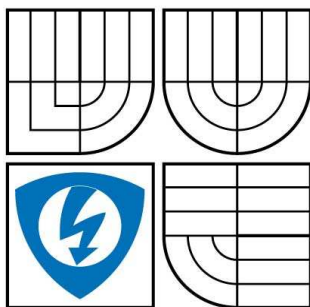


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV TEORETICKÉ A EXPERIMENTÁLNÍ
ELEKTROTECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION

DEPARTMENT OF THE THEORETICAL AND EXPERIMENTAL
ELECTRICAL ENGINEERING

NÍZKONÁKLADOVÝ AUTONÓMNÍ ZDROJ ELEKTRICKÉ ENERGIE

LOWCOST AUTONOMOUS ELECTRICAL ENERGY SOURCE

BAKALÁRSKA PRÁCA

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

BRANISLAV FOJTLÍN

VEDÚCI PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. TOMÁŠ JIRKŮ

BRNO 2009

Anotácia

Témou mojej bakalárskej práce je nízkonákladový autonómny zdroj elektrickej energie. Pretože ponuka na trhu v oblasti fotovoltaických systémov je v súčasnosti veľmi široká, je mojou úlohou vybrať lacné a efektívne riešenie solárneho zdroja energie, ktoré bude na výstupe poskytovať tri rôzne úrovne napätia. Zameriavam sa hlavne na prehľad druhov fotovoltaických článkov, porovnanie výrobcov článkov, návrh plošných spojov, realizáciu a overenie správnej funkcie zariadenia. V tejto práci ďalej popisujem problematiku pulzných zdrojov, ktoré sú použité pre prispôbenie výstupného napätia pre cieľovú aplikáciu. V práci je uvedené riešenie problematiky pomocou rôznych typov meničov.

Annotation

The aim of my bachelor's work is a low-cost autonomous generator of electrical energy. Since the offer on the market for photovoltaic systems is now very wide, it is my task to select a cheap and effective solution for solar energy generator that will provide three different levels of voltage on the output. I focus especially on the overview of the types of photovoltaic cells and comparison of cells producers. This work also describes switching converters, which will be used for the output voltage conversion for the target system. In the work the solution by different DC/DC regulators is described.

Kľúčové slová

Autonómny zdroj, solárny zdroj, fotovoltaický článok, kremíkový článok, pulzný zdroj, DC/DC menič, znižujúci neinvertujúci menič, zvyšujúci neinvertujúci menič, invertujúci menič

Keywords

Autonomous source, solar source, photovoltaic cell, silicon cell, switching converter, DC/DC converter, step-down noninverting converter, step-up noninverting converter, back-boost converter

Bibliografická citácia podľa CSN ISO 690

FOJTLÍN, B. Nízkonákladový autonómny zdroj elektrickej energie. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 43s. Vedúci bakalárskej práce Ing. Tomáš Jirků.

Prehlásenie

Prehlasujem, že svoju bakalársku prácu na tému **NÍZKONÁKLADOVÝ AUTONÓMNÍ ZDROJ ELEKTRICKÉ ENERGIE** som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej bakalárskej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tohto projektu som neporušil autorské práva tretích osôb, v prvom rade som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovení § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovení § 152 trestného zákona č. 140/1961 Sb.

V Brne dňa

.....

podpis autora

PodĎakovanie

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce Ing. Tomášovi Jirků za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej bakalárskej práce.

V Brne dňa

.....

podpis autora

Obsah

Obsah	5
Zoznam obrázkov	6
Zoznam tabuliek	8
1 Úvod.....	9
2 Fotovoltaické články, ich princípy, materiály	10
2.1 Fyzikálny princíp polovodičového fotovoltaického článku.....	10
2.2 Základné typy fotovoltaických článkov- stručný generačný vývoj	12
2.3 Komerčne dostupné typy fotovoltaických článkov	13
2.4 Nové trendy a smery výskumu v odbore fotovoltaických článkov	15
2.5 Možnosti zvýšenia účinnosti fotovoltaických modulov	17
2.6 Prehľad niektorých výrobcov fotovoltaických modulov, ich produkty a ceny... 19	
3 PULZNÉ ZDROJE	22
3.1 Napájacie zdroje a záťaž meniča	22
3.2 Najjednoduchšie meniče s jedným akumuláčnym prvkom	22
3.3 Znižujúci neinvertujúci menič (step – down)	25
3.4 Zvyšujúci neinvertujúci menič (step-up)	27
3.5 Invertujúci menič (buck-boost).....	27
4 Riešenie úlohy.....	28
4.1 Výber prvkov	28
4.2 Návrh jednotlivých druhov meničov	29
5 ZÁVER	40
6 Zoznam citovanej literatúry	41
Zoznam použitých symbolov a skratiek	43

Zoznam obrázkov

Obr. 1: PN priechod [17]	10
Obr. 2: Schéma fotovoltaiického článku [16]	11
Obr. 3: Časť spektra slnečného žiarenia využiteľná kremíkovým fotovoltaiickým článkom [8].	12
Obr. 4: Fotovoltaiický článok - vľavo monokryštalický, vpravo polykryštalický [7]	14
Obr. 5: Schéma fotovoltaiického článku z amorfného kremíku [9]	15
Obr. 6: Sledovač slnka Traxle [18]	18
Obr. 7: Aktívna záťaž: a) náhradná schéma akumulátoru, b) náhradná schéma jednosmerného elektromotoru s cudzím budením	22
Obr. 8: Pracovné kvadranty vo Voltampérovej rovine	23
Obr. 9: Principiálna schéma DC/DC meničov s jediným akumuláčnym prvkom	23
Obr. 10: Typy spínačov pre pulzné meniče: a) horný spínač, b) dolný spínač, c) paralelná kombinácia horného a dolného spínača	24
Obr. 11: Skutočné silové obvody meničov z Obr. 9 a ich pracovné kvadranty, a) menič znižujúci neinvertujúci (step-down), b) menič zvyšujúci neinvertujúci (step-up), c) menič invertujúci (buck-boost)	25
Obr. 12: Znižujúci menič pracujúci v 1. kvadrante, a) menič s aktívnou záťažou typu jednosmerný motor, b) menič s LC filtrom	25
Obr. 13: Znižujúci menič pracujúci v 1. kvadrante a) skutočné (exponenciálne) priebehy prúdov, b) linearizované priebehy prúdov ($R=0$), c) pravouhlé priebehy prúdov ($L \rightarrow \infty$)	26
Obr. 14: Zvyšujúci menič pracujúci v 1. kvadrante	27
Obr. 15: Bloková schéma celého systému	28
Obr. 16: Schéma zapojenia obvodu MAX5035	30
Obr. 17: Doska plošných spojov navrhnutá v EAGLE 5.4.0	31
Obr. 18: Pohľad na osadenú dosku plošných spojov	31
Obr. 19: Bloková schéma pre overenie činnosti meniča	31
Obr. 20: Zapojenie meracieho pracoviska	32
Obr. 21: Graf závislosti výstupného napätia od výstupného prúdu	33
Obr. 22: Graf závislosti efektivity obvodu od výstupného prúdu	33
Obr. 23: Charakteristiky MAX5035A podľa katalógového listu [24]	34
Obr. 24: Charakteristiky MAX5035B podľa katalógového listu [24]	34
Obr. 25: Zapojenie obvodu MAX5035D [24]	35
Obr. 26: Charakteristiky MAX5035D pre $U_{OUT} = 5\text{ V}$ podľa katalógového listu [24] ..	35
Obr. 27: Schéma zapojenia pre menič TPS5410	36
Obr. 28: Doporučené zapojenie dosky plošných spojov pre TPS5410	37

Obr. 29: Zapojenie obvodu LT3507 [28].....	37
Obr. 30: Charakteristiky LT3507 podľa katalógového listu [28].....	38
Obr. 31: Charakteristiky spínaných meničov v TPS650240 podľa katalógového listu [29].....	38
Obr. 32: Schéma zapojenia meniča TPS650240.....	39

Zoznam tabuliek

Tabuľka 1: Obvyklé a maximálne účinnosti rôznych typov kremíkových solárnych článkov [1]	15
Tabuľka 2: Odkazy na výrobcov fotovoltaických modulov	19
Tabuľka 3: Solárne panely dodávané v ČR firmou TRIMEX TESLA [2].....	20
Tabuľka 4: Technické parametre výrobkov firmy SOLARTEC – solárne minipanely [19].....	20
Tabuľka 5: Najmenšie moduly	20
Tabuľka 6: Malé moduly	20
Tabuľka 7: Štandardné moduly	21
Tabuľka 8: Veľké moduly	21
Tabuľka 9: Odporúčané a skutočné hodnoty súčastok pre vstupné napätie U_{IN} od 9 do 14 V.....	31
Tabuľka 10: Výsledky meraní pre MAX5035A	32

1 Úvod

Celá biosféra funguje už milióny rokov vďaka slnečnej energii, ktorú pohlcujú rastliny a zhromažďujú ju vo forme organických zlúčenín. Tie sú ďalej využívané ako potrava pre živočíchy a človeka. Takto môže biosféra fungovať v podstate neobmedzene dlho, respektíve pokiaľ bude svietiť slnko a podmienky na Zemi budú približné tým dnešným.

Horšie je na tom technosféra. Väčšinu energie totiž naša civilizácia čerpá z fosílnych palív. Oveľa väčším problémom ako vyčerpanie fosílnych palív je, že ich ťažbou a spaľovaním sa pozvoľne mení naše životné prostredie, čo má bezpochyby negatívny dopad na atmosféru. Spaľovaním fosílnych palív sa produkuje oxid uhličitý, ktorého obsah v atmosfére má potenciál stúpať. Ako uvádza [1] na strane 6, v súčasnosti je koncentrácia oxidu uhličitého v atmosfére najvyššia za posledných 500 tisíc rokov a stále narastá. Ako metán, tak oxid uhličitý patria medzi takzvané skleníkové plyny a rast ich koncentrácie v atmosfére narušuje tepelnú bilanciú Zeme – vedie k rastu teploty.

Elektrina je bezpochyby najvýznamnejšou formou energie pre našu civilizáciu. Podľa [2] strana 11, slnečná energia dopadajúca na zemské pevniny je 2700x väčšia než celosvetová spotreba primárnej energie (v roku 1994). Je zvláštnosťou, že ľudstvo využíva slnečné žiarenie, tento ľahko dostupný a žiadne škodlivé emisie produkujúci zdroj energie, zatiaľ len veľmi málo. Na základe [2] môžeme skonštatovať, že úplné zásobovanie energiou zo Slnka je technicky možné. Musíme ale počítať s faktom, že fotovoltaické články sú stále pomerne drahé a ich účinnosť sa pohybuje v rozmedzí od nízkych 4 % (pri použití amorfného kremíku) maximálne do 40,7 % (články využívajúce trojnásobné prechody) [3].

K premenu solárnej energie na elektrickú je v súčasnosti najpoužívanejším zariadením fotovoltaický článok. Tak, ako každá výroba, i výroba elektrickej energie zo slnečného žiarenia nie je len záležitosťou technickou, ale významnú úlohu tu zohrávajú aj otázky ekonomické. Takéto zariadenie musí byť natoľko lacné, účinné a spoľahlivé, aby cena získanej elektriny bola porovnateľná s cenou elektrickej energie vyrobenej vo veľkých elektrárňach.

Výhodou fotovoltaickej premeny svetelnej energie na elektrickú je, že odpadá opotrebenie a straty trením a tiež mazanie a údržba. V porovnaní s inými technológiami premeny energie má výroba elektriny pomocou solárnych článkov rozhodujúce prednosti:

- Solárne články nepotrebujú žiadnu pohonnú látku.
- Solárne články nemajú žiadne opotrebovanie.
- Solárne články je možné zoskupovať do solárnych fotovoltaických generátorov ľubovoľnej veľkosti.
- Solárne články nevytvárajú žiadne znečistenie, žiadny hluk, žiadne splodiny a žiadny zápach.
- Solárne články neuvolňujú pri výrobe elektriny žiadny CO₂.

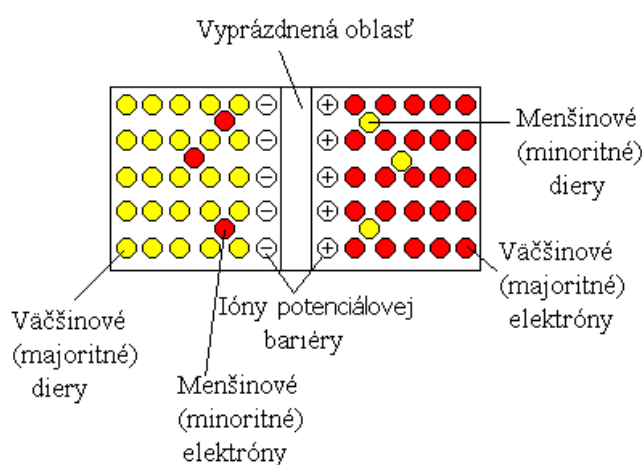
Z týchto dôvodov je fotovoltaika považovaná za metódu výroby elektrickej energie, ktorá je najpriaznivejšia pre životné prostredie. Napríklad použitím fotovoltaiky namiesto konvenčných zariadení na výrobu elektrického prúdu (elektráreň spaľujúca fosílnu palivú) sa ušetrí značné množstvo splodín a znečisťujúcich látok ohrozujúcich životné prostredie.

Pri výrobe solárnych článkov sa však spotrebováva energia. V závislosti od typu článku musia solárne články vyrábať elektrinu 1-5 rokov, aby nahradili energiu spotrebovanú pri ich výrobe. Táto doba sa označuje ako **doba elektrickej návratnosti**; je omnoho kratšia než životnosť fotovoltaických zariadení, ktorá je najmenej 20 až 30 rokov.

2 Fotovoltaické články, ich princípy, materiály

2.1 Fyzikálny princíp polovodičového fotovoltaického článku

Za objavenie základného princípu fotovoltaického javu v roku 1839 vďačíme francúzskemu fyzikovi Alexandrovi Edmondovi Becquerelovi. Zistil, že ožiarením povrchu kovu žiarením, prichádza k uvoľneniu elektrónov z jeho povrchu. Ak je energia žiarenia postačujúca, elektrón vyletí z povrchu kovu a zanechá po sebe v kove kladný náboj nazývaný diera. Ak však elektrón zostane v kove, následne je veľmi rýchlo pritiažený k diere, ktorá po ňom zostala, a jeho energia sa uvoľní ako neužitočné teplo. Preto je nutné oddeliť od seba elektróny a diery a „prinútiť“ elektróny, aby predtým, než sa vrátia späť do diery, prešli elektrickým obvodom a odovzdali získanú energiu zo slnečného žiarenia vo forme užitočnej práce v danom spotrebiči. Toto oddelenie sa dá oveľa lepšie realizovať v polovodičoch ako v kovoch.



Obr. 1: PN prechod [17]

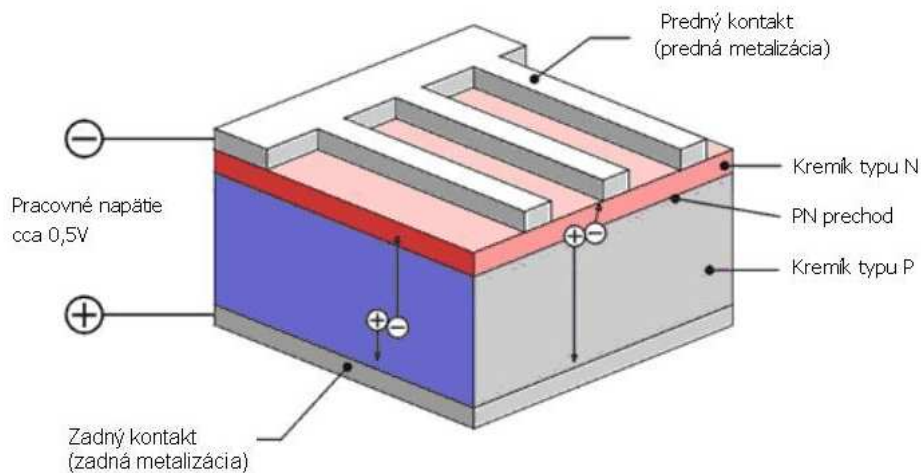
Elektrické vlastnosti polovodičov ležia niekde medzi kovmi a izolantmi. Inými slovami, nie sú v nich voľné elektróny ako v kovoch, ale relatívne jednoducho tam môžu vzniknúť (teplom, alebo napríklad dopadom slnečného žiarenia). K oddeleniu elektrónov a diery je požiadavka vytvoriť v polovodiči takzvaný P-N prechod (viď. Obr. 1). Princíp vzniku P-N prechodu sa dá demonštrovať na najpoužívanejšom polovodičovom kremíku. Tuhý kremík sa skladá z mriežky atómov kremíku, ktoré sú navzájom spojené pomocou kovalentných väzieb a na rozdiel od kovov sa v takomto žiadne voľné (k atómom neviazané) elektróny nevyskytujú. K uvoľneniu elektrónov z väzieb stačí pri kremíku dodať pomerne malé množstvo energie. Kremík má pomerne malú vzdialenosť (rozdiel energie) medzi posledným obsadeným (valenčným) orbitálom a prvým neobsadeným. Ako uvádza [1] na strane 13, z toho vyplýva skutočnosť, že pri izbovej teplote má kremík vždy určité (malé) množstvo elektrónov postačujúcu energiu na to, aby sa z väzieb dostali do neobsadeného vodivostného pásu. Preto kremík vedie v malej miere elektrický prúd. Kremík sa so zvyšovaním teploty stáva čoraz viac vodivejší, pretože sa do vodivostného pásu dostáva viac elektrónov. Pri osvetľovaní kremíku slnečným žiarením nastáva podobná situácia.

Vodivosť kremíku sa dá zmeniť pomocou prímiesí (najčastejšie fosforu alebo bóru). Jedná sa o takzvané dopovanie kremíku.

Fosfor obsahuje vo valenčnej sfére 5 elektrónov, ale vo väzbách s okolitými atómami kremíku sa môžu uplatniť len 4 elektróny. Polovodič typu N vznikne dopovaním kremíku fosforom, ktorý má nadbytočné elektróny a je omnoho viac vodivý než čistý kremík. Obdobne pridaním bóru (s 3 elektrónmi vo valenčnej sfére) vznikne polovodič typu P s nadbytočnými dierami (miestami, kde chýba elektrón). Tesným spojením oboch typov

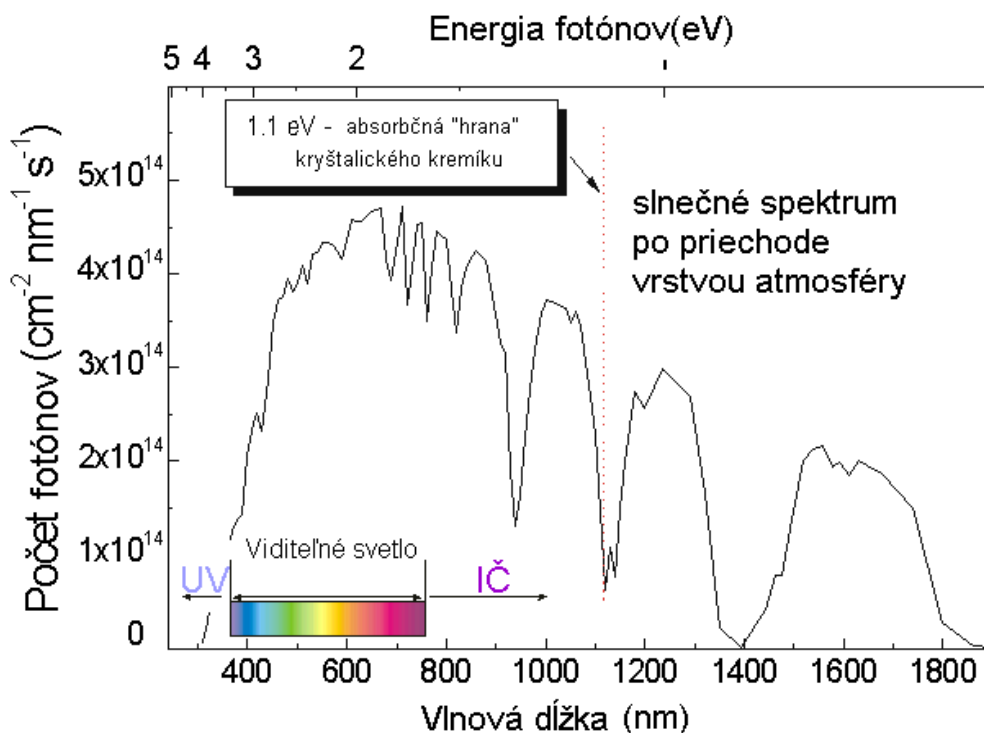
polovodičov vznikne v mieste ich dotyku tenká vrstva, ktorá ma pomenovanie P-N prechod. V polovodiči typu N je koncentrácia elektrónov väčšia než v polovodiči typu P. S koncentráciou dier je to opačne. Spojením polovodiču typu N a polovodiču P dôjde k takzvanej rekombinácii nábojov, teda elektrón zapadne do diery. Avšak tento pohyb nabitých častíc na opačné strany sa čoskoro skončí, pretože po elektrónoch zostanú v polovodiči typu N kladne nabité náboje a po dierach v polovodiči typu P záporné náboje. Vzniknuté elektrické pole ďalšiu difúziu zastaví, tým pádom príde k presunu len malej časti elektrónov a dier v blízkosti P-N prechodu a vznikne rovnováha, kedy je rovnaké množstvo elektrónov, ktoré prejde v dôsledku difúzie, je premiestnené späť pôsobením elektrického poľa. Výsledkom procesu je výrazné zníženie vodivosti v oblasti P-N prechodu a vytvorenie elektrického potenciálu (na P časti prechodu je záporný náboj, na časti N kladný).

Fotovoltaický článok možno považovať v podstate za veľkoplošnú diódu. Pod povrchom (malej hĺbke) tenkého plátku kremíku je vytvorený P-N prechod, ktorý má z oboch strán vhodné kovové kontakty (viď. Obr. 2). Dopadaním slnečného žiarenia sa generujú voľné elektróny a diery. Tie budú oddelené a poslané na opačné strany elektrickým poľom P-N prechodu. Elektróny do vrstvy typu N, tá sa stáva záporným pólom fotovoltaického článku, a diery do vrstvy typu P, tá sa stáva kladným pólom.



Obr. 2: Schéma fotovoltaického článku [16]

Napätie fotovoltaického článku závisí od použitého polovodiča. Ak sa jedná o kremík, 0,6 V (pri zaťažení mierne klesá). Napätie 0,5 V nastane pri optimálnom prúde, kedy je taktiež maximálny výkon. Vzhľadom na tieto skutočnosti je nutnosťou spájanie rád článkov do série, aby sa získalo prakticky využiteľné napätie. Obvykle sa používajú moduly s 36 alebo 72 článkami, ktoré dodávajú 18 alebo 36 voltov. Do istej miery je možné solárny článok pri dopade svetla prirovnať k batérii. Fotovoltaický článok využíva iba také fotóny, ktorých energia je väčšia než rozdiel energie medzi valenčným a vodivostným pásom v danom polovodiči. Kremíkový článok využíva fotóny s energiou väčšou než 1,1 eV, čo sa rovná žiareniu o vlnovej dĺžke menšej než 1100 nm. Fotóny majú vlastnosť, že skracovaním vlnovej dĺžky narastá ich energia. Slnečné žiarenie, ktoré prechádza atmosférou obsahuje fotóny s energiami od 0,5 eV – infračervené žiarenie do približne 2,9 eV – ultrafialové žiarenie. Kremík sa využíva z toho dôvodu, že do oblasti využiteľnej kremíkovými článkami spadá veľká časť energie slnečného žiarenia [1].



Obr. 3: Časť spektra slnečného žiarenia využiteľná kremíkovým fotovoltaickým článkom [8].

Energia fotónov majúcej kratšiu vlnovú dĺžku, teda zároveň aj väčšiu energiu, nie je ale využitá bezozvyšku. Každý fotón uvoľňuje iba 1 elektrón a prebytok jeho energie je premenený na teplo. S takýmto článkom nejde z princípu dosiahnuť využiteľnosť energie žiarenia väčšiu ako 55 %. Ďalšie straty v reálnom fotovoltaickom článku spôsobujú, že účinnosť v praxi sa pohybuje na rozmedzí 16 až 19 %, v špeciálnych štruktúrach až 24 % [4].

2.2 Základné typy fotovoltaických článkov - stručný generačný vývoj

Fotovoltaické články majú za sebou takmer 62 rokov vývoja. Prvý patent na solárny článok bol podaný v roku 1946 Russellom Ohlom, ktorý taktiež stál na počiatku rozvoja kremíkových solárnych článkov [4]. Odtedy bol vyvinutý celý rad konštrukcií, typov s využitím rôznych materiálov. Doposiaľ existujú štyri generácie fotovoltaických článkov [1], [4]:

Prvá generácia: Je tvorená fotovoltaickými článkami z doštičiek monokryštalického kremíku, v ktorých je vytvorený veľkoplošný P-N prechod. Sú dnes najpoužívanejšou technológiou na trhu (cca 90 %), hlavne na veľké inštalácie. Komerčne sa začal ich predaj niekedy v sedemdesiatych rokoch. I napriek tomu, že je ich výroba náročná a pomerne drahá (je to spôsobené hlavne drahým vstupným materiálom-veľmi čistým kremíkom), budú ešte v niekoľkých ďalších rokoch pravdepodobne vládnuť na trhu.

Druhá generácia: Dôvodom pre rozvoj článkov druhej generácie bola hlavne snaha o zníženie nákladov na výrobu - úsporou drahého základného materiálu, kremíku, sa výrazne zlacní výroba. Články druhej generácie majú 100 krát až 1000 krát tenšiu aktívnu absorbnú polovodičovú vrstvu (takzvaný thin-film). Najbežnejšie sú články z polykryštalického, amorfného a mikrokryštalického kremíku. Využitie nachádzajú aj materiály ako silicon-germanium, či silicon-karbid, ale taktiež tzv. zmesné polovodiče z materiálov ako Cu, In, Ga, S, Se, označované vo všeobecnosti ako CIS štruktúry. Ich hlavnou nevýhodou je však

nižšia účinnosť (v sériovej výrobe cca pod 10 %, účinnosť ďalej klesá časom) a menšia stabilita. V posledných rokoch našli tenkovrstvové články využitie hlavne v aplikáciách, ktoré vyžadujú ohybnosť a pružnosť (napríklad súčasť oblečenia). Komerčne se začali články druhej generácie predávať v polovici osemdesiatych rokov.

Tretia generácia: Predstavuje akúsi revolúciu vo fotovoltaike. Zaradujeme sem systémy využívajúce k separácii nábojov aj iné metódy ako P-N prechod a často tiež aj iné materiály než len polovodiče. Hlavným cieľom je predovšetkým snaha o maximalizáciu počtu absorbovaných fotónov a následne generovaných párov elektrón-diera („prúdový zisk“), ale aj maximalizácia využitia energie dopadajúcich fotónov („napätový“ zisk fotovoltaických článkov). Jedná sa predovšetkým o fotoelektrochemické články a polymerické články. Ich zloženie spočíva v polymere s konjugovanými dvojnými väzbami a molekulách Fullerenu [21]. V súčasnej dobe sa výskum zameriava tiež na viacvrstvové solárne články (z tenkých vrstiev), články s viacnásobnými pásmi, články, ktoré by využívali „horúcich“ nosičov náboja pre generáciu viac párov elektrón-diera. Uplatňujú sa tiež nanoštruktúry vo forme uhlíkových nanotrubičiek alebo nanotyčínok, alebo štruktúry vytvorené nanosením takzvaných kvantových bodiek na vhodnú podložku. Výhodou týchto štruktúr je možnosť cieleného vyladenia optických a elektrických vlastností. Nie sme teda závislí len od štruktúr, ktoré nám poskytuje príroda a Mendelejevova tabuľka prvkov. Praktické využitie týchto článkov je zatiaľ nízke (nízka účinnosť, malá stabilita vlastností a životnosti). Zatiaľ najbližšie ku komerčnému využitiu majú asi flexibilné fotovoltaické moduly založené na organických polyméroch.

Štvrtá generácia: tvoria ju kompozitné fotovoltaické články zložené z jednotlivých vrstiev, ktoré sú schopné využívať širokú časť slnečného spektra. Je to preto, že každá z vrstiev je schopná využiť svetlo v určitom rozsahu vlnových dĺžok. Žiarenie, ktoré nedokáže využiť prepustí do hlbších vrstiev, kde je následne využité.

2.3 Komerčne dostupné typy fotovoltaických článkov

V súčasnosti najviac používaný materiál pre výrobu solárnych článkov je kryštalický kremík. S dostupnosťou materiálu nie sú problémy, pretože oxid kremičitý je zastúpený v zemskej kôre približne s 26 %. Technológia spracovania kremíku je v polovodičovom priemysle dobre zvládnutá. Donedávna sa na výrobu fotovoltaických článkov používal „odpadový kremík“, nevyhovujúci prísnyim požiadavkám výrobcov mikroelektroniky. Momentálne je už spotreba kremíku na výrobu fotovoltaických článkov tak veľká, že tento zdroj nestačí. Navyše kremík pre mikroelektroniku je čistejší (preto aj drahší), než je potrebné pre potreby fotovoltaiky. [1].

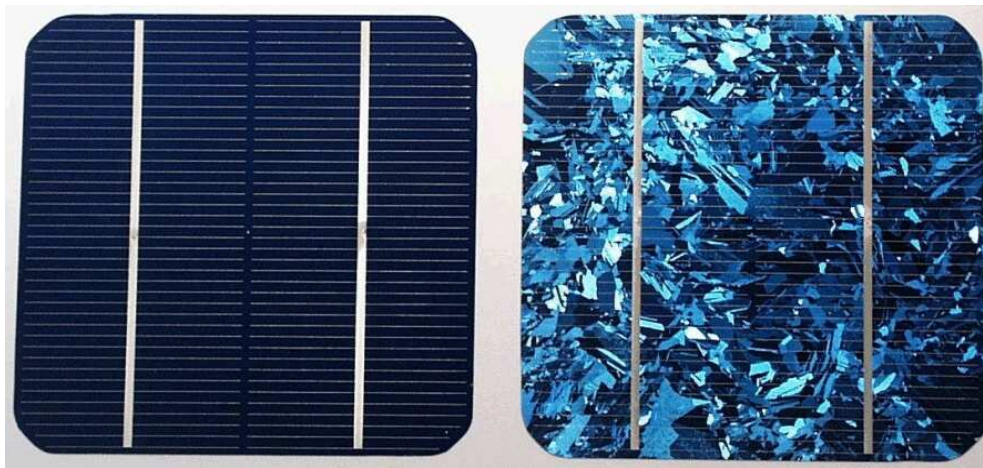
2.3.1 Najčastejšie používané typy kremíkových článkov

Kremíkové monokryštalické články, ktoré možno považovať za najstaršie vyrábané typy fotovoltaických článkov. Rozmer kryštálov je rádovo 10cm. Sú vyrábané z takzvaných ingotov najčastejšie Czochralského metódou, ktorá spočíva v ťahaní zárodka kryštálu z taveniny veľmi čistého kremíku.

Jeho účinnosť premeny sa zo začiatku pohybovala okolo 6 %. Od roku 1954 do roku 1975 sa v tomto smere nedosiahlo takmer žiadneho pokroku, pretože výskum sa orientoval predovšetkým na vesmírne použitie. Od roku 1975 až do roku 1980 sa túto hodnotu podarilo posunúť len o pár percent a hodnota 17 % bola považovaná za neprekonateľnú. Celkový pokrok v týchto rokoch brzdil tiež fakt, že vedci sa sústredili skôr na znižovanie cien ako na zvyšovanie účinnosti. Osemdesiate roky výrazne zmenili tento stav a výsledkom bola

účinnosť 35,2 %. Dnes sa v bežnej výrobe dosahuje účinnosti 13-17 % [3]. Ingoty monokryštalického kremíku sa rozrežú špeciálnou drôtovou pílou na tenké pláty hrubé približne 0,25 až 0,35 mm (v posledných rokoch aj 0,1 mm). S poklesom hrúbky doštičiek sa podarilo zmenšiť aj odpad pri rezaní. Monokryštalický kremík je totiž momentálne stále príliš drahým materiálom, a tak sú výskumníci nútení orientovať sa i na výrobu materiálu s nižšou čistotou. Dosiahlo by sa tým menšej energetickej náročnosti výroby a hlavne výrazného zníženia ceny. Plátky sa ďalej zarovnávajú na rovnomernú hrúbku, vyleštia sa a na povrchu odleptajú, čím sa odstránia nečistoty a nepravidelnosti. Polovodičový P-N prechod sa potom na doštičkách vytvorí prídavkom fosforu, ktorý vytvorí na povrchu vrstvu s vodivosťou typu N. Inou z možností, ako zlacniť výrobu, je priamo ťahať z taveniny tenký monokryštalický pásik, ktorý sa ďalej dá rozrezať na solárne články oveľa jednoduchšie a pri rovnakom množstve kremíku sa dá vyrobiť až dvojnásobná plocha fotovoltaických článkov. Nevýhodou tohto článku je ale o niečo nižšia účinnosť než u článkov vyrobených narezaním z veľkých ingotov monokryštalického kremíku. Monokryštal sa používa tam, kde nie je možné aby panely mali príliš veľké rozmery, v kozmických aplikáciách alebo aj v prípadoch, kedy budúceho majiteľa neodradza značne vyššia cena [1], [6].

Fotovoltaické články z polykryštalického kremíku (vid' Obr. 4) v súčasnosti sú stále viac a viac používaný typ článkov, hlavne vďaka svojej nižšej výrobnéj cene. Výroba spočíva v odlievaní čistého kremíku do vhodných foriem a v rezaní vzniknutých ingotov na tenké plátky. Odlievanie je každopádne jednoduchšia metóda než proces ťahania monokryštálu. Ďalšou z výhod je nepochybne lepšie využitie materiálu, pretože sa dajú vytvoriť bloky so štvorcovým, prípadne obdĺžnikovým prierezom a vo väčších rozmeroch. Takto vyrobené články majú avšak aj svoju tienistú stránku. Majú trochu horšie elektrické vlastnosti, konkrétne účinnosť oproti predchádzajúcemu typu článku. Laboratórne tieto solárne články dosahujú účinnosť 18,5 %, v podmienkach hromadnej výroby však nepresahujú 14 %. Je to spôsobené tým, že na styku jednotlivých kryštálových zŕn je väčší odpor. V priebehu tuhnutia taveniny dochádza k tvorbe rôzne veľkých a orientovaných kryštálov. Polykryštalická štruktúra materiálu dodáva týmto článkom charakteristický vzhľad. Viditeľné hranice kryštálov pripomínajú leštený kameň a je obľúbený u architektov [1], [6].

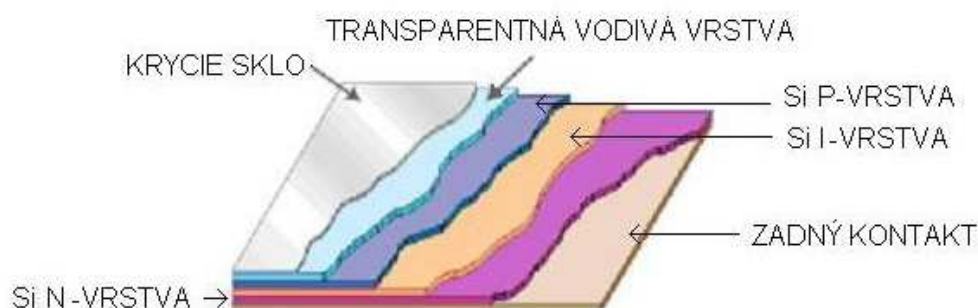


Obr. 4: Fotovoltaický článok - vľavo monokryštalický, vpravo polykryštalický [7]

Fotovoltaické články z amorfného kremíku sa vyznačujú v prvom rade veľmi malou spotrebou polovodičového materiálu a malou energetickou náročnosťou na ich výrobu a teda v konečnom dôsledku vo veľkovýrobe i nízkou cenou. Výroba týchto článkov pozostáva na rozklade vhodných zlúčenín kremíku vo vodíkovej atmosfére. Takýmto spôsobom sa dajú vyrobiť veľmi tenké vrstvy kremíku nanosené na lacné podklady ako sú napríklad sklo, nerez, keramické alebo plastové fólie (vid' Obr. 5). Takto nanosená vrstva kremíku je amorfná, to znamená, že nemá pravidelnú kryštalickú štruktúru a obsahuje určité množstvo vodíku.

Vďaka väčšej schopnosti absorbovať žiarenie zo slnka je možné, aby bola oveľa tenšia (ako uvádza [1] strana 20, vrstva o hrúbke 1mm je schopná pohltiť 90 % slnečného žiarenia). Vďaka tejto kladnej vlastnosti je možné vyhotoviť veľmi tenké a zároveň aj ohybné fotovoltaické články, ktoré nájdu využitie napríklad ako nášivky na oblečenie, prípadne ako krycie fólie na strechy.

Jednou z vlastností tohto materiálu je, že má oproti kryštalickému kremíku oveľa menej pravidelnú štruktúru, ktorá má veľké množstvo porúch, čo v konečnom dôsledku znamená zníženie účinnosti. Ďalším problémom, s ktorým musíme počítať, je značná nestabilita týchto článkov. Výkon u týchto článkov zpočiatku klesá a až časom sa ustáli na približne 80 % pôvodnej hodnoty. Tento článok sa vyznačuje tým, že horná vrstva s vodivosťou P je veľmi tenká a zachytáva len málo fotónov a až pod ňou sa nachádza ďalšia tenká vrstva, ktorá je nedopovaná – intrinzičná (má tiež označenie ako vrstva I). Práve v nej dochádza k pohlteniu väčšiny dopadajúceho žiarenia a k vytvoreniu voľných elektrónov a dier. Účinnosť tohto typu článku je dosť nízka. Podľa [3] v rozmedzí 4-8 %. To ho predurčuje na použitie v zariadeniach s malou spotrebou energie ako sú kalkulačky a hodinky a podobne. Je dobré si uvedomiť, že by použitie drahých materiálov predražilo takéto výrobky natoľko, že by sa ich výroba vôbec nevyplatila [1], [2], [8].



Obr. 5: Schéma fotovoltaického článku z amorfného kremíku [9]

Tabuľka 1: Obvyklé a maximálne účinnosti rôznych typov kremíkových solárnych článkov [1]

Typ	Obvyklá účinnosť (%)	Maximálna účinnosť dosiahnutá v laboratóriu (%)
Monokryštalický kremík	14-17	25
Polykryštalický kremík	13-16	20
Amorfny kremík	5-7	12

2.4 Nové trendy a smery výskumu v odbore fotovoltaických článkov

S rastúcim nedostatkom kremíku pre výrobu klasických monokryštalických a polykryštalických kremíkových článkov vzniká tlak na tvorbu nových článkov, ktoré budú využívať materiály iné ako kremík. Medzinárodnou snahou v oblasti fotovoltaických článkov je, aby bola cena fotovoltaických článkov natoľko nízka, že by sa do roku 2015 cena nimi vyrobenej elektrickej energie vyrovnala cene elektriny z doposiaľ využívaných zdrojov. Väčšina týchto nových článkov sa vyznačuje tým, že sú tenkovrstvové a dajú sa vyrábať metódami vyznačujúcimi sa dobrou produktivitou a potenciálom pre znižovanie nákladov s rastom produkcie. Môžeme sa stretnúť s týmito materiálmi:

- **Arzenid galný (Galiumarzenit, GaAs [10]):** Sú to monokryštalické články s tenkými vrstvami, ktoré sa dajú vyrobiť s odlišnými vlastnosťami, a zároveň aj optimálne prispôbiť potrebám. Je možné u nich meniť pomer Ga/As a tiež použiť rôzne prvky

za účelom dopovania (P, Al, Sb, In). Ich výhodou je, že majú vysokú schopnosť absorbovať žiarenie. Stačí totiž hrúbka niekoľko mikróv na to, aby zachytili takmer všetko dopadajúce žiarenie. Nevýhodou je, že gálium je pomerne zriedka vyskytujúci sa kov a arzén je jedovatý. Tiež sú menej citlivé na vyššie teploty ako kremíkové články. Kvôli tejto vlastnosti sú používané pri fotovoltaických systémoch s koncentrátormi žiarenia (viď. ďalej), kde ich účinnosť dosahuje vyšších hodnôt.

- **Telurid kadmia (Cadmium telluride, CdTe [1]):** Tento materiál má taktiež ako GaAs veľkú schopnosť absorbovať slnečné žiarenie a má takmer ideálnu vzdialenosť valenčného a vodivostného pásu (1,44 eV). Bezpochyby jednou z výhod u tohto materiálu je, že tenkovrstvové články vyrobené z CdTe je možné vyrábať nízkonákladovými technológiami.
- **Diselenid medi a india (Copper indium diselenide, CuInSe₂, CIS):** Vyznačujú sa vysokou absorptivitou pre slnečné žiarenie, z tohto dôvodu môžu byť veľmi tenké. Podľa [1] strana 22 sa 99 % slnečného žiarenia pohltí v prvom mikrometri hrúbky. V laboratóriu dosahujú až 18 % účinnosť [11].
- **Články využívajúce organické látky:** Sú síce potenciálne veľmi sľubné a je tu veľké množstvo možností, ale zatiaľ je tento odbor veľmi málo preskúmaný a taktiež relatívne málo využívaný. Ak uvažujeme o komerčných aplikáciách, stretáme sa zatiaľ prakticky len s firmou Konarka [12], ktorá ako sa zdá, sa jediná venuje tejto problematike.

Organické zlúčeniny môžu byť využité na vytvorenie fotovoltaických článkov rôznymi spôsobmi. Za zmienku stoja napríklad **fotogalvanické články s organickým farbivom**, ktoré sa skladajú z vrstvy vysoko porézneho a vysoko jemného oxidu titaničitého TiO₂, v ktorom je nasiaknutý vodný roztok elektrolytu obsahujúci takzvanú redox dvojicu (jód/jodid) a vhodné farbivo (organický komplex ruthenia). Farbivo zachytením fotónu vytvorí excitovaný stav a elektrón je prenesený na oxid titaničitý. Elektrón "presiakne" cez štruktúru TiO₂ na priehľadnú elektródu a je odvedený do vonkajšieho obvodu. Obvod je uzatvorený tak, že na druhej elektróde je elektrón vstupujúci z vonkajšieho obvodu prenesený na jód, vytvorí sa trijodidový anión, ktorý má za úlohu redukovať oxidovanú formu farbiva, ktoré je tak pripravené na prijatie ďalšieho fotónu. Výhodou spomínaného článku je, že kladie malé nároky na čistotu použitých materiálov. Avšak má aj svoje nevýhody, ktoré súvisia s korozívnym elektrolytom. Ten musí byť totiž dokonale uzatvorený a použité farbivo musí vydržať dlhú dobu slnečného svitu a nesmie sa rozkladať. Čo sa týka praktického využitia, existujú napríklad firmy Solaronix SA [13] a DYESOL [14]. I tu sa v posledných rokoch výskumu objavujú nové riešenia, a to konkrétne v podobe nanoštruktúr.

Namiesto bežného mikrokryštalického TiO₂ sa galvanicky vytvorí na sklenenej podložke pokrytej vodivou vrstvou oxidu cínu veľmi tenká vrstva kovového titánu. Na ňom sa elektrolytickou oxidáciou nechá vyrásť vrstva oxidu titaničitého vo forme nanotrubičiek, ktoré sa zahriatím prevedú do kryštalickej, takmer priehľadnej formy. Tie sa nakoniec pokrývajú elektrolytom s organickým farbivom.

- **Nanoštruktúry:** V posledných rokoch existujú špeciálne technológie umožňujúce pripraviť dostatočne malé štruktúry, takzvané „kvantové bodky“ [1]. Ako uvádza [15], v takýchto štruktúrach sa uplatní efekt nazývaný „quantum confinement“, ktorý umožní nastaviť potrebnú veľkosť šírky zakázaného pásma. Takéto nanoštruktúry, ako je uvedené v [1], by bolo údajne možné nanášať na povrch vhodného substrátu nalievaním suspenzie v odstredivke. Dosahované účinnosti sú stále nízke (okolo 3 %).

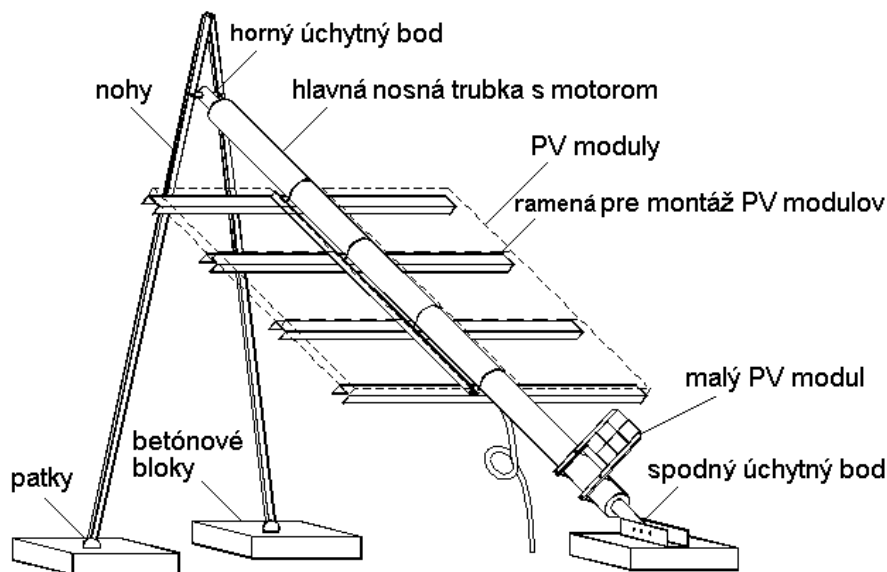
- **Fotogalvanické články z vodivých polymérov:** Jedná sa o určitú podobnosť fotovoltaiických článkov s P-N prechodom. V zmesi vodivých polymérnych molekúl, z ktorých jeden má elektrónakceptorové vlastnosti a druhý elektrón donorové vlastnosti, dôjde pohltením fotónu k vzniku viazaného páru elektrón-diera a za určitých podmienok dôjde k prenosu náboja na elektrónakceptorovú molekulu. Ako elektrón donorovú molekulu možno použiť napríklad poly(3-oktyl-thiofen). Ako akceptor elektrónov slúži uhlíková nanotrubička. Účinnosť je u tejto aplikácie najväčším problémom. Pohyblivosť elektrónov v organických systémoch je horšia než v anorganických polovodičoch.
- **Viacprechodové štruktúry (multijunction)** využívajú myšlienky, že ak sa vytvorí viacvrstvová štruktúra, ktorej každá časť je dimenzovaná pre určitú časť slnečného spektra, potom je možné dosiahnuť podstatne lepšieho využitia energie dopadajúceho žiarenia. Viacvrstvová štruktúra síce redukuje prúd, ale tento fakt je vykompenzovaný zvýšením napätia článku. Jednou z výhod týchto štruktúr je lepšie využitie energie slnečného žiarenia a s tým súvisiaca i dosiahnuteľná účinnosť. V slnečnom spektre sú fotóny s rôznymi vlnovými dĺžkami. Tie, ktoré majú energiu menšiu ako je šírka zakázaného pásu daného polovodiča, prejdú bez zachytenia. Fotóny, ktoré majú väčšiu energiu, zase využijú len jej časť (zbytok sa premení na teplo). Vytvorením viacvrstvovej štruktúry, kde každá vrstva môže využiť inú časť solárneho spektra, sa dá doceliť podstatne vyššia účinnosť. Teoreticky sa dá využiť plné slnečné spektrum. V praxi sa spravidla používa vrstevnatá štruktúra, kde vo vrchnej vrstve je polovodič zachytávajúci fotóny s vyššou energiou a prepúšťajúce fotóny s energiou nižšou, ktoré sú zachytené ďalším z polovodičov v nižšej vrstve. Pre jednotlivé vrstvy sa ako materiál používajú napríklad InP, GaSb, GaAs. Dôkladným nastavením zloženia je možné vyladiť šírku zakázaného pásu tak, aby celá štruktúra optimálne využila takmer celú energiu dopadajúceho žiarenia. Viacprechodové štruktúry sú pochopiteľne omnoho drahšie ako klasické kremíkové články, preto sú často používané v spojení s koncentrátorom, ktorý umožní znížiť plochu článku a zároveň zlepšiť tak pomer užitočnej hodnoty k cene [1].

2.5 Možnosti zvýšenia účinnosti fotovoltaiických modulov

- **Antireflexné vrstvy a textúra povrchu:** Podľa [1], vzhľadom k vysokej cene fotovoltaiických modulov je každé zvýšenie ich účinnosti vítané. Materiál fotovoltaiických článkov má pomerne veľký index lomu a teda dochádza k odrazu časti dopadajúceho slnečného žiarenia (obzvlášť keď dopadá pod malým úhлом). Použitím dokonalejšej antireflexnej vrstvy sa dá dosiahnuť ďalšie zvýšenie účinnosti. Vytvorením ihlanovitej štruktúry na prednej strane sa uľahčuje vstup fotónov do štruktúry článku, a naopak, vďaka totálnej reflexii sa znemožňuje výstup nezachytených fotónov odrazených od zadnej strany článku smerom von.
- **Priehľadné kontakty:** Kontakt, ktorý odvádza elektrický prúd zo spodnej vrstvy fotovoltaiického článku, nepredstavuje taký problém ako zberné kontakty – mriežka na vrchnej strane. Tá totiž zastieňuje určitú časť dopadajúceho žiarenia. Jednou z možností je použitie priehľadných elektricky vodivých vrstiev (zpravidla oxid cínu).
- **Obojstranné moduly:** Ďalšou možnosťou ako zvýšiť výrazne množstvo žiarenia dopadajúceho na P-N prechod fotovoltaiického článku, je použiť špeciálne obojstranné fotovoltaiické panely a nechať svetlo dopadať z oboch strán. Podľa zdroja [1] zo strany 28, ak je panel namontovaný napríklad na bielej alebo natriebro natretej streche je množstvo žiarenia dopadajúce zo zadnej strany pomerne významné – zvýši sa produkcia energie až o 30 %. Tieto panely nájdu dobré uplatnenie taktiež v spojení so

zrkadlovým koncentrátorom a stojanom umožňujúcim natáčanie za slnkom (viď. ďalej).

- **Natáčanie modulov za slnkom:** významné zvýšenie dennej produkcie elektriny sa dá doceliť montážou fotovoltaických panelov na pohyblivý stojan, ktorý sleduje slnko, a zaisťuje tak trvalý kolmý dopad lúčov v priebehu dňa. U malých systémov, s ktorými sa stretávame v praxi najčastejšie sa používa automatické natáčanie okolo jednej osi. Umožňuje sledovať denný pohyb slnka po oblohe. Zmena výšky slnka nad obzorom v priebehu roka sa nastavuje manuálne. Sledovanie pohybu slnka sa deje najčastejšie pomocou dvojice čidiel, ktorých signál je v rovnováhe len vtedy, ak na obe čidlá dopadá slnečné žiarenie rovnako. Toto riešenie je použité napríklad pri systémoch Traxle [18] vyobrazenom na Obr. 6. Zariadenie používa jednosmerný motor, ktorý cez skrutkovú prevodovku (sú umiestnené v trubici tvoriacu osu) otáča na osi upevnené moduly na jednu alebo druhú stranu podľa polarít prúdu. Elektrický prúd určený na pohon motoru je získavaný z malého PV modulu uchyteného na spodnej časti osi (trubky). Tento modul je namontovaný kolmo k slnku a má PV články na oboch stranách. Slnečný sledovač Traxle sa otáča v závislosti od toho, na ktorú stranu malého PV modulu svieti slnko. V prípade, že začne slnko svietiť zo strany a jeden modul je osvetlený viac, rovnováha sa poruší a motor sa začne otáčať pokiaľ slnko nebude svietiť rovnako na obe strany tohoto malého PV modulu – a teda kolmo na hlavné fotovoltaické moduly.
- **Koncentrátory:** sú optické zariadenia schopné sústrediť slnečné žiarenie z veľkej plochy na malú plochu fotovoltaického článku (modulu) a podstatne tak zvýšiť jeho výkon (prúd). Použitie takejto aplikácie je výhodné hlavne preto, že cena koncentrátoru je spravidla značne nižšia ako cena solárneho modulu. Fotovoltaické články tiež často poskytujú pri vyššom svetelnom toku vyššiu účinnosť a navyše je možné používať účinnejšie typy článkov, ktoré sú príliš drahé na to, aby sa dali bežne používať a doposiaľ sa využívali len v kozmických plavidlách. Koncentrátory môžeme rozdeliť podľa toho, aké optické prvky ku koncentrácii využívajú na **koncentrátory zrkadlové** (s rovinným zrkadlom, s parabolickým zrkadlom), **koncentrátory šošovkové** (bežné spojité šošovky, Fresnelove šošovky), koncentrátory založené na iných princípoch (napríklad dielektrické alebo fluorescenčné).



Obr. 6: Sledovač slnka Traxle [18]

- Použitie koncentrátoru má však i svoje nevýhody, čo je tiež dôvod, prečo sa s koncentrátormi málokedy v praxi stretujeme. Asi základnou nevýhodou je **zníženie uhlového rozsahu**, z ktorého je schopný koncentrátor zachytiť dopadajúce žiarenie. Na bežný fotovoltaický modul môže priame žiarenie dopadať s uhlami 0° až takmer 90° od kolmice a stále je aspoň časť žiarenia zachytená a využitá. Ak je obloha pokrytá oblačnosťou tento panel dokáže využiť väčšinu rozptýleného žiarenia, ktoré je k dispozícii. Ale použitím akéhokoľvek koncentrátoru sa rozsah uhlov, z ktorých koncentrátor dokáže zachytiť žiarenie znižuje úmerne tomu, ako rastie koncentrácia. Tento problém sa dá odstrániť presným sledovaním slnka. V našich klimatických podmienkach je pomerne veľká časť dopadajúcej energie vo forme rozptýleného žiarenia, čo je, ako bolo už spomenuté, pre použitie koncentrátorov nevýhodné. Ďalej musíme brať do úvahy **optické straty**. Ak už použijeme ku koncentracii žiarenia zrkadlo alebo šošovku, systém má stále nejaké straty. Časť žiarenia sa pohltí alebo rozptýli.

Väčšina koncentrátorov má problém zaistiť **rovnomernú intenzitu** žiarenia dopadajúceho na fotovoltaické články, čo vedie ku zníženiu účinnosti. Ďalšou z nevýhod je i **zahrievanie**. Pod intenzívnym koncentrovaným žiarením sa fotovoltaické články zahrievajú, čo má za následok napríklad u kremíkových článkov zníženie účinnosti, pri prílišnej teplote dokonca ich zničenie. **Životnosť** zrkadiel koncentrátorov je často vo vonkajšom prostredí obmedzená. Materiál na výrobu zrkadiel je často hliníkový plech pokrytý vhodnou ochrannou vrstvou. Pomerne odolné sú tiež vrstvičky hliníku vákuovo naparené na vhodnej plastovej fólii. Výhody takéhoto zrkadla sú ľahkosť a nízka cena. Najdokonalejšie sú asi tenké postriebrené zrkadlá prítmelené na vhodný ocelový plech, ktoré je možné taktiež ohýbať do potrebného tvaru.

2.6 Prehľad niektorých výrobcov fotovoltaických modulov, ich produkty a ceny

Tabuľka 2: Odkazy na výrobcov fotovoltaických modulov

Výrobca	Odkaz
Elektro Solar Technik	http://www.estechnik.cz/
Siemens	http://www.powergeneration.siemens.com
Canon Uni-Solar	http://www.uni-solar.com/
Solarex	http://www.solarex.cz/solarni-systemy
Eurosolare	http://www.eurosolare.it
Kyocera	http://www.kyocerasolar.com
Solarfabrik	http://solar-fabrik.com/
Helios	http://helios-pv.com
BP Solar	http://www.bp.com
ASE	http://www.solarhome.org/solarpanelbrand_ase.html
TRIMEX Tesla	http://www.trimex-tesla.cz
Solartec	http://solartec.czechtrade.sk/

Tabuľka 3: Solárne panely dodávané v ČR firmou TRIMEX TESLA [2]

Typ	Optimálne napätie	Optimálny prúd	Max. výkon	Napätie naprázdno	Prúd nakrátko	Dĺžka	Šírka	Hrúbka	Hmotnosť	Cena v Kč bez DPH
	(V)	(mA)	(W)	(V)	(A)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg)	
M-S36-53	17,2	3,1	53	21,5	3,42	1005	453	34	5,9	10 655
M-S36-46	16,7	2,74	46	21,3	3,13	1005	453	34	5,9	9 163
M-SH36-26	17,2	1,55	26	21,5	1,71	537	453	34	3,4	6 350
M-SH36-23	16,7	1,37	23	21,3	1,57	537	453	34	3,4	5 441
M-SQ36-13	17,2	0,77	13	21,5	0,85	527	243	34	1,9	4 299
M-SQ36-10	16,4	0,63	10	21,2	0,73	527	243	34	1,9	3 268

Tabuľka 4: Technické parametre výrobkov firmy SOLARTEC – solárne minipanely [19]

Typ	Nominálne napätie	Optimálne napätie	Optimálny prúd	Optimálny výkon	Dĺžka	Šírka	Hrúbka	Hmotnosť	Cena v Kč bez DPH
	(V)	(V)	(mA)	(WP)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg)	
SMP 12-350	12	17,4	340	6	504	125	8	0,8	2 330
SMP 12-180	12	17,1	180	3,2	311	125	8	0,5	1 714
SMP 8-350	8	9,5	340	3,3	293	125	8	0,5	1 556
SMP 8-180	8	9,5	180	1,8	183	125	8	0,3	1 377
SMP 6-350	6	7,5	340	2,6	240	125	8	0,4	1 317
SMP 6-180	6	7,5	180	1,4	152	125	8	0,3	1 115
SMP 3-350	3	3,9	340	1,3	129	125	8	0,2	978
SMP 3-180	3	3,8	180	0,7	85	125	8	0,2	807

Poznámka: Ceny sú aktuálne ku dňu 20.12.2008

2.6.1 Prehľad niektorých solárnych modulov dostupných na trhu [2]

Tabuľka 5: Najmenšie moduly

Výrobca	Typ	Technológia	Menovitý výkon (W)	Menovité napätie (V)	Menovitý prúd (A)	Zkratový prúd (A)	Napätie naprázdno (V)	Účinnosť (%)	Výška (mm)	Šírka (mm)	Hmotnosť (kg)
Siemens	M10	Mono	10	16,3	0,6	0,71	19,9	8,4	360	330	1,8
Canon Uni-solar	US11	Si-film	11	16,5	0,62	0,87	23,8	5,9	491	380	1,6
Siemens	M20	Mono	20	14,6	1,37	1,6	18	10,6	570	330	2,5
Solarex	MSX20	Poly	20	17,1	1,17	1,27	20,8	9,4	422	502	3
Elektro Solar Technik	SPP 12-20R	Mono	20	17,4	1,21	1,3	21,7	16	537	453	2

Tabuľka 6: Malé moduly

Výrobca	Typ	Technológia	Menovitý výkon	Menovité napätie	Menovitý prúd	Zkratový prúd	Napätie naprázdno	Účinnosť	Výška	Šírka	Hmotnosť
			(W)	(V)	(A)	(A)	(V)	(%)	(mm)	(mm)	(kg)
Canon Uni-solar	US21	Si-film	21	16,5	1,27	1,59	23,8	5,9	928	383	3
Eurosolare	MA250	Poly	25	17,2	1,45	1,6	21,3	10,5	540	440	3
Solarex	MSX30	Poly	30	17,1	1,75	1,9	21,1	10,0	597	502	3,9
Canon Uni-solar	US32	Si-film	32	16,5	1,94	2,4	23,8	6,1	1366	383	4,8
Solarex	MSX40	Poly	40	17,1	2,34	2,53	21,1	10,3	770	502	5,4
Canon Uni-solar	KC40	Poly	40	16,9	2,34	2,48	21,5	11,7	4652	526	6

Tabuľka 7: Štandardné moduly

Výrobca	Typ	Technológia	Menovitý výkon	Menovité napätie	Menovitý prúd	Zkratový prúd	Napätie naprázdno	Účinnosť	Výška	Šírka	Hmotnosť
			(W)	(V)	(A)	(A)	(V)	(%)	(mm)	(mm)	(kg)
Solarfabrik	SF46A	Mono	46	17	2,7	3,16	21,2	10,2	1000	450	6
BP Solar	BP250	Mono	50	17,1	2,94	3,22	21,2	11,4	825	530	5,6
Solarex	MSX50	Poly	50	17,1	2,92	3,17	21,1	8,9	1113	502	7,2
ASE	MQ36D	Poly	53	17,2	3,08	3,25	21,6	11,7	977	462	6,8
Siemens	M55	Mono	55	17,5	3,15	3,4	21,7	12,9	1293	329	5,5
Solarex	MSX60	Poly	60	17,1	3,5	3,8	21,1	10,7	1113	502	7,2

Tabuľka 8: Veľké moduly

Výrobca	Typ	Technológia	Menovitý výkon	Menovité napätie	Menovitý prúd	Zkratový prúd	Napätie naprázdno	Účinnosť	Výška	Šírka	Hmotnosť
			(W)	(V)	(A)	(A)	(V)	(%)	(mm)	(mm)	(kg)
Solarex	MSX64	Poly	64	17,5	3,66	4	21,3	11,5	1113	502	7,2
BP Solar	BP275	Mono	75	17	4,5	4,8	21,4	11,3	1118	530	7,5
Helios	H800	Mono	80	17	4,7	5,4	20,9	11,3	1250	565	78,5
Eurosolare	MAP1000	Poly	100	17,1	5,62	6,2	21,1	11,3	995	890	11,5
Siemens	M110F	Mono	110	35	3,15	3,45	43,5	12,7	1316	660	11,5
Solarfabrik	SF115	Mono	115	16,8	6,9	7,9	20,9	12	1470	564	10

3 PULZNÉ ZDROJE

Ako uvádza [20] meniče DC/DC sú obvody, ktoré regulujú elektrickú energiu a menia vstupné jednosmerné napätie U_1 na iné výstupné jednosmerné napätie U_2 . Tieto meniče sú napät'ového typu, čo znamená, že sú to meniče napájané konštantným vstupným napätím z napät'ového zdroja. Meniče bez transformátoru neumožňujú galvanické oddelenie výstupu od vstupu.

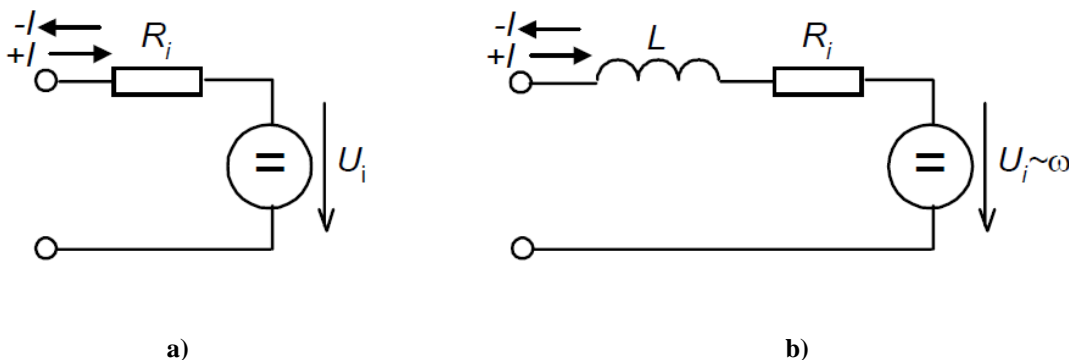
Každý menič sa skladá z vlastného silového obvodu a riadiacej elektroniky (regulačných obvodov). Silové obvody meničov pozostávajú len zo spínačov a akumuláčnych prvkov, teda indukčností a kapacít. Takéto obvody nesmú využívať pri regulácii energiu rezistorov. Je to preto, že nás zaujímajú len také silové obvody, ktoré sú z princípu bezstratové.

Vo všeobecnosti môžeme rozdeliť DC/DC meniče na meniče bez transformátoru a meniče s transformátorom. Pre naše účely sú vhodné DC/DC meniče bez transformátoru, ktoré budú popisované v ďalšom texte.

3.1 Napájacie zdroje a záťaž meniča

DC/DC meniče môžu čerpať energiu zo zdroja a dodávať ju do záťaže alebo tiež opačne, energiu čerpať zo záťaže a dodávať ju do zdroja. Zdrojom s konštantným napätím U_1 , schopným dodávať a akumulovať energiu je akumulátor. Z hľadiska schopnosti spotreby či dodávky energie je možné rozlišovať záťaž aktívnu a pasívnu. Aktívnou záťažou môže byť opäť napríklad akumulátor, ale taktiež i jednosmerný motor. Jeho náhradné zapojenie pre ustálený stav je uvedené na Obr. 7. Vnútrné rotačné (pohybové) indukované napätie je úmerné otáčkam, prúd potom momentu na hriadeli a to vrátane znamienok.

Ak tečie prúd v strednej hodnote do záťaže ($+I$), tak motor poháňa, čiže mení elektrickú energiu na mechanickú (pracuje v motorickom režime). V prípade, že tečie zo záťaže ($-I$), motor brzdí, teda mení z vonkajšku dodávanú mechanickú energiu na energiu elektrickú (pracuje v generátorickom režime).

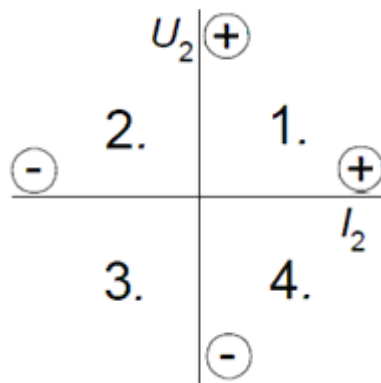


Obr. 7: Aktívna záťaž: a) náhradná schéma akumulátoru, b) náhradná schéma jednosmerného elektromotoru s cudzím buđením

3.2 Najjednoduchšie meniče s jedným akumuláčnym prvkom

Podľa polarít výstupného napätia U_2 a výstupného prúdu I_2 môže menič pracovať v štyroch kvadrantoch Voltampérovej roviny (viď. Obr. 8).

V kvadrantoch 1 a 3 dodáva menič energiu do záťaže. Ak je záťaž motor, tak poháňa. Pasívne záťaže môžu pracovať iba v týchto kvadrantoch. V kvadrantoch 2 a 4 dodáva aktívna záťaž energiu opäť do meniča. Ak sa jedná o motor, potom brzdí.



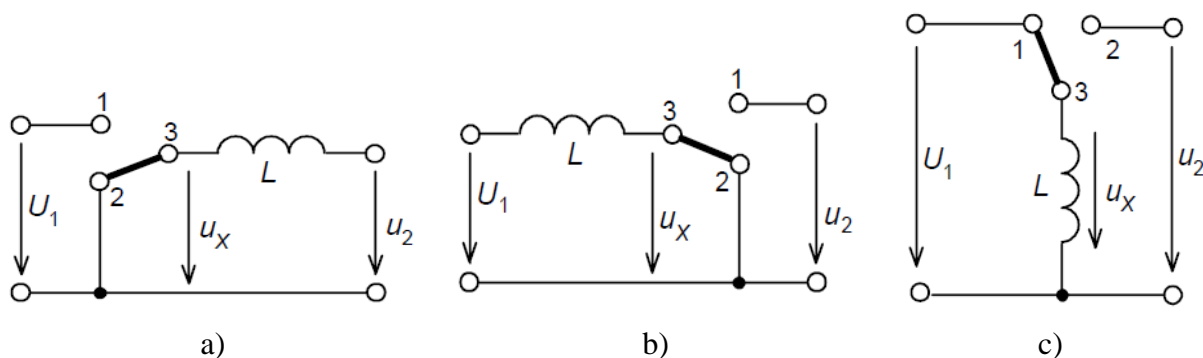
Obr. 8: Pracovné kvadranty vo Voltampérovej rovine

3.2.1 Princípy najjednoduchších meničov s jedným akumuláčným prvkom (indukčnosťou)

Pre objasnenie princípu činnosti je vhodné si vytvoriť silový obvod meniča pozostávajúci z dvoch prvkov – indukčnosť L a ideálny prepínač. Tri spôsoby ako takýto menič zapojiť sú vyobrazené na Obr. 9.

Ad a) **menič znižujúci a neinvertujúci** (step-down, chopper, buck, priepustný menič). Stredná hodnota U_x musí vzhľadom k činnosti prepínača byť

$$U_x = U_1 \frac{t_1}{t_1 + t_2} < U_1, \quad (1)$$



Obr. 9: Principiálna schéma DC/DC meničov s jedným akumuláčným prvkom

Výstupné napätie je rovné U_x , pretože stredná hodnota napätia na indukčnosti L musí byť nulová. Platí vzťah

$$U_2 = U_x = U_1 \frac{t_1}{t_1 + t_2} < U_1. \quad (2)$$

Výstupné napätie je vždy menšie než vstupné a má rovnakú polaritu. Prípustné pracovné kvadranty sú 1 a 2. Menič je schopný dávať napätie U_2 jednej polarity, ale prúd I_2 môže tiecť oboma smermi.

Ad b) **zvyšujúci a neinvertujúci menič** (step-up, boost). Stredná hodnota U_x musí vzhľadom k činnosti prepínača byť

$$U_x = U_2 \frac{t_2}{t_1 + t_2} = U_1. \quad (3)$$

Vstupné jednosmerné napätie U_1 sa rovná U_x (je nulová stredná hodnota napätia na indukčnosti L). Platí

$$U_2 = U_1 \frac{t_1 + t_2}{t_2} > U_1. \quad (4)$$

Stredná hodnota výstupného napätia je vyššia než vstupné napätie a má rovnakú polaritu. Možné pracovné kvadranty sú opäť 1 a 2.

Ad c) **menič invertujúci** (buck-boost, menič so spoločnou tlmivkou, blokujúci menič). Vzhľadom k činnosti prepínača musí pre U_x platiť

$$U_x = \frac{U_1 t_1 + U_2 t_2}{t_1 + t_2}. \quad (5)$$

Pretože U_x je stredná hodnota napätia na indukčnosti L , môžeme napísať

$$U_x = 0. \quad (6)$$

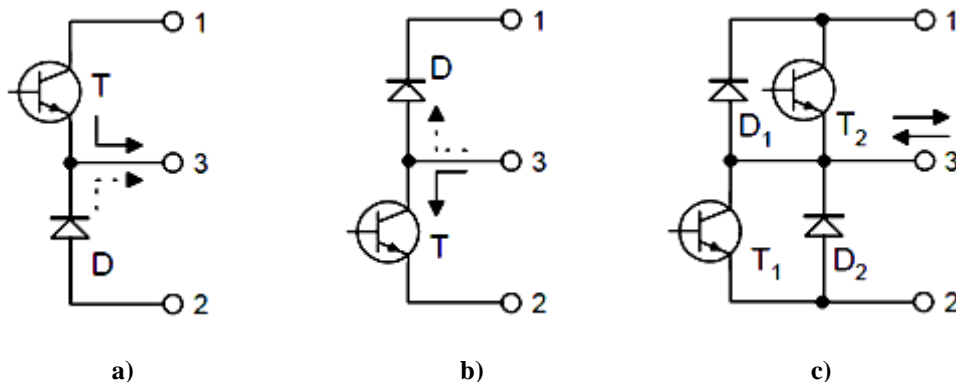
Potom

$$U_2 = -\frac{t_1}{t_2} U_1 \quad (7)$$

Veľkosť výstupného napätia môže byť väčšia aj menšia ako vstupná. Možné pracovné kvadranty sú 3 a 4.

3.2.2 Prakticky realizované silové prvky

Prepínače sa v skutočných obvodoch realizujú pomocou horných a dolných spínačov - trojpólov.



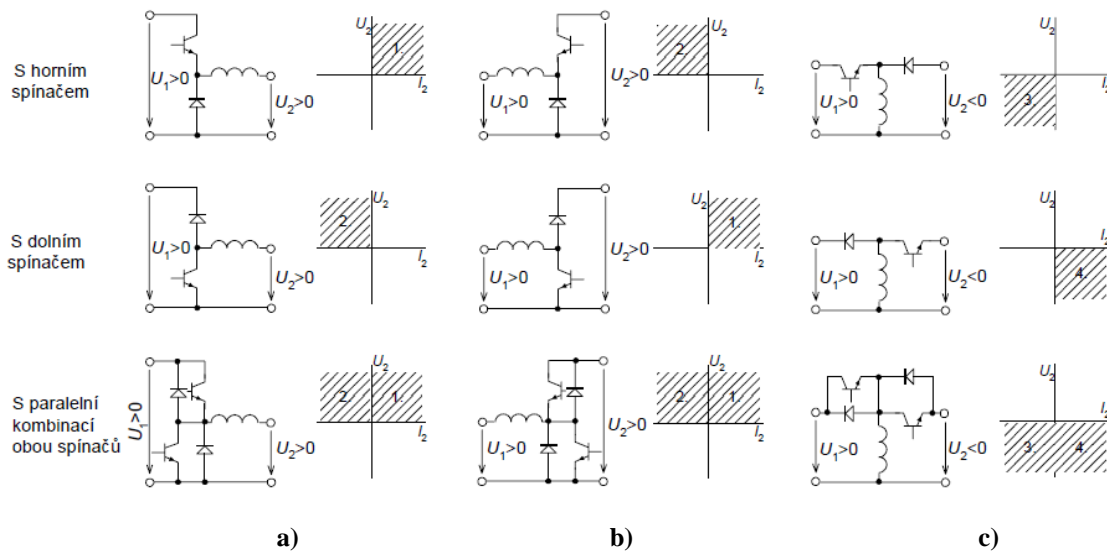
Obr. 10: Typy spínačov pre pulzné meniče: a) horný spínač, b) dolný spínač, c) paralelná kombinácia horného a dolného spínača

a) Horný spínač je nášmu prepínaču presne ekvivalentný pri splnení dvoch podmienok:

- 1) Induktívna záťaž medzi 1 - 3 alebo 2 - 3.
- 2) Prúd tečie touto záťažou smerom von z vývodu 3. Za týchto predpokladov, ak zopneme tranzistor T, tečie prúd I z 1 do 3 cez tranzistor, dióda D je polarizovaná v závernom smere (nevedie). Ak vypneme T, udržuje indukčtná záťaž zapojená

medzi 2 - 3 (alebo 1 - 3) stále prúd I , prípadne na indukčnosti sa vytvorí také napätie, aby sa dióda D otvorila a prúd sa mohol uzatvoriť cez ňu, teda potečie z 2 do 3.

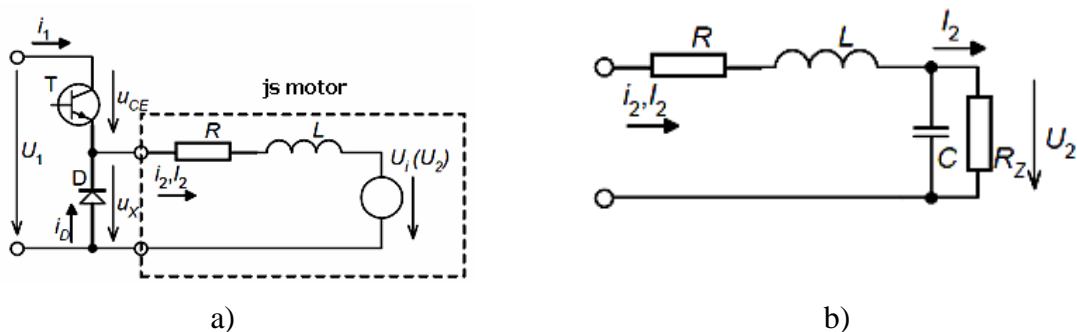
- b) Dolný spínač pracuje podobne, len smer prúdu musí byť opačný.
- c) Paralelná kombinácia horného a dolného spínača sa nazýva vetva. Je ekvivalentná prepínaču za podmienky použitia indukčívnej záťaže. Smer prúdu môže byť obojaký. Ak tečie von z 3, vedú ho striedavo T_2 alebo D_2 (teda horný spínač). Ak tečie do 3, vedú ho striedavo T_1 alebo D_1 (teda dolný spínač).



Obr. 11: Skutočné silové obvody meničov z Obr. 9 a ich pracovné kvadranty, a) menič znižujúci neinvertujúci (step-down), b) menič zvyšujúci neinvertujúci (step-up), c) menič invertujúci (buck-boost)

Dôležité je to, že vedenia prúdu sa vždy zúčastní tranzistor so svojou protíľahlou diódou, tj. prvky tvoriace spolu funkčný celok (horný alebo dolný spínač). Teda v Obr. 11c to sú funkčné celky T_1D_1 a ďalej T_2D_2 . Tranzistor so susediacou antiparalelnou diódou je z tohto hľadiska sama o sebe nefunkčná kombinácia, vzniknutá až dôsledkom spojenia horného a dolného spínača. S pomocou horných a dolných spínačov môžeme principiálnu schému z Obr. 9 prekresliť do realizovateľnej podoby na

3.3 Znižujúci neinvertujúci menič (step – down)

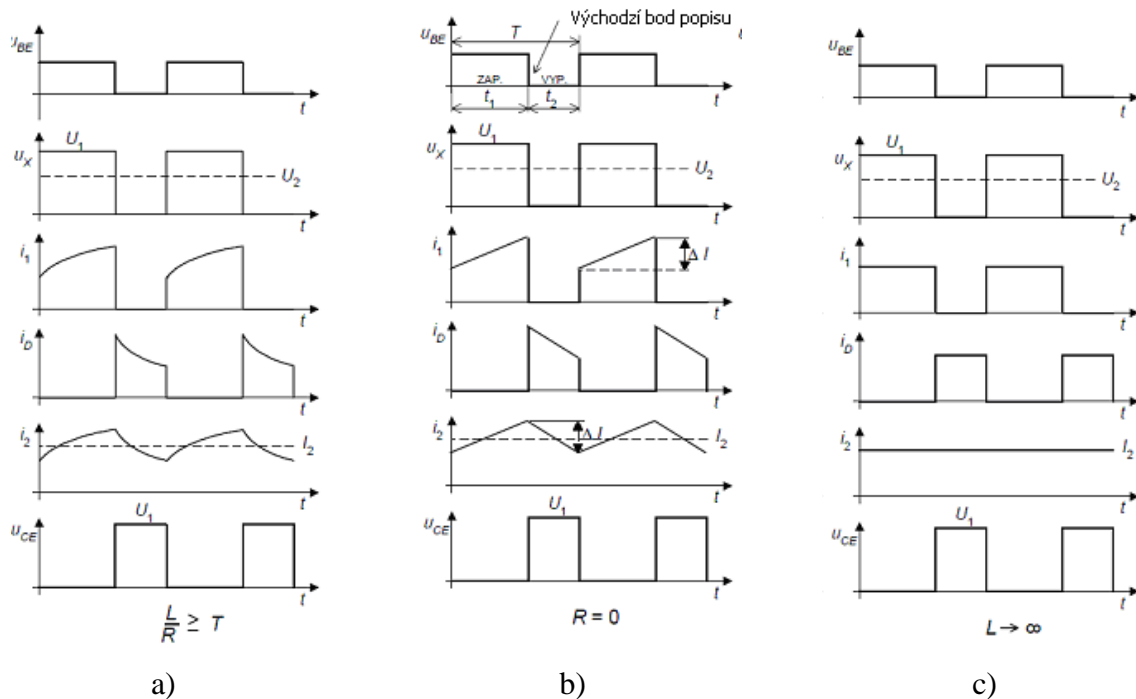


Obr. 12: Znižujúci menič pracujúci v 1. kvadrante, a) menič s aktívnou záťažou typu jednosmerný motor, b) menič s LC filtrom

Jedná sa o menič z Obr. 11 a) s horným spínačom. Pracuje v 1. kvadrante.

Na obr. Obr. 12 a) je nakreslený menič s aktívnou záťažou typu jednosmerný motor s cudzím budením – indukčnosť L je kotvová indukčnosť stroja. Na Obr. 12 b) je menič s LC filtrom pracujúcim do záťaže R_Z .

3.3.1 Popis činnosti v režime spojitých prúdov



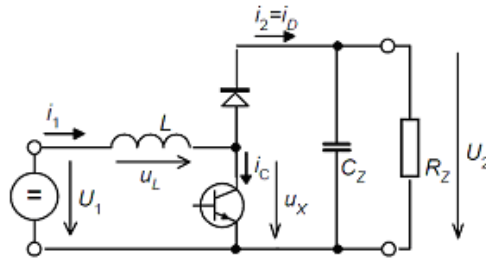
Obr. 13: Znižujúci menič pracujúci v 1. kvadrante a) skutočné (exponenciálne) priebehy prúdov, b) linearizované priebehy prúdov ($R=0$), c) pravouhlé priebehy prúdov ($L \rightarrow \infty$)

Režimom spojitých prúdov rozumieme, že prúd tlmivkou L nikdy počas svojho poklesu v časovom intervale t_2 neklesne na nulu a nepretrvávajú nulový. V medznom prípade sa môže dotknúť nuly v jedinom bode, v okamihu skončenia doby t_2 .

- 1) Ak vyjdeme zo stavu, kedy je tranzistor T je vypnutý, v ustálenom stave meniča (po niekoľkých spínacích periódach) už tečie tlmivkou L nenulový prúd $i_2(t)$. Uzatvára sa cez záťaž a diódu D. Tá je teda otvorená a napätie u_X je teraz preto nulové. Zdrojom prúdu v takto uzatvorenom obvode je indukčnosť L . Prebieha prechodový dej s časovou konštantou L/R . Ak bude spínacia perióda (a teda aj doba vypnutia tranzistoru dostatočne krátka, nestačí sa behom nej zmeniť vnútorné napätie U_1 motoru alebo napätie U_2 záťaže s LC filtrom a dá sa ju považovať za konštantnú. Prúd $i_2(t)$ teda exponenciálne klesá s danou časovou konštantou.
- 2) Pri zopnutí tranzistoru T bude napätie u_X rovné U_1 . Dióda D sa preto uzatvorí a prúd $i_2(t)$ je dodávaný zo zdroja U_1 . Opäť prebieha prechodový dej s časovou konštantou L/R a prúd vzrastá.
- 3) Vypnutím tranzistoru sa dostávame opäť do východiskového stavu 1). Ak by sa odpor R rovnal nule, zmenili by sa exponenciálne priebehy prúdu na šikmé priamky. V praxi je hodnota R veľmi malá. Ak sa jedná o záťaž s jednosmerným motorom, je to jeho odpor vinutia, v prípade LC filtru je to odpor vinutia tlmivky L . Exponenciálne priebehy sa teda budú šikmým priamkam veľmi blížiť. Uskutočnime teda zjednodušenie a budeme uvažovať linearizované priebehy podľa Obr. 13 b). Tieto priebehy by presne platili pre $R=0$. V prípade nekonečne veľkej indukčnosti L by prúd $i_2(t)$ musel byť z celá konštantný (Obr. 13 c).

3.4 Zvyšujúci neinvertujúci menič (step-up)

Jedná sa o menič z Obr. 11 b), variantu s dolným spínačom. Jeho ďalší názov je: boost converter. Tento menič pracujúci v 1. kvadrante je ekvivalentný meniču step-down pracujúcemu v 2. kvadrante, Obr. 11 a), s dolným spínačom, iba záťaž a zdroj sú vymenené. Schéma zapojenia je na Obr. 14



Obr. 14: Zvyšujúci menič pracujúci v 1. kvadrante

3.4.1 Popis činnosti v režime spojitého prúdu:

Opäť sa „spojitosť“ a „nespojitosť“ týka prúdu prechádzajúceho tlmivkou, u tohto meniča sa jedná o prúd vstupný $i_1(t)$.

- 1) Tranzistor T je vypnutý. V ustálenom stave (po niekoľkých spínacích periódach) už tečie tlmivkou L určitý prúd zo zdroja U_1 cez D do záťaže U_2 . Dióda D je teda otvorená. Na tlmivke L je preto napätie $u_L = U_1 - U_2$. Je záporné, pretože $U_2 > U_1$. Preto prúd tlmivkou lineárne klesá.
- 2) Pri zopnutí tranzistoru, sa objaví na tlmivke kladné konštantné napätia $u_L = U_1$ a prúd i_1 tečúci tlmivkou začne lineárne narastať. Uzatvára sa pritom zo zdroja U_1 cez L a tranzistor. Dióda D je polarizovaná v závernom smere a je uzatvorená.
- 3) Vypnutím tranzistoru sa dostávame do východzieho stavu 1).

3.5 Invertujúci menič (buck-boost)

Jedná sa o menič z obr. Obr. 11 c), variant s horným spínačom. Jeho ďalší názov je blokujúci menič. Menič pracuje v 3. kvadrante. Šípka napätia U_2 je vyznačená s ohľadom na skutočnú polaritu tohto výstupného napätia.

3.5.1 Popis činnosti v režime spojitého prúdu

„Spojitosť“ a „nespojitosť“ sa týka prúdu i_L tlmivkou. U tohto meniča teda nejde ani o vstupný ani o výstupný prúd.

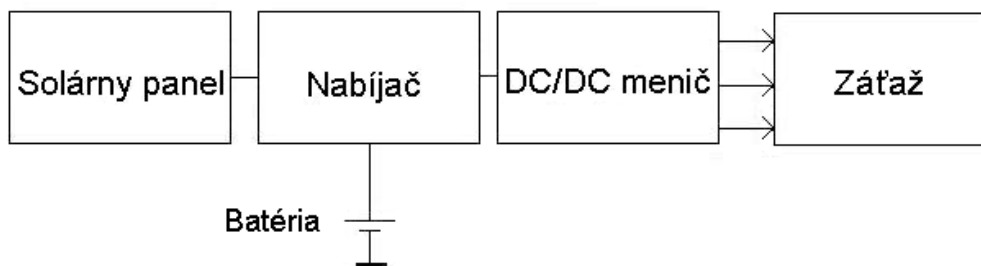
1) Tranzistor T je vypnutý. V ustálenom stave meniča (po niekoľkých spínacích periódach) už tečie tlmivkou L určitý prúd i_L . Uzatvára sa cez záťaž a diódu D. Tá je teda otvorená a napätie u_X sa tak rovná napätiu $-U_2$. Na cievke L je teda konštantné napätie opačnej polarite než má prechádzajúci prúd. Ten preto lineárne klesá.

2) Ak zapneme tranzistor T, sa napätie u_X rovná napätiu U_1 . Na cievke L je teda konštantné napätie U_1 . Prúd preto lineárne narastá. Uzatvára sa tentokrát zo zdroja U_1 cez tranzistor. Dióda D je polarizovaná v závernom smere a prúd $i_2(t)$ netečie.

3) Vypnutím tranzistoru sa dostávame do východiskového stavu 1).

4 Riešenie úlohy

Bloková schéma na Obr. 15 popisuje mnou navrhnutý autonómny zdroj elektrickej energie. V ďalšom texte špecifikujem návrh a funkciu jednotlivých blokov.



Obr. 15: Blokovaná schéma celého systému

4.1 Výber prvkov

4.1.1 Solárny panel

Po preskúmaní trhu v oblasti solárnych panelov sa mi javil cenovo a parametricky najvýhodnejší výkonový solárny panel SPP 12-20R od firmy Elektro Solar Technik. Podľa údajov na štítku výrobku a podľa [24], je panel vyrobený z monokryštalického kremíku. Jeho menovitý výkon je 20 W, menovité napätie je 17,4 V a menovitý prúd je 1,21 A, čo postačuje pre naše účely. Panel disponuje dvojstavovým regulátorom 14,4 V, ideálnym pre priame pripojenie a súčasné nabíjanie 12 V oloveného akumulátora. Púzdo panelu pozostáva z tvrdeného predného skla, trojvrstvého laminátu a duralového rámu. Panel je odolný proti striekajúcej vode, krúpom, snehu a mrazu. Údržba spočíva v mechanickom odstránení prípadných nečistôt (prach, sneh). Výrobca udáva taktiež informáciu o ideálnom umiestnení. Smerom 10° na juhozápad s vyklopením od vodorovnej osi 45 až 50° aktívnou plochou smerom k slnku. Zvod doporučuje vykonať zväzkovým dvojžilovým káblom s dvojistou silikónovou izoláciou a je treba dodržať i voľný priestor za zadnou stranou najmenej 50 mm. Účinnosť nami zvoleného modulu činí 16 %. Cena panelu s DPH je 5 364 Kč, čo je prijateľná cena vzhľadom na jeho parametre. Na výrobok je poskytovaná tiež 20 ročná garancia pre pokles výkonu maximálne o 10 %. Údaje o rozmeroch a váhe udáva Tabuľka 5.

4.1.2

4.1.3 Batéria

Pri výbere vhodnej batérie som bral do úvahy nasledovné parametre:

- rozsah pracovných teplôt -15 až + 50 °C (vonkajšie prostredie, okrem použitia v zimných mesiacoch)
- rýchlosť samovybíjania (%)
- životnosť pri 80 % vybíjaní
- účinnosť nabíjania
- kapacita (v Ah)
- požadovaná frekvencia dopĺňania elektrolytu
- chránenie pred prebitím
- cena

Najbežnejšími batériami používaných v solárnych systémoch, sú olovené batérie. Pre malé fotovoltaiické systémy sa niekedy používajú automobilové batérie, pretože sú lacné, avšak ich životnosť v takýchto aplikáciách býva krátka. Sú navrhnuté tak, aby poskytovali

veľké prúdy počas krátkeho času na naštartovanie motora. Nie sú vhodné na hlboké vybíjanie spojené s používaním fotovoltaiických systémov. Používajú sa preto špeciálne olovené batérie s antimónovými platňami, ktoré sú vhodné pre takéto systémy. Vyznačujú sa:

- nízkou rýchlosťou samovybíjania (2 % za mesiac pri 25 °C)
- vysokou životnosťou (1800 cyklov vybitia na 80 % pri 40 °C)
- nulovou spotrebou vody
- rozsahom pracovných teplôt od -15 do + 50 °C
- absolútnou bezúdržbovosťou

Takéto batérie majú životnosť 5-7 rokov pri zabezpečení predpísanej údržby a použití regulátora nabíjania. Dlhšia životnosť sa dá dosiahnuť ak sa obmedzí úroveň maximálneho vybíjania batérie. Jedným z takýchto akumulátorov je napríklad Energizer Deep cycle [26]. Jedná sa o 50 Ah akumulátor s menovitým napätím 12 V. Jeho cena je v súčasnej dobe 90 €.

Batéria od firmy APC, ktorú som použili v mojej aplikácii je navrhnutá pre záložný zdroj. Ide o bezúdržbový olovený zatavený akumulátor Genuine RBC48_2 so suspendovaným elektrolytom (netečie). Kapacita batérie 7 Ah a jej menovité napätie 12 V pre účely testovania systému postačujú.

4.1.4 Meniče

Najdôležitejším kritériom pri výbere meniča použitého vo fotovoltaiických systémoch je jeho účinnosť a výstupné napätie U_{OUT} .

Na výstupe môjho solárneho zdroja sa požadujú 3 úrovne napätia: 1,8 V, 3,3 V a 5 V. Môžem využiť samostatné meniče (napríklad MAX5035A, MAX5035B a MAX5035D taktiež trikrát TPS5410), jeden integrovaný obvod obsahujúci tri meniče (LT3507) a integrovaný obvod špeciálne navrhnutý pre zariadenie, ktoré bude na záťaži (TPS650240).

4.2 Návrh jednotlivých druhov meničov

Predbežný návrh meniča je po dohode so školiteľom upravený pre požiadavky Evaluation board i.Evolution (PHYTEC) s mikroprocesorom i.MX31 (Freescale) zapojený na výstupe solárneho zdroja. Zariadenie spotrebúva prúd 1 A a napätie 12 V.

Nasledujúca kapitola pojednáva o návrhu jednotlivých druhov realizácie meničov. V kapitole sa nachádza i popis, realizácia, záznam z merania meniča MAX5035A, ktorý bol použitý v našej aplikácii.

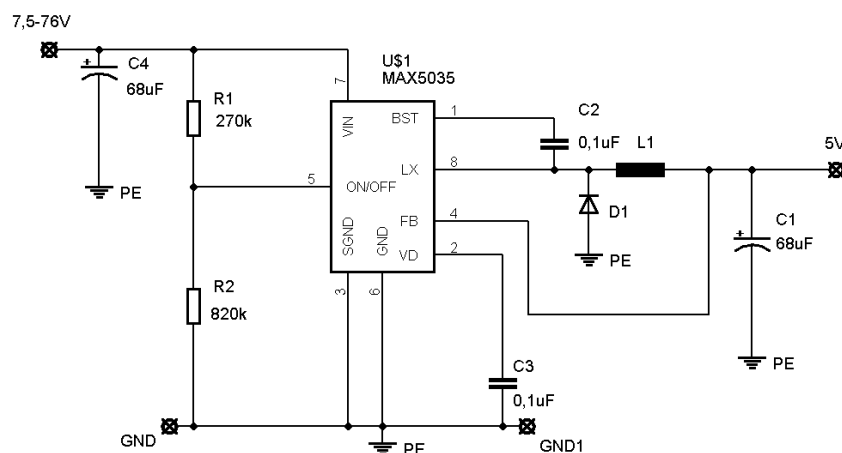
4.2.1 Riešenie pomocou troch nezávislých meničov

Mnou zvolený menič MAX5035 od firmy MAXIM sa vyznačuje jednoduchosťou použitia a vysokou efektívnosťou (až 94 %). Ide o step down DC-DC konvertor, pracuje na vstupe s napätím od 7,5 do 76 V a v kludovom stave spotrebuje iba 270 μ A. Tento pulzne-širokovo modulovaný (PWM) konvertor pracuje so spínacou frekvenciou 125 kHz pri najvyššom zaťažení a automaticky mení mód pulzného posunu, aby poskytol nízky kludový prúd a vysokú efektívnosť pri malej záťaži. Výstupný prúd 1 A môže byť limitovaný maximálnym stratovým kapacitným výkonom púzdra. MAX5035 ponúka fixné výstupné napätia 3,3 V (MAX5035A), 5 V (MAX5035B), 12 V (MAX5035C) a prispôsobiteľné napätie v rozsahu 1,25 V-13,5 V (MAX5035D). Meniče sú dostupné v malých plastových

8 pinových SO a DIP púzdrach a sú dimenzované na teplotný rozsah -40° do $+125^{\circ}\text{C}$. Maximálne prípustné napätie, ktoré môžeme priviesť na vstup, je od $-0,3\text{ V}$ do $+80\text{ V}$. Teplotná ochrana sa spína pri teplote 160°C . Prúd pri ktorom sa obvod vypne (Shutdown current), sa pohybuje pre všetky meniče v rozmedzí od 10 do $40\ \mu\text{A}$. Použité zapojenie tohoto meniča je vyobrazené na Obr. 16. U typov A a B sa spätná väzba zapojuje priamo na výstup U_{OUT} , typ D, ktorý využijeme pre premenu napätia na $1,8\text{ V}$ bude mať zapojenú aj rezistorovú spätnú väzbu.

4.2.2 Menič pre výstupné napätie $3,3\text{ V}$ – MAX5035A

Testovaný menič MAX5035A, poskytuje efektívnosť 86% pri $U_{\text{IN}} = 12\text{ V}$ a $I_{\text{LOAD}} = 0,5\text{ A}$. Maximálny rozsah výstupných napätí je od $3,185\text{ V}$ do $3,415\text{ V}$ a rozsah kludových prúdov pri $U_{\text{FB}} = 3,3\text{ V}$, $270 - 440\ \mu\text{A}$. Má prednastavené už spomínané výstupné napätie $U_{\text{OUT}} = 3,3\text{ V}$, spätná väzba je pripojená priamo na U_{OUT} .



Obr. 16: Schéma zapojenia obvodu MAX5035

Vzťah popísaný nižšie udáva výpočet pre minimálnu hodnotu R_1

$$U_{UVLO(TH)} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \cdot 1,85\text{V} \Rightarrow R_1 \cong 680\text{k}\Omega. \quad (8)$$

Odporúčaná hodnota $U_{UVLO(TH)}$ je $6,5\text{ V}$ pre výstupné napätie $3,3\text{ V}$. Hodnota R_2 by mala byť menšia ako $1\text{ M}\Omega$. Výber cievky je daný rozdielom napätí medzi U_{IN} a U_{OUT} , požadovaným výstupným prúdom a operačnou frekvenciou obvodu. Minimálna hodnota indukčnosti použitej cievky je daná vzťahom

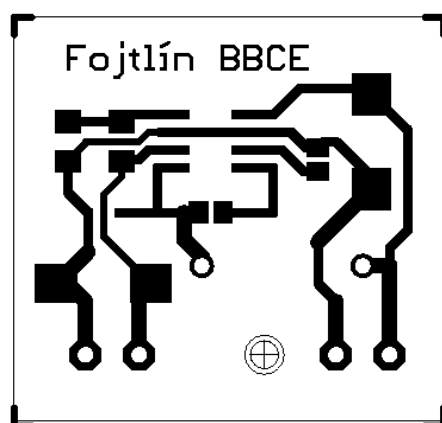
$$L = \frac{(U_{\text{IN}} - U_{\text{OUT}}) \frac{U_{\text{OUT}}}{U_{\text{IN}}}}{0,3 \cdot I_{\text{OUTMAX}} \cdot f_{\text{SW}}} = \frac{(12 - 3,3) \frac{3,3}{12}}{0,3 \cdot 1,0 \cdot 125000} \cong 63,8\ \mu\text{H}, \quad (9)$$

I_{OUTMAX} je maximálny vyžadovaný výstupný prúd, $f_{\text{SW}} = 125\text{ kHz}$ je operačná frekvencia. Výsledná hodnota je minimálna odporúčaná. Volím teda cievku s hodnotou $100\ \mu\text{H}$, podľa katalógového listu.

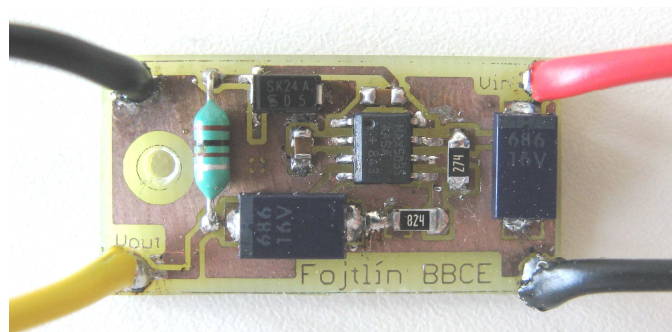
V katalogovom liste sú zhrnuté odporúčané hodnoty súčiastok pre vstupné napätie U_{IN} od 9 do 14 V. Tento rozsah vstupných napätí je dostačujúci za predpokladu napájania meniča z olovenej batérie, pretože rozsah výstupných napätí použitej batérie do tohto intervalu spadá.

Tabuľka 9: Odporúčané a skutočné hodnoty súčiastok pre vstupné napätie U_{IN} od 9 do 14 V

Označenie súčiastky	Hodnota odporúčanej súčiastky	Typ a hodnota použitej súčiastky
D_1	B220	SK24A
C_{IN}	220 μ F	220 μ F/16V
C_{OUT}	68 μ F	68 μ F/16 V
C_{BST}	0.1 μ F, 0805	0.1 μ F, 0805
R_1	1M Ω \pm 1 %, 0805	1M Ω \pm 1 %, 0805
R_2	274 k Ω \pm 1 %, 0805	270 k Ω \pm 1 %, 0805
L_1	100 μ H	100 μ H (TLEC24-101k)

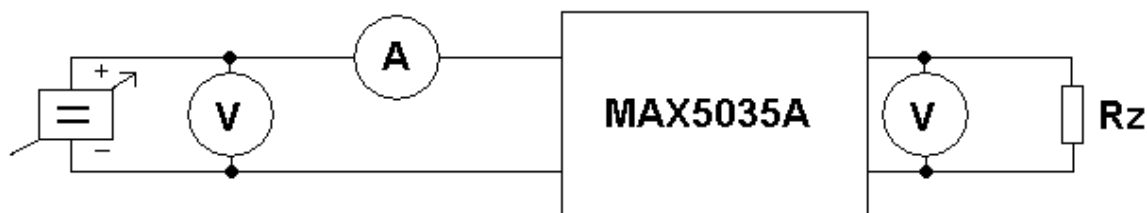


Obr. 17: Doska plošných spojov navrhnutá v EAGLE 5.4.0



Obr.18: Pohľad na osadenú dosku plošných spojov

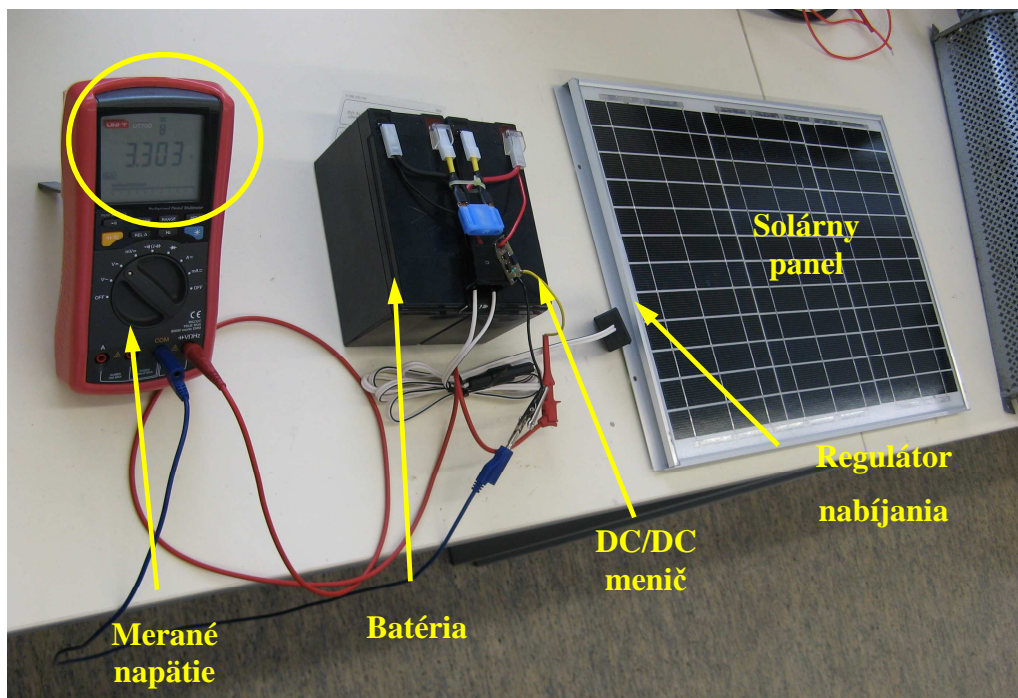
Činnosť meniča bola overená v zapojení podľa Obr. 19. Jedná sa o meranie efektivity obvodu v závislosti na záťaži. Na vstup bolo pripojené napätie s hodnotou 12 V a bol meraný vstupný prúd obvodu. Na výstup boli pripojované postupne rôzne hodnoty záťažového odporu a bolo merané výstupné napätie meniča.



Obr. 19: Bloková schéma pre overenie činnosti meniča

Výsledky z merania uvádza Tabuľka 10. Pri hodnote prúdu $I_{OUT} = 500 \text{ mA}$ sme začali pozorovať zníženie výstupného napätia na $2,75 \text{ V}$, ktoré bolo sprevádzané pomerne veľkým zahriatím súčiastky. Pri výstupnom prúde 700 mA sa už súčiastka zahrievala natoľko, že sme museli ukončiť meranie v záujme jej ochrany. Efektivita bola počítaná pomocou vzťahu

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} = 100 \cdot \frac{U_{OUT}^2}{U_{IN} \cdot I_{IN} \cdot R_Z} (\%). \quad (10)$$



Obr. 20: Zapojenie meracieho pracoviska

Tabuľka 10: Výsledky meraní pre MAX5035A

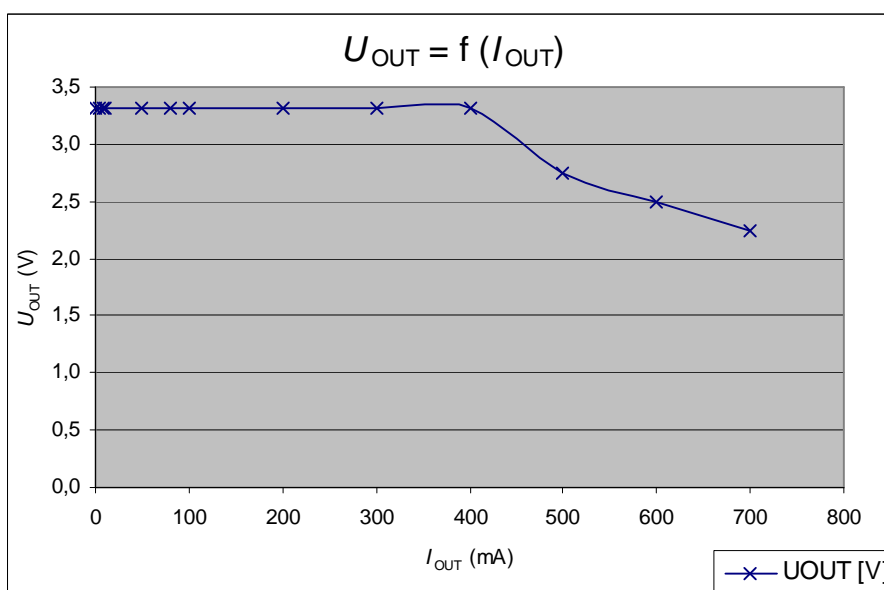
n	U_{IN} [V]	I_{IN} [mA]	U_{OUT} [V]	R_Z [Ω]	I_{OUT} [mA]	η [%]
1	12	1,3	3,32	3300,00	1,0	21
2	12	5,1	3,32	660,00	5,0	27
3	12	8,2	3,32	412,50	8,0	27
4	12	10,0	3,32	330,00	10,0	28
5	12	49,0	3,32	66,00	50,3	28
6	12	69,0	3,32	41,30	80,4	32
7	12	98,3	3,32	33,00	100,6	28
8	12	218,8	3,32	16,50	201,2	25
9	12	308,0	3,32	11,00	301,8	27
10	12	340,0	3,32	8,25	402,4	32
11	12	422,0	2,75	6,60	417,0	27
12	12	431,0	2,50	5,50	454,5	29
13	12	473,0	2,24	4,71	476,6	27

4.2.3 Menič pre výstupné napätie 5 V – MAX5035B

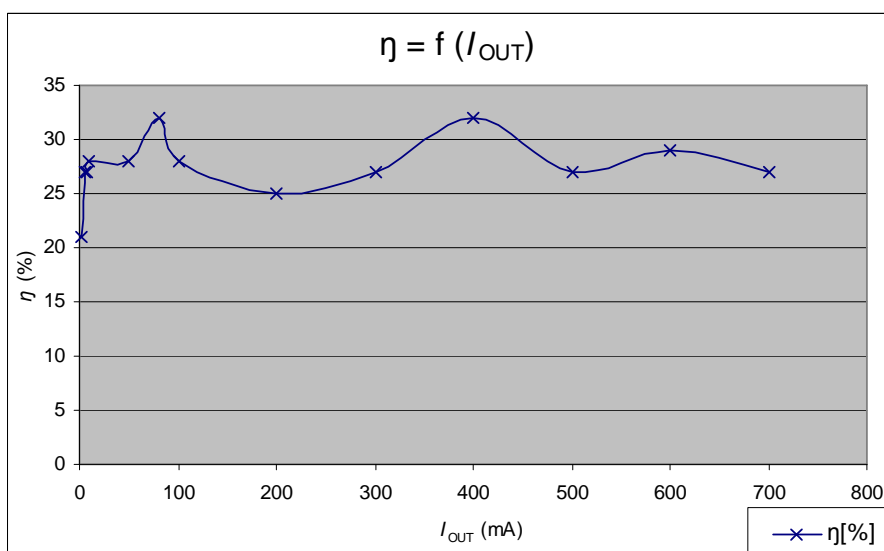
Menič MAX5035B, poskytuje efektívnosť 90 % pri $U_{IN} = 12 \text{ V}$ a $I_{LOAD} = 0,5 \text{ A}$. Maximálny rozsah výstupných napätí je od 4,85 do 5,15 V a rozsah kľudových prúdov pri $U_{FB} = 5 \text{ V}$, 270 - 440 μA . Má prednastavené výstupné napätie $U_{OUT} = 5 \text{ V}$, spätná väzba je opäť pripojená priamo na U_{OUT} . Schéma zapojenia je rovnaká, ako u meniča MAX5035A, viz. Obr. 16. I hodnota cievky je počítaná rovnakým vzťahom ako u predošlého meniča. Výsledná hodnota je v tomto prípade 77,8 μH .

Doporučené hodnoty súčiastok pre vstupné napätia rozsah U_{IN} od 9 do 14 V súhlasia s hodnotami u MAX5035A.

Doska plošných spojov je tiež rovnaká ako pre menič MAX5035A (Obr. 17).



Obr. 21: Graf závislosti výstupného napätia od výstupného prúdu



Obr. 22: Graf závislosti efektivity obvodu od výstupného prúdu

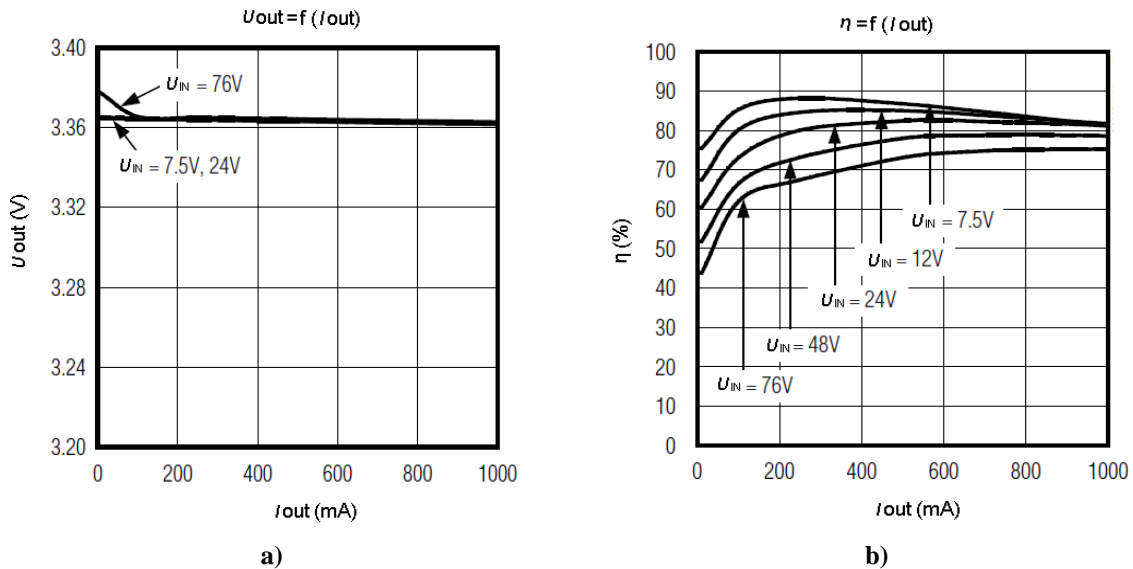
Pretože som tento menič nerealizoval, uvádzam iba grafy prevzaté z katalógového listu.

4.2.4 Menič pre výstupné napätie 1,8 V – MAX5035D

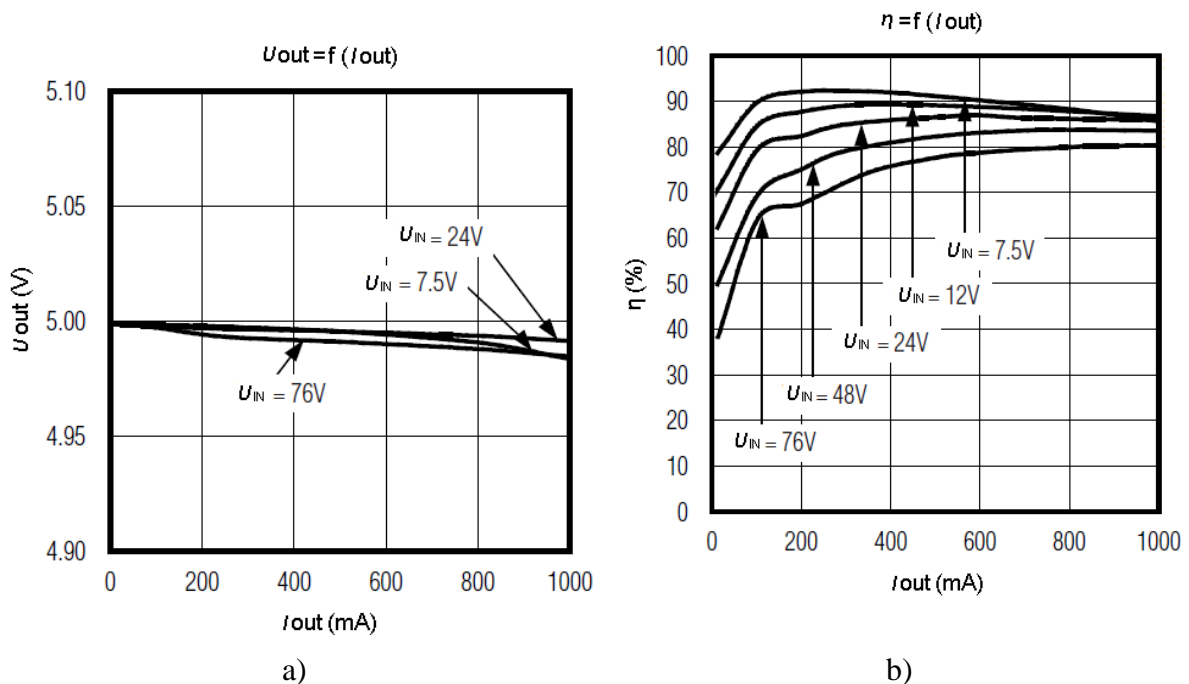
Menič MAX5035D poskytuje efektívnosť 90 % pri $U_{IN}=12\text{ V}$, $U_{OUT}=5\text{ V}$ a $I_{LOAD}=0,5\text{ A}$. Ponúka nastaviteľné výstupné napätie. Výstupné napätie sa nastavuje pomocou odporového deliča, zapojeného medzi výstupom U_{OUT} a zemou. Schéma zapojenia tohto meniča je na Obr. 25.

Výrobca odporúča nastaviť hodnotu rezistoru R_4 menšiu ako 15 k Ω . Z rezistorového radu som teda zvolil 12 k Ω . Rezistor R_3 sa vypočíta podľa vzťahu

$$R_3 = \frac{(U_{OUT} - 1,22)}{1,22} \cdot R_4 = \frac{(1,8 - 1,22)}{1,22} \cdot 12000 = 5705\Omega \cong 5,7\text{ k}\Omega = 5,6\text{ k}\Omega + 100\Omega. \quad (11)$$



Obr. 23: Charakteristiky MAX5035A podľa katalogového listu [24]

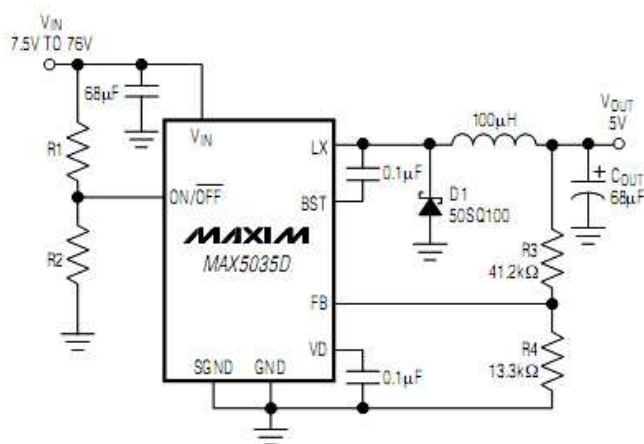


Obr. 24: Charakteristiky MAX5035B podľa katalogového listu [24]

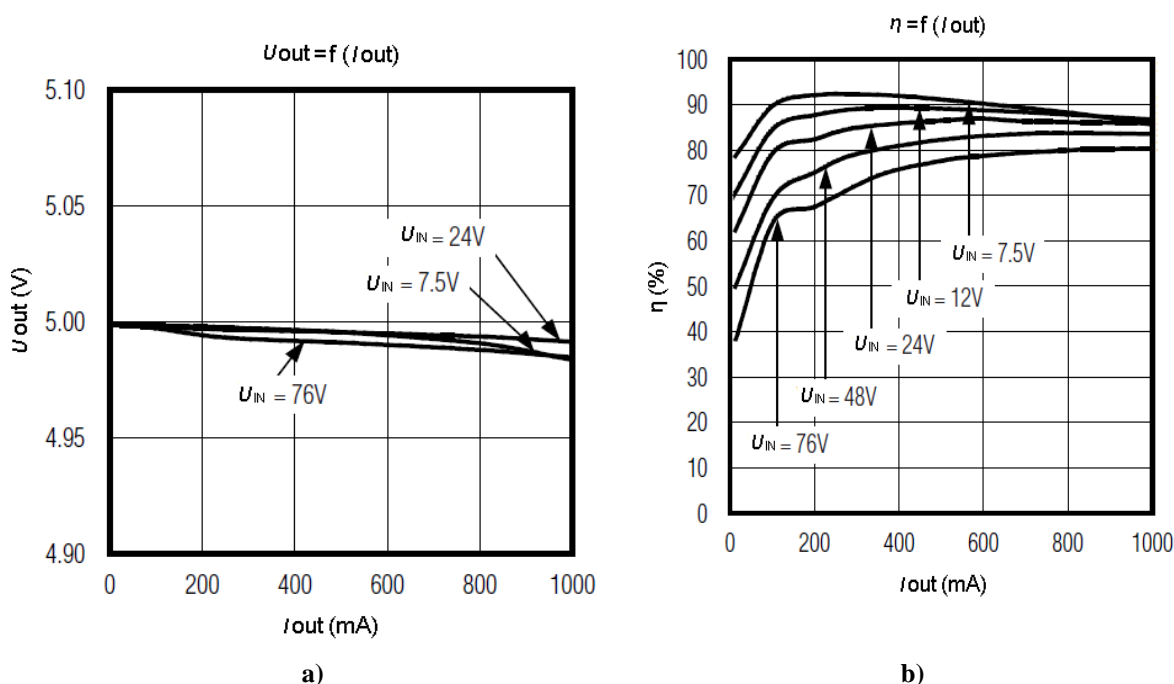
Minimálna hodnota indukčnosti cievky $40,8 \mu\text{H}$ je opäť podložená vzťahom (9).

Voľbu vstupného a výstupného kapacitoru by som uskutočnil podľa odporúčaných hodnôt v katalógovom liste: $C_1 = C_2 = 68 \mu\text{F}$.

Menič MAX5035A nesplnil moje očakávania. Ako je vidieť z Obr. 22, účinnosť realizovaného meniča je príliš nízka proti teoretickej hodnote uvedenej v katalógovom liste. Pre porovnanie priebehov prikladám i priebehy udávané katalógovým listom na Obr. 23. S použitím meniča MAX5035 by som ale váhal, s ohľadom na výsledky merania efektivity podtypu MAX5035A. Bola tu nameraná efektivita približne o 60 % nižšia než udáva katalógový list. Rozsah hodnôt výstupného prúdu bol rovnako nižší oproti očakávaniu.

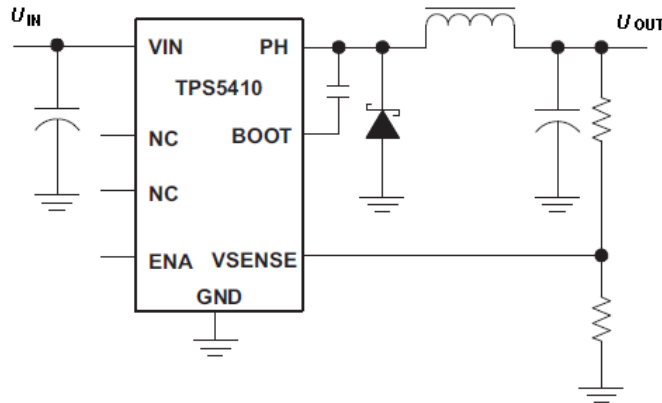


Obr. 25: Zapojenie obvodu MAX5035D [24]



Obr. 26: Charakteristiky MAX5035D pre $U_{OUT} = 5 \text{ V}$ podľa katalógového listu [24]

4.2.5 Riešenie pomocou meniča TPS5410



Obr. 27: Schéma zapojenia pre menič TPS5410

Ďalší nami zvolený menič je od výrobcu Texas Instruments a má označenie TPS5410 [27]. Poskytuje široký rozsah vstupných napätí 5,5 V – 36 V, trvalý výstupný prúd až 1 A (1,2 A v špičke), vysokú efektívnosť až 95 %, samo ochranu proti prehriatiu pri 162 °C, vysokému prúdu a napätiu. Výstupné napätie je nastaviteľné v rozsahu od 1,23 V do 31 V, je teda použiteľné pre realizáciu všetkých troch požadovaných úrovní napätia. Obvod môže pracovať v rozsahu teplôt od -40 °C do +125 °C. Je dostupný v malých plastových 8-pinových SOIC puzdrách. Zvodový prúd môže dosiahnuť 10 μ A.

Minimálna hodnota indukčnosti cievky sa určí pomocou vzťahu

$$L_{\text{MIN}} = \frac{U_{\text{OUT}} \cdot (U_{\text{IN}(\text{MAX})} - U_{\text{OUT}})}{U_{\text{IN}(\text{MAX})} \cdot K_{\text{IND}} \cdot I_{\text{OUT}} \cdot f_{\text{SW}} \cdot 0,8} \text{ (H)}, \quad (12)$$

koeficient K_{IND} treba voliť od 0,2 do 0,3, $f_{\text{SW}} = 500$ kHz. Boot kapacitor je výrobcom daný na hodnotu 0,01 μ F. Pre tento návrh je vybraná dióda B340A so záverným napätím 40 V, priepustným prúdom 3 A a priepustné napätie 0,5 V. Minimálna hodnota výstupného kondenzátoru je udávaná katalógovým listom 7,6 μ F. Vstupný kondenzátor má mať minimálnu hodnotu 4,7 μ F.

Výstupné napätie je dané rezistorovým deličom (R_1 a R_2). Odporúčanú hodnotu R_1 je treba voliť 10 k Ω . R_2 potom určíme

$$R_2 = \frac{R_1 \cdot 1,221}{U_{\text{OUT}} - 1,221} \text{ (}\Omega\text{)}. \quad (13)$$

4.2.6 Realizácia meniča pre výstupné napätie 1,8V

Pre $U_{\text{OUT}} = 1,8$ V a $U_{\text{IN}} = 12$ V vyjde podľa vzťahu (12) minimálna hodnota indukčnosti $L_{\text{MIN}} = 19,1$ μ H. Rezistor R_2 má v tomto prípade podľa uvedeného vzťahu hodnotu približne 21 k Ω .

4.2.7 Realizácia meniča pre výstupné napätie 3,3V

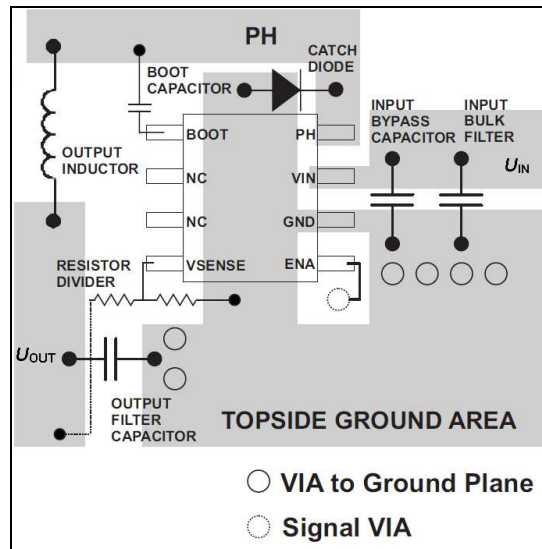
Pre $U_{\text{OUT}} = 3,3$ V a $U_{\text{IN}} = 12$ V vyjde podľa vzťahu pre výpočet minimálna hodnota $L_{\text{MIN}} = 29,9$ μ H. Rezistor R_2 má v tomto prípade podľa uvedeného vzťahu hodnotu približne 59 k Ω .

4.2.8 Realizácia meniča pre výstupné napätie 5V

Pre $U_{OUT} = 5\text{ V}$ a $U_{IN} = 12\text{ V}$ vyjde podľa vzťahu pre výpočet minimálna hodnota $L_{MIN} = 36,5\ \mu\text{H}$. Rezistor R_2 má v tomto prípade podľa uvedeného vzťahu hodnotu približne $3,2\ \text{k}\Omega$. Môžeme ho zložiť sériovou kombináciou hodnôt $1\ \text{k}\Omega$ a $2,2\ \text{k}\Omega$.

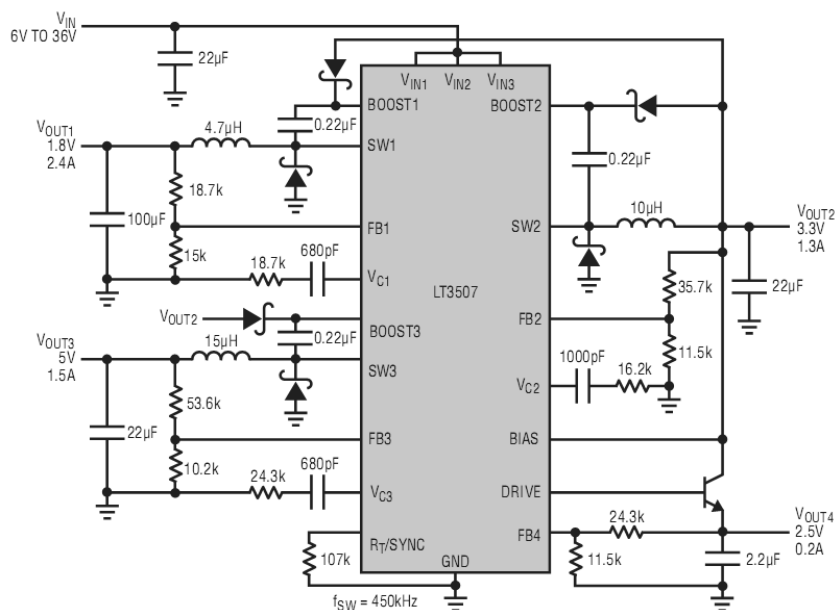
Doporučený návrh dosky plošných spojov podľa katalógového listu udáva Obr. 28

Bohužiaľ, katalógový list tohto obvodu neuvádza priebehy, ktoré by boli porovnateľné s tými v predchádzajúcom texte, nemôžem porovnať tento menič s ostatnými z hľadiska efektivity obvodu. Ani tento integrovaný obvod nebol testovaný z dôvodu predĺženia doručenia obvodu.



Obr. 28: Doporučené zapojenie dosky plošných spojov pre TPS5410

4.2.9 Riešenie pomocou jedného integrovaného obvodu



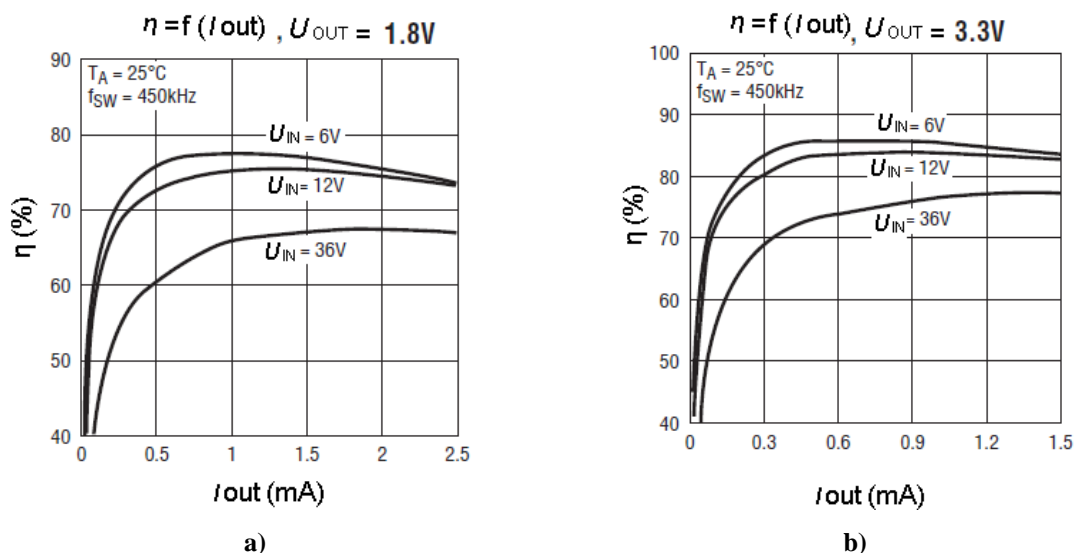
Obr. 29: Zapojenie obvodu LT3507 [28]

Na trhu existujú tiež viac integrované riešenia. Konkrétne v našom prípade môžeme použiť integrovaný obvod LT3507 [28], ktorý zahrňuje tri spínané meniče a jeden lineárny

regulátor. Priamo v katalógovom liste tohto obvodu je obvod, ktorý má na výstupoch požadované výstupné napätia - Obr. 16.

Vlastnosti meniča:

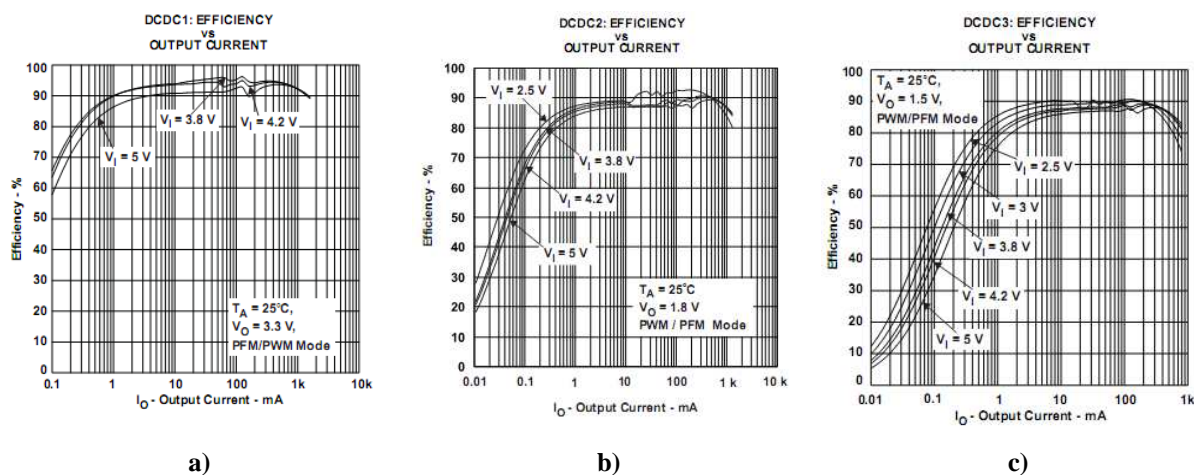
- Vstupné napätie: 4 V - 36 V
- Výstupné napätie: 0,8 V - 32,4 V
- Maximálny výstupný prúd: 1 x 2,4 A, 2 x 1,5 A
- Napájací prúd: 2 mA



Obr. 30: Charakteristiky LT3507 podľa katalógového listu [28]

Použitie tohto integrovaného obvodu je pre nás výhodnejšie z hľadiska počtu použitých puzdiel. Počet okolitých súčiastok je prakticky zhodný s predošlým riešením pomocou troch nezávislých meničov. Jeho efektivita nie je tak vysoká ako je udávané u meniča MAX5035, avšak meranie reálneho obvodu môže dopadnúť mnohým lepšie.

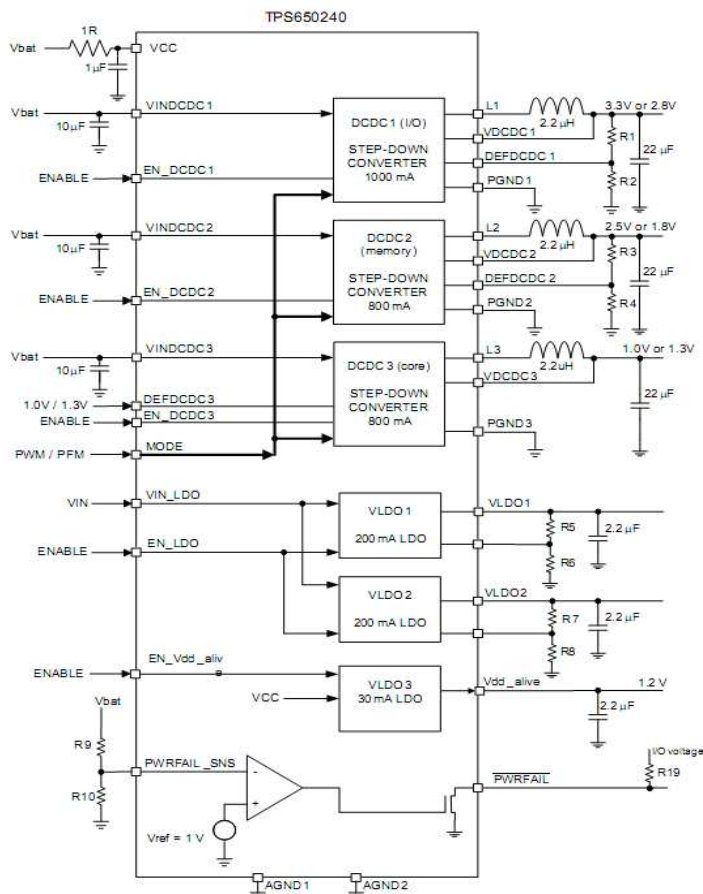
4.2.10 Špecializovaný obvod TPS650240



Obr. 31: Charakteristiky spínaných meničov v TPS650240 podľa katalógového listu [29]

Tento špeciálne navrhnutý obvod pre potreby mikroprocesorov založených na architektúre ARM. Obsahuje tri nezávislé step-down konvertory s možnosťami výstupných

parametrov 3,3 V/1,6 A, 1,8 V/1 A a 1 V/0,8 A. Ďalej obsahuje tri nezávislé lineárne regulátory (LDO). Dva môžu dodávať prúd 200 mA a jeden 30 mA. Tieto LDO budú použité pre výstupné napätie 5V. Má predpoklady pre použitie v režimu spánku procesoru aj pri jeho plnom výkone. Jeho spínacia frekvencia je 2,25 MHz a kľudový prúd má 85 μ A. Rovnako ako predchádzajúce meniče obsahuje tepelnú ochranu. Efektívnosť jednotlivých spínaných meničov udáva Obr. 31. Vstupné napätie môžu byť v intervale 2,5 – 6 V.



Obr. 32: Schéma zapojenia meniča TPS650240

Jedinou nevýhodou tohto obvodu je rozsah jeho vstupných napätí 2,5 – 6 V. Pri napájaní z 12 V akumulátora je tu nutnosť použiť nejaký iný menič z 12 V na asi 5 - 5,5 V s dostatočným prúdovým rozsahom.

5 ZÁVER

Táto práca pojednáva o autonómnom zdroji elektrickej energie. V úvodnej kapitole boli popísané fotovoltaické články, ich princípy a materiály, z ktorých sa vyrábajú. Následne bol popísaný fyzikálny princíp polovodičového fotovoltaického článku. Ďalej boli uvedené základné typy fotovoltaických článkov, ich stručný generačný vývoj a príklady najčastejšie používaných kremíkových článkov.

Následne bol vytvorený prehľad výrobcov fotovoltaických modulov a prehľad ich produktov. Tieto produkty je možné s pomocou vytvoreného prehľadu porovnávať podľa najrôznejších parametrov. Z uvedených panelov bol vybraný pre použitie v zariadení panel typu SPP 12-20R od firmy Elektro Solar Technik. Jeho parametre sú zhrnuté v kapitole 4.1.1.

Výber batérie je popísaný v kapitole 4.1.3. Pre testovacie účely nebol kupovaný požadovaný typ batérie, ale bol použitý akumulátor určený pre záložný zdroj.

Nakoniec som sa zameril na prieskum DC/DC meničov. Spracoval som prehľad ich základných typov. Ako najlepší pre účely tejto práce sa zdá byť znižujúci menič. Spracoval som príklad riešenia pomocou troch nezávislých meničov, pomocou jedného integrovaného obvodu a so špeciálnym meničom určeným priamo pre napájanie mikroprocesorov ARM. Po porovnaní týchto možností môžeme konštatovať, že prvé dve sú takmer totožné. Jediný meraný obvod bol MAX 5035. Tento nespĺnil moje očakávania. Meranie aj jeho výsledky sú v kapitole 4.2.1. Ostatné typy meničov som nemal fyzicky k dispozícii, takže porovnanie s MAX5035 môžem urobiť iba na základe informácií uvedených v katalógových listoch.

Možnosti použitia troch nezávislých meničov a jedného integrovaného obvodu (LT3507) je z hľadiska zložitosti rovnaké, iba v druhom prípade je výhoda v menšom počte puzdier na doske plošných spojov.

Špecializovaný obvod TPS650240 je priamo určený pre použitie s mikroprocesorom typu ARM, avšak jeho vstupné napätie má pre použitie s oloveným akumulátorom príliš malý rozsah. Je teda nutné v tomto prípade použiť nejaký prídavný konvertor z 12 V na nižšie napätie. Tím sa trochu zvedá zložitosť obvodu, ale TPS650240 má iné výhody vyplývajúce z jeho vnútornej konštrukcie.

Ako vylepšenie riešenia by som navrhol použitie malej veternej elektrárne. Bolo by potom možné dobíjať batériu i v noci a pri zamračenej oblohe. Ďalej by som navrhol pre zabezpečenie vysokej spoľahlivosti ochranu meniča, na vstupnom aj výstupnom vodiči, pred napätovými špičkami spôsobenými blízkym úderom blesku alebo preťažením.

6 Zoznam citovanej literatúry

- [1] MURTINGER K., BERANOVSKÝ J., TOMEŠ M., Fotovoltaika, Elektřina ze slunce, ERA Brno, 2007.
- [2] HENZE, A., WERNER, H. Elektrický proud ze slunce : Fotovoltaika v praxi. Ostrava, HEL, 2000.
- [3] WIKIPEDIA. Fotovoltaický článok [online]. [cit. 2008-12-1]. Dostupný z WWW: [Http://sk.wikipedia.org/wiki/Fotovoltaick%C3%BD_%C4%8D1%C3%A1nok](http://sk.wikipedia.org/wiki/Fotovoltaick%C3%BD_%C4%8D1%C3%A1nok)
- [4] ISOLAR. Stručný generačný vývoj [online]. [cit. 2008-12-14]. Dostupný z WWW: < http://www.isolar.cz/?p=p_3&sName=technologie >
- [5] Článok na stránke: http://www.fzu.cz/texty/brana/fotovoltaika/slunecni_energie.php
- [6] Článok na stránke: <http://www.lifestyler.sk/index.cfm?module=ActiveWeb&page=WebPage&DocumentID=2218>
- [7] Obrázok na stránke: http://www.czrea.org/files/images/OZE/FV_obr1_3.jpg
- [8] Článok na stránke: <http://www.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=4251>
- [9] Obrázok na stránke: <http://www1.eere.energy.gov/solar/silicon.html#amorphous>
- [10] Článok na stránke: http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell#Thin_films
- [11] Článok na stránke: <http://www.ecn.nl/docs/libary/report/1999/c99046.pdf>
- [12] Článok na stránke: <http://www.konarka.com/about/>
- [13] Článok na stránke: <http://www.solaronix.com>
- [14] Článok na stránke: <http://www.dyesol.com/index.php?page=Technology>
- [15] Článok na stránke: <http://www.evidenttech.com/resource-center/document-center.php>
- [16] Obrázok na stránke: http://www.czrea.org/files/images/OZE/FV_obr1_2.jpg
- [17] Obrázok na stránke: <http://fel.utc.sk/~hockicko/semestralky/prace/p41/PN%20priechod.htm>
- [18] Obrázok na stránke: <http://www.fotovoltaika.cz/sch-cze.gif>
- [19] Tabuľka na stránke: <http://www.solartec.cz/cs/vyrobky-a-sluzby/technicke-udaje/minipanely.html>
- [20] NOVOTNÝ, V., VOREL, P., PATOČKA, M. Napájení elektronických zařízení. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2008
- [21] Článok na stránke: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Fullereny>
- [22] Článok na stránke: http://www.innovationhouse.com/products/solar_siemens_st20.html
- [23] Článok na stránke: <http://www.gme.cz/cz/index.php?page=product&detail=332-078>
- [24] Katalógový list MAX 5035 na stránke: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/maxim/MAX5035.pdf>
- [25] Článok na stránke: http://www.apc.com/resource/include/techspec_index.cfm?base_sku=RBC48&fnl=3944,2&fnl_basket=3944,3c

- [26] Článok na stránke: <http://www.akumulator.sk/akumulatory-pre-zalozne-pouzitie-aelektropohon/antimonove-akumulatory/954006000-50ah-40ah.html#specification>
- [27] Katalógový list TPS5410: <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/tps5410.pdf>
- [28] Katalógový list LT3507:
<http://www.linear.com/pc/downloadDocument.do?navId=H0,C1,C1003,C1042,C1032,C1064,P80681,D26277>
- [29] Katalógový list TPS650240: <http://www.ti.com/lit/gpn/tps650240>

Zoznam použitých symbolov a skratiek

Si.....	Kremík	$i_2(t)$	Výstupný prúd
Cu	Meď	i_L	Prúd tečúci tlmivkou
P.....	Olovo	i_C	Prúd tečúci do kolektoru
Al.....	Hliník	t_1	Časový interval 1
Sb.....	Antimón	t_2	Časový interval 2
In.....	Indium	LDO	lineárny regulátor
CIS.....	CuInSe ₂ - Diselenid medi a india		
CO ₂	Oxid uhličitý		
GaAs.....	Arzenit galitý		
CdTe	Telurid kadmia		
TiO ₂	Oxid titaničitý		
InP	Indium-Fosforid		
GaSb	Galium-Antimon		
PV	Fotovoltaický		
ČR.....	Česká republika		
EUR.....	Euro mena		
USD.....	Americký dolár		
js	Jednosmerný		
Ah	Ampérhodiny		
C	Kondenzátor		
T	Tranzistor		
R	Rezistor		
R_Z	Odpor záťaže		
R_i	Vnútorý odpor		
L.....	Tlmivka		
U_x	Stredná hodnota napätia		
U_1	Vstupné jednosmerné napätie		
U_2	Výstupné jednosmerné napätie		
U_{OUT3}	Výstupné jednosmerné napätie		
U_i	Vnútoré napätie		
U_{CE}	Napätie kolektor-emitor		
+I.....	Prúd v strednej hodnote do záťaže		
-I	Prúd v strednej hodnote zo záťaže		
$i_1(t)$	Vstupný prúd		