

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Nabíjení a vybíjení superkapacitorů

Vedoucí práce: Ing. Petr Polcar

2012

Autor: Jan Jeníček

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan JENÍČEK**
Osobní číslo: **E08B0338P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**
Název tématu: **Nabíjení a vybíjení superkapacitorů**
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Zásady pro vypracování:

1. Popište fyzikální princip, možnosti využití, výhody a nevýhody superkapacitorů.
2. Navrhněte a sestavte modul pro nabíjení a vybíjení těchto prvků.
3. Na základě získaných zkušeností zhodnoťte technologii superkapacitorů z hlediska nabíjení a vybíjení.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. www.maxwell.com
2. <http://www.ieee.org>
3. Další bude předána při konzultaci

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Polcar**
Katedra teoretické elektrotechniky


Konzultant bakalářské práce: **Ing. Petr Polcar**
Katedra teoretické elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **17. října 2011**

Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2012**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Předkládaná bakalářská práce se zabývá otázkou nabíjení a vybíjení superkapacitorů. V první části práce je uvedena historie superkapacitorů, následně fyzikální principy, vlastnosti, přehled možného využití, zásady při měření, jejich výhody a nevýhody. V druhé části je do detailu rozebrán nabíjecí modul s integrovaným obvodem BQ24640, který byl konstruován a dále využit pro měření předložených superkapacitorů.

Klíčová slova

Superkapacitor, pseudokapacitor, elektrická dvojvrstva, nabíjení a vybíjení superkapacitorů, BQ24640

počet stran	počet příloh	počet obrázků	počet tabulek
40	2	14	8

Abstract

The present thesis deals with the question of charging and discharging supercapacitors. The first part is given supercapacitor's history, followed by physical principles, characteristics, an overview of potential applications, the measurement principles, their advantages and disadvantages. In the second part is broken down in detail the charging module with integrated circuit BQ24640, which was designed and used for measurements presented supercapacitors.

Key words

Supercapacitor, pseudocapacitor, Electrochemic double layer capacitor, charging and discharging of supercapacitor, BQ24640.

number of pages	number of appendixes	number of pictures	number of tables
40	2	14	8

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a zdrojů uvedených v seznamu, který je součástí bakalářské práce. Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 23.5.2012

.....

Jan Jeníček

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Polcarovi za odborné vedení, cenné rady, připomínky a vstřícné jednání při tvorbě mé bakalářské práce.

Obsah

Úvod	- 9 -
Seznam použitých zkratk	- 9 -
Superkapacitory	- 10 -
Historie	- 10 -
Princip	- 10 -
Pseudokapacitory	- 11 -
Spojování superkapacitorů	- 12 -
ZÁSADY PRO SPOJOVÁNÍ SUPERKAPACITORŮ:	- 12 -
Vliv vlhkosti	- 13 -
Vliv tlaku	- 13 -
Polarita	- 13 -
Počet cyklů	- 14 -
Vliv superkapacitorů na životní prostředí	- 14 -
Zásady při měření superkapacitorů	- 14 -
Možnosti využití	- 15 -
Výhody superkapacitorů	- 16 -
Nevýhody superkapacitorů	- 17 -
Integrovaný obvod BQ24640	- 18 -
Funkce:	- 18 -
Popis	- 19 -
Schéma zapojení	- 19 -
Funkce pinů	- 20 -
Nastavení výstupního napětí	- 21 -
Nastavení výstupního proudu	- 21 -
Zapnutí	- 22 -
Automatický SOFT- START	- 22 -
Synchronní a Asynchronní operace	- 23 -
Integrované ochrany	- 23 -
Vstupní napěťová ochrana (ACOV)	- 23 -
Výstupní napěťová ochrana	- 23 -
Proudová nabíjecí ochrana	- 24 -
Tepelná ochrana	- 24 -
Režim nabíjení	- 25 -
Statusy nabíječky	- 25 -
Nastavení parametrů	- 25 -
Nabíjecí proud	- 25 -
Zvolení indukčnosti	- 26 -
Vstupní kapacita	- 26 -
Výstupní kapacita	- 27 -
Výběr MOSFET tranzistorů	- 27 -
Návrh vstupního filtru	- 28 -
Realizace	- 29 -
Seznam použitých součástek	- 30 -
Měření superkapacitorů	- 30 -
Seznam použitých přístrojů	- 30 -
Závěr	- 34 -
Seznam použité literatury	- 35 -
Přílohy	- 38 -

Úvod

S výrobou elektrické energie se pojí jedno velké úskalí a to skladování vyrobené energie. Možností pro hromadění energie není mnoho a proto se do popředí v posledních letech dostává superkapacitor. Superkapacitor má výhodu oproti klasickým bateriím, dokáže rychle reagovat, rychleji se nabíjí a má větší teplotní rozsah pro správnou funkčnost. Cílem této bakalářské práce je shrnout základní informace o těchto nově se rozvíjejících perspektivních elektronických součástkách a prakticky realizovat nabíječku pro tyto součástky. Zároveň jsou zde uvedeny zkušenosti získané z nabíjení a vybíjení těchto prvků.

Seznam použitých zkratk

SC	superkapacitor
EDLC	elektrický dvojvrstvý kondenzátor (z angl. Electric Double Layer Capacitor)
C_{dl}	kapacita elektrické dvojvrstvy [F]
ACOV	vstupní napěťová ochrana
GND	uzemnění
DPS	deska plošných spojů
U_n	jmenovité napětí [V]
C	kapacita [F]
V	volt, jednotka napětí
A	ampér, jednotka proudu
F	farad, jednotka kapacity
H	henry, jednotka indukčnosti
Hz	hertz, jednotka frekvence
Ω	ohm, jednotka elektrického odporu
$^{\circ}\text{C}$	stupeň Celsiův, jednotka tepla
%	procento

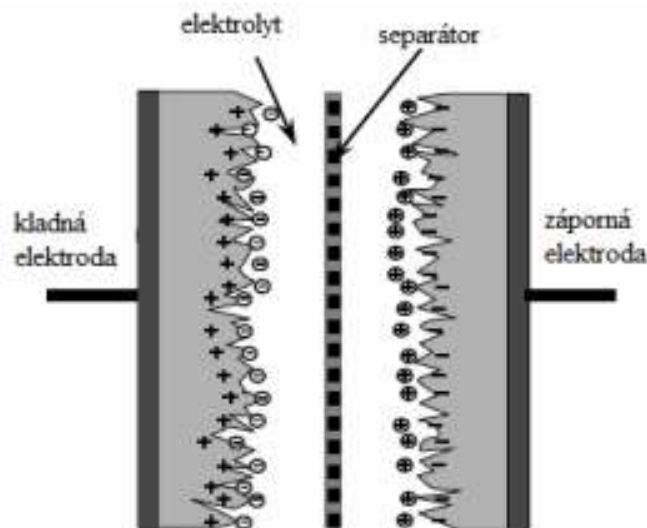
Superkapacitory

Historie

Počátek vzniku kondenzátorů je datován do roku 1837, kdy objevil významný anglický fyzik a chemik Michael Faraday polarizaci dielektrika. Zjistil, že pokud se dielektrikem vyplní prostor mezi elektrodami kondenzátoru namísto vzduchu, vzroste tím jeho kapacita. Princip uchování energie v superkapacitoru vychází z efektu, který popsal již v roce 1856 K. Hemholz, který objevil princip ukládání elektrického náboje, založený na jeho separaci a tím i elektrickou dvojrůstvou. Tento typ superkapacitoru bývá označován jako EDCL (Electrochemic double layer capacitor). Taktéž v některé literatuře je tento typ superkapacitoru nazýván jako elektrochemický dvojrůstvý kondenzátor [16, 17].

Princip

Stejně jako u běžného kondenzátoru je energie uchována v elektrostatickém poli. Po přivedení vnějšího napětí se kladné ionty přesouvají k záporné elektrodě a záporné ionty ke kladné elektrodě. Tak vznikají dvě vrstvy, na nichž se skladuje elektrický náboj. Kapacita superkapacitoru může dosahovat až tisíců faradů [3].



Obr.1 Struktura EDLC [3] (Základem každého SC je kladná a záporná elektroda, elektrolyt a separátor)

Přestože se jedná o elektrochemické zařízení, neprobíhají v superkapacitoru žádné chemické reakce. Využitím elektrostatického vázání energie je docíleno, že proces nabíjení a vybíjení je velice rychlý v porovnání například s klasickými bateriemi, a zároveň je možné opakovat tyto procesy až milionkrát.

Superkapacitor se jeví jako dva do série zapojené kondenzátory oddělené separátorem (oddělovačem). Kapacita elektrické dvojvrstvy je dána vztahem: [9].

$$C_{dl} = \frac{\varepsilon A}{4\pi t} \text{ [F]} \quad (1)$$

Kde ε je permitivita prostředí,

A je povrch elektrody,

t je tloušťka dvojvrstvy.

Materiálem vhodným pro elektrody je aktivní uhlík z důvodu velké dosažitelnosti plochy skutečného povrchu (vysoká poréznost), elektrické vodivosti, chemické netečnosti, vysoké teplotní stability, odolnosti proti korozi a relativně nízké ceny. Díky tomu lze dosáhnout povrchu elektrody až kolem $3000 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ (aktivní plocha se může ještě zvětšit použitím nanomateriálů). Tloušťka elektrické dvojvrstvy se pohybuje kolem 10nm. Díky těmto vlastnostem lze vyrobit superkapacitor s kapacitou v řádů tisíců Faradů [7].

Pseudokapacity

Princip pseudokondenzátorů je odlišný od EDCL. Na rozdíl od EDCL je princip založen na chemických reakcích, které probíhají na povrchu elektrody. Jedná se o mladou technologii, která může být v budoucnu dobře rozvíjena. Pseudokapacitor pracuje stejně jako superkapacitor s EDCL, hlavní rozdíl je v použití materiálu na elektrody. Často bývá první elektroda tvořena uhlíkovými sazemi a druhá elektroda bývá z oxidu kovů. Z toho vyplývá, že pseudokapacitor může dosahovat větší hustoty energie (až o 80% více) než superkapacitor s EDCL.

Největším problémem pseudokapacitorů je výroba nízkonákladového oxidu kovu o vysokém výkonu. Další nevýhodou kromě kratší životnosti je nižší účinnost nabíjení a delší časová odezva [7].

Spojování superkapacitorů

Spojování superkapacitorů má skoro stejné zásady, jako propojování všech zdrojů velkých proudů. Je tedy nutné zajistit malý elektrický odpor všech vodivých spojení a dobrou mechanickou pevnost spojů, která odolá mechanickým otřesům a popřípadě i tepelné roztažnosti [9].

ZÁSADY PRO SPOJOVÁNÍ SUPERKAPACITORŮ:

Při spojování superkapacitorů je třeba dodržovat tyto zásady [9]:

- Nízký odpor spojů: Povrch spojovaných dílů musí být čistý, šroubové spoje utaženy, kontaktní plocha by měla být co největší.
- Ošetření povrchu spojů: Oxidace má vliv na odpor spojů, proto by spoje měly být ošetřeny elektrickou vodivou pastou.
- Tepelná roztažnost: Při spojení materiálu s různou tepelnou roztažností, může dojít k povolání spojů a tudíž dochází k následnému zvětšování elektrického odporu, zvětšení ohřívání a tím dochází k zhoršení parametrů superkapacitoru.
- Plocha propojovacích vodičů: plocha propojovacích vodičů musí být navržena na největší očekávané proudy s koeficientem bezpečnosti 1,5. Takto jsou spoje dimenzovány i proti případnému zkratu.
- Elektrická izolace: přídavná izolace mezi superkapacitory. Materiál a tloušťka musí být navržena s ohledem na pracovní napětí superkapacitorů.
- Galvanická koroze spojů: pro spojování superkapacitorů se doporučuje zvolit materiál s co nejmenší galvanickou aktivitou proti hliníku, jelikož dochází ke korozi vlivem různých elektrochemických potenciálů obou materiálů.
- Mechanické namáhání: spoje a celá konstrukce musí být navržena tak, aby dokázala minimalizovat případné mechanické namáhání od různých nárazů a chvění, nebo aby se zabránilo poškození izolace.

- Tepelná ochrana: správná teplota pro obvyklou funkčnost superkapacitoru by se měla pohybovat v rozmezí -40°C až 60°C , proto je nutné v některých případech přidat chladicí zařízení, které bude odvádět teplo do okolí. Používáním superkapacitorů při nižších teplotách se dosáhne delší životnosti. Provozní teplota by však neměla klesnout pod -40°C . Dochází k mrznutí elektrolytu. Superkapacitor, který není používán by taktéž neměl být vystaven teplotám mimo rámec používání.
- Dodržování bezpečnosti: při delších měřicích intervalech musí být kontrolována teplota superkapacitoru, dále všechny elektrické vodiče musí být dimenzovány na očekávané hodnoty proudu.

Vliv vlhkosti

Superkapacitor je schopen fungovat i při velké vlhkosti, musíme ovšem zabezpečit, že nedojde během fungování ke kondenzaci par. Superkapacitory se během skladování běžně zavírají do vakuových kontejnerů. Důsledkem toho je, že se na kontaktech superkapacitoru nevytváří koroze. Případná koroze, která je způsobena vysokou vlhkostí se dá odstranit lehkým zbrúšením, například smirkovým papírem [3].

Vliv tlaku

Jakmile je superkapacitor vystaven mírnému podtlaku, nejedná se o žádný problém, protože nedochází k žádným negativním účinkům na funkci superkapacitoru. Tlak vyšší než atmosférický se ovšem projevuje negativními účinky, a to v podobě deformace nanostruktur u elektrod. V některých případech mohou být poničeny superkapacitory jako celek [3].

Polarita

Jak již bylo zmíněno, obě elektrody superkapacitorů jsou vyrobeny ze stejného materiálu. Svorky jsou tudíž v jistém ohledu zaměnitelné. Každý výrobce už při výrobě rozliší polaritu svorek, proto by se měl brát ohled na polarizaci, kterou vyznačil výrobce. Po přepólování superkapacitoru nedochází k jeho zničení nebo dokonce výbuchu. Výkon a životnost superkapacitoru se ale snižuje [3].

Počet cyklů

Každým nabíjecím a vybíjecím cyklem dochází k opotřebování superkapacitoru. Velikost degradace je přímo závislá na velikosti jmenovitého napětí. Při nižším jmenovitém napětí je degradace kapacity podstatně menší. Počet nabíjecích a vybíjecích cyklů je u běžných superkapacitorů kolem jednoho milionu [3].

Vliv superkapacitorů na životní prostředí

Používáním superkapacitorů nehrozí žádné nebezpečí z pohledu na životní prostředí, jelikož svým fungováním negeneruje žádné škodlivé látky. Po skončení své životnosti je superkapacitor likvidován stejným způsobem jako například akumulátory, které se likvidují jako nebezpečný odpad. Obalové materiály jsou snadno recyklovatelné. Zbylé části superkapacitorů se likvidují spalováním při vysokých teplotách [3].

Zásady při měření superkapacitorů

Měření superkapacitorů v režimu nabíjení a vybíjení je vykonáváno při konstantním proudu. Toto měření slouží k ověření správnosti nasazení vhodného superkapacitoru, před uvedením do stálého pracovního režimu. Na základě měření mohou být vyhodnocovány výsledky a popřípadě změněny superkapacitory, když se prokáže, že zvolený superkapacitor není vhodný. Veškeré superkapacitory jsou z důvodu bezpečnosti skladovány vybité.

Před každým měřením je doporučeno zkratování svorek superkapacitoru, aby došlo k úplnému vybití. Po skončení měření, je vhodné opět zkratovat svorky, aby se minimalizovalo riziko úrazu další osoby, která bude následně pracovat se superkapacitorem.

Seznam potřebných přístrojů pro měření:

1. oddělený napájecí zdroj a nastavitelná zátěž.
2. měření a zaznamenání napětí v závislosti na čase – osciloskop.
3. měření a zaznamenání proudu v závislosti na čase.

Nastavíme zdroj na požadované hodnoty napětí a proudu. Zdroj vypneme. Napětí zdroje nesmí být vyšší než maximální možné napětí na superkapacitoru. Proud může být nastaven na jakoukoliv nižší maximální hodnotu proudu, který smí procházet superkapacitorem. Pokud je nabíjení prováděno opakovaně, nemělo by se zapomínat na chlazení superkapacitoru, například pomocí proudícího vzduchu. Následně se připojí superkapacitor ke zdroji napětí.

Zapnutím zdroje napájení je nabíjen superkapacitor konstantním proudem na nastavenou hodnotu napětí. Po nabití se odpojí napájecí zdroj. Zátěž se připojí k superkapacitoru a necháme vybit [10].

$$C = \frac{I_d * t_d}{U_0 - U_f} \quad [\text{F, A, s, V}] \quad (2)$$

U_0 počáteční napětí na superkapacitoru [V].

U_f napětí na superkapacitoru po vybití [V].

I_d vybíjecí proud [A].

t_d čas, po který se vybíjel SC [s]. [9].

Možnosti využití

Superkapacity jsou kvůli svým parametrům stále častěji využívány v různých oblastech, kde je potřeba skladovat energii. V dnešní době je důležitá i otázka neznečišťování životního prostředí. Díky využívání superkapacitorů je snížena produkce emisí a škodlivých látek v oblasti pohonů. Vyčerpávání přírodních zdrojů, zejména pak ropy, nutí lidstvo hledat alternativní zdroje, které by se daly používat. Autobusy hromadné dopravy, dálkové kamiony a jiné přepravní stroje jako vlaky, lodě, tramvaje nebo metra měly prospěch z přijetí hybridních pohonů s využitím superkapacitorů. Superkapacity umožňují elektromobilům a hybridním pohonům šetřit palivo a snížit produkci emisí [18].

1. **Autobaterie:** Využitím několika SC lze sestavit náhradní modul, který by fungoval jako autobaterie. Výhod je několik, rozměr a hmotnost alternativní autobaterie ze SC je podstatně menší, dále pak schopnost dodat okamžitě maximální výkon a teplotní stálost kapacity. V současnosti se stavějí 12V moduly, ale v budoucnu se počítá i s 36 - 42V autobateriemi. Superkapacity s mimořádně vysokou hustotou výkonu i při velmi nízkých teplotách jsou schopné nastartovat automobil. Zaručují rychlý, spolehlivý start bez ohledu na teplotu okolí, nebo jiné elektrické požadavky. Ani stáří baterie nemá vliv [4].
2. **Záložní napájení:** použitím superkapacitorů jako záložního zdroje se používá pro případ výpadku energie v oblastech, kde je potřeba nepřetržitého napájení (záložní osvětlení, servery, atd.) [19].

3. **Použití v hybridních vozidlech:** V dnešní době je rozvoj hybridních vozidel velmi lukrativní oblastí pro vývoj. Hybridní vozidlo si vyrobí energii pomocí motogenerátoru nebo palivového článku. Vyrobena energie je spotřebovávána hnacím motorem. Funkce SC je hromadění nadbytečné energie (brzdění, jízda z kopce...) [4].
4. **Použití v ss síti:** Nejčastějším použitím SC je při rekuperaci, kdy je rekuperovaná energie nahromaděna v SC a následně je využívána při rozběhu motoru. Úspora energie při rekuperaci je mezi 20 – 40% [11].
5. **Použití v stř. síti:** SC snižuje množství energie vyměněné mezi spotřebičem a zdrojem. Lze tím zajistit plynulý provoz bez oscilací [12].
6. **Použití ve větrných elektrárnách:** SC slouží jako záložní zdroj pro nastavení lopatek větrné elektrárny a tudíž přispívá k maximalizování zisku vyrobené energie. Větrné elektrárny mají nastavitelné lopatky, které jsou natáčeny a mohl být tak využit maximální potenciál větru [14].

Výhody superkapacitorů

- Velmi vysoká účinnost nabíjení a vybíjení 88-98% oproti olověné baterii, která má účinnost maximálně 85%. Palivové články dosahují účinnosti kolem 30-40% [15, 13].
- Malý vnitřní odpor (řádově mΩ). Díky tak malému odporu se superkapacitor velice rychle nabíjí a vybíjí. Rychlost nabíjení byla ověřena i měřením [6].
- Oproti bateriím mají superkapacitory 10x vyšší měrný výkon na jednotku hmotnosti [2].
- Správná funkce superkapacitorů je zaručena při velkém teplotním rozsahu (-40 až 65°C). Horní hranice se udává v rozmezí 65°C až 85°C [2].
- U superkapacitorů nedochází k paměťovému efektu.
- Bezproblémová údržba a nejsou potřeba žádné speciální ohledy při přepravě.
- Životnost superkapacitorů je dána počtem nabíjecích a vybíjecích cyklů při teplotě 25°C. Životnost superkapacitorů od firmy MAXWELL dosahuje až 1 000 000 cyklů. Po každém cyklu dochází k nenávratné ztrátě kapacity a nárůstu sériového odporu. Délka života superkapacitoru se udává dokud se sériový odpor nezdvoujnásobí nebo dokud nepoklesne kapacita pod 80% jmenovité hodnoty [2].

Nevýhody superkapacitorů

- Zdraví škodlivá výroba, jelikož při výrobě uhlíkových nanotrubic se uvolňují toxické a rakovinotvorné zplodiny. Tyto nanouhlíky jsou nebezpečné i z důvodu malých rozměrů (1 až 100 nm), mohou se dostat do plic [5].
- Superkapacitory mají 10x nižší hustotu energie na jednotku hmotnosti oproti bateriím [2].
- Nebezpečná likvidace zejména kvůli škodlivosti acetonitrilu.
- Nežádoucí vlastností superkapacitoru je samovybíjení. Důležitým aspektem je přítom teplota, s růstem pracovních teplot roste i rychlost samovybíjení.
- Vysoká cena, ale v posledních letech se superkapacitory velice rozšiřují a tak se dá očekávat snížení ceny.
- Samostatný superkapacitor má nízké provozní napětí, které je ovlivněno vzdáleností elektrod. Hodnota je 2,5 V. Při nedodržení tohoto napětí může dojít ke snížení životnosti. Pro větší napětí se používá sériová kombinace [2, 8].

Integrovaný obvod BQ24640

vysoce efektivní synchronní nabíječka superkapacitorů

Funkce:

Nabíjení superkapacitorů od 2.1V do 26V.

600kHz NMOS-NMOS synchronní regulátor.

Účinnost nabíjecího proudu přes 90% až do 10A .

Napájení 5V až 28V.

Přesnost: $\pm 0.5\%$ nastaveného nabíjecího napětí.

$\pm 3\%$ nastaveného nabíjecího proudu.

Vysoká integrace: Vnitřní kompenzace.

Vnitřní digitální Soft Start.

Bezpečnost: Vstupní přepěťová ochrana.

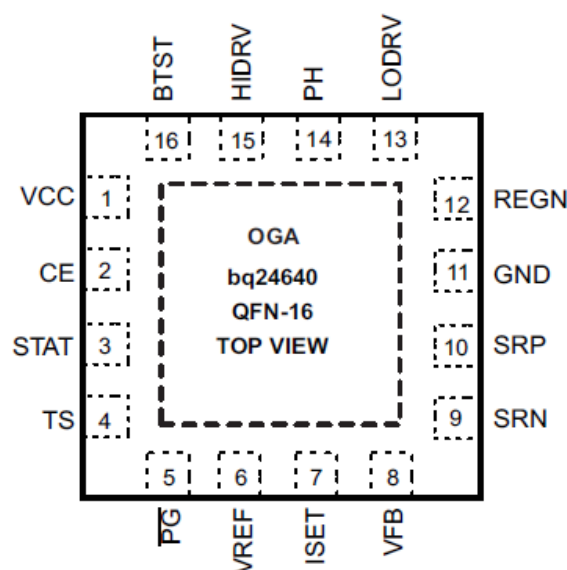
Tepelná ochrana.

Automatické přepnutí do Sleep modu při nabití superkapacitoru.

Spotřeba: $< 15 \mu\text{A}$ po nabití superkapacitoru při vypnutém stavu.

$< 1.5\text{mA}$ vstupní klidový proud při vypnutém stavu.

Pouzdro $3.5 \times 3.5 \text{ mm}^2$ QFN-16 [1].



Obr.2 Pouzdro BQ24640[1]

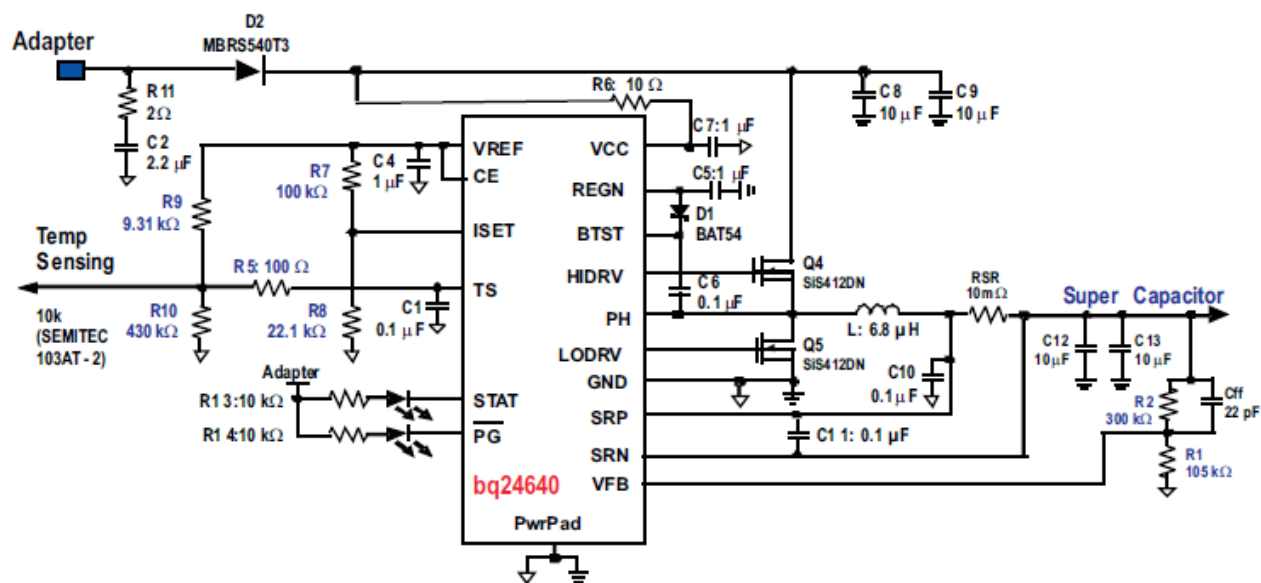
Popis

BQ24640 je vysoce integrovaná nabíječka superkapacitorů. To zajišťuje synchronní PWM regulátor s konstantní frekvencí s velmi přesným nabíjecím proudem a nastavitelným napětím.

BQ24640 nabíjí superkapacity ve dvou fázích: konstantním proudem a konstantním napětím. Nabíjení začíná od 0V přivedením proudu na ISET pin. Nabíjecí proud začne klesat, když napětí na VFB dosáhne vnitřní referenční hodnoty. BQ24640 přechází do nízko odběrového sleep režimu (odebíraný proud je $< 15\mu\text{A}$), jakmile vstupní napětí klesne pod výstupní napětí kapacitoru.

BQ24640 obsahuje vstupní CE pin, pomocí kterého je povoleno nebo zakázáno nabíjení superkapacitoru. Výstupní piny STAT a PG oznamují stav nabíjení a zapnutí napájení. TS pin slouží k monitorování teploty, a jakmile je překročena povolená teplota, vypíná obvod, a tím ho chrání před zničením [1].

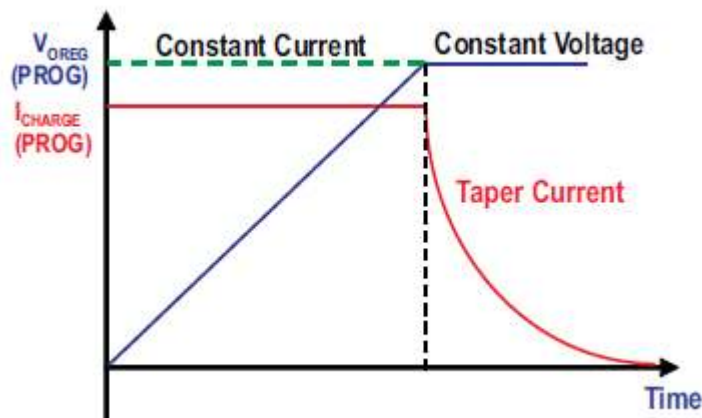
Schéma zapojení



Obr.3 Schéma zapojení [1]

Funkce pinů

- VCC: Napájecí pin, který je spojen přes 10Ω odpor na katodu vstupní diody. Přidaný $1\ \mu\text{F}$ keramický kondenzátor je umístěn co nejbližší IO kvůli odfiltrování šumu.
- CE: Pomocí tohoto pinu se nastavuje možnost nabíjení. Log. „1“ umožňuje nabíjení a log. „0“ zakazuje nabíjení.
- STAT: Slouží k zobrazování různých nabíjecích operací. Připojená LED zobrazuje stav nabíjení.
- TS: Tepelná ochrana čipu. Připojen $10\text{k}\Omega$ NTC termistor, který mění svůj odpor v závislosti na teplotě a udržuje obvod ve správném teplotním okně.
- PG: Po připojení napájení přiložená LED svítí, při přepnutí obvodu do sleep modu dochází k vypnutí LED.
- VREF: 3.3V referenční napětí, které může být použito pro přenastavení nabíjecího proudu.
- ISET: Nastavení nabíjecího proudu dle rovnice
- $$I_{CHG} = \frac{V_{ISET}}{20 \cdot R_{SR}} \quad (3)$$
- VFB: Nastavení zpětné napěťové vazby, která nastavuje výstupní napětí. Interní limit je 2.1V
- SRN: záporný vstup na R_{SR} , odpor pro nastavení nabíjecího proudu.
- SRP: kladný vstup na R_{SR} , odpor pro nastavení nabíjecího proudu.
- GND: analogová/digitální zem. Na DPS spojena s powerpad pod čipem [1].



Obr.4 Režimy nabíjení [1]

Nastavení výstupního napětí

BQ24640 využívá vysoce přesný napěťový regulátor pro změnu výstupního napětí. Výstupní napětí je dáno velikostí odporů rezistorů R1 a R2, které jsou mezi výstupní svorkou a zemí. K odporům R1 a R2 je přivedeno napětí z VFB pinu, které je nastaveno na 2.1V. Hodnota výstupního napětí je dána podle vzorce:

$$U_{OUT} = 2.1 \cdot \left(1 + \frac{R2}{R1}\right). \quad (4)$$

Nastavení výstupního proudu

Vstupní pin ISET nastavuje maximální možný nabíjecí proud. Výstupní proud je dán rezistorem R_{SR} připojený mezi piny SRP a SRN. Při plném rozsahu rozdíl napětí mezi SRP a SRN je 100mV. Pro hodnotu odporu R_{SR} = 10mΩ je maximální nabíjecí proud roven 10A. Rovnice pro nabíjecí proud:

$$I_{CHARGE} = \frac{U_{ISET}}{20 \cdot R_{SR}}. \quad (3)$$

Vstupní napěťový rozsah ISET je mezi 0 a 2V. V základním zapojení je mezi piny SRP a SRN připojen odpor R_{SR}= 10mΩ, nicméně může být použit i odpor s jinou hodnotou. Větší hodnota odporu R_{SR} bude znamenat větší napětí a větší přesnost, ale za cenu vyšších ztrát na vedení. [1]

Zapnutí

BQ24640 využívá komparátor k určení toho, jestli napájení, které je připojeno na VCC pin, je schopno nabít superkapacitor. Jestliže je napětí na VCC nad prahem UVLO, je větší než napětí na SRN a pokud jsou zároveň splněny podmínky, začne nabíjení superkapacitoru. Jakmile je hodnota napětí na SRN vyšší než napájecí napětí, obvod se přepne do sleep režimu. Pokud je hodnota napětí na pinu VCC pod prahem UVLO, zařízení je vypnuto.

Při splnění následujících podmínek je zařízení schopné nabíjet superkapacitory:

- Na pin CE musí být přivedena log. „1“.
- Zařízení nesmí být v UVLO režimu (Under-Voltage-Lockout).
- Zařízení nesmí být ve SLEEP režimu ($VCC > SRN$).
- 30ms zpoždění je kompletní po prvním zapnutí.
- REGN LDO a VREF LDO napětí jsou ve správných úrovních.
- Teplotní ochrana není aktivní (TSHUT).
- Není detekována chyba na TS.

Zařízení nenabíjí, když:

- Na pin CE je přivedena log. „0“.
- Při odejmutí napájecího zdroje se zařízení dostává do UVLO režimu.
- Zařízení se přepne do SLEEP režimu.
- Napájecí napětí je větší než je povoleno.
- TSHUT IC teplotní práh je dosažen.
- Napětí TS je mimo povolený rozsah. Teplota je moc velká nebo naopak malá. [1]
viz. obrázek č. 5

Automatický SOFT- START

Nabíječka automaticky reguluje nabíjecí proud, aby bylo zajištěno, že nebude překročen povolený nabíjecí proud superkapacitoru. SOFT-START spočívá v rozložení nabíjecího cyklu. Nabíjecí cyklus je rovnoměrně rozdělen do 8 kroků. Každý další krok má vyšší hladinu proudu. Doba trvání jednoho kroku je 1.6ms při typickém nabíjecím cyklu, který trvá 13ms. Pro tuto funkci nejsou zapotřebí žádné další součástky. Snižující PWM měnič využívá ovládací typologie s napěťovým režimem s pevnou frekvencí a dopřednými vazbami. Kompenzace vstupního stupně je vnitřně připojena mezi výstupní zpětnou vazbu (FBO) a vstup chybového zesilovače (EAI). Zpětnovazební kompenzační stupeň je připojen mezi vstup chybového zesilovače (EAI) a výstup chybového zesilovače (EAO). LC

výstupní filtr je vybraný na rezonanční frekvenci 12kHz – 17kHz, kde rezonanční frekvence je dána vzorcem:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0C_0}}. \quad (5)$$

Synchronní a Asynchronní operace

Nabíječka může pracovat ve dvou režimech. V synchronním režimu pracuje, když napětí na SRP-SRN je nad 5mV (0.5A proud procházející indukčností a 10mΩ odpor). Během synchronního režimu vnitřní logika obvodu zajišťuje, že dochází k doplňkovému přepínání pro ochranu před špičkovými proudy. Oba FET tranzistory jsou vypnuty, cívkou prochází proud z indukčností po dobu 30ns. Poté jsou zapnuty FET tranzistory, které udržuje nízké výkonové rozptýlení, a umožňují bezpečně nabíjet vysokými proudy. Během synchronního režimu vždy proud protéká indukčností a měnič pracuje v nepřetržitém režimu (CCM) a vytváří pevný dvoupólový systém.

Do asynchronním režimu vstupuje nabíječka jakmile napětí na SRN – SRP spadne pod 5mV. Nabíječka je donucena přejít do asynchronního režimu také v případě, kdy průměrné napětí na SRP – SRN je nižší než 1,25mV. Během asynchronní operace MOSFET umožňuje vést proud indukčností. Když se sníží nabíjecí proud a proud indukčností klesne na 0 A, připojená dioda se vypne a proud indukčností se stává přerušovaným. Tento režim je nazýván DCM [1].

Integrované ochrany

Vstupní napěťová ochrana (ACOV)

ACOV poskytuje ochranu proti zničení během vysokého napájecího napětí. Jakmile napájecí napětí dosáhne ACOV prahu je okamžitě nabíječka vypnuta [1].

Výstupní napěťová ochrana

Nabíječka neumožňuje zapnutí FET tranzistorů, dokud výstupní napětí nespadne pod 102% z nastaveného napětí. Toto se využije například při odebrání zátěže. Když proud z SRN/SRP pinu na GND klesne pod 8mA je umožněno vybíjení výstupních kondenzátorů [1].

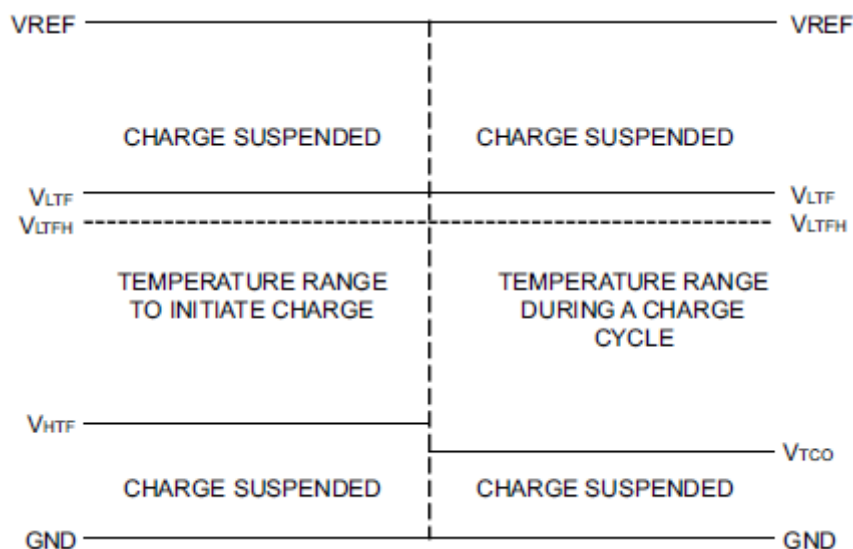
Proudová nabíjecí ochrana

Nabíječka obsahuje ještě proudovou nabíjecí ochranu. Ta monitoruje nabíjecí proud a nedovolí, aby zmíněný nabíjecí proud překročil 160% nastaveného nabíjecího proudu. Jakmile nabíječka detekuje, že proud překročil 160% nastaveného proudu, okamžitě se vypne. Automatické obnovení funkce proběhne v okamžiku, kdy proud klesne pod 160% práh [1].

Tepelná ochrana

QFN pouzdro má nízkou teplotní impedanci, která poskytuje dobrou tepelnou vodivost silikonu do okolí a tím pádem udržuje nízké provozní teploty čipu. Čip může využívat i doplňkové tepelné ochrany, která je založena na přidání termistoru. Když teplota čipu překročí práh 145°C (TSHUT), dochází k okamžitému vypnutí nabíječky, aby nedošlo ke zničení. Nabíječka zůstává ve vypnutém stavu, dokud teplota neklesne pod 130°C.

Měnič nepřetržitě monitoruje teplotní zatížení měřením napětí mezi piny TS a GND. Termistor s negativním koeficientem (NTC) a vnější dělič napětí rozvádí napětí mezi těmito píny. Měnič porovnává toto napětí proti vnitřnímu práhu, který je určen, když je povoleno nabíjení. Pro zahájení nabíjení musí být teplota mezi prahy $V(LTF)$ a $V(HTF)$. Pokud je teplota mimo tento rozsah, měnič odstaví nabíjení dokud teplota neklesne do již výše zmíněného rozsahu. Během nabíjení musí být teplota v rozsahu $V(LTF)$ až $V(TCO)$. Jakmile se teplota pohybuje mimo rámec těchto hodnot, je nabíječka odstavena, dokud neklesne teplota do rozsahu $V(LTF)$ až $V(HTF)$. Měnič odstaví nabíjení vypnutím FET tranzistorů. Pokud není funkce TS vyžadována, nastavíme hodnoty odporů $R9$ a $R10$ na stejnou hodnotu a napětí na TS bude 1.65V s $VREF$ jako referenční hodnotou [1].



Obr.5 Napětové hladiny [1]

Režim nabíjení

Digitální vstup CE je používán pro povolení nebo zakázání nabíjecího procesu. Při log. „1“ na pinu CE je povoleno nabíjení, musí být ale zároveň splněny i ostatní podmínky pro nabíjení. Přechod z vysoké hladiny na nízkou na tomto pinu mimoto vyresetuje všechny čítače a poruchové stavy. Pin CE obsahuje vnitřní $1M\Omega$ rezistor. Jestliže je na CE plovoucí hodnota napětí, nabíječka není zapnuta. Jakmile je připojeno napájení na pin CE, reaguje výstupní pin PG (power good) sloužící pro indikaci napájení. K pinu PG se může připojit LED pro názorné ukázaní, že je připojeno napájení, nebo může být použit tento pin ke komunikaci s procesorem [1].

Statusy nabíječky

K zobrazení různých stavů nabíječky slouží pin STAT. Tento informační pin může být připojen k procesoru nebo může být přidána LED pro indikování stavů. Viz následující tabulka.

Tabulka 1: Statusy nabíječky.

Stav nabíječky	STAT
CE v log. "1"	ON
SLEEP režim	OFF
CE v log. "0", sepnuty ochrany	BLIKÁ

Nastavení parametrů

Nabíjecí proud

BQ24640 poskytuje vnitřní smyčkovou kompenzaci. K nejlepší stabilitě dochází, když LC rezonanční frekvence f_0 je přibližně 12kHz – 17kHz. Hodnota nabíjecího proudu se dá nastavit vhodným pozměněním výstupní indukčnosti a výstupní kapacity. Následující tabulka ukazuje typické hodnoty LC součástek pro různé nabíjecí proudy.

Ve verzi, kterou jsem konstruoval, byly použity součástky pro nabíjecí proud $I = 4A$.

Tabulka 2: Závislost nabíjecího proudu na výstupní cívce a kondenzátoru.

Nabíjecí proud	2A	4A	6A	8A	10A
Výstupní cívka L_0	10 μH	6.8 μH	4.7 μH	3.3 μH	3.3 μH
Výstupní kapacita C_0	15 μF	20 μF	30 μF	40 μF	40 μF
R_{SR}	10 $m\Omega$	10 $m\Omega$	10 $m\Omega$	10 $m\Omega$	10 $m\Omega$

Zvolení indukčnosti

BQ24640 má přepínací frekvenci 600kHz, to umožňuje použít indukčnosti a kapacity o malé hodnotě. Saturační proud protékající indukčností by měl být vyšší než nabíjecí proud plus polovina šumového proudu.

$$I_{SAT} \geq I_{CHG} + \frac{1}{2} I_{RIPPLE}. \quad (6)$$

Šumový proud protékající indukčností závisí na vstupním napětí (V_{IN}), cyklu nabíjení ($D = V_{OUT}/V_{IN}$), přepínací frekvenci (f_s) a indukčnosti (L).

$$I_{RIPPLE} = \frac{V_{IN} \cdot D \cdot (1-D)}{f_s \cdot L}. \quad (7)$$

Maximální šumový proud protékající indukčností je při $D = 0.5$ nebo blíží se této hodnotě. Obvykle je velikost šumového proudu v rozmezí 20 až 40% maximálního nabíjecího proudu jako kompromis mezi velikostí indukčnosti a efektivnosti pro praktické realizování.

Vstupní kapacita

Vstupní kapacitor by měl být dostatečně velký, aby mohl absorbovat vstupní šumový proud. V polovině nabíjecího cyklu prochází vstupním kapacitorem největší proud I_{CIN} . Hodnota proudu procházející vstupním kapacitorem se dá odhadnout podle následující rovnice:

$$I_{CIN} = I_{CHG} \cdot \sqrt{D \cdot (1-D)}. \quad (8)$$

Nízké ESR keramických kondenzátorů jako například X7R a X5R jsou preferovány kvůli vstupnímu oddělení kapacity a měly by být umístěny co nejblíže k drainu u horního MOSFETu a u sourcu u dolního MOSFETu. Napětíové dimenzování těchto kondenzátorů musí být vyšší než u normálních vstupních kondenzátorů. Napětí $U = 25V$ nebo vyšší je preferováno pro 20V vstupní napětí. Hodnota $C = 20 \mu F$ je navrhována pro typický nabíjecí proud $I = 3 \sim 4A$.

Výstupní kapacita

Výstupní kondenzátor by také měl umožnit absorbování výstupního šumového proudu. Výstupní proud kondenzátoru je dán:

$$I_{COUT} = \frac{I_{RIPPLE}}{2 \cdot \sqrt{3}} = 0.29 \cdot I_{RIPPLE}. \quad (9)$$

Výstupní šumové napětí lze spočítat z následující rovnice:

$$\Delta V_o = \frac{1}{8LCf_s^2} \cdot (V_{OUT} - \frac{V_{OUT}^2}{V_{IN}}). \quad (10)$$

Při známém vstupním/výstupním napětí a spínací frekvenci lze redukovat šumové napětí změněním výstupního LC filtru.

BQ24640 obsahuje vnitřní kompenzátor pro zlepšení stability. Rezonanční frekvence výstupní cívky a výstupního kondenzátoru by měla být v rozmezí 12kHz až 17kHz. Doporučené kondenzátory musí být minimálně na 25V a musí být typu X7R nebo X5R.

Výběr MOSFET tranzistorů

Dva vnější N-MOSFETy jsou použity pro synchronní přepínání nabíječky. Tranzistory by měly být dostatečně napěťově dimenzovány. Například pro napájecí napětí 20V by měl být tranzistor dimenzován minimálně na 30V, pro napájecí napětí 28V by měl být tranzistor dimenzován minimálně na 40V.

Jestliže napětí na SRN-SRP klesne pod 5mV (Nabíječka je přinucena přejít do asynchronního režimu, když průměrné napětí na SRN-SRP je nižší než 1,25mV), nižší FET tranzistor je vypnut pro zbytek cyklu jako prevence proti proudu protékající indukčností. Maximální nabíjecí proud v asynchronním režimu může být zvýšen na 0.9A (typicky 0.5A) při 10mΩ R_{SR}.

MOSFET tranzistory přispívají k hlavním ztrátám IO, a to při přepínání měniče. Vhodným vybráním MOSFET tranzistorů s malým Q_{g_total} lze redukovat výkonové ztráty a vyhnout se sepnutí tepelné ochrany [1].

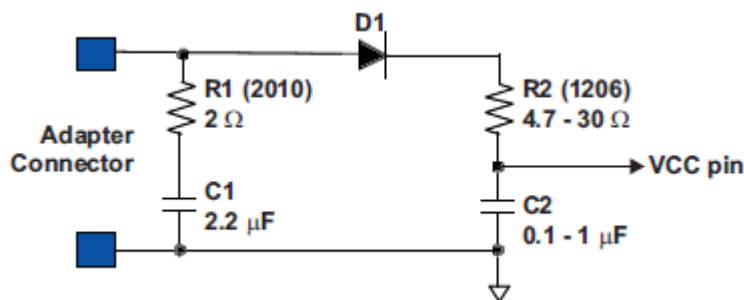
$$P_{ICLoss_driver} = V_{IN} \cdot Q_{g_total} \cdot f_s. \quad (11)$$

Návrh vstupního filtru

Během připojení napájení na zařízení dochází k působení nežádoucích parazitních vlivů. Mezi tyto vlivy patří zejména parazitní indukčnost a kapacita. Důsledkem toho mohou vznikat nepatřičné napěťové špičky, které mohou zapříčinit nesprávnou funkci IO nebo dokonce IO zničit. Proto musí být IO ochráněn vstupním filtrem, který je přesně navržen a otestován, aby zabránil na pinu VCC napěťovému přetížení a předešel tak následnému zničení IO.

Existuje několik metod, jak lze tlumit nebo limitovat napěťové špičky při připojení napájení. Elektrolytický kondenzátor s vysokým ESR jako vstupní kondenzátor dokáže dobře tlumit přepětové špičky. Vysoká proudová schopnost TVS zenerovy diody může také omezit přepětí a udržet na IO bezpečnou hladinu napětí. Nicméně tyto dvě řešení nemusí být nejlevnější a mohou zabírat mnoho místa.

Mnohem efektivnější řešení s nižšími nároky na prostor lze vidět na následujícím obrázku.



Obr.6 Návrh vstupního filtru [1]

R1 a C1 tvoří tlumící RC síť, která tlumí kmitání po připojení napájení. Díky tomu jsou napěťové špičky omezeny na bezpečnou hladinu. D1 je použita pro ochranu pinu VCC, na který díky diodě neprojde opačné napětí. C2 je oddělovací kondenzátor u pinu VCC, tento kondenzátor by měl být umístěn co nejbližší VCC pinu. R2 a C2 utváří tlumící RC síť pro další ochranu IO proti vysokému dU/dt a dalším přepětovým špičkám. Hodnota C2 by měla být nižší než hodnota C1. Pouzdra R1 a R2 musí být dostatečně velká, aby zvládla příval výkonových ztrát v závislosti na odporu. Hodnoty součástí ve filtru musí být ověřeny realizací a popřípadě mohou být provedeny menší úpravy, aby byla zaručena správná funkčnost.

Realizace

Pro realizaci nabíječky s IO BQ24640 jsem se rozhodl na základě několika faktorů. Prvním z těchto faktorů byl samotný výrobce Texas Instruments (TI). Tato firma se zabývá výrobou polovodičových součástek pro analogové obvody přes 80 let. Dalším faktorem byla velikost výsledného návrhu, kdy celková velikost DPS je 40 x 60 mm. V neposlední řadě byla důležitým faktorem cena samotného IO BQ24640. Pro moji realizaci mi bylo poskytnut IO BQ24640 jako vzorek, který byl poskytnut zadarmo. IO BQ24640 obsahuje řadu ochran a výrobce v katalogovém listu poskytuje doporučené schéma zapojení, které jsem v rámci bakalářské práce realizoval.

Doporučené schéma zapojení je navrženo pro napájecí napětí $U_{IN} = 19V$, výstupní napětí $U_{OUT} = 8.1V$ a nabíjecí proud $I_{CHARGE} = 3A$. Hodnota napětí, na kterou se nabíjely superkapacity, byla vždy 2.1V. Při realizaci jsem zvolil jiné hodnoty výstupních odporů $R1$ a $R2$, abych dosáhl výstupního napětí $U_{OUT} = 2.3V$. Závislost výstupního napětí je dána podle vzorce

$$U_{OUT} = 2.1V \cdot \left(1 + \frac{R2}{R1}\right). \quad (12)$$

Podle výrobce bylo pro výstupní napětí 8.1V použito $R1 = 105k\Omega$ a $R2 = 300 k\Omega$. Pro výstupní napětí 2.3V jsou hodnoty odporů $R1 = 105 k\Omega$ a $R2 = 10 k\Omega$. Další změnou oproti schéma v katalogovém listu bylo přidání NTC termistoru k pinu TS. Nejedná se o změnu, která by měla vliv na funkčnost, ale pouze o zlepšení teplotní ochrany IO. NTC termistor mění svůj odpor v závislosti na teplotě a slouží tudíž jako doplňková teplotní ochrana IO.

Jako návrhový software pro tvorbu desky plošných spojů byl použit program EAGLE (Easily Applicable Graphical Layout Editor). Při návrhu DPS jsem využil zkušeností z předchozího navrhování DPS pro jiné účely. Výrobce ve svém katalogovém listě udává taktéž několik rad a tipů, kterými jsem se řídil při vlastním návrhu desky plošných spojů pro tento IO.

Seznam použitých součástek

Tabulka 3: Seznam použitých součástek.

Označení	ks	popis	pouzdro
BQ24640	1	BQ24640	QFN-16
Q4,Q5	2	N-channel MOSFET 30V, 9.2A, IRF7413	SO8
D1	1	Schottky 30V, 200mA, BAT54C	SOT23
D2	1	Schottky 40V, 5A PDS540	PowerDI5
D3,D4	2	LED, 2.1V	
R _{SR}	1	10mΩ 1W	1206
L	1	6.8 μH, 5.5A, IHLP2525	
C8,C9,C12,C13	4	10μF, 35V X7R	1206
C4,C5	2	1μF, 16V X7R	0603
C7	1	1μF, 50V X7R	1206
C1,C6,C11	3	0.1μF, 16V X7R	0603
C2	1	2.2μF, 50V X7R	1206
C _{FF}	1	22pF, 50V X7R	1206
C10	1	0.1μF, 35V X7R	1206
R1	1	105kΩ, 1/16W, 0.5%	0805
R2	1	10kΩ, 1/16W, 0.5%	1206
R7	1	100kΩ, 1/16W, 0.5%	1206
R8	1	22kΩ, 1/16W, 0.5%	1206
R9	1	10kΩ, 1/16W, 1%	1206
R10	1	430kΩ, 1/16W, 1%	1206
R11	1	2Ω, 1W, 5%	1206
R13,R14	2	100kΩ, 1/16W, 5%	1206
R5	1	100Ω, 1/16W, 0.5%	1206
R6	1	10Ω, 1/4W, 5%	1206
NTC	1	NTC termistor 10k	

Měření superkapacitorů

Po úspěšné realizaci nabíječky s IO BQ24640 byla proměřena nabíjecí a vybíjecí charakteristika superkapacitorů. Výsledné charakteristiky odpovídají teoretickým předpokladům. Závislost napětí superkapacitoru na čase je uvedena v následujících tabulkách.

Seznam použitých přístrojů

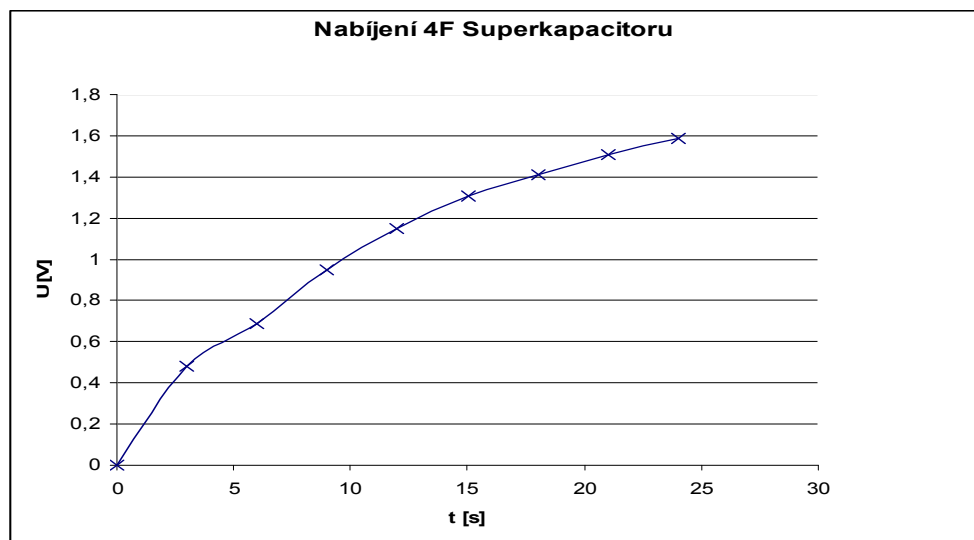
Tabulka 3: Seznam použitých přístrojů.

Voltmetr	METEX	M-3860D	104424
Napájecí zdroj	STATRON	Typ 2225	500532.002
Zátěž		odpor 2,7Ω	
Superkapacity	MAXWELL	PC5 4F/2.5V	
	MAXWELL	PC10 10F/2.5V	
	MAXWELL BOOSCAP	140F/2.5V	

Tabulka 4: Nabíjení 4F Superkapacitoru

t (s)	0	3	6	9	12	15	18	21	24
U (V)	0	0,48	0,69	0,95	1,15	1,31	1,41	1,51	1,59
t (s)	27	30	33	36	39	42			
U (V)	1,67	1,82	1,88	1,94	2,05	2,1			

Nabíjecí charakteristika 4F Superkapacitoru

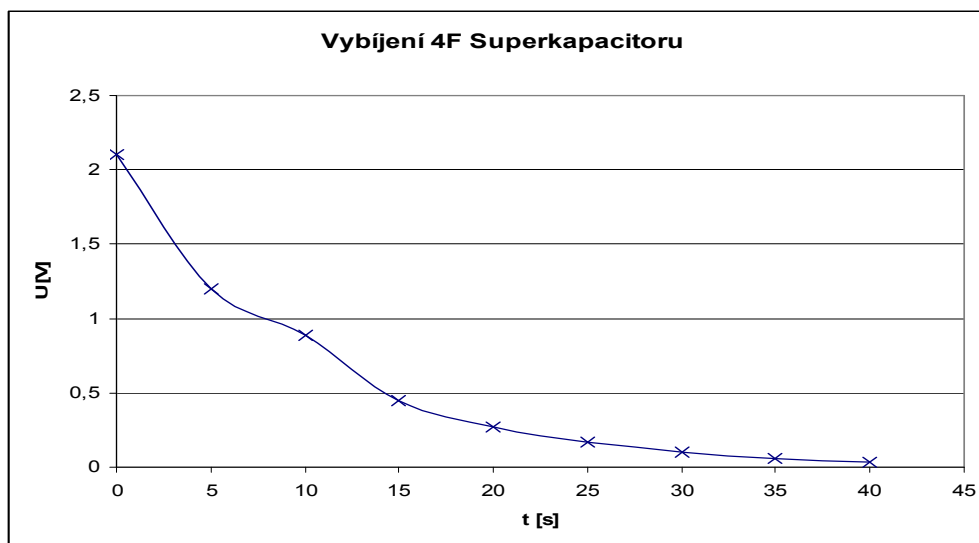


Obr.7 Nabíjecí charakteristika 4F SC.

Tabulka 5: Vybíjení 4F Superkapacitoru

t (s)	0	5	10	15	20	25	30	35	40
U (V)	2,106	1,2	0,89	0,45	0,27	0,17	0,1	0,06	0,03
t (s)	45	50	55	60	65	70			
U (V)	0,02	0,014	0,009	0,006	0,004	0			

Vybíjecí charakteristika 4F Superkapacitoru

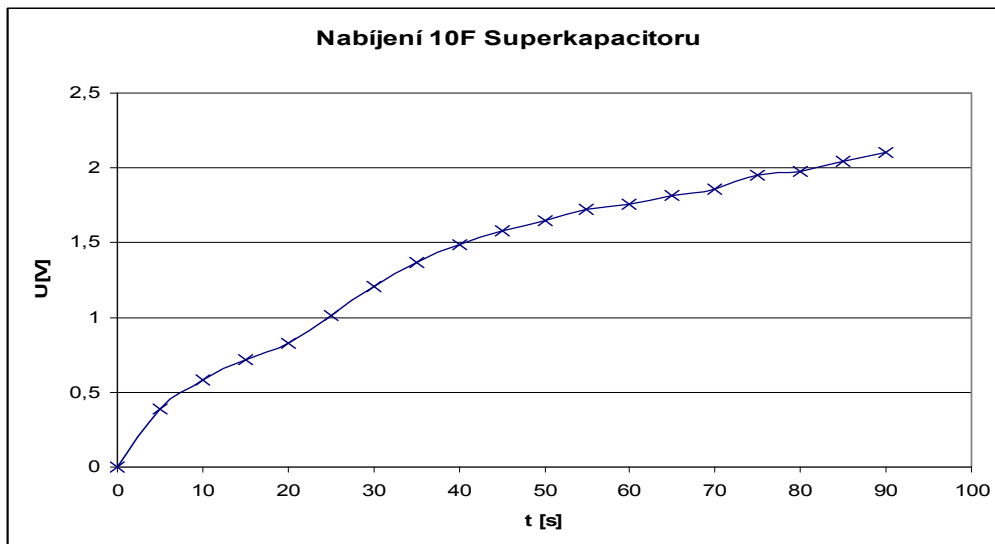


Obr.8 Vybíjecí charakteristika 4F SC.

Tabulka 6: Nabíjení 10F Superkapacitoru

t (s)	0	5	10	15	20	25	30	35	40
U (V)	0	0,39	0,58	0,72	0,83	1,01	1,21	1,37	1,49
t (s)	50	55	60	65	70	75	80	85	90
U (V)	1,65	1,72	1,76	1,82	1,86	1,95	1,98	2,04	2,1

Nabíjecí charakteristika 10F Superkapacitoru

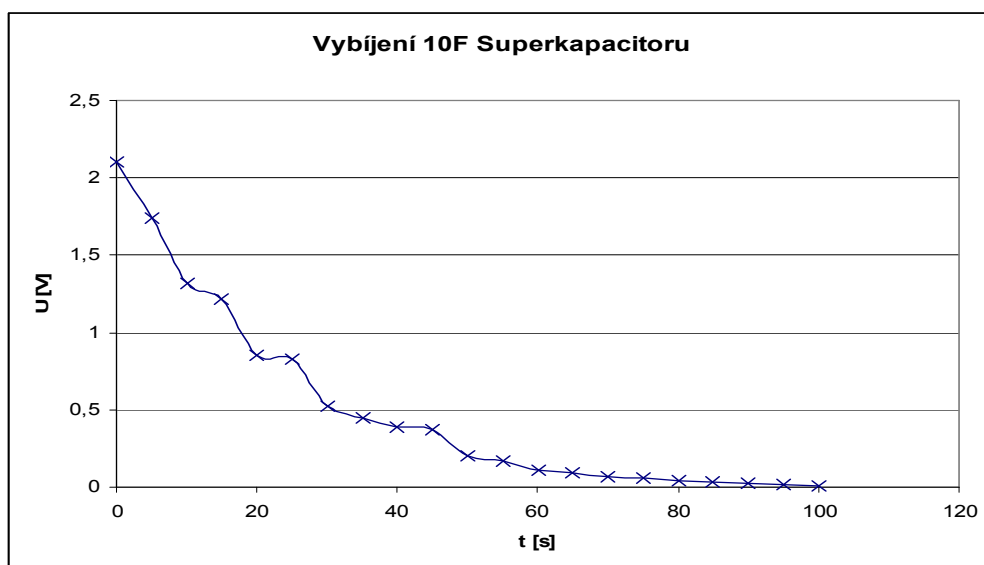


Obr.9 Nabíjecí charakteristika 10F SC.

Tabulka 7: Vybíjení 10F Superkapacitoru

t (s)	0	5	10	15	20	25	30	35	40
U (V)	2,106	1,74	1,32	1,22	0,85	0,83	0,52	0,45	0,39
t (s)	45	50	55	60	65	70	75	80	85
U (V)	0,37	0,2	0,17	0,11	0,09	0,07	0,06	0,04	0,03
t (s)	90	95	100	105					
U (V)	0,026	0,021	0,012	0					

Vybíjecí charakteristika 10F Superkapacitoru

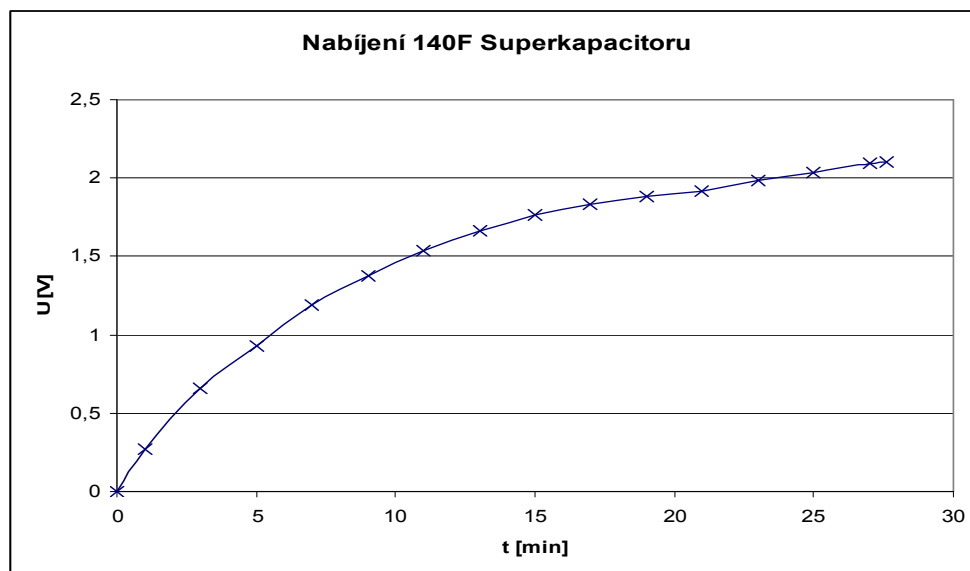


Obr.10 Vybíjecí charakteristika 10F SC.

Tabulka 8: Nabíjení 140F Superkapacitoru

t (min)	0	1	3	5	7	9	11	13	15
U (V)	0	0,27	0,66	0,93	1,19	1,38	1,54	1,663	1,764
t (min)	17	19	21	23	25	27	27,6		
U (V)	1,833	1,881	1,921	1,985	2,033	2,093	2,106		

Nabíjecí charakteristika 140F Superkapacitoru



Obr.11 Nabíjecí charakteristika 140F SC.

Z naměřených hodnot vyplývá, že použití nabíječky s IO BQ24640 je výhodné použít pro superkapacitory s kapacitou v řádu desítek faradů. Superkapacitory s vyšší kapacitou lze taktéž nabíjet pomocí tohoto zařízení, ale nabíjecí čas se nepohybuje v řádu vteřin, ale minut. Například výkonový 140F superkapacitor jsem nabíjel 27 minut 40 vteřin. Takto dlouhá doba je dána nastavením nabíjecího proudu na 3A. Maximální nabíjecí proud, kterého lze dosáhnout překonfigurováním obvodu je 10A. Přenastavení pro změnu nabíjecího proudu nebylo provedeno.

Pro vybíjení superkapacitoru byla použita zátěž je formě výkonového odporu o hodnotě 2.7Ω . Doba vybíjení 4F Superkapacitoru z napětí 2.106V na 0V byla rovna 1 minutě a 7 vteřinám. 10F Superkapacitor se vybil z 2,106V na 0V za 1 minutu a 59 vteřin.

Dále byla zkoumána závislost rychlosti nabíjení superkapacitorů na výstupním napětí. Superkapacitor o hodnotě 4F jsem nabíjel výstupním napětí 8.1V a následně i napětím 2.3V. Z naměřených údajů vyplývá, že vliv výstupního napětí na nabití superkapacitoru nemá velký vliv, jelikož doba za kterou se nabil superkapacitor při výstupním napětí 8.1V byla 43 vteřin. Po následném překonfigurování nabíječky na výstupní napětí 2.3V byla nabíjecí doba 44 vteřin.

Závěr

Superkapacitory jsou v dnešní době velice využívané součástky. Jejich vývoj pokračuje ohromnou rychlostí a zdokonalování těchto součástek zdaleka není u svého konce. Za svoje dobré parametry vděčí ploše elektrod, které jsou tvořeny mikroskopickými uhlíkovými částicemi, které určují kapacitu součástky. Superkapacitory můžeme najít v široké škále úkonů. Pomalu, ale jistě nahrazují klasické zdroje jako jsou například klasické akumulátory. Z ekonomického hlediska pomáhají superkapacitory ušetřit nemalé množství peněz. Úspory se mohou vyšplhat až ke 40%. Zvláště pak v oborech jako je doprava atd.

Součástí bakalářské práce je fyzicky realizovaná nabíječka s IO BQ24640 od firmy Texas Instruments. Nabíječka hned od svého prvního zprovoznění fungovala podle předpokladů. V příloze jsou obrázky z návrhu DPS i obrázek výsledné nabíječky.

Po realizaci nabíječky bylo provedeno měření na předložených superkapacitorech. I přesto, že nabíječka byla konstruována pouze na nabíjecí proud 3A, byla rychlost nabíjení superkapacitorů s menším výkonem velice rychlá. U výkonových superkapacitorů (stovky farad) bylo nabíjení velice pomalé, ale přestavbou nabíječky je možné nabíjecí proud nastavit až na hodnotu 10A, která by si už poradila i s výkonovými superkapacitory velice obstojně.

Seznam použité literatury

- [1] TEXAS INSTRUMENTS. *BQ24640: High-Efficiency Synchronous Switch-Mode Super Capacitor Charger* [online]. march 2010. 2010 [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq24640.pdf>
- [2] Superkapacitory. *Maxwell Technologies* [online]. [cit. 2011-02-27]. Dostupný z WWW: <http://www.ecomcz.eu/novinky/maxwell_user_manual.pdf>.
- [3] [Http://maxwell.com](http://maxwell.com) [online]. 2009 [cit. 2011-02-04]. Product guide. Dostupné z WWW: <http://maxwell.com/docs/1014627_BOOSTCAP_PRODUCT_GUIDE.PDF>.
- [4] [Http://nesscap.com](http://nesscap.com) [online]. 2009 [cit. 2011-02-07]. Review of Ultracapacitor Technologies for Vehicle Applications. Dostupné z WWW: <http://nesscap.com/data_nesscap/Prof%20Burke-AABC%202001.PDF>.
- [5] Uhlíkové nanotrubičky. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 1.9.2009, last modified on 9.4.2011 [cit. 2011-05-04]. Dostupné z WWW: http://cs.wikipedia.org/wiki/Uhlíkové_nanotrubičky.
- [6] ING. MAREŠ, Jan, et al. Akumulace elektrické energie v superkapacitorech. *Akumulace elektrické energie* [online]. Únor 2011 [cit. 2011-05-04]. Dostupný z WWW: <<http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/42869.pdf>>.
- [7] Superkondenzátory : Elektrochemické kondenzátory. *Princip uchování el. náboje v elektrochemických kondenzátorech* [online]. 16. 08. 2010 [cit. 2011-03-06]. Dostupný z WWW: <<http://energie.tzb-info.cz/teorie-obnovitelna-energie/6710-superkondenzatory>>.
- [8] Maxwell Technologies : BOOSTCAP® Ultracapacitors. [online]. 2009 [cit. 2011-03-12]. WWW: <http://www.maxwell.com/docs/1014627_BOOSTCAP_PRODUCT_GUIDE.PDF>.

- [9] PANDOLFO, A.G. ; HOLLENKAMP, A.F. Carbon properties and their role in supercapacitors. [online]. 04.04.2006 [cit. 2011-03-27]. Dostupný z WWW: <http://www.demar.eel.usp.br/electronica/artigos/Carbon_in_supercapacitors.pdf>.
- [10.] Zásady a postupy při měření superkapacitorů od firmy Maxwell dostupné 15.5.2010 z <http://www.jelektronik.sk/produkty-databaza/4.Pas%EDvne%205%FA%E8iastky/supercapacitory%20maxwell.pdf>
- [11] *Http://tf.llu.lv* [online]. 2008 [cit. 2011-02-16]. THE APPLICATION OF SUPERCAPACITOR ENERGY STORAGE DEVICES IN DC DRIVE. Dostupné z WWW: <http://tf.llu.lv/conference/proceedings2008/Papers/14_Brazis.pdf>.
- [12] *Http://tf.llu.lv* [online]. 2009 [cit. 2011-02-22]. APPLICATION OF SUPERCAPACITOR ENERGY STORAGE DEVICES IN INDUCTION DRIVES. Dostupné z WWW: <http://tf.llu.lv/conference/proceedings2009/Papers/58_Viesturs_Brazis.pdf>.
- [13] Superkondenzátor – princip, vlastnosti, použití. *Automatizace.hw.cz : rady a poslední novinky z oboru* [online]. 26.12.2006 [cit. 2011-04-30]. Dostupný z WWW: <<http://automatizace.hw.cz/clanek/2006122601>>.
- [14] *Http://www.sumobrain.com* [online]. 2007 [cit. 2011-04-09]. Wind turbine system with AC servo motor rotor blade pitch control, using supercapacitor energy storage. Dostupné z WWW: <<http://www.sumobrain.com/patents/wipo/Wind-turbine-system-withac/WO2007132303A1.pdf>>.
- [15] Palivový článek. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 23.10.2005, last modified on 19.4.2011 [cit. 2011-04-30]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Palivový_článek>.
- [16] Dielektrika. [online]. 2009 [cit. 2011-02-27]. Dostupný z WWW: <<http://dielektrika.kvalitne.cz/historie.html>>.

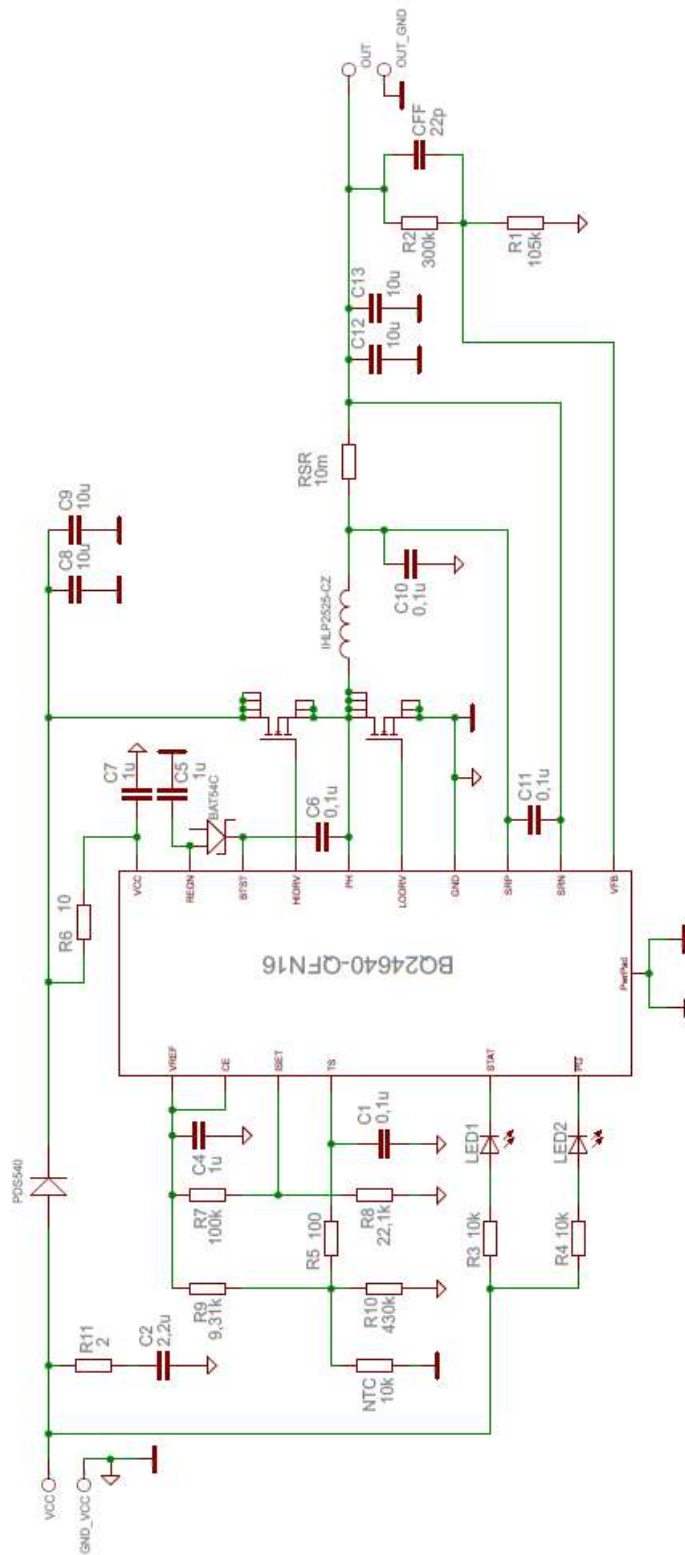
[17] SCHNEUWLY, Adrian; GALLAY, Roland. Properties and applications of supercapacitors : From the state of the art to future trends. [online]. [cit. 2011-03-05]. WWW: <<http://www.garmanage.com/atelier/root/public/Contacting/biblio.cache/PCIM2000.pdf>>.

[18] Stop – start systém. *Maxwell Technologies* [online]. 2011 [cit. 2011-04-17]. Dostupné z WWW: <<http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/industries/transportation.aspx>>.

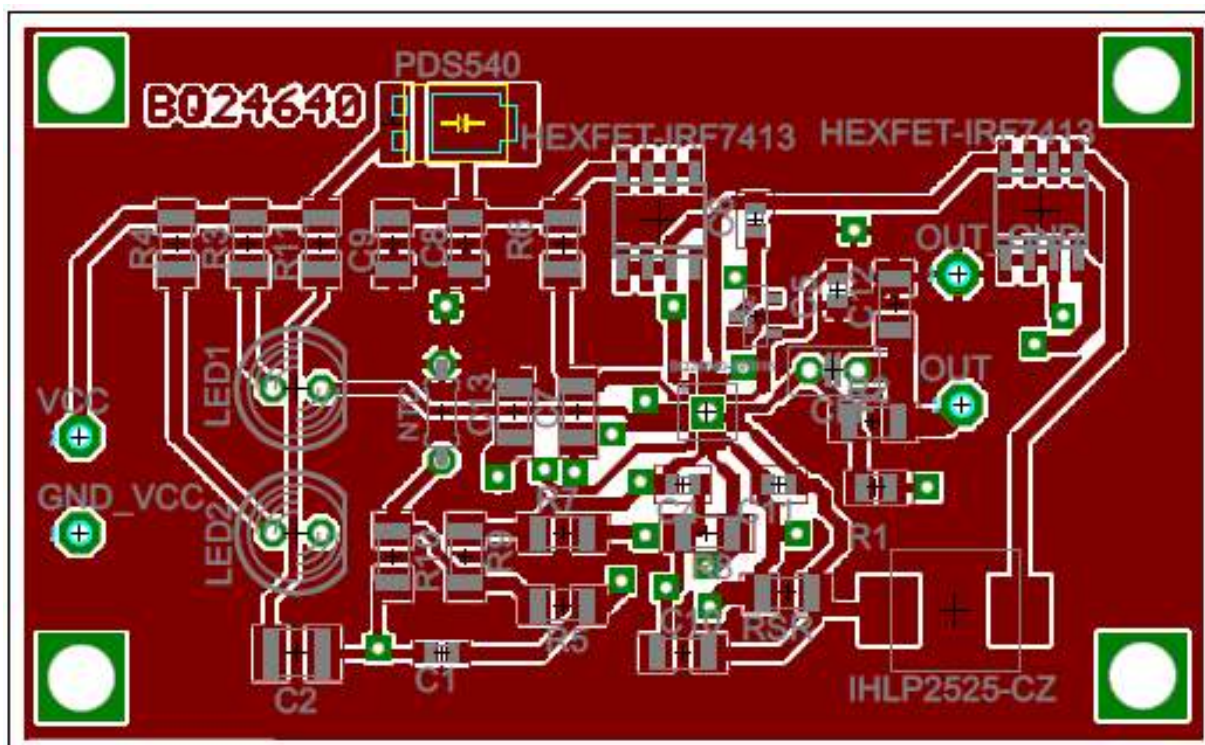
[19] Maxwell Backup Power. *Maxwell Technologies* [online]. 2011 [cit. 2011-04-25]. WWW: <http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/applications/backup_power.aspx>.

Přílohy

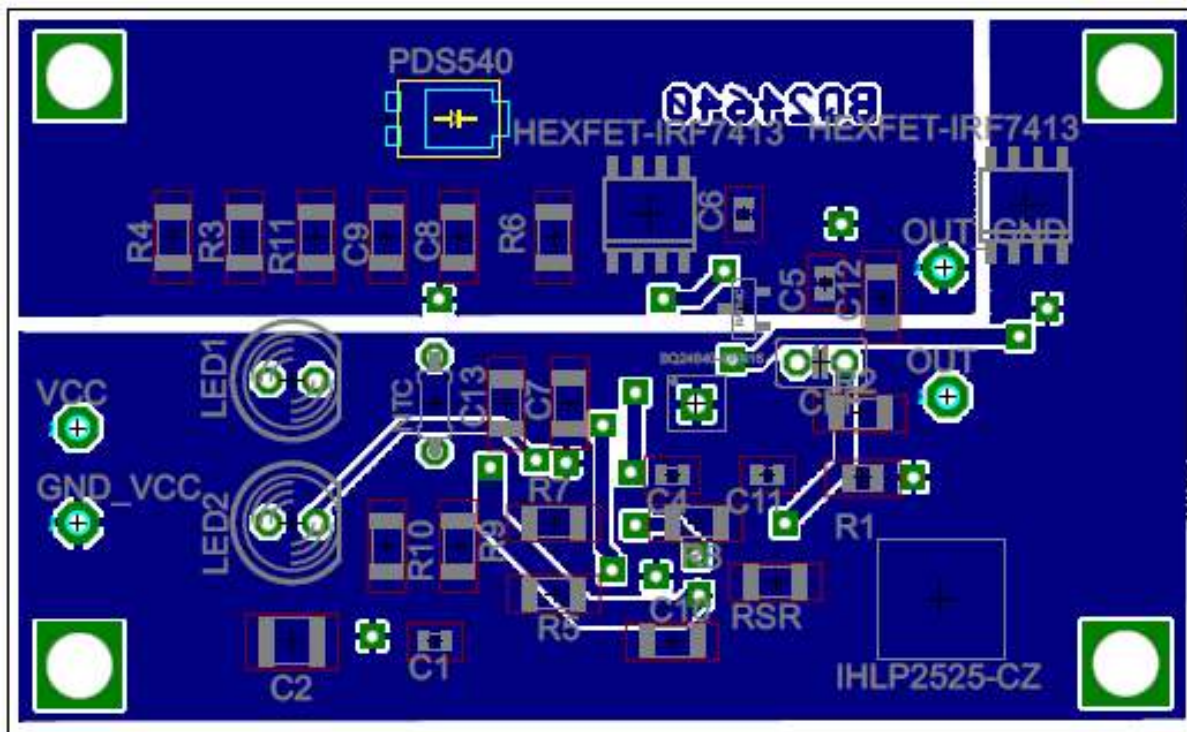
Realizace nabíječky v programu EAGLE



Obr.12 Schéma zapojení



Obr.13 DPS horní vrstva



Obr.14 DPS dolní vrstva

Evidenční list

Souhlasím s tím, aby moje bakalářská práce byla půjčována k prezenčnímu studiu v Univerzitní knihovně ZČU v Plzni.

Datum:

Podpis:

Uživatel stvrzuje svým čitelným podpisem, že tuto bakalářskou práci použil ke studijním účelům a prohlašuje, že ji uvede mezi použitými prameny.

Jméno	Fakulta/katedra	Datum	Podpis