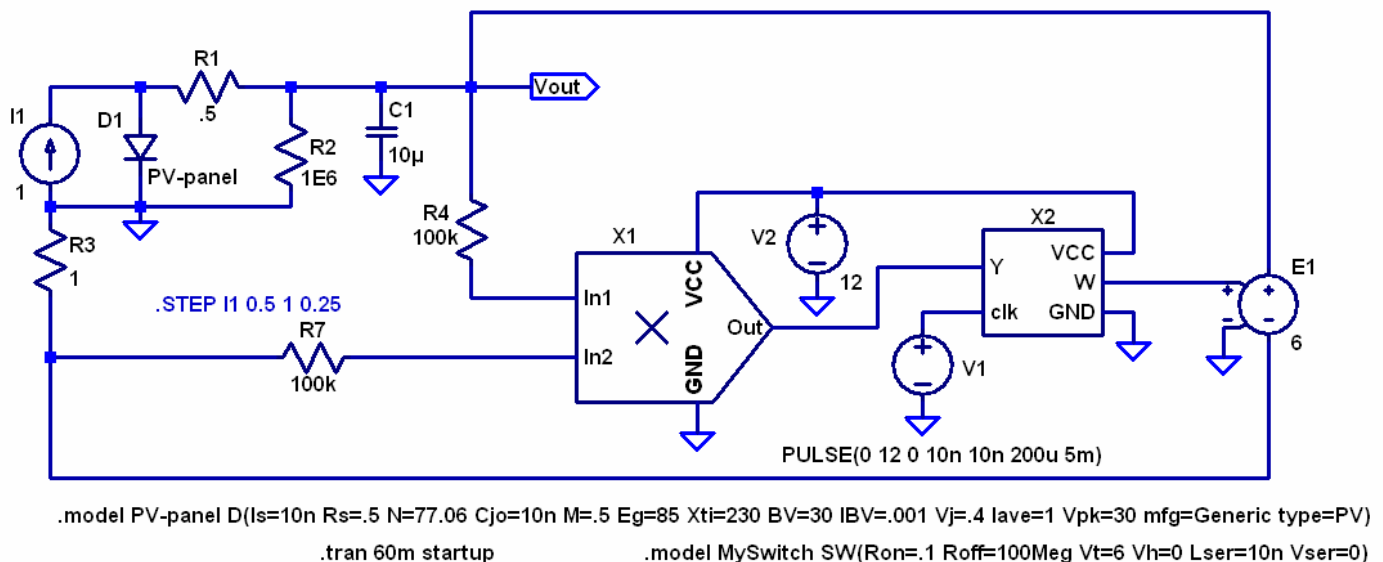
- In the SPICE Simulation command, enter 6.5 (sec) in the "Stop Time" box and 4.5 (sec) in the "Time to start saving data" box. The controller takes several seconds before the output of U2 is high enough to cause the MOSFET M1 to start drawing current (due to the MOSFET's threshold voltage). Until that point, the output of the

controller changes very slowly. This is only a problem because of the greatly simplified circuit we use to model the battery charger.

- In the model above, source V3 has a negligible effect. It was used initially to fine tune the model. It can be removed without effect on the simulation result.
- The ratio between R5 and R7 defines the amount of modulation. Here, the ratio is about 50. By decreasing the ratio (for instance by increasing R8), the amount of modulation will decrease.
- An actual product would use actual components to replace the ideal switches S1 and S2. CMOS analog switches such as the [MC14066](#) would be a good fit.
- The clock signal could be generated by a timer circuit such as the [LM555](#).

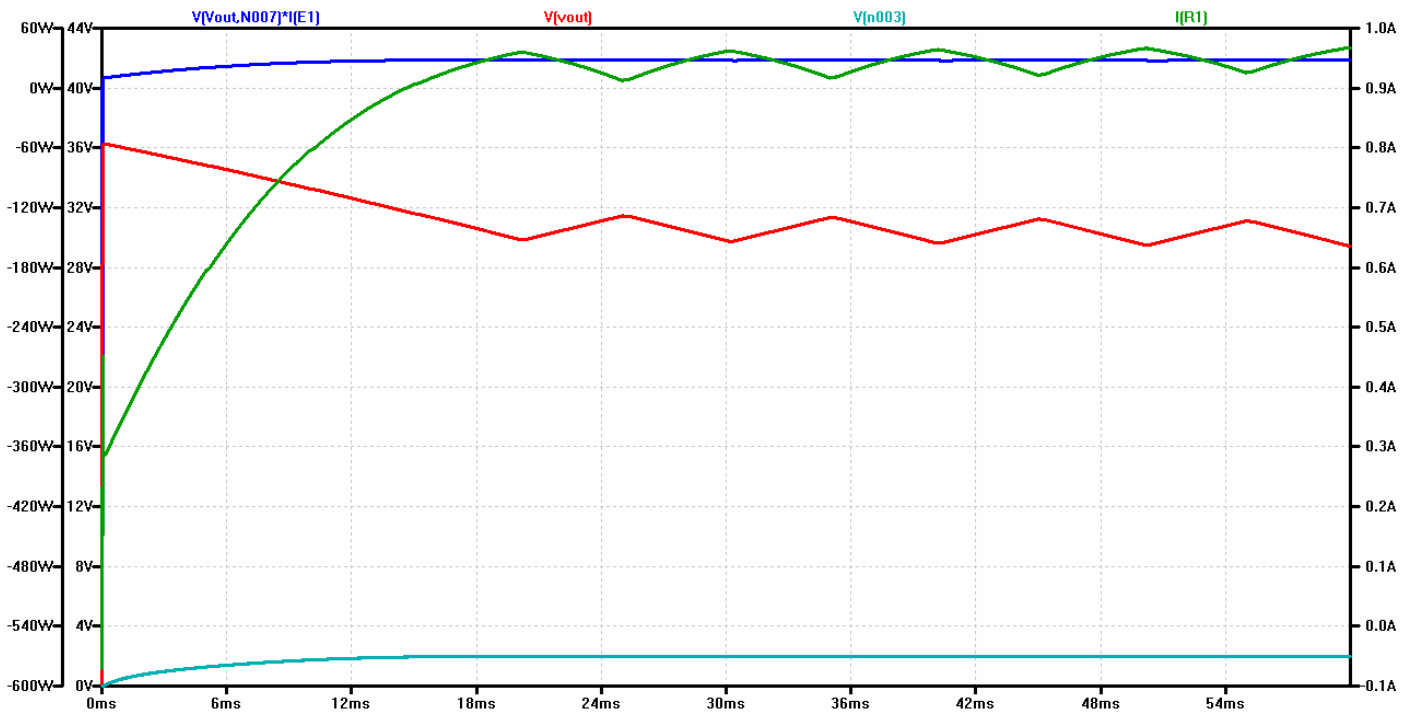
Poznámka překladatele:

Na dalším obrázku máme úplné schéma zapojení MPP regulace výkonu PV panelu.



Obr. 10. Optimální regulace výkonu PV panelu

Blok X2 představuje regulátor z obr. 8 a řízený zdroj E1 představuje zátěž řízenou napětím z regulátoru X2. Na dalším obrázku máme výstup simulace. Modrá čára představuje výkon odebraný z PV panelu, zelená představuje proud odebraný z panelu, červená je napětí panelu a tyrkysová dole představuje řídicí napětí zátěže. Na obr. 11 vidíme, že napětí a proud kolísají kolem rovnovážné polohy, zatímco výkon je téměř konstantní. Kdybychom chtěli kolísání proudu a napětí zmenšit, museli bychom buď zvýšit frekvenci hodin, nebo zvětšit konstantu integrátoru.



Obr. 11: Simulace činnosti MPP regulátoru PV panelu

Závěr:

Pomocí běžných součástek jsme demonstrovali možnost vytvořit jednoduchý analogový MPP regulátor PV panelu. Dopustili jsme se sice menšího zjednodušení hlavně pokud jde o simulaci zátěže, ale jinak jsme použili většinou reálné nebo snadno realizovatelné součástky a funkční bloky. V praxi bychom mohli použít malý mikroprocesor, který bychom poměrně snadno naprogramovali, a vyšlo by to možná levněji, ale jak říká autor článku, nebylo by to tak zábavné.

K tomuto tématu se hodlám v budoucnu vrátit a dopracovat některé detaily. Možná dojde i na realizaci s pokusným PV panelem, který v současné době leží ladem, a autobaterií 12V.

Conclusion

We demonstrated that it is possible to realize a simple analog controller capable of optimizing the amount of power recovered from a solar panel over a range of environmental conditions (illumination, temperature).

We also realized a simple model for a Photovoltaic Panel.

It is to be noted that nowadays, a small microcontroller would perform all the tasks required probably at lower cost, but it would not be nearly as much fun :)

More Information

For tips on creating custom models and IV curves, see Ref([\[4\]](#)).

References

1. A Simple Analog Multiplier, mathscinotes.wordpress.com/2011/05/16/a-simple-analog-multiplier/
2. Intusoft Newsletter #78, November 2005, www.intusoft.com/nlpdf/nl78.pdf
3. Semiconductor modelling in SPICE, Imperial College, London, www3.imperial.ac.uk/pls/portallive/docs/1/7292572.PDF
4. Creating IV curves and SPICE models chriscrossx.blogspot.com/2008/01/lt-spice-modelling-parametrics-steps.html
5. MC14066 data sheet from ON-Semi, www.onsemi.com/pub_link/Collateral/MC14066B-D.PDF
6. LM555 data sheet, www.national.com/ds/LM/LM555.pdf

Except as noted, this entire site [Copyright](#) © 2002-2014. [KO4BB](#) All rights reserved.

October 11 2014 15:12:31

Zdroj: http://www.ko4bb.com/Solar_Optimizer/

Přeložil a poznámkami opatřil Ladislav Kopecký