

Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

Simulace a měření na obvodu pro sběr a uchování energie
Simulation and Measurement at Module for Energy Harvesting and
Storing

2015

Tomáš Čaňo

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

Zadání bakalářské práce

Student:

Tomáš Čaňo

Studijní program:

B2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

2612R041 Řídicí a informační systémy

Téma:

Simulace a měření na obvodu pro sběr a uchování energie
Simulation and Measurement at Module for Energy Harvesting
and Storing

Zásady pro vypracování:

1. Popis zdrojů energie v prostředí.
2. Popis možností sběru energie - měniče.
3. Popis možností uložení energie.
4. Návrh řešení celého systému (BQ25504).
5. Simulace navrženého řešení v TINA-TI.
6. Praktická aplikace na vývojovém kitu.
7. Testování a měření na vývojovém kitu.
8. Zhodnocení dosažených výsledků práce.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] PRAUZEK, M., P. MUSILEK, A.G. WATTS a M. Michalikova. Powering environmental monitoring systems in arctic regions: A simulation study. In: *Elektronika ir Elektrotechnika*. 2014, vol.20, no.7, p.34-37. ISSN 1392-1215. DOI: <http://dx.doi.org/10.5755/j01.eee.20.7.8020>.
- [2] WATTS, A.G., P. MUSILEK a L. WYARD-SCOTT. Managing the energy-for-data Exchange in remote monitoring systems. In: *2013 IEEE Electrical Power and Energy Conference, EPEC 2013*. Halifax: IEEE, 2013. ISBN 978-1-4799-0105-0. DOI: 10.1109/EPEC.2013.6802941.
- [3] TEXAS INSTRUMENTS. *BQ25504 datasheet*. [s.l.]:Texas Instruments, c2014.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Michal Prauzek, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015



doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Veškeré použité podklady, ze kterých jsem čerpal informace, jsou uvedeny v seznamu použité literatury a citovány v textu podle normy ČSN ISO 690.

V Ostravě dne 7.5.2015


.....
Podpis

Poděkování

Děkuji Ing. Michal Prauzek, Ph.D. za odborné vedení práce, věcné připomínky, dobré rady a vstřícnost při konzultacích a vypracování bakalářské práce.

Abstrakt

Tato bakalářská práce je zaměřena na metody získávání elektrické energie z okolního prostředí „Energy harvesting“. V práci jsou popsány jednotlivé možnosti sběru energie, a také možnosti jejího ukládání do paměťových prvků. Pro sběr a uchování energie slouží vývojový kit s integrovaným obvodem BQ25504. K integrovanému obvodu je jako zdroj energie připojen solární článek, a pro její uchování jsou použity kondenzátory. Hlavní vlastností tohoto řešení je jeho energetická soběstačnost a vysoká účinnost. Proto se dají solární články použít i za slabého osvětlení. Cílem bakalářské práce je pro zvolené zapojení provést návrh, kde jsou počítány jednotlivé prahové hodnoty pro správnou funkci IO. Na navrženém řešení integrovaného obvodu, bude provedena simulace a měření. Pomocí osciloskopů se změří průběhy nabíjení a vybíjení kondenzátorů, tyto průběhy budou analyzovány v textové části bakalářské práce.

Klíčová slova

BQ25504, Energy harvesting, WSN, měnič, solární energie, fotovoltaický článek, kondenzátor, superkondenzátor

Abstract

This thesis is focused on methods of obtaining electrical energy from the environment, "Energy harvesting". The paper describes the various possibilities energy harvesting, and also the possibility of storing in the memory elements. For collecting and storing energy used development kit with integrated circuit BQ25504. For integrated circuit is connected solar cell as a power source and for energy storage are used capacitors. The main feature of this solution is its energy self-sufficiency and high efficiency. Therefore, the solar cells can be used in low light. The aim of the thesis is design solutions, which are calculated by the individual thresholds for correct function. On the proposed solution integrated circuit will be a simulation and measurement. An oscilloscope is measured during charging and discharging capacitors, these waveforms will be analyzed in the text of thesis.

Keywords

BQ25504, Energy harvesting, WSN, converter, solar energy, photovoltaic cell, capacitor, supercapacitor

Seznam použitých symbolů a zkratek

Zkratka	Popis	Jednotka
AC	střídavý proud	
BAT	pin pro připojení úložného prvku	
C3	úložný kondenzátor	[F]
DC	stejnoseměrný proud	
EDLC	superkondenzátor	
FV	fotovoltaický	
IO	integrováný obvod	
LED	luminiscenční dioda	
MEMS	mikro elektrické mechanické systémy	
MPPT	sledování maximálního bodu výkonu	
PMOS	unipolární tranzistor mezi VBAT a VSTOR	
PFM	pulsně frekvenční modulace	
R_{OC1}, R_{OC2}	odpory pro MPPT	
$R_{OK1}, R_{OK2}, R_{OK3}$	odpory pro provozní rozsah V_{BAT_OK}	[Ω]
R_{OV1}, R_{OV2}	odpory pro prahovou hodnotu V_{BAT_OV}	[Ω]
R_{SUM_OC}	součet odporů pro MPPT	[Ω]
R_{SUM_OK}	součet odporů pro provozní rozsah V_{BAT_OK}	[Ω]
R_{SUM_OV}	součet odporů pro prahovou hodnotu V_{BAT_OV}	[Ω]
R_{SUM_UV}	součet odporů pro prahovou hodnotu V_{BAT_UV}	[Ω]
R_{UV1}, R_{UV2}	odpory pro prahovou hodnotu V_{BAT_UV}	[Ω]
VSTOR	pin IO BQ25504 pro připojení zátěže	
TEG	termoelektrický generátor	
VBAT	pin pro připojení baterie	[V]
V_{BAT_OK}	napětí provozního rozsahu	[V]
$V_{BAT_OK_HYST}$	napětí provozního rozsahu, při růstu	[V]
$V_{BAT_OK_PROG}$	napětí provozního rozsahu, při poklesu	[V]
V_{BAT_OV}	přepět'ová prahová hodnota	[V]
V_{BAT_UV}	podnapět'ová prahová hodnota	[V]
V_{BIAS}	uzlové referenční napětí	[V]
V_{IN_DC}	vstupní napětí	[V]
V_{REF_SAMP}	referenční snímkovací napětí pro MPPT	[V]
V_{STOR_CHGEN}	hodnota přechodu mezi studeným startem a hlavním nabíjecím režimem (1,8 V)	[V]
WSN	senzorické bezdrátové síť	

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Teoretická část.....	2
2.1	Energy harvesting.....	2
2.2	Popis zdrojů energie.....	2
2.2.1	Solární	2
	Fotovoltaický článek	3
2.2.2	Tepelná energie	4
2.2.3	Vibrační energie	4
2.2.4	Lidská energie	5
2.3	Elektrochemické zdroje energie	6
2.3.1	Primární články	6
2.3.2	Sekundární články	6
2.3.3	Palivové články	7
2.4	Popis možností uložení energie.....	7
2.4.1	Superkondenzátory.....	8
2.4.2	NiMH	8
2.4.3	Li-Ion.....	9
2.4.4	Olověné akumulátory	10
3	Funkce a návrh integrovaného obvodu	11
3.1	BQ225504	11
3.2	Zamýšlený provoz.....	11
3.3	Funkční režimy.....	12
3.3.1	Studený start.....	13
3.3.2	Hlavní zesilující režim	13
3.4	MPPT	14
	Návrh referenčního napětí V_{REF_SAMP} :	14
3.5	Správa baterie.....	15

3.5.1	Podnapět'ová ochrana baterie	16
	Návrh prahové hodnoty V_{BAT_UV} :	16
3.5.2	Přepět'ová ochrana baterie.....	17
	Návrh prahové hodnoty V_{BAT_OV} :	17
3.5.3	Napětí baterie v provozním rozsahu V_{BAT_OK}	18
4	Simulace.....	19
4.1	Simulovaný průběh nabíjení se solárním článkem.....	19
4.2	Simulovaný průběh nabíjení s napět'ovým zdrojem.....	21
5	Měření	22
5.1	Nabíjení kondenzátoru solárním článkem.....	23
5.2	Nabíjení kondenzátoru napět'ovým zdrojem.....	24
5.3	Průběh vybíjení připojením zátěže	25
6	Závěr	27
7	Použitá literatura	28
	Seznam příloh:	30

1 Úvod

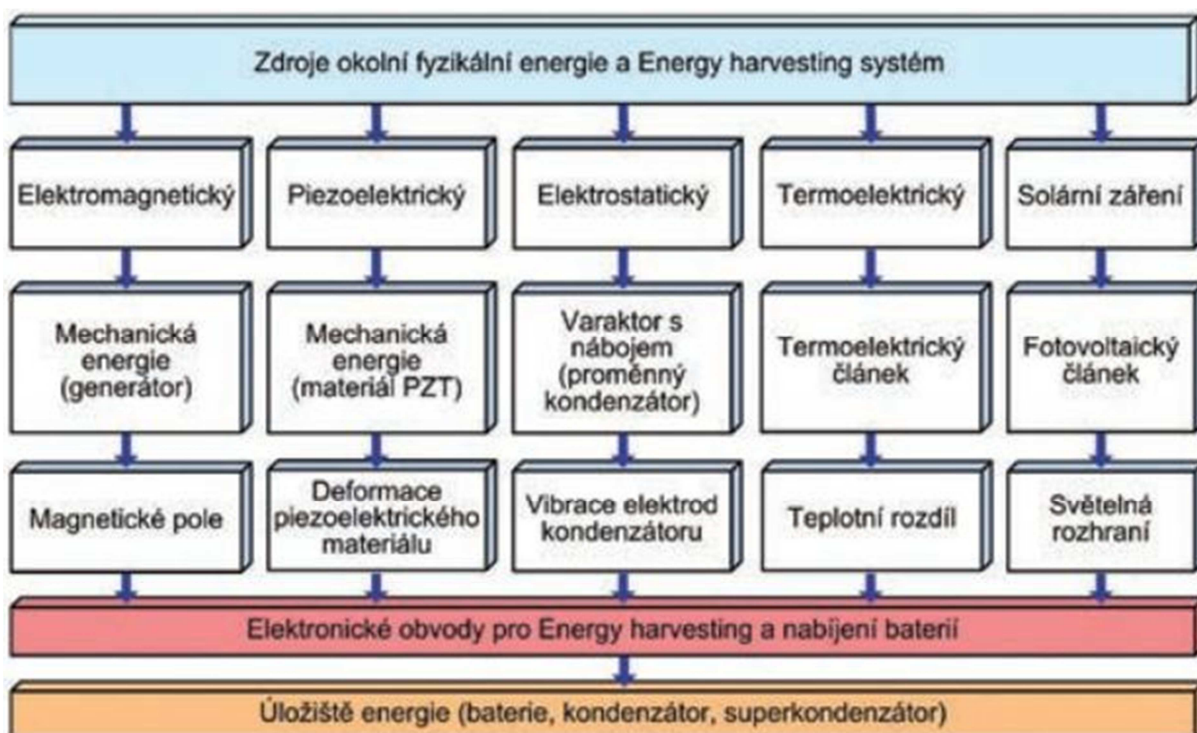
V dnešní době jsou přístroje stále menší a potřebují malé množství energie. Přístroje se také snaží získat nezávislost na elektrické rozvodné síti. Energie pro napájení může být velice efektivně získávána z okolních vlivů prostředí. Zdrojem energie z okolního prostředí může být solární, tepelná vibrační nebo také lidská energie. Energy harvesting, česky získávání energie umožňuje právě sběr energie, a její použití pro elektronická zařízení. Pokud je nahromaděný dostatek energie, je zařízení elektricky soběstačné.

Cílem bakalářské práce je seznámit s možnostmi získávání energie Energy Harvesting a její uložení do paměťových prvků jako akumulátory nebo kondenzátory. Navrhnout řešení pro integrovaný obvod BQ25504. Pro navržené řešení bude provedena simulace pomocí simulačního softwaru, k získání převodní analýzy. Simulováno bude nabíjení kondenzátorů pomocí solárních článků a napěťového zdroje. Po simulaci daného zapojení se na upraveném vývojovém kitu s BQ25504, provede měření průběhů nabíjení a vybíjení kondenzátorů pomocí osciloskopů. Pomocí simulace a měření budou ověřeny jednotlivé funkce integrovaného obvodu BQ25504 a správnost navrženého řešení.

2 Teoretická část

2.1 Energy harvesting

Pojem energy harvesting můžeme volně přeložit jako získávání energie, ovšem v praxi se používá anglický výraz. Zpravidla takto označujeme techniky získávání malého množství energie ze zdrojů, jako je okolní teplota, vibrace, nebo proudění vzduchu. V praxi je toho využíváno zejména u mobilních zařízení, u kterých je nutné zajištění bezdrátového přísunu energie. Takto získané množství energie je relativně malé, proto tímto způsobem můžeme napájet pouze nízkopříkonová zařízení. [1]



Obr. 1: Obecný přehled Energy harvesting systémů. [1]

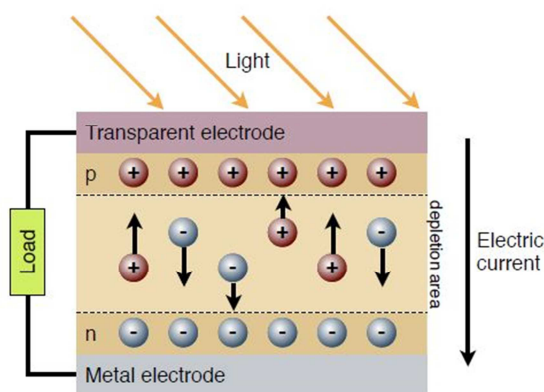
2.2 Popis zdrojů energie

2.2.1 Solární

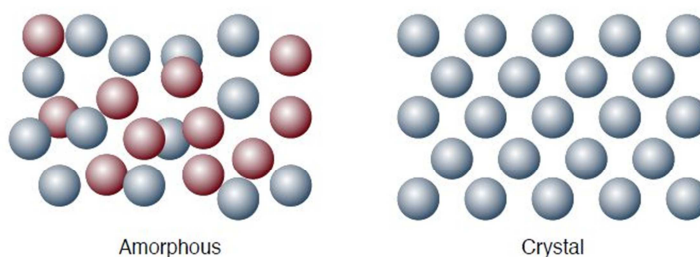
V současné době se jedná pravděpodobně o nejvíce využívanou energii pro výrobu elektrické energie typu Energy harvesting. Využívají se fotovoltaické články 3D Si struktury, které zvyšují efektivitu. Realizované elektronické systémy s plně kompatibilními obvody se současnými technologiemi výroby integrovaných obvodů, umožňují získání vyšších elektrických výkonů v porovnání s ostatními zdroji Energy harvesting. Výstupní výkon je i v tomto případě silně závislý na podmínkách prostředí a je prakticky vždy silně kolísavý. [1]

Fotovoltaický článek

Křemíkový solární článek se vyznačuje tím, že generuje energii v důsledku polovodičového jevu. Když světlo narazí na křemík (Obr. 2), reaguje s ním a vytváří pozitivní a negativní náboj, reprezentující díry (pozitivní) a elektrony (negativní). [2]



Obr. 2: Struktura křemíkového článku. [2]



Obr. 3: Rozmístění atomů různých typů křemíkových článků. [2]

Různé dopované křemíkové sekce, představují tzv. p-n přechody; po generaci se náboje začnou pohybovat k příslušnému přechodu. Pohyb děr směřuje k p-oblasti a pohyb elektronů směřuje k n-oblasti. Tento pohyb vytváří prázdný prostor ve středu, který vede k rozdílu napětí na kovových elektrodách. Následně, pokud je k článku je připojena zátěž, pohyb elektronů uvnitř zátěže generuje elektrický proud. [2]

Solární články jsou klasifikovány v závislosti na materiálu použitého při výrobního procesu, jako je například: mono-krytalický křemíku (c-Si), poly-krytalický křemík nebo amorfni křemík (a-Si). Na rozdíl od krystalu křemíku, kde jsou atomy uvnitř umístěny ve strukturovaném uspořádání, v amorfni uspořádání jsou atomy rozptýleny (Obr. 3). Dalším důležitým rozdílem mezi a-Si a Si-C články je, že mají jinou spektrální citlivost, pokud jde o absorbované světlo. Sluneční světlo a zářivka mají velmi odlišná svítící spektra. Také citlivost se hodně mění podle snímáčího

zařízení. a-Si články jsou vhodné jak pro vnitřní použití (fluorescenční světlo) tak pro venkovní (sluneční světlo), zatímco c-Si představují nižší citlivost v rozsahu vlnových délek. [2]

Křemíkové články, vykazují chování typické diodám, podobně jako ony, mají články také podobné napětí naprázdno okolo 0,7 V. Z tohoto důvodu, aby bylo dosaženo vyšších napětí, jsou články umístěny v sérii. Je-li smyslem dosáhnout vyššího výstupního proudu, články jsou umístěny paralelně. U venkovních FV panelů se používají hybridní řešení, aby se dosáhlo jak vysokého napětí, tak vysokého proudu, aby bylo možné produkovat více energie. U vnitřních řešení v důsledku omezeného prostoru, jsou buňky obvykle umístěny do série pro vytvoření napěťové úrovně pro provoz digitálních obvodů. [2]

2.2.2 Tepelná energie

Sběr tepelné energie je založen na principu nalezení teplotního rozdílu. Teplotní rozdíly mohou být využity ke sběru elektrické energie pomocí termoelektrického generátoru (TEG). TEG vytváří elektrickou energii, pokud je umístěn mezi teplý a studený tepelným zdrojem. Vzniká zde tepelný tok z teplé do studené strany. Tento tepelný tok tvoří pohyb elektronů mezi TEG, vytvářející elektrické napětí, které může být uloženo. Sběr tepelné energie spočívá v Peltierově článku, chladiči, tepelném spojení, a modulu pro úpravu energie tak, aby odpovídal výstup sběrače se systémovým vstupem. Peltierův článek se skládá z několika p a n přechodů v sérii (také nazývaný termočlánek); dosažením teplotního rozdílu, dojde k difúzi nosičů náboje z horké strany směrem k chladnější straně. To nutí elektrony (negativní) a díry (pozitivní), vytvářet proud, který generuje napětí na svorkách termočlánku. Tento proces se nazývá Seebeckův jev. Výstupní výkon z TEG je úměrný teplotnímu rozdílu. [2]

2.2.3 Vibrační energie

Vibrační sběr energie, lze použít kdekoli kde je pohyb. Vibrace jsou obzvláště v dopravním průmyslu a průmyslové výrobě. Existují tři typy mechanismů: piezoelektrický, elektromagnetický a elektrostatický. [2]

- **Piezoelektrický** - K přeměně mechanické energie na elektrickou se využívá piezoelektrických vlastností vhodných materiálů (PZT, polymery apod.). Oscilační systém může mít různé tvary, typicky se jedná o strukturu vetknutého nosníku, kde na jeho konci je umístěna setrvačná hmota způsobující ohýbání nosníku, při působení mechanické energie. Vytvořené napětí na polepech piezoelektrického materiálu je časově proměnné, a amplituda se mění úměrně velikosti působení mechanické energie. Piezoelektrický princip přeměny mechanické energie na elektrickou vytváří relativně vyšší napětí a větší hustotu energie, než je dosaženo u elektromagnetického systému. [1]

- **Elektromagnetický** - Cívka připojená k oscilační hmotě se pohybuje v magnetickém poli vytvořeném pevným magnetem. Na cívce procházející magnetickým polem se podle Faradayova

zákona indukuje napětí, které je však ve své podstatě malé. Nicméně každý z těchto parametrů má svá omezení daná velikostí mikročipu, materiálovými vlastnostmi nebo konstrukcí. [1]

- **Elektrostatický** - Metoda využívá proměnnou kapacitu kondenzátoru způsobenou změnou geometrie desek (elektrod), působením mechanických otřesů. Velkou výhodou této metody je kompatibilita s technologiemi výroby integrovaných obvodů. MEMS proměnné kondenzátory mají velmi malé ztráty, jsou dnes dosti dobře výrobně dostupné a jsou schopné generovat vyšší úroveň výstupního napětí se střední hustotou výkonu, v porovnání s elektromagnetickými metodami. [1]

Hlavní překážkou je výstupní proud, kvůli jejich vibračním vlastnostem. Proud je střídavý (AC), z tohoto důvodu musí být do obvodu usměrňovač integrován usměrňovač, aby jej mohl převést na stejnosměrný proud (DC). Kromě toho, všechny vibrační systémy mají specifickou rezonanční frekvenci, při které AC kmitá, na této frekvenci je maximální výkon, v případě že nefunguje na této konkrétní frekvenci, generovaná energie bude velmi nízká. V důsledku toho musí usměrňovač pracovat na rezonančním kmitočtu v oblasti AC. [2]

2.2.4 Lidská energie

Lidské tělo produkuje velké množství energie, každý den v různých formách. V současné době existuje několik výzkumů, které se snaží vytvořit systém schopný sbírat energii z tohoto typu zdroje.

Hlavně lidské tělo vytváří pasivně dva druhy energií: tepelnou a kinetickou, například získáním energie při dopadu chodidla na podrážku. Nicméně jdou použít různé možnosti, včetně využívání energie z dýchání, krevního tlaku, exhalace, pohybu ramen nebo pohybu prstu. Problémy v těchto případech jsou, jak nejučinnějším způsobem sbírat energii ze zdroje, aby se zabránilo nepříjemnému nošení invazivních sond, nebo aby nedošlo ke změně životního chování. Nejběžnější způsob, jak to udělat, je vytvořit některé druhy "chytrého" oblečení. Například převedením bavlněného trička do textilie z aktivního uhlí, pro skladování energie. Po takovéto úpravě textilie získává vysoce vodivé a flexibilní vlastnosti, což umožňuje ideální provedení superkondenzátoru. Tento úspěch otevře cestu k novému sběru energie, s cílem využít odpadní energii lidského těla pro napájení elektrických zařízení. [2]

Je třeba mít na paměti, že lidské tělo není schopné generovat energii pouze pasivně, ale i aktivně. Ve skutečnosti ji lidé mohou produkovat také jinými způsoby, které nezahrnují nošení tohoto typu oblečení. Například při otevírání a zavírání dveří, při jízdě na kole nebo při mačkání tlačítek na klávesnici počítače. [2]

Tab. 1. Výkonová hustota jednotlivých energetických zdrojů. [8]

Energetický zdroj	Výkonová hustota
Solární (venku)	$1,5 \cdot 10^{-2} \text{ W/cm}^2$
Solární (uvnitř)	$1,0 \cdot 10^{-5} \text{ W/cm}^2$
Teplota (10 °C gradient)	$4,0 \cdot 10^{-5} \text{ W/cm}^3$
Vibrace	$2,0 \cdot 10^{-4} \text{ W/cm}^3$
Lidská energie	$9,6 \cdot 10^{-4} \text{ W/cm}^3$

2.3 Elektrochemické zdroje energie

Elektrochemické zdroje proudu dělíme do tří skupin. První skupinu tvoří primární články, druhou články sekundární neboli akumulátory a třetí články palivové. [7]

2.3.1 Primární články

Jsou to články, které mají omezené množství reaktanů. Vybitím článků se reaktany spotřebují na produkty, které nelze nabíjením, tj. vnějším elektrickým proudem, znovu převést na původní reaktany. Jde tedy o články na jedno vybití. Hovorově se nazývají baterie. [7]

Nejběžnějšími primárními články jsou články s burelovou (MnO_2) katodou a zinkovou anodou. Je-li v nich solný elektrolyt (vodný roztok chloridů amonného, zinečnatého a někdy vápenatého), nazývají se podle jejich vynálezce Lelanchéovy články. Obsahují-li alkalický elektrolyt (roztok KOH), hovoří se o alkalických burelových člancích. Ty lze případně i nabíjet, přesněji řečeno dobíjet, jsou-li vybity jen částečně; jsou tedy současně články sekundární. Podobně je tomu i s články stříbrozinkovými či rtuťovými. Slouží však převážně jako články primární. Primární články vzduch-zinek pracují s alkalickým elektrolytem. Jejich katodou – oxidačním činidlem je vzdušný kyslík. [7]

2.3.2 Sekundární články

Tyto články mají stejně jako články primární omezené množství reaktanů. Reakční produkty vzniklé vybíjením lze však znovu převést elektrickým proudem z vnějšku na původní aktivní reaktanty, jsou to tedy články na více vybití. Elektrická energie používaná k nabití článku se v článku akumuluje ve formě chemické energie, odtud označení. Jelikož napětí jednoho článku je malé (běžně 1,2 až 2 V – podle typu akumulátoru), sestavují se ze článků akumulátorové baterie. Podle elektrolytu se tyto články dělí na akumulátory kyselé (olověné), alkalické (Ni-Cd, Ni-Fe, Ni-Zn, Ni-MH, Ag-Zn). [7]

Většina akumulátorů je schopna snést až stovky či tisíce nabití a vybití. Počet cyklů nabíjecích cyklů (tj. životnost udávaná v cyklech) je jedním z parametrů charakterizujících daný akumulátor. [7]

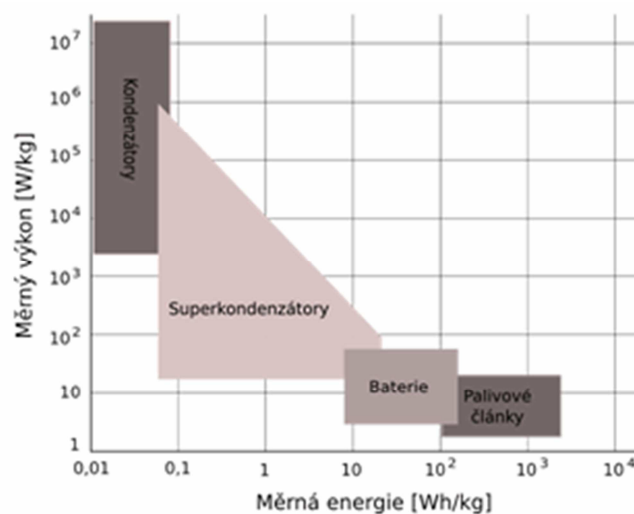
2.3.3 Palivové články

Název těchto článků je odvozen od skutečnosti, že v nich probíhá tzv. studené spalování paliva za tvorby elektrického proudu. Pro funkci palivových článků musí být splněny dvě základní podmínky: palivo i okysličovadlo jsou kontinuálně a přitom odděleně přiváděny k elektrodám a reakční zplodiny jsou kontinuálně z článku odváděny. Články se tedy pouze „vybíjejí“ a fungují, je-li zajištěn přívod paliva a okysličovadla do článku. [7]

Jako palivo v palivových člancích lze použít vodík, formaldehyd, amoniak, oxid uhelnatý, zemní plyn, metan, metanol, etanol a kyselinu mravenčí, oxidační činidly může být buď čistý kyslík, vzduch a peroxid vodíku. Elektrolytem mohou být vodné roztoky hydroxidu draselného (KOH) nebo kyseliny sírové (H₂SO₄) nebo fosforečné (H₃PO₄), dále iontoměničové membrány, roztavené uhličitany nebo tuhé oxidační keramiky. [7]

Elektrody palivových článků jsou inertní, na nich probíhají příslušné elektrodové reakce. Průběh reakcí se urychluje pomocí katalyzátorů (nejčastěji jsou jimi platina či patinové kovy). [7]

2.4 Popis možností uložení energie



Obr. 4: Energetická bilance prvků. [5]

2.4.1 Superkondenzátory

Superkondenzátory (*Obr. 5*), je možno rozdělit dle způsobu ukládání náboje do dvou základních skupin. První skupinou jsou pseudokondenzátory využívající vratných oxidačně-redukčních reakcí na povrchu elektrody. Elektrická energie je uložena chemicky, způsobem uchovávání energie jsou blízké akumulátorům. Druhou kategorií jsou tzv. EDLC (Electric Double Layer Capacitor) pracující na principu elektrochemické dvojvrstvy, tedy nedochází k žádným chemickým reakcím. Náboj je zde vázán k elektrodám pouze elektrostatickou silou. [5]

Náboj, který mohou zachytit klasické kondenzátory je relativně malý a pro dlouhodobější skladování energie mají jen malý význam. Superkondenzátory, někdy označované jako ultrakondenzátory nebo též elektrochemické kondenzátory dosahují běžně kapacit v pásmu jednotek až tisíců Faradů, a tak se již v tomto směru trochu blíží akumulátorům. Zvýšení měrné kapacity o mnoho řádů je dáno jejich principem, který je založen na využití vlastností elektrické dvouvrstvy[6]. Velice rychle se vybíjí a nabíjí. Superkondenzátory mají vysoký životní cyklus a mohou operovat v širokém rozsahu teplot bez významných ztrát kapacity. Velkým problémem oproti sekundárním článkům je jejich samovybíjení přibližně 5% za den. [8]



Obr. 5: Struktura superkondenzátoru. [6]

2.4.2 NiMH

NiMH baterie byly do komerčního použití zavedeny kolem roku 1995, nikl kadmium (NiCd) baterie byly zavedeny kolem roku 1915. Ve srovnání s olověnými akumulátory, baterie na bázi niklu, mají vyšší výkonovou hustotu, mírně vyšší energetickou hustotu a počet cyklů je vyšší; Je k dispozici mnoho konstrukčních tvarů. [4]

Z technického hlediska, NiCd akumulátory jsou velmi úspěšný produkt; Zejména to jsou jediné baterie schopné fungovat dobře i při nízkých teplotách v rozmezí od -20°C do -40°C . Velké bateriové systémy používají ventilované NiCd akumulátory, které pracují na obdobném rozsahu jako olověné baterie. Nicméně, vzhledem k toxicitě kadmia, jsou tyto baterie v současné době v Evropě používány pouze pro stacionární použití. [4]

NiMH baterie nahradily NiCd baterie. Ve skutečnosti, NiMH baterie mají všechny pozitivní vlastnosti NiCd akumulátorů, s výjimkou maximální nominální kapacity, která je stále ještě desetkrát menší ve srovnání s NiCd a olověnými akumulátory. Kromě toho, NiMH baterie mají mnohem vyšší energetickou hustotu. V přenosných a mobilních aplikacích byly uzavřené NiMH akumulátory rozsáhle nahrazeny lithiium iontovými bateriemi. Na druhé straně, hybridní vozidla dostupné na současném trhu pracují téměř výhradně s hermeticky uzavřenými baterie NiMH, protože jsou robustnější a mnohem bezpečnější, než lithiium-iontové baterie. NiMH baterie v současné době stojí zhruba stejně jako lithiium iontové baterie. [4]

2.4.3 Li-Ion

Lithiium-iontové baterie (*Obr. 6*) se staly nejdůležitější skladovací technologií v oblasti přenosných a mobilních aplikací (např notebook, mobilní telefon, elektrické kolo, auto na elektrický pohon). Vysoké napětí článků až do 3,7 nominálního napětí znamená, že počet článků v sérii s tím vhodným zapojení a elektronikou může být snížen pro získání cílového napětí. Například, jeden Li-Ion článek může nahradit tři NiCd nebo NiMH články, které mají napětí článků pouhých 1,2 voltů. Další výhodou lithiium-iontových baterií je jejich vysoká měrná hmotnost, a vyhlídka na velkých snížení nákladů přes sériovou výrobu. I když Li-ion baterie mají podíl více než 50% v malých přenosných zařízeních na trhu, stále ještě existují některé výzvy pro rozvoj ve větším měřítku Li-ion baterií. Hlavní překážkou je vysoká cena, díky speciálním obalům a vnitřnímu obvodu na ochranu před přebitím. Lithiium-iontové akumulátory mají obvykle velmi vysokou účinnost, typicky v rozmezí 95% - 98%. Téměř jakýkoliv vybíjecí čas od několika sekund až týdnů může být realizován, což z ní dělá velmi flexibilní a univerzální technologie. Li-ion baterie jsou stále velmi drahé. [4]

Bezpečnost je vážný problém u lithiium-iontových akumulátorů. Většina z elektrod oxidu kovu jsou tepelně nestálé a mohou se rozkládat při zvýšených teplotách, uvolňují kyslík, který může způsobit vybuchnutí. Pro minimalizaci tohoto rizika, lithiium-iontové baterie jsou vybaveny monitorovací jednotkou, aby se zabránilo nadměrnému nabití a vybití. Obvykle napěťový balanční obvod je nainstalován také k sledování napěťové úrovně každého jednotlivého článku a zabraňuje vzniku napěťové odchylky mezi nimi. Lithiium-iontová baterie technologie se stále vyvíjí, a je zde značný potenciál pro další pokrok. Výzkum je zaměřen na vývoj katodových materiálů. [4]



Obr. 6: Li-Ion akumulátor. [11]

2.4.4 Olověné akumulátory

Olověné baterie jsou světově nejrozšířenějším typem baterií a byly komerčně nasazeny asi od roku 1890. Olověné bateriové systémy se používají v mobilních i stacionárních aplikacích. Jejich typické aplikace jsou nouzové napájecí systémy, ostrovní systémy s fotovoltaickými panely nebo jako startovací baterie ve vozidlech. Stacionární olověné akumulátory musí splňovat mnohem větší nároky na kvalitu produktů, než startovací baterie. Typická životnost je 6-15 let s 1 500 nabíjecích cyklů při 80% hloubce vybití, a dosahují účinnosti cyklů přibližně 80% až 90%. Nevýhodou olověných baterií je snížení použitelné kapacity, pokud jsou rychle vybity. Například, pokud je baterie vybitá za hodinu, je k dispozici asi pouze 50% až 70% jmenovité kapacity. Další nevýhody jsou nižší výkonová hustota a používání olova. Výhodou je příznivý poměr cena / výkon, snadná recyklovatelnost a jednoduchá technologie nabíjení.[4]

Tab. 2. Parametry úložných prvků. [8]

Baterie	Specifická energie [Wh/kg]	Teplotní rozsah [°C]	Nabíjecích cyklů [-]
Olověná	30 až 50	-20 až +60	$5 \cdot 10^2$ až 10^3
NiCd	50 až 60	-40 až +60	10^3 až $2 \cdot 10^3$
NiMHd	60 až 70	-20 až +60	10^3 až $2 \cdot 10^3$
Li-Ion	75 až 200	-20 až +60	10^3 až 10^4
Superkondenzátor	5 až 15	-55 až +85	10^4 až 10^6

3 Funkce a návrh integrovaného obvodu

3.1 BQ225504

BQ225504 je první z nové řady inteligentních integrovaných energy harvesting Nano-Power management řešení, které jsou velmi vhodné pro splnění zvláštních potřeb aplikací ultra malého výkonu. Tento výrobek je speciálně navržen k efektivnímu získávání a řízení energie několik mikrowattů (μW) až mW generovaných z různých stejnosměrných zdrojů, jako jsou fotovoltaické (solární) nebo tepelně elektrické generátory. BQ225504 je první zařízení svého druhu k realizaci vysoce efektivního zesilujícího měniče / nabíječe cíleného na produkty a systémy, jako jsou například bezdrátové senzorové sítě (WSN), které mají přísné výkonové a provozní požadavky. DC-DC zesilující měnič / nabíječ, vyžaduje ke svému provozu pouze několik málo mikrowattů výkonu. [9]



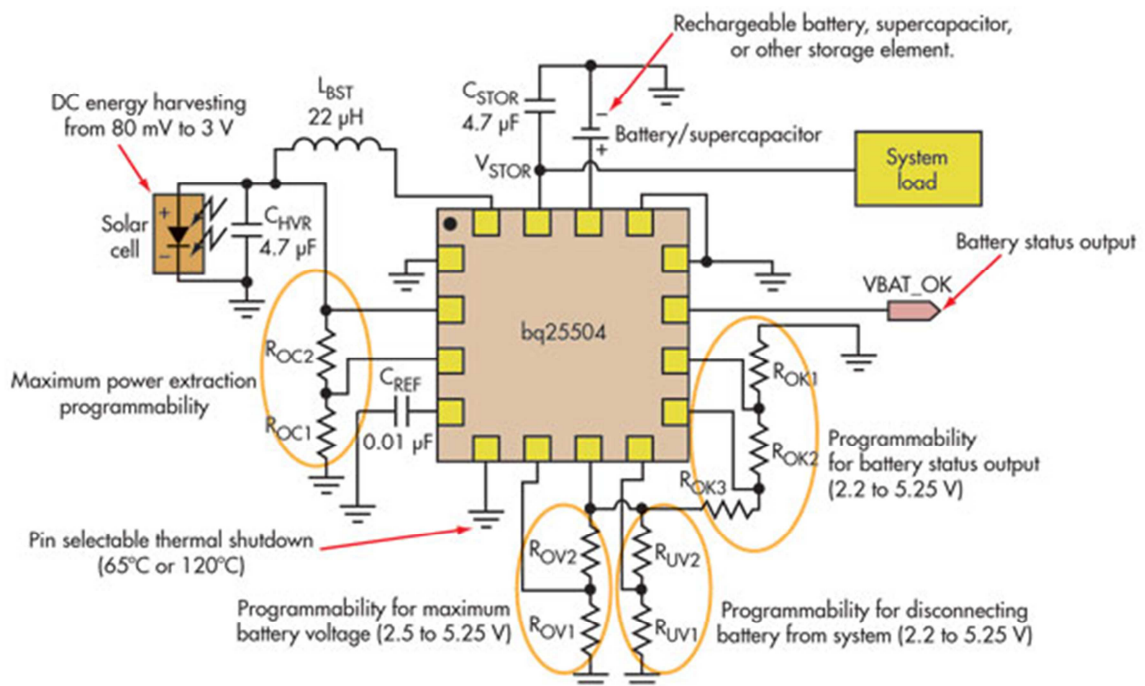
Obr. 7: Vývojový kit s BQ225504

3.2 Zamýšlený provoz

Prioritou BQ225504 je nabíjet kondenzátor C_{STOR} a pak napájet dodatečné vnitřní obvody z V_{STOR} . V přílohách na předposlední straně je přiloženo blokové vnitřní schéma BQ225504 (viz Příloha E). Je-li připojen paměťový prvek, BQ225504 se nejprve pokusí dobít C_{STOR} z paměťového prvku sepnutím vnitřního PFET tranzistoru mezi piny V_{STOR} a V_{BAT} na cca 45ms. Pokud je systémová zátěž vázána na V_{STOR} , zabráňuje paměťovému prvku nabíjení V_{STOR} mezi 45ms, je doporučeno přidat externí PFET mezi systémovou zátěž a V_{STOR} . Invertovaný $V_{\text{BAT_OK}}$ signál může být použit k řízení hradla na PFET tranzistoru. Jakmile napětí na pinu V_{STOR} dosáhne uživatelem nastavené hodnoty podprahového napětí $V_{\text{BAT_UV}}$, vnitřní PFET zůstane sepnut a zesilující měnič / nabíječ začne nabíjet úložný prvek, pokud je k dispozici dostatek napětí na pinu $V_{\text{IN_DC}}$.

Pokud napětí na VSTOR nedosáhne V_{BAT_UV} do 45 ms, pak se PFET vypne a zapne se studený start, jak je uvedeno v kapitole 3.3.1. [9]

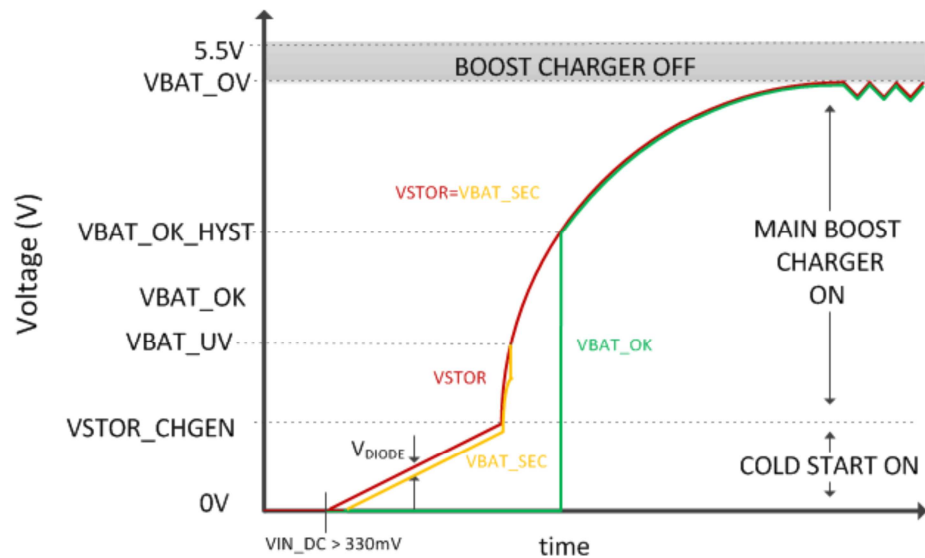
Pokud není připojen vstupní zdroj, C_{STOR} by měl být vybit přes zem, před připojením paměťového prvku. Pokud je připojený nabitý paměťový prvek, tak PFET mezi VSTOR a VBAT (viz Příloha E), zůstane vypnutý. Nabíjení může pokračovat, dokud není připojen vstupní zdroj. Pokud je připojena systémová zátěž na VSTOR, může stáhnout hodnotu napětí na VSTOR pod V_{BAT_UV} , a tím se vypne PFET, aby se dobil kondenzátor C_{STOR} . [9]



Obr. 8: Schéma zapojení. [10]

3.3 Funkční režimy

BQ25504 má dva hlavní funkční režimy: studený start a hlavní nabíjení. Obvod studeného startu je napájen z V_{IN_DC} , zatímco hlavní nabíjecí obvod je napájen z VSTOR (viz Příloha E). [9]



Obr. 9: Funkční režimy. [9]

3.3.1 Studený start

Pokud napětí na pinu VIN_DC překročí minimální vstupní napětí s dostatečným výkonem, zapne se studený start. Studený start je v podstatě neregulovaný spínaný měnič. Pokud kondenzátor C_{STOR} dosáhne napětí $V_{\text{STOR_CHGEN}}$ (obvykle 1,8 V), spustí se hlavní zesilující režim. Napětí na VSTOR z hlavního zesilujícího režimu je nyní srovnáváno s hodnotou ($V_{\text{BAT_UV}}$). Pokud je dosaženo hodnoty $V_{\text{BAT_UV}}$ tak se PMOS tranzistor mezi VSTOR a VBAT (viz Příloha E) sepne, což umožní dobít připojený paměťový prvek k VBAT. Studený start není tak efektivní jako hlavní zesilující regulovaná funkce. Pokud není k dispozici dostatek energie, je možné, že studený start běží nepřetržitě a výstup VSTOR se nezvýší na 1,8 V a spustí se hlavní zesilující režim (viz kapitola 3.3.2). [9]

3.3.2 Hlavní zesilující režim

Hlavní zesilující režim v BQ25504 slouží k nabíjení úložnému prvku připojenému na BAT, z energie ze stejnosměrných zdrojů. Za prvních 32 ms, poté co je hlavní měnič zapnutý, je nabíjení zakázáno, aby na vstupu vzrostlo na napětí naprázdno. To je potřebné, k získání referenčního napětí, které bude použito pro zbývající nabíjecí operace, až do dalšího zapnutí MPPT vzorkovacího cyklu. Měnič používá k řízení a regulaci vstupního napětí, pulsně frekvenční modulaci (PFM). Regulace vstupního napětí, se získá přenosem náboje ze vstupu do VSTOR, pouze tehdy, pokud je vstupní napětí vyšší než napětí $V_{\text{REF_SAMP}}$. Měnič jmenovitě přenáší proud průměrně až do 100 mA vstupního proudu. Zesilující měnič je zakázán, pokud napětí na VSTOR dosáhne hodnoty $V_{\text{BAT_OV}}$, aby chránil baterii připojenou na VBAT vůči přebití. [9]

3.4 MPPT

Cílem sledování maximálního bodu výkonu (MPPT) je v BQ25504 maximalizovat výkon extrahovaný z energy harvesting zdrojů. MPPT se provádí periodickým snímkováním poměru napětí naprázdno z energy harvesting zdroje a používá jej jako referenční napětí (V_{REF_SAMP}) zesilujícího měniče. Poměr vzorkování může být externě programován pomocí odporů R_{OC1} a R_{OC2} . Pro solární články, odporový dělicí poměr je typicky nastaven v rozmezí 0,7 až 0,8 a pro termoelektrické články je obvykle používán odporový dělicí poměr 0,5. Přesný poměr MPPT je optimalizován tak, aby vyhovoval potřebám užívaného vstupního zdroje. Vnitřní zesilující měnič moduluje efektivní impedanci získáním energie z obvodu, pro regulaci vstupního napětí, na referenční snímkovací napětí. Nové referenční napětí, se získává každých 16s periodickým odpojením nabíječe na 256ms, a snímkovacím poměrem napětí naprázdno. [9]

Referenční napětí je dáno následujícím výrazem: [9]

$$V_{REF_SAMP} = V_{IN_DC} \cdot \left(\frac{R_{OC1}}{R_{OC1} + R_{OC2}} \right) \quad (3.1)$$

kde: V_{IN_DC} [V]	-	vstupní napětí,
R_{OC1}, R_{OC2} [M Ω]	-	rezistory,
R_{SUM_OC} [M Ω]	-	součet odporů R_{OC1} a R_{OC2} ,
V_{REF_SAMP} [V]	-	referenční snímkovací napětí.

Návrh referenčního napětí V_{REF_SAMP} :

Hodnota V_{REF_SAMP} je pro simulaci i pro měření nastavena na hodnotu 0,78 dělicího poměru odporového děliče. Hodnota je nastavena odpory s nejbližší hodnotou vypočteným hodnotám, $R_{OC1} = 15,65 \text{ M}\Omega$ a $R_{OC2} = 4,42 \text{ M}\Omega$. Odpory nebyly měněny a jsou původní.

Výpočet odporů je proveden, podle následujících vztahů: [9]

$$R_{OC1} = \left(\frac{V_{REF_SAMP}}{V_{IN_DC}} \right) \cdot R_{SUM_OC} = 0,78 \cdot 20 \cdot 10^3 = 15,6 \text{ M}\Omega \quad (3.2)$$

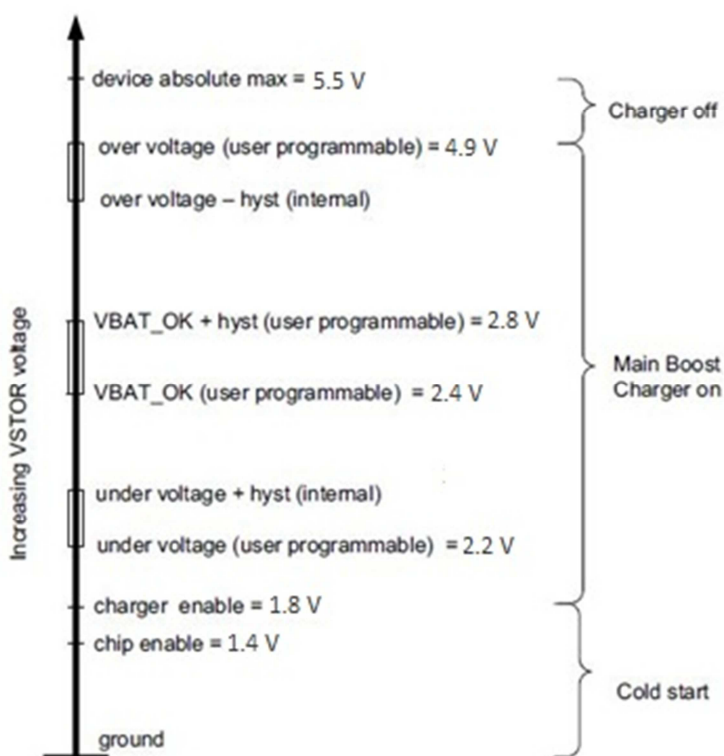
$$R_{OC2} = R_{SUM_OC} \cdot \left(1 - \frac{V_{REF_SAMP}}{V_{IN_DC}} \right) = 20 \cdot 10^3 \cdot (1 - 0,78) = 4,4 \text{ M}\Omega \quad (3.3)$$

kde: V_{IN_DC} [V]	-	vstupní napětí,
R_{OC1}, R_{OC2} [M Ω]	-	rezistory,
R_{SUM_OC} [M Ω]	-	součet odporů R_{OC1} a R_{OC2} ,
V_{REF_SAMP} [V]	-	referenční snímkovací napětí.

3.5 Správa baterie

Integrovaný obvod BQ25504, také zahrnuje funkce pro správu baterií. Integrovaný obvod je vybaven interními obvody pro řízení napětí na prvku a pro optimalizování nabíjení úložného prvku. Pro získávání energie ze zdroje, je potřeba nastavit tři různé prahové napětí (Obr. 10) pomocí externích rezistorů, a to podnapěťová prahová hodnota V_{BAT_UV} , meze provozního rozsahu V_{BAT_OK} a přepěťová prahová hodnota V_{BAT_OV} . Tyto prahové napětí, určují oblast provozu IO. Pro nejlepší provoz systému, by V_{BAT_OK} měl být použit k určení, kdy zátěž může být použita nebo odstraněna. [9]

Provozní rozsah není při simulaci ani při měření používán, proto není potřeba jej navrhovat, pouze je vysvětlena jeho funkce a uvedeny vztahy pro výpočet. Správa baterií je řízena pouze prahovými hodnotami V_{BAT_OV} a V_{BAT_UV} .



Obr. 10: Hodnoty prahových napětí. [9]

3.5.1 Podnapět'ová ochrana baterie

Pro ochranu před hlubokým vybitím a poškozením dobíjecích baterií, také jako ochrana před ztracením náboje v kapacitním paměťovém prvku, musí být podnapět'ový práh V_{BAT_UV} nastaven pomocí externích rezistorů. [9]

Prahové napětí V_{BAT_UV} při poklesu napětí paměťového prvku je dáno rovnicí: [9]

$$V_{BAT_UV} = V_{BIAS} \left(1 + \frac{R_{UV2}}{R_{UV1}} \right) \quad (3.4)$$

kde: V_{BIAS} [V] - referenční uzlové napětí,
 R_{UV2}, R_{UV1} [M Ω] - rezistory,
 V_{BAT_UV} [V] - podnapět'ová prahová hodnota.

Součet odporů by měl být přibližně 10 M Ω , ($R_{UV1} + R_{UV2} = 10$ M Ω). Pokud napětí baterie roste, je podnapět'ový práh dán UV_HYST. Jde o interní nastavení podnapět'ového prahu plus vnitřní napětí hystereze označené jako $V_{BAT_UV_HYST}$. Pro správnou funkci IO a celého systému, musí být zátěž připojena k VSTOR pinu, zatímco úložný prvek, musí být připojen k pinu VBAT. Jakmile napětí na VSTOR překročí práh UV_HYST, VSTOR a VBAT jsou zkratovány. Přepínač zůstane zavřený, dokud napětí na VSTOR, klesne pod prahovou hodnotu. Práh V_{BAT_UV} by měl být považován jako zabezpečení proti selhání systému. [9]

Návrh prahové hodnoty V_{BAT_UV} :

Podnapět'ová ochrana baterie pro měření a simulaci, je nastavena na prahovou hodnotu $V_{BAT_UV} = 2,2$ V, pomocí odporů nejbližších hodnot odporů $R_{UV1} = 5,60$ M Ω a $R_{UV2} = 4,42$ Ω . Hodnota V_{BAT_UV} byla ponechána původní, tím se nemuseli měnit odpory na desce.

Výpočet odporů je proveden, podle následujících vztahů: [9]

$$R_{UV1} = \frac{R_{SUM_UV} \cdot V_{BIAS}}{V_{BAT_UV}} = \frac{10 \cdot 10^3 \cdot 1,25}{2,2} = 5,68 \text{ M}\Omega \quad (3.5)$$

$$R_{UV2} = R_{SUM_UV} - R_{UV1} = 10 - 5,68 = 4,42 \text{ M}\Omega \quad (3.6)$$

kde: V_{BIAS} [V] - referenční uzlové napětí,
 R_{UV2}, R_{UV1} [M Ω] - rezistory,
 R_{SUM_UV} [M Ω] - součet odporů R_{UV1} a R_{UV2} ,
 V_{BAT_UV} [V] - podnapět'ová prahová hodnota.

3.5.2 Přepět'ová ochrana baterie

Pro ochranu dobíjecích baterií před nadměrným nabíjecím napětím, a také aby se zabránilo přebití kapacitního paměťového prvku, musí být napět'ová prahová hodnota stanovená pomocí externích rezistorů. To je také hodnota napětí, na kterou se bude regulovat hodnota VSTOR a VBAT, pokud je na vstupu dostatečný výkon. [9]

Pokud prahové napětí V_{BAT_OV} roste, je dáno rovnicí: [9]

$$V_{BAT_OV} = \frac{3}{2}V_{BIAS} \cdot \left(1 + \frac{R_{OV2}}{R_{OV1}}\right) \quad (3.7)$$

kde: V_{BIAS} [V] - referenční uzlové napětí,
 R_{OV2}, R_{OV1} [M Ω] - rezistory,
 V_{BAT_OV} [V] - přepět'ová prahová hodnota.

Součet odporů by měl být přibližně 10 M Ω , ($R_{OV1} + R_{OV2} = 10M\Omega$). Pokud napětí baterie klesá je přepět'ový práh je dán OV_HYST. Jde o interní nastavení přepět'ového prahu minus vnitřní napětí hystereze označené jako $V_{BAT_OV_HYST}$. Jakmile napětí na akumulátoru překročí práh V_{BAT_OV} , zesilující měnič je odpojen. [9]

Návrh prahové hodnoty V_{BAT_OV} :

Prahová hodnota V_{BAT_OV} je pro simulaci a měření nastavena na hodnotu 4,9V, pomocí odporů hodnot odporů $R_{OV1} = 3,8 M\Omega$ a $R_{OV2} = 6,2 M\Omega$. Původní odpory R_{OV1} a R_{OV2} (na desce R3 a R4) bylo potřeba vyměnit, za požadované hodnoty odporů.

Výpočet odporů je proveden, podle následujících vztahů: [9]

$$R_{OV1} = \frac{3}{2} \cdot \frac{R_{SUM_OV} \cdot V_{BIAS}}{V_{BAT_OV}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{10 \cdot 10^3 \cdot 1,25}{4,9} = 3,83 M\Omega \quad (3.8)$$

$$R_{OV2} = R_{SUM_OV} - R_{OV1} = 10 - 3,83 = 6,17 M\Omega \quad (3.9)$$

kde: V_{BIAS} [V] - referenční uzlové napětí,
 R_{OV2}, R_{OV1} [M Ω] - rezistory,
 R_{SUM_OV} [M Ω] - součet odporů R_{OV1} a R_{OV2} ,
 V_{BAT_OV} [V] - podnapět'ová prahová hodnota

3.5.3 Napětí baterie v provozním rozsahu V_{BAT_OK}

IO umožňuje uživateli nastavit programovatelné napětí nezávisle na nastavení přepětí a podpětí pro indikaci, zda napětí na VSTOR (a tím i napětí na VBAT, pokud je externí PFET mezi dvěma piny zapnut) je na přijatelné úrovni. [9]

Pokud napětí baterie klesá, prahová hodnota je stanovena rovnicí: [9]

$$V_{BAT_OK_PROG} = V_{BIAS} \left(1 + \frac{R_{OK2}}{R_{OK1}} \right) \quad (3.10)$$

- kde: V_{BIAS} [V] - referenční uzlové napětí,
 R_{OK2}, R_{OK1} [M Ω] - rezistory,
 $V_{BAT_OK_PROG}$ [V] - napětí provozního rozsahu, při poklesu.

Pokud se napětí baterie zvyšuje, prahová hodnota je stanovena rovnicí: [9]

$$V_{BAT_OK_HYST} = V_{BIAS} \left(1 + \frac{R_{OK2} + R_{OK3}}{R_{OK1}} \right) \quad (3.11)$$

- kde: V_{BIAS} [V] - referenční uzlové napětí,
 $R_{OK3}, R_{OK2}, R_{OK1}$ [M Ω] - rezistory,
 $V_{BAT_OK_HYST}$ [V] - napětí provozního rozsahu, při růstu.

Součet odporů by měl být přibližně 10 M Ω , ($R_{OK1} + R_{OK2} + R_{OK3} = 10 \text{ M}\Omega$). Logická úroveň 1 tohoto signálu se rovná napětí na VSTOR. Prahová hodnota $V_{BAT_OK_PROG}$ musí být větší nebo stejná jako prahová hodnota V_{BAT_UV} . Pro nejlepší fungování systému, by V_{BAT_OK} měl být nastaven tak, aby řídil externí PFET mezi VSTOR a systémovou zátěží, a aby určil, kdy zatížení může být použito nebo odpojeno pro optimalizaci kapacity úložných prvků. [9]

4 Simulace

Simulace je provedena pomocí simulačního softwaru TINA-TI od Texas Instruments. Pro simulaci byl použit návrh přechodového modelu pro BQ25504 ze stránek výrobce se solárním článkem. Simulace je časově náročná, proto je model nastaven v tzv. FAST módu. Tenhle mód pracuje tak jak je popsáno v datasheetu s výjimkou, že snímkování napětí naprázdno je sníženo z 16s na 512 ms, což výrazně snižuje čas potřebný k simulaci. Snímkovací perioda může být změněna zpět na 16 s, změnou FAST na 1, ale s možností zaplnění operační paměti a výrazným prodloužením doby simulace.

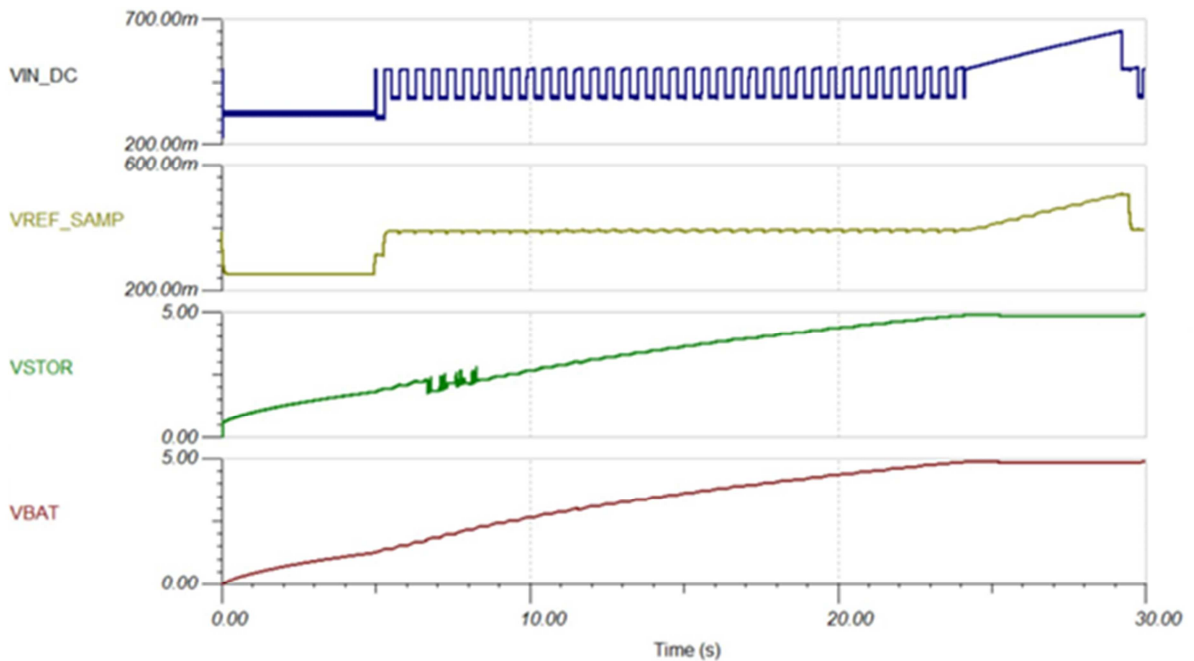
U zapojení simulace bylo potřeba pro správnou funkci změnit jednotlivé hodnoty rezistorů pro prahové hodnoty V_{BAT_OV} a V_{BAT_UV} , podle vypočtených hodnot v návrhu. Hodnoty rezistorů pro MPPT jsou nastaveny na $V_{REF_SAMP} = 0.78$ podle návrhu. Stejná hodnota je použita i při zapojení s napěťovým zdrojem.

Pro simulaci jsou zvoleny dva druhy zapojení, první se solárním článkem a druhý s napěťovým zdrojem viz příloha. Jako solární článek je použit článek s výstupním proudem $400 \mu A$ a napětím $0,5 V$ DC. U druhého zapojení je použit DC zdroj se stejným napětím jako u solárního článku $0,5 V$. K napěťovému zdroji je připojen do série rezistor s hodnotou 10Ω , který je použit pro zmenšení vstupního proudu do IO. Zdroj energie je připojen na vstup integrovaného obvodu VIN_DC . Na výstup BAT je připojen kondenzátor C3, který slouží pro uložení energie. Hodnota kondenzátoru je $100 \mu A$, protože při větší kapacitě se výrazně prodlužuje doba simulace.

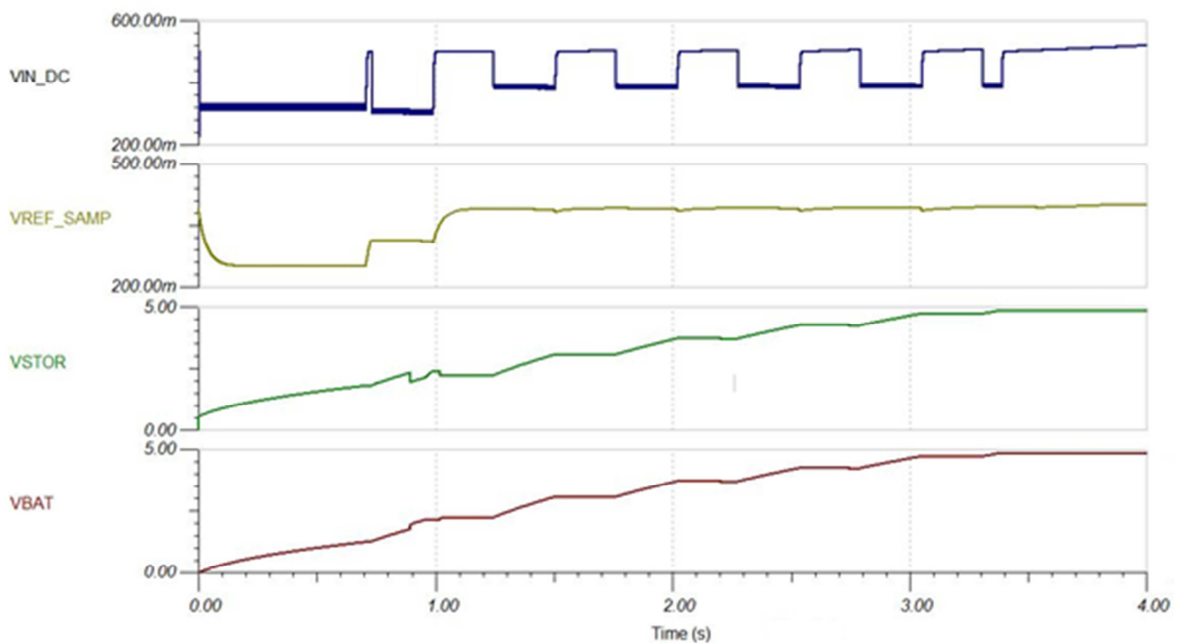
Jsou simulovány průběhy vstupního napětí (VIN_DC), referenčního snímkovacího napětí (V_{REF_SAMP}), napětí na kondenzátoru C_{STOR} na $VSTOR$ a napětí na kondenzátoru C3 na $VBAT$.

4.1 Simulovaný průběh nabíjení se solárním článkem

Pro simulaci nabíjení pomocí solárního článku jsou zvoleny 2 hodnoty kondenzátorů, $100 \mu A$ a $10 \mu A$. Hodnota kondenzátoru $10 \mu A$ je zvolena pro lepší zobrazení jednotlivých funkčních režimů a změny úrovní napětí.



Obr. 11: Nabíjení kondenzátoru 100µF.

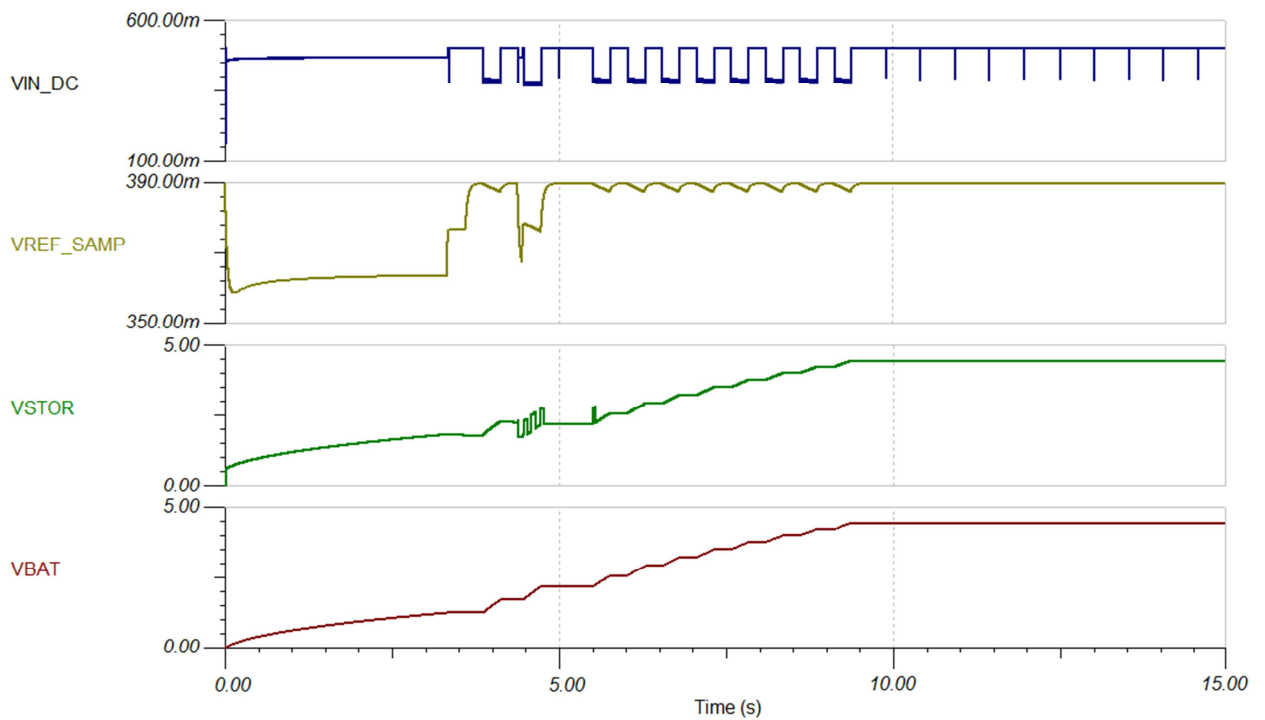


Obr. 12 Nabíjení kondenzátoru 10µF.

Na Obr. 12 lze vidět, změny vstupního napětí v důsledku MPPT, změny jsou větší, protože solární články fungují jako proudový zdroj. Hodnota V_{REF_SAMP} , odpovídá navrženým 78% vstupního napětí. Hodnota napětí V_{STOR} je o 0,5 V vstupního napětí vyšší než napětí V_{BAT} . Hodnoty napětí na V_{BAT} a V_{STOR} se srovnávají až v hlavním nabíjecím režimu. Lze vidět průběh režimu studeného

startu od 0 do 0,7s. Na hodnotě $V_{\text{STOR_CHGEN}} = 1,8 \text{ V}$ se studený start vypne. Po studeném startu se na 32 ms zakáže nabíjení, jak je vidět u stejně dlouhého nárůstu napětí naprázdno. Poté se zapne hlavní nabíjecí režim, který se zastaví na hodnotě 4,9V ($V_{\text{BAT_OV}}$), nastavené podle návrhu.

4.2 Simulovaný průběh nabíjení s napěťovým zdrojem



Obr. 13: Nabíjení kondenzátoru 1 mF napěťovým zdrojem.

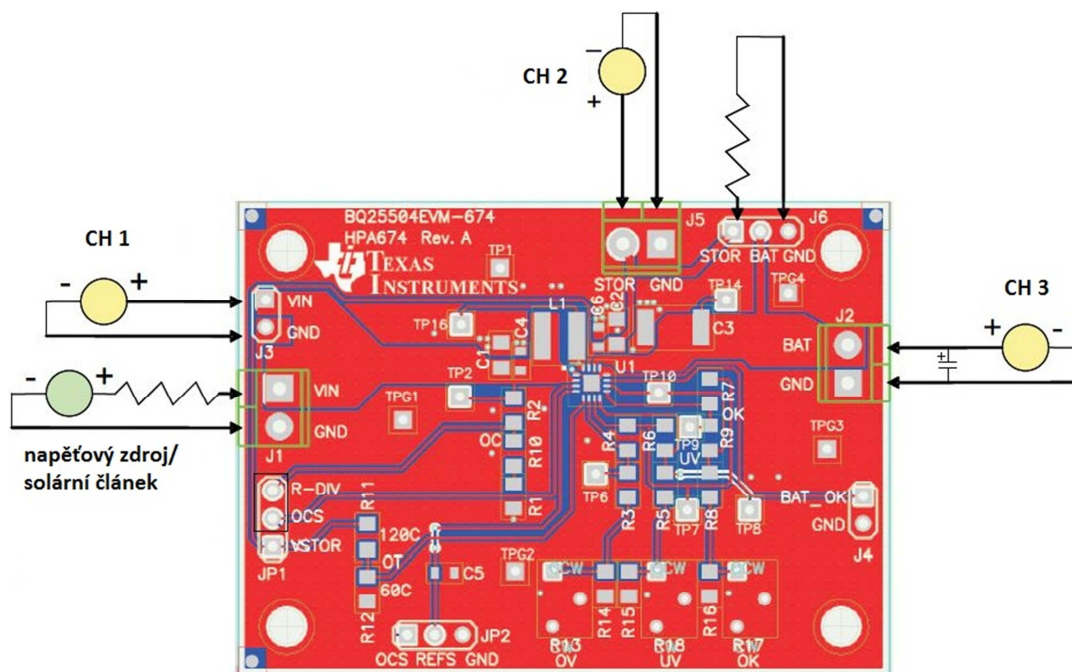
Nabíjení pomocí napěťového zdroje je rychlejší, díky vyššímu nabíjecímu proudu. Vstupní napětí odpovídá 0,5 V na zdroji. Je zde použit napěťový zdroj místo proudového. Jinak průběh nabíjení splňuje všechny podmínky správné funkce, jako zapojení se solárním článkem. Simulovaný průběh nabíjení odpovídá odměřenému průběhu při stejném vstupním napětí a kapacitě kondenzátoru (viz kapitola 5.2).

5 Měření

Měření probíhá na vývojovém kitu s BQ25504, v laboratoři na osciloskopu modelu Agilent Technologies MSO60334A. Před měřením je nutné přepájet rezistory na hodnoty odporů odpovídajícím navrženým prahovým hodnotám V_{BAT_OV} (viz kapitola 3.5.2) a V_{BAT_UV} (viz. kapitola 3.5.1). Rezistory je nutné zvolit s co největší přesností, aby naměřené prahové hodnoty odpovídali a neodchylovali se od návrhu.

Jako zdroj energie je použit dodaný solární článek, a napěťový zdroj s napětím 0,5V. Zdrojem světla je zde LED lampa o výkonu 8 wattů. U napěťového zdroje, stejně jako u simulace je do série připojen rezistor s hodnotou 10Ω . Rezistor je potřebný pro zmenšení proudu, protože delším zatížením proudem nad 200 mA, může dojít k poškození IO BQ25504 na desce. Zdroj energie je připojen na pin VIN. Jako paměťový prvek je zvolen kondenzátor. Kapacita kondenzátoru by měla být podle datasheetu větší než $100\mu F$. Připojením superkondenzátoru se zvětší doba nabíjení, kvůli tomu celý průběh nepůjde zobrazit na osciloskopu. Zvýšením napětí se dosáhne rychlejšího nabíjení superkondenzátoru, ale průběhy nabíjení se neliší, proto je zvolena hodnota 1mF. Na menší hodnotě kondenzátoru se i lépe zobrazují jednotlivé funkce.

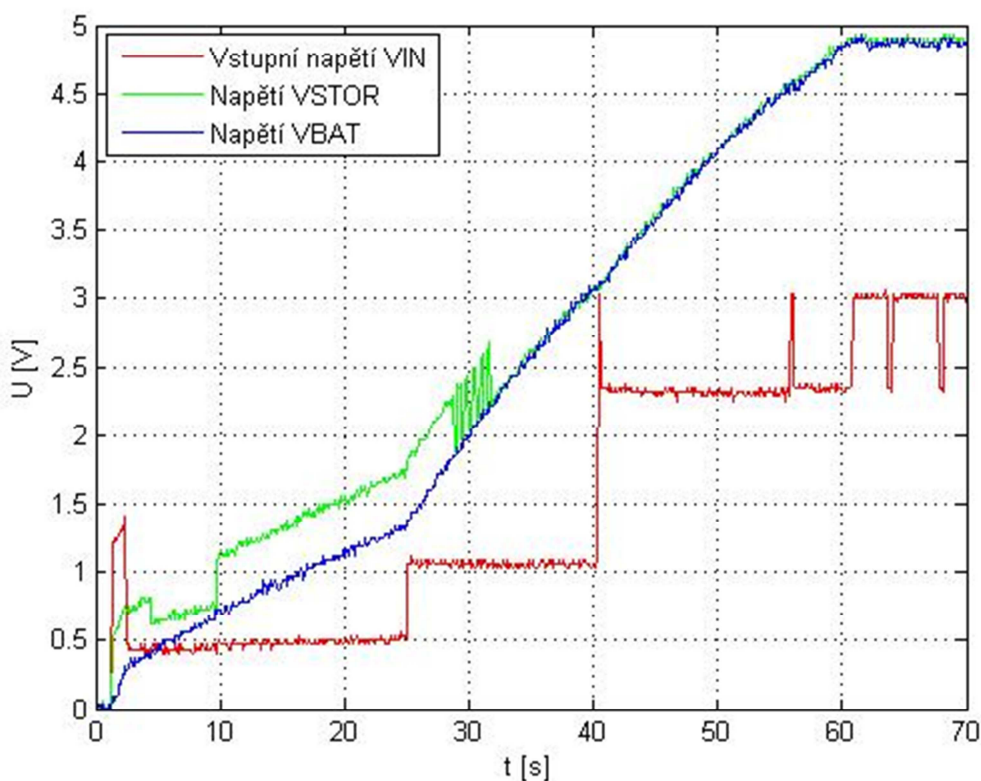
Jsou měřeny průběhy vstupního napětí VIN, napětí VBAT na kondenzátoru a napětí VSTOR. Připojení měřících přístrojů kondenzátoru a zdroje je na (Obr. 14). Obrázek je převzat, pouze je upraveno jednotlivé připojení přístrojů. Zdroj energie je přiveden na svorku J1, kondenzátor na J3 a zátěž na J6. Na kanálu 1 (CH 1) osciloskopu je měřeno vstupní napětí, na kanálu 2 (CH 2) napětí VSTOR a na kanálu 3 (CH 3) napětí VBAT na kondenzátoru.



Obr. 14: Připojení měřících přístrojů, zdroje a kondenzátoru. [12]

5.1 Nabíjení kondenzátoru solárním článkem

Jako zdroj energie je připojen solární článek na J1. Napětí solárního článku je měřeno na J3. Kondenzátor o kapacitě 10 mF je připojen na J2. Napětí VBAT na kondenzátoru je měřeno na J2. Na J5 je měřeno napětí V_{STOR} . Zátěž se v tomto zapojení nepřipojuje.

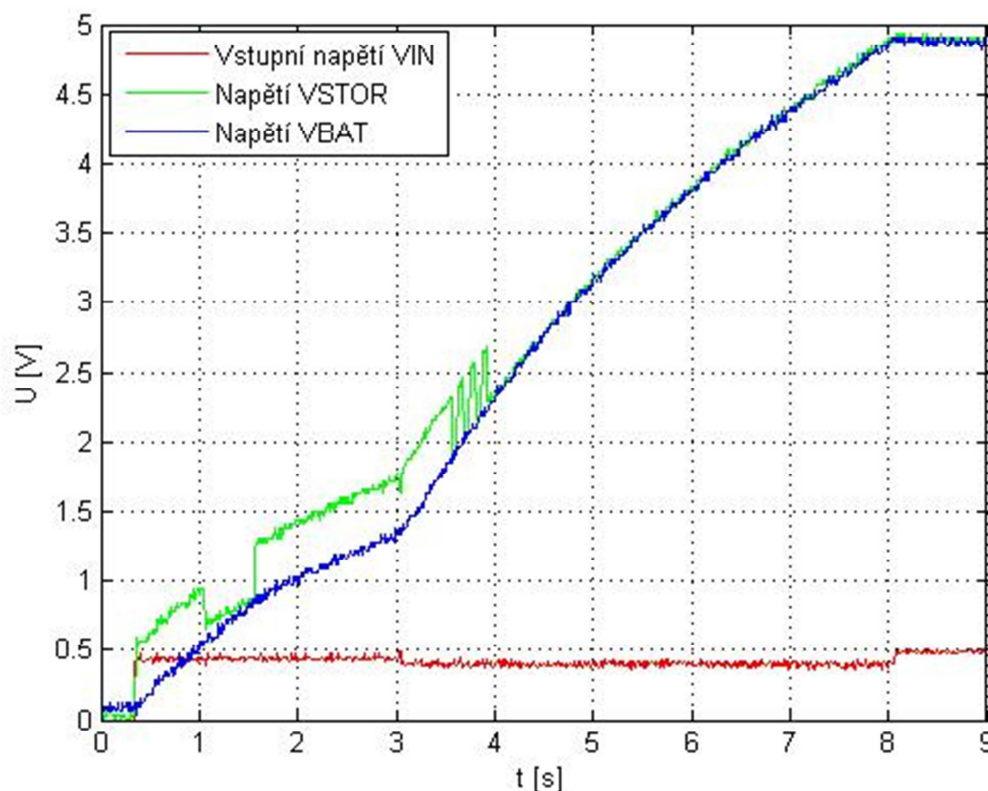


Obr. 15 Měřený průběh nabíjení solárním článkem

Hodnota napětí solárního článku roste se stoupajícím napětím VSTOR a VBAT na kondenzátoru. Velké změny napětí jsou způsobeny díky tomu, že solární článek je proudový zdroj. Dochází zde ke sledování maximálního výkonu MPPT, a tím se mění hodnota napětí. Je zde vidět režim studeného startu, který se zapne, protože napětí VSTOR nedosáhne hodnoty $V_{STOR_CHGEN} = 1,8$ V do 45ms. Po dosažení V_{STOR_CHGEN} se vypne režim studeného startu a zapne se hlavní nabíjecí režim. Po ukončení režimu studeného startu se za 16 s, což je doba snímkování referenčního napětí, změní hodnota vstupního napětí. Napětí VSTOR je větší než VBAT o 0,5 V vstupního napětí, ale napětí se po chvíli srovnají. Po dosažení prahové hodnoty $V_{BAT_OV} = 4,9$ V se hodnota VBAT a VSTOR ustálí a obvod reguluje napětí kondenzátoru na hodnotu V_{BAT_OV} .

5.2 Nabíjení kondenzátoru napěťovým zdrojem

Jako zdroj energie je připojen napěťový zdroj s napětím 0,5 V na J1. Do série k napěťovému zdroji je připojen rezistor s hodnotou 10 Ω , pro zmenšení vstupního proudu. Napětí zdroje je měřeno na J3. Kondenzátor o kapacitě 1 mF je připojen na J2. Napětí VBAT na kondenzátoru, je měřeno na J2. Na J5 je měřeno napětí VSTOR. Zátěž se v tomto zapojení nepřipojuje.

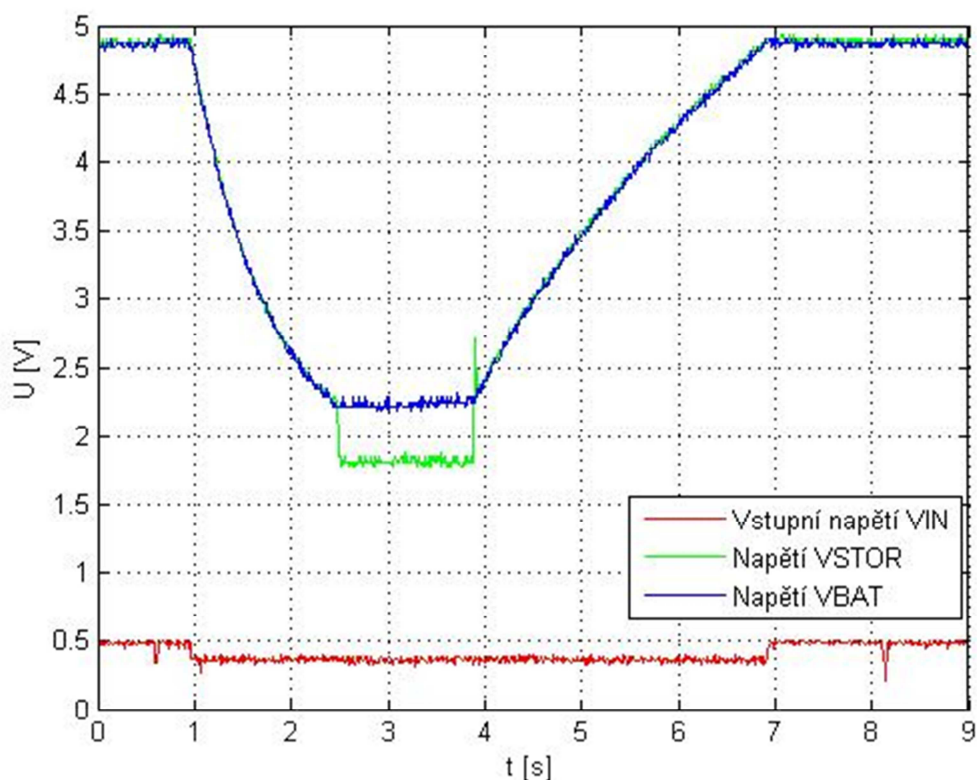


Obr. 16: Měřený průběh nabíjení napěťovým zdrojem

Vstupní napětí VIN se nemění tolik jako u zapojení se solárním článkem, protože je používán napěťový zdroj. Zapne se režim studeného startu, protože napětí na VSTOR nedosáhne $V_{\text{STOR_CHGEN}}$ do 45 ms. Po dosažení $V_{\text{STOR_CHGEN}}$ se spustí hlavní nabíjecí režim. Hodnota nabíjecího proudu vzroste při hlavním nabíjecím režimu po studeném startu na 156 mA. Otevře se tranzistor mezi VBAT a VSTOR a kondenzátor se začne nabíjet. Po dosažení $V_{\text{BAT_OV}}$ se nabíjení ustálí a napětí kondenzátoru se reguluje na hodnotu $V_{\text{BAT_OV}}$. Nabíjení kondenzátoru při měření trvá stejně dlouhou dobu jako při simulaci (viz kapitola 4.2), tím je potvrzena funkčnost simulace.

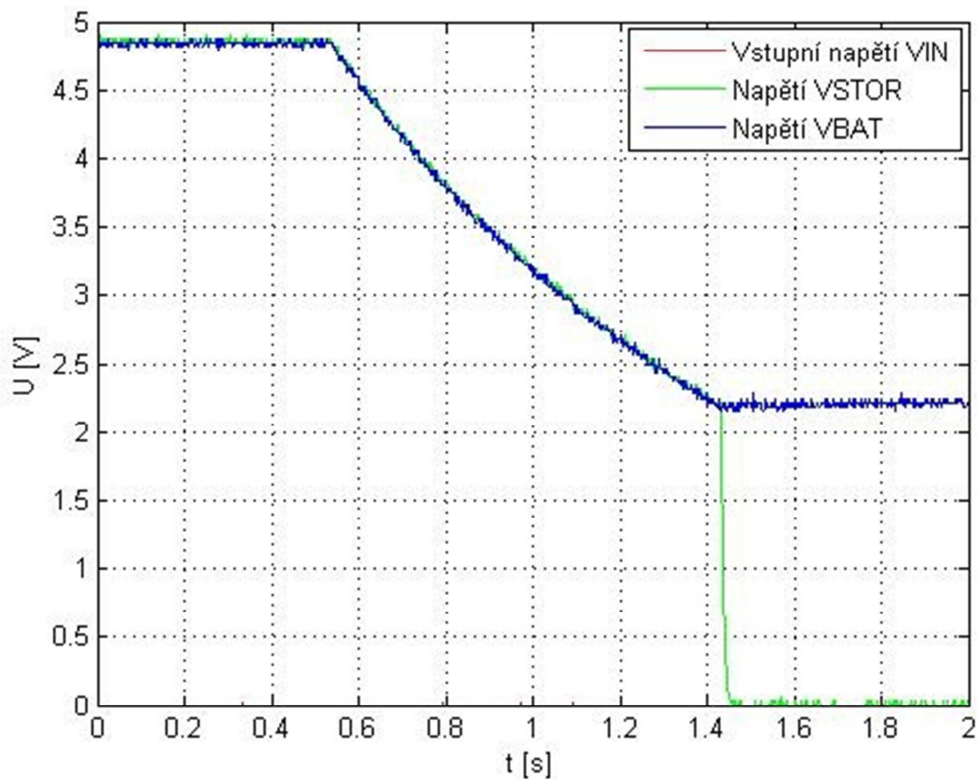
5.3 Průběh vybíjení připojením zátěže

Pro měření vybíjení je na pin J6 (STOR) připojuje na zátěž $10\text{ k}\Omega$. Jako zdroj energie je připojen napěťový zdroj s napětím $0,5\text{ V}$ na J1. Do série k napěťovému zdroji je připojen rezistor s hodnotou $10\ \Omega$, pro zmenšení vstupního proudu do IO. Napětí zdroje je měřeno na J3. Kondenzátor o kapacitě 1 mF je připojen na J2. Napětí VBAT na kondenzátoru je měřeno na J2. Na J5 je měřeno napětí na VSTOR.



Obr. 17: Vybíjení kondenzátoru s napětí $V_{IN_DC} = 0,5V$

Kondenzátor je nabit na prahovou hodnotu $V_{BAT_OV} = 4,9\text{ V}$. Připojením rezistoru s odporem $10\text{ k}\Omega$, začne klesat napětí VSTOR a VBAT, kondenzátor se vybíjí. Rychlost vybíjení je dána kapacitou kondenzátoru. Napětí na kondenzátoru klesne na navrženou prahovou hodnotu $V_{BAT_UV} = 2,2\text{ V}$, napětí na kondenzátoru neklesne pod tuto hodnotu. Napětí na VSTOR, klesne na hodnotu $V_{STOR_CHGEN} = 1,8\text{ V}$, kde je přechod mezi režimem studeného startu a hlavním nabíjecím režimem. Odpojením zátěže, pokud je na vstupu VIN napětí (Obr. 17) kondenzátor se začne znovu nabíjet na prahovou hodnotu V_{BAT_OV} .



Obr. 18: Vybíjení kondenzátoru s napětí $V_{IN_DC} = 0\text{ V}$

Pokud na vstupu V_{IN_DC} není napětí, po připojení zátěže, se kondenzátor vybije na navrženou hodnotu V_{BAT_UV} . Po dosažení V_{BAT_UV} , napětí V_{STOR} na kondenzátoru C_{STOR} klesne na nulu. Rychlé vybíjení je dáno rozdílem kapacit kondenzátorů. Úložný kondenzátor připojený na pin J3 (Obr. 14), má přibližně 1000 krát menší kapacitu. Jelikož na vstupu není napětí, kondenzátor se po odpojení zátěže nemůže nabíjet. Hodnota napětí V_{BAT} na kondenzátoru, zůstane na hodnotě V_{BAT_UV} .

6 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo, seznámit se s oblastí získávání energie z neobvyklých zdrojů okolo nás. V teoretickém úvodu bakalářské práce jsou obecně popsány, jednotlivé možnosti sběru energie „Energy harvesting“ a možnosti její ukládání do paměťových prvků jako jsou kondenzátory a baterie. Jako zdroj energie, byl pro práci zvolen solární článok, který je jeden z nejpoužívanějších zdrojů, vzhledem k vysokému výkonu oproti jiným energy harvesting zdrojům. Volba paměťového prvku, byla závislá na kapacitě úložného prvku a času nabíjení. Proto jsou vybrány kondenzátory, namísto superkondenzátorů nebo baterií. Superkondenzátory se příliš dlouze nabíjí a nejsou příliš vhodné pro analýzu naměřeného průběhu. Pokud není potřeba zaznamenávat průběh nabíjení, je lepší zvolit paměťový prvek s vyšší kapacitou. Solární články se dají velice dobře použít i pro nabíjení vyšších kapacit paměťových prvků. Pomocí sledování maximálního bodu výkonu (MPPT), dokáže integrovaný obvod, ze solárních článků i za špatných světelných podmínek dostat maximální možný výkon. Pro paměťové prvky se navrhovaly jednotlivé prahové hodnoty, přepětová ochrana V_{BAT_OV} proti přebití a podnapětová ochrana V_{BAT_UV} proti hlubokému vybití.

Simulace navrženého řešení je velice časově náročný proces. Simulace nabíjení kondenzátoru o kapacitě 1 mF, pomocí napěťového zdroje s napětím 0,5 V DC, trvala přibližně 18 hodin na průměrně výkonném notebooku. Použitím výkonnějšího hardwaru je možné čas zkrátit. 10 násobným zvýšením kapacity kondenzátoru se doba simulace prodlouží desetkrát. Čas simulace je tedy závislý na zvoleném simulovaném čase, kdy je možné kondenzátor plně nabít. U simulace se před praktickou aplikací a měřením se ověřilo, jestli návrh prahových hodnot pro správu baterií je správný. Měření bylo prováděno dvěma způsoby, jako u simulace. Pomocí solárních článků a napěťového zdroje. Při měření jsou na průběhu dobře vidět jednotlivé funkční režimy, studený start a hlavní nabíjecí režim. Po pomalém přechodu do hlavního nabíjecího režimu, ze studeného startu začal IO ze zdroje odebírat větší proud. Kondenzátor se začal nabíjet na hodnotu V_{BAT_OV} . Pokud bylo na vstupu dostatečné napětí, napětí na kondenzátoru se regulovalo na tuto hodnotu. Připojením zátěže k IO na VSTOR, se kondenzátor připojený na VBAT začal vybíjet. Kondenzátor se vybil na hodnotu V_{BAT_UV} a pokud bylo na vstupu napětí, kondenzátor se opět začal nabíjet. Měřené prahové hodnoty odpovídají návrhu. Měřený průběh s napěťovým zdrojem odpovídá průběhu při simulaci. Nabíjení trvá stejnou dobu přibližně 9s.

Dále může být bakalářská práce rozšířena, například použitím jiných zdrojů energie jako jsou termoelektrické články k snímání teplotního rozdílu nebo piezoelektrické členy pro deformaci materiálu. Je možné také pokračovat realizací soběstačné sensorové jednotky, která dokáže poskytovat informace pomocí GSM modulu.

Hlavním výsledkem této práce je důkaz že, v dnešní době mohou zařízení fungovat zcela soběstačně, bez externího zdroje napájení. Energetická soběstačnost umožňuje široké použití v různých aplikacích jako, bezdrátové sensorové sítě, chytré oblečení, monitorování životního prostředí, přenosné elektronické zařízení tzv. wearables atd.

7 Použitá literatura

- [1] HUSÁK, Miroslav. *Mikroelektronické zdroje energie z okolního prostředí –Energy harvesting*, DPS-AZ [online]. [cit. 2013-04-16]. Dostupné z: http://www.dps-az.cz/media/pdf/ukazky/vyvoj_1302.pdf

- [2] VIGNATI, Stefano. *Solutions for Indoor Light Energy Harvesting*. Stockholm, Švédsko, 20.11.2012. Akademická práce. School of Information and Communication Technology KTH.

- [3] KHALIGH, Alireza. *Energy harvesting: solar, wind, and ocean energy conversion systems*. Boca Raton: CRC Press, 2010, xv, 350 s., [16] s. bar. příl. Energy, power electronics, and machines series. ISBN 978-1-4398-1508-3.

- [4] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *Electrical Energy Storage*. Ženeva, Švýcarsko, 2011. ISBN 978-2-88912-889-1. Dostupné z: <http://www.iec.ch/whitepaper/energystorage/>

- [5] TZB-info. DVOŘÁK, Petr. *Superkondenzátory* [online]. 2010 [cit. 2015-01-20]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/teorie-obnovitelna-energie/6710-superkondenzatory>

- [6] VOJÁČEK, Antonín. *Superkondenzátor - princip, vlastnosti, použití* [online]. [cit. 2015-01-20]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/clanek/2006122601>

- [7] CENEK, Miroslav. *Akumulátory od principu k praxi*. Praha: FCC Public, 2003, 248 s. ISBN 80-865-3403-0.

- [8] MUSÍLEK, Petr a Michal PRAUZEK. Review of Energy Management Strategies for Environmental Monitoring Systems. IEEE Transactions on Power Electronics.

- [9] TEXAS INSTRUMENTS. 2014. BQ25504 datasheet. [cit. 2015-04-20]. Dostupné z: <http://www.ti.com/product/BQ25504/technicaldocuments>.

- [10] Boost Charger IC Completes The Energy-Harvesting Puzzle [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: <http://electronicdesign.com/energy/boost-charger-ic-completes-energy-harvesting-puzzle>
- [11] Baterie Lithiová nabíjecí článek. Hofman electro [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: <http://www.elektro-hofman.cz/cz-detail-878474-baterie-li-ion-cr123-icr16340-rcr123-3-7v-750mah.html>
- [12] User's Guide: BQ25504 EVM – Ultra Low Power Boost Converter with Battery Management for Energy Harvester Applications. 2011. Dostupné také z: <http://www.ti.com/lit/ug/sl00654a/sl00654a.pdf>

Seznam příloh:

Příloha A: Schéma zapojení simulace s napěťovým zdrojem

Příloha B: Schéma zapojení simulace se solárním článkem

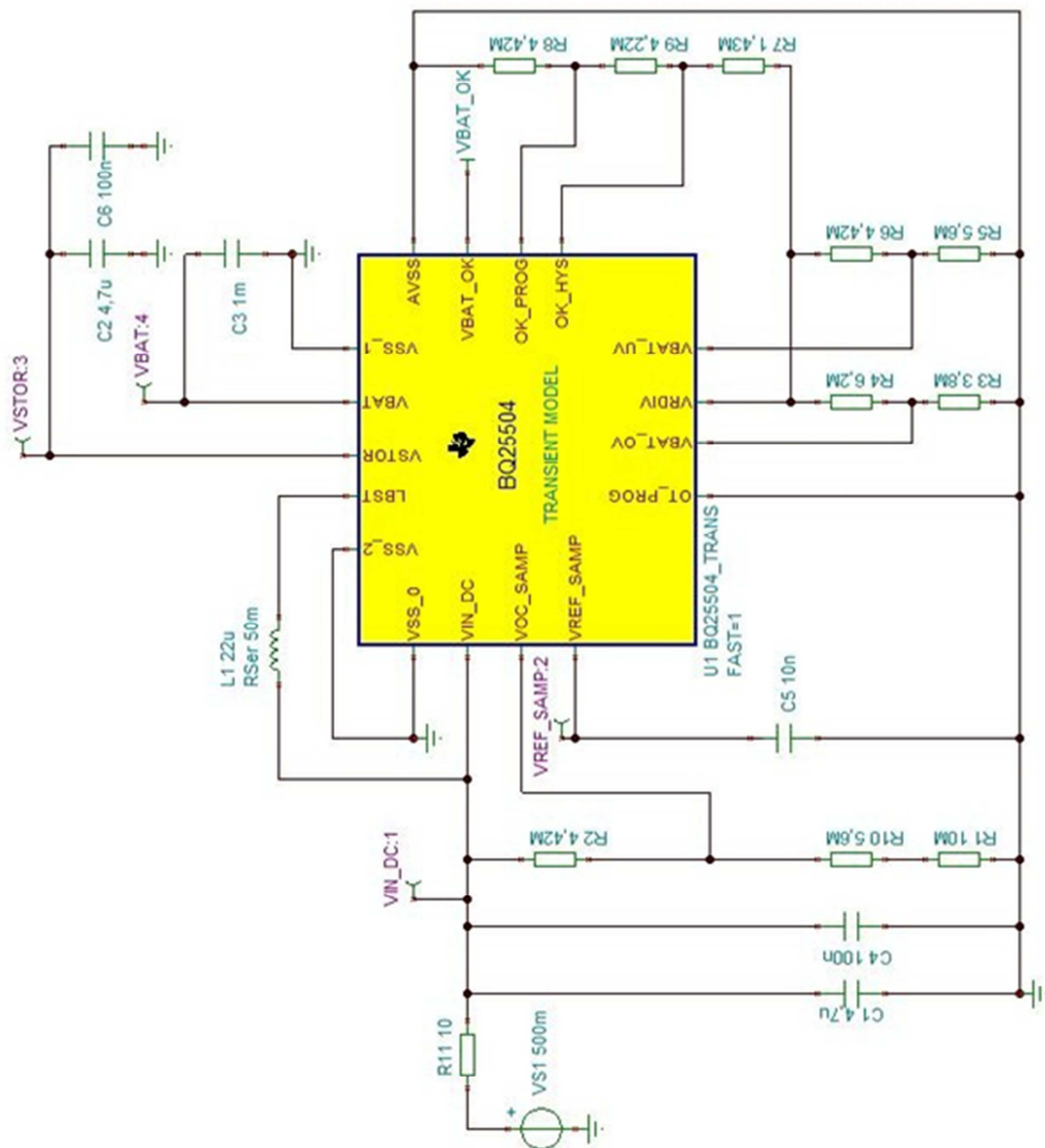
Příloha C: Měření se solárním článkem

Příloha D: Fotovoltaický článek

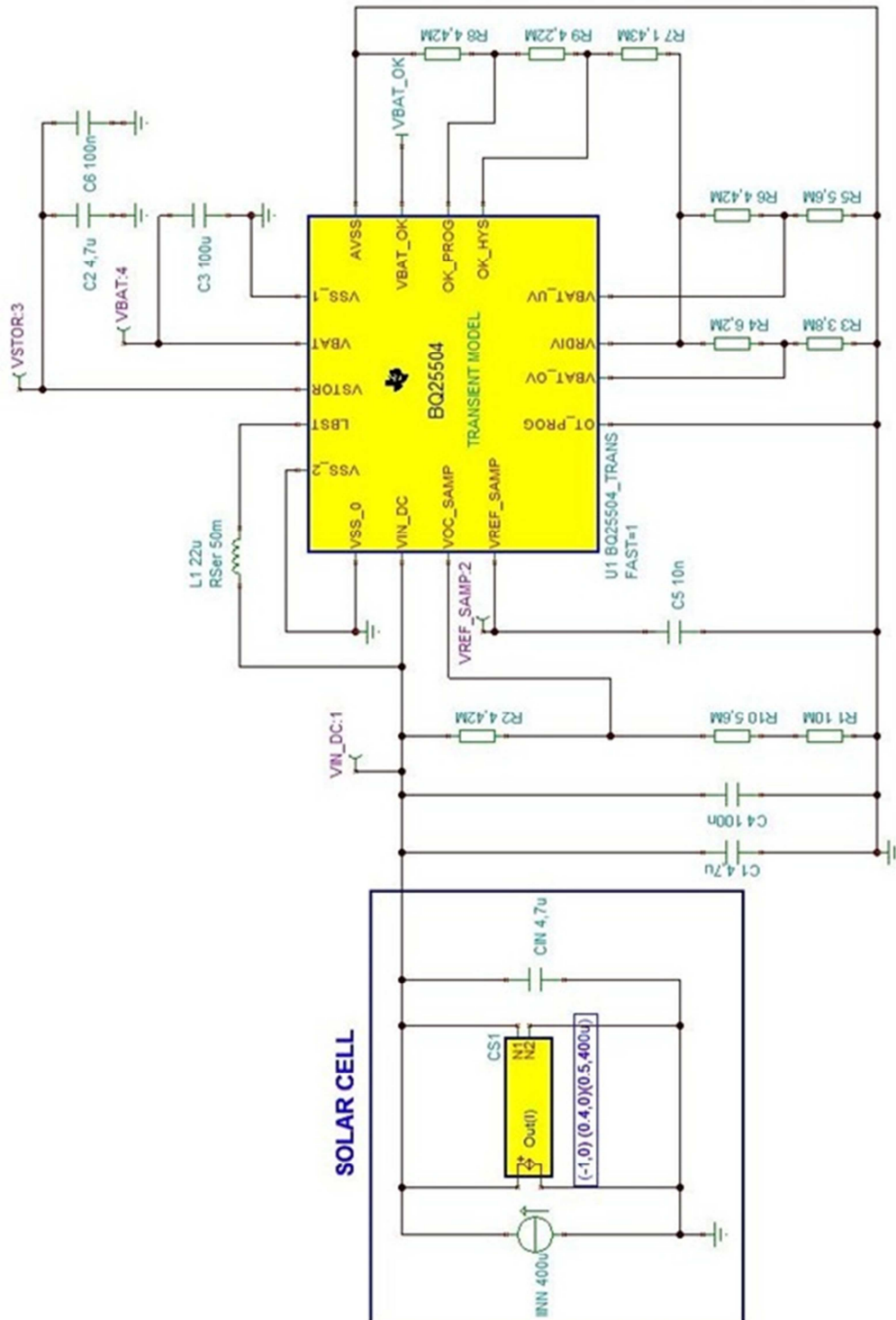
Příloha E: Blokové schéma

Příloha F: CD

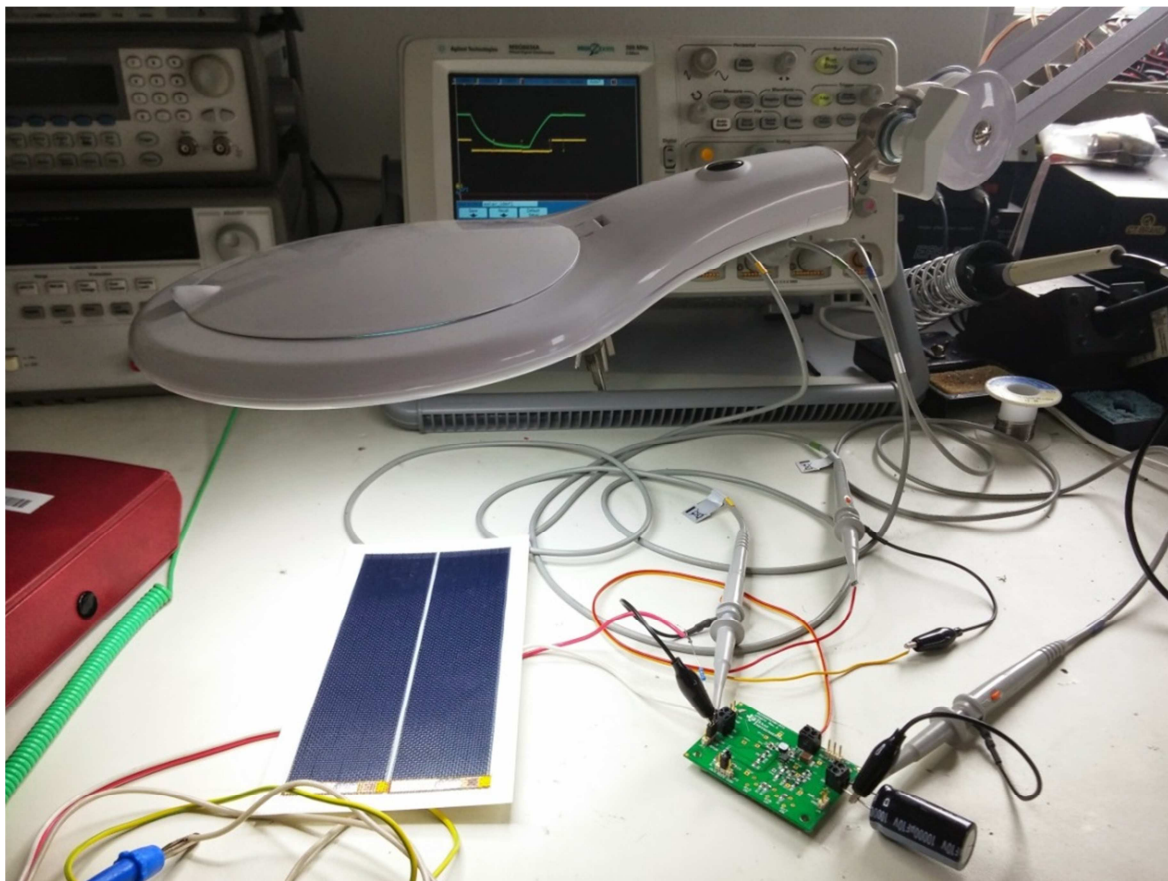
Příloha A: Schéma zapojení simulace s napěťovým zdrojem



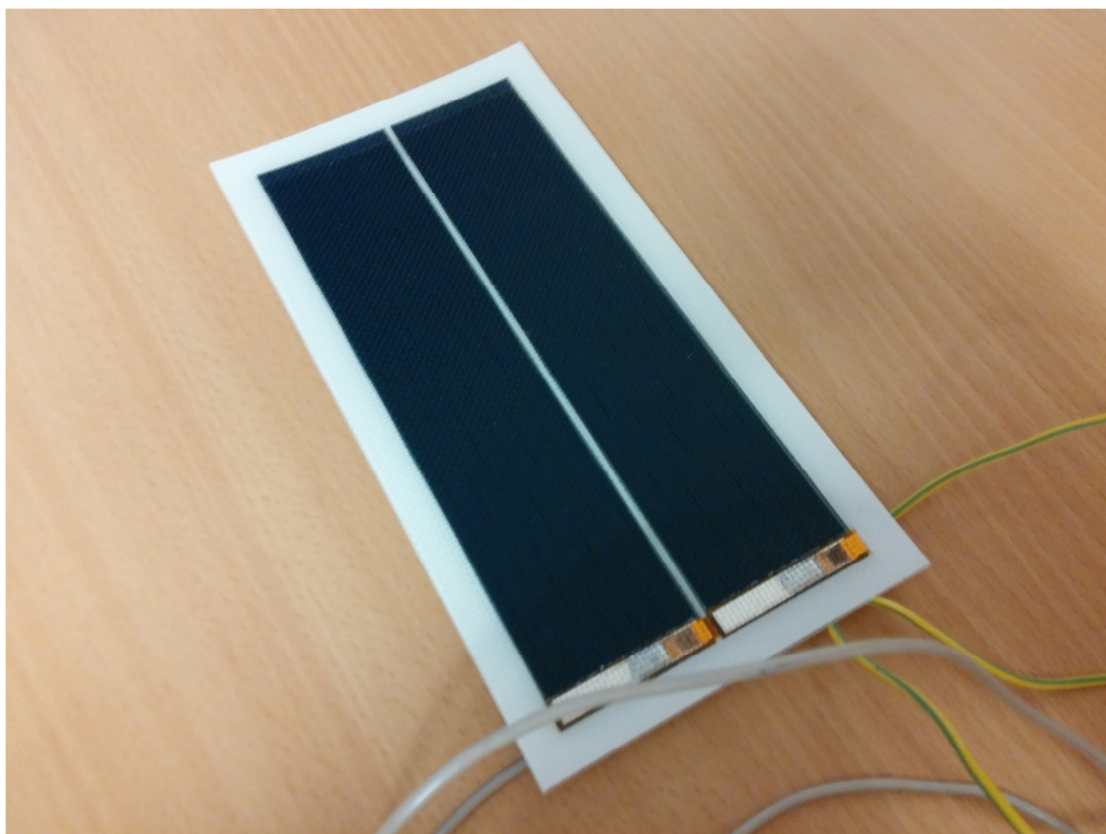
Příloha B: Schéma zapojení simulace se solárním článkem



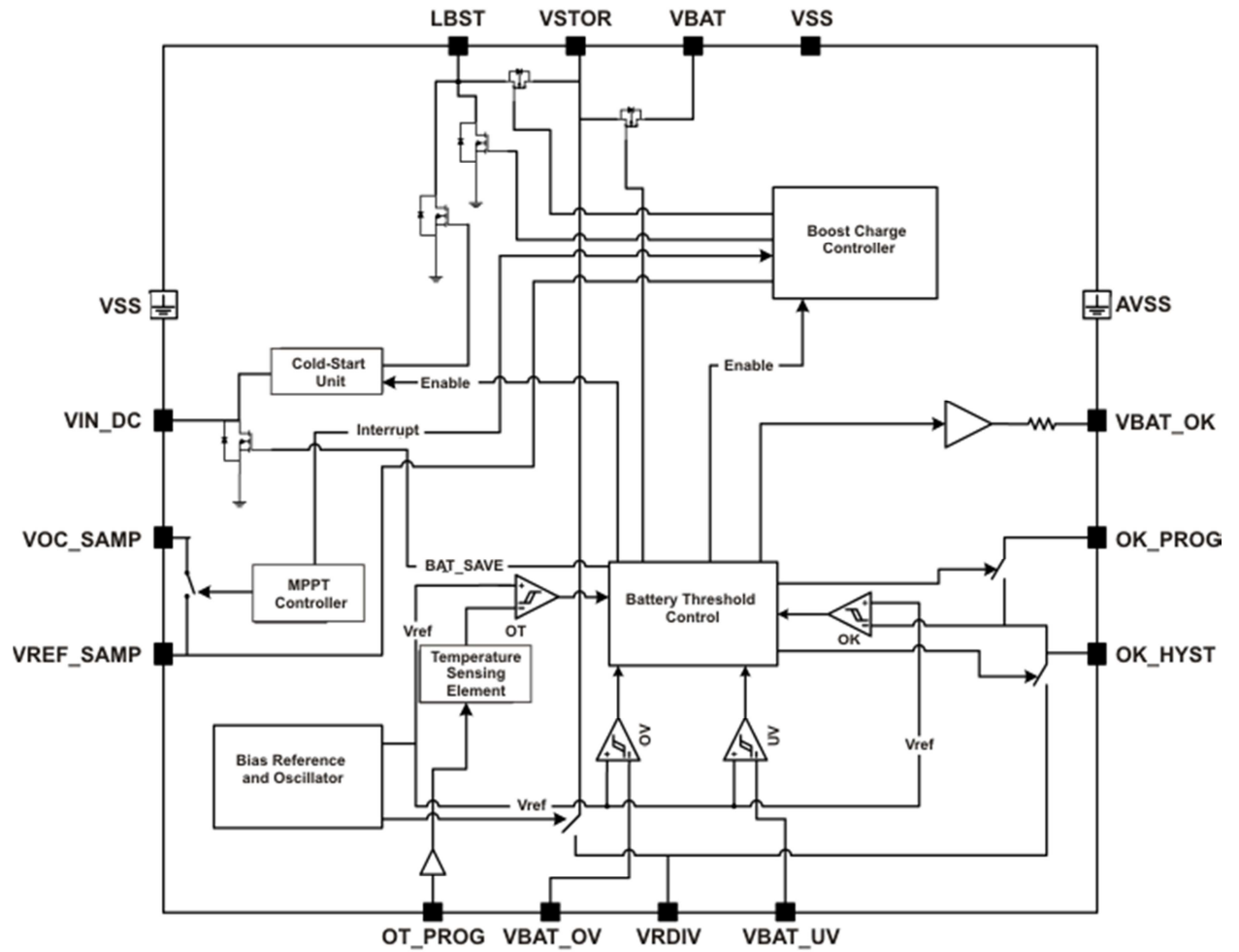
Příloha C: Měření se solárním článkem



Příloha D: Fotovoltaický článek



Příloha E: Blokové schéma



Příloha F: CD

K bakalářské práci je přiloženo CD s obsahem

- Bakalářská práce ve formátu .pdf
- Zdrojový kód pro vykreslení grafů
- Naměřená data
- Datasheet BQ25504