



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektrotechnologie
Technická 2, 166 27 Praha 6

Diplomová práce

Hodnocení BMS systémů

autor: **Bc. Pavel Lípa**
vedoucí práce: **Ing. Jan Koller, Ph.D**



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Lípa** Jméno: **Pavel** Osobní číslo: **420047**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Technologické systémy**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Hodnocení BMS systémů

Název diplomové práce anglicky:

Battery Management System Evaluation

Pokyny pro vypracování:

- 1) Realizujte, (a) nebo aplikujte, vybrané aktivní a pasivní BMS systémy na různé typy článků.
- 2) Proveďte srovnávací měření systému bez balancování, s aktivním a pasivním balancováním a to i s ohledem na specifika různých technologií článků.
- 3) Vyhodnoťte naměřená data a zhodnoťte jednotlivé systémy z hlediska energetických i ekonomických parametrů.

Seznam doporučené literatury:

- [1] REDDY, Thomas B. a David. LINDEN. Linden's handbook of batteries. 4th ed. New York: McGraw-Hill, c2011. ISBN 978-007-1624-213.
- [2] ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. FAKULTA Elektrotechnická. Katedra elektroenergetiky. Praha 2016. Bakalářská práce. Systém managementu baterie pro elektrokolo autor: Pavel Lípa vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Novák, Ph.D
- [3] Datové listy testovaných baterií

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jan Koller, Ph.D., katedra fyziky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **06.02.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **25.05.2018**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2019**

Ing. Jan Koller, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta



Poděkování

Touto cestou bych chtěl poděkovat Ing. Janu Kollerovi, Ph.D. za jeho odborné vedení a cenné rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce.

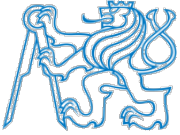
V neposlední řadě bych tímto chtěl poděkovat své rodině za její podporu a pochopení.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Datum: 27.5.2018

.....
podpis diplomanta



Název práce:

Aktivní BMS

Abstrakt:

Tato práce se zabývá popisem funkcí nejpoužívanějších systémů pro BMS u lithiových baterií, jejich porovnáním a návrhem aktivního balancéru. Práce v úvodu definuje jednotlivé systémové části u nejpoužívanějších BMS pro lithiové baterie.

Následně je v praktické části popsán návrh modulu aktivního balancování, kde jsou popsány jednotlivé kroky návrhu. V závěru praktické části jsou zobrazeny průběhy veličin modulu aktivního balancování a popis možných zlepšení. Předposlední kapitola zobrazuje průběhy napětí a SOC během balancování při různých podmínkách. Závěr práce se zabývá porovnáním pasivních a aktivních balancujících systémů jak z hlediska energetického, tak z hlediska ekonomického.

Klíčová slova:

BMS, baterie, aktivní balancování, energetické a ekonomické zhodnocení



Name of thesis:

Active BMS

Abstract:

This thesis deals with the description of the most frequently used BMS for lithium batteries, their comparison and the design of the active balancer. The work defines introduction the individual system parts of the most commonly used BMS for lithium batteries.

Subsequently, the practical part describes the design active balancing of the module, where the individual design steps are described. At the end of the practical sections, the waveforms of the active module balancer and the possible improvements are displayed. The penultimate chapter displays voltage time dependencies and state of charge during balancing under different conditions. The conclusion of the thesis deals with the comparison of passive and active balancing systems from energetic and economic point of view.

Klíčová slova:

BMS, cell, active balancing, economic and energetic evaluation

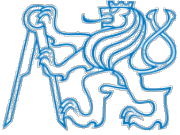


Obsah

Seznam symbolů a zkratk	- 7 -
1. Úvod	- 8 -
2 Popis funkcí nejpoužívanějších BMS u Li-ion baterií	- 9 -
2.1 Balancování	- 10 -
2.2 Ochranný obvod	- 11 -
2.3 Přednabíjecí obvod (Precharge)	- 12 -
2.4 Měření proudu	- 13 -
2.5 Měření SoC (stav náboje)	- 13 -
2.6 Měření teploty	- 14 -
2.7 Nabíjení	- 15 -
3 Návrh, realizace a oživování modulu aktivního balancování	- 17 -
3.1 Blokový návrh	- 17 -
3.2 Popis cyklu LT8584	- 18 -
3.3 Návrh balancování	- 20 -
3.3.1 Výběr transformátoru	- 20 -
3.3.2 RCD odlehčovač	- 21 -
3.3.3 Výstupní dioda	- 22 -
3.3.4 Výstupní kapacitor	- 23 -
3.3.5 Indikace balancování	- 24 -
3.3.6 Vývojový diagram balancování	- 25 -
3.3.7 Zapojení bateriových článků	- 26 -
3.4 Oživení a odladění modulu aktivního balancování	- 27 -
3.4.1 Vyhlazení vstupního proudu	- 27 -
3.4.2 Přidání RC odlehčovacího obvodu pro snížení zákmitů napětí na spínacím prvku v okamžiku spínání	- 29 -
3.4.3 Optimalizace řídicího algoritmu balancování	- 30 -
4 Porovnání aktivního balancování na různých technologiích bateriových článků	- 31 -
4.1 Aktivní balancování článků LiFePO ₄ (Winston 100Ah)	- 31 -
4.2 Aktivní balancování článků Li-ion (Samsung IRN18650 30Q 3Ah)	- 32 -



5	Zhodnocení jednotlivých systémů z hlediska energetických a ekonomických parametrů.....	- 34 -
5.1	Ekonomické zhodnocení.....	- 34 -
5.1.1	Nízko výkonový modul pasivního balancování ($I_{bal. 150\text{ mA}}$).....	- 34 -
5.1.2	Výkonový modul pasivního balancování ($I_{bal. 1\text{ A}}$).....	- 35 -
2.1.1	Výkonový modul pasivního balancování ($I_{bal. 1\text{ A}}$).....	- 36 -
2.2	Energetické zhodnocení.....	- 38 -
6	Závěr.....	39
	Seznam použité literatury.....	40
	Seznam obrázků.....	41
	Seznam tabulek.....	42
	Seznam příloh.....	43



Seznam symbolů a zkratek

BMS	Battery management system
MIK	Mikrokontroler
U_{BAL}	Hranice napětí, do kdy má BMS balancovat [V]
U_{DIF}	Rozdílové napětí [V]
LTC	Linear Technology
PWM	Pulzně šířková modulace
IO	Integrovaný obvod
MPPT	Maximum power point tracking
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
AC	Alternating current
DC	Direct current
EMI	Electromagnetic interface
RCD	Kombinace pasivních součástek (Odpor, Kondenzátor, Dioda)



1. Úvod

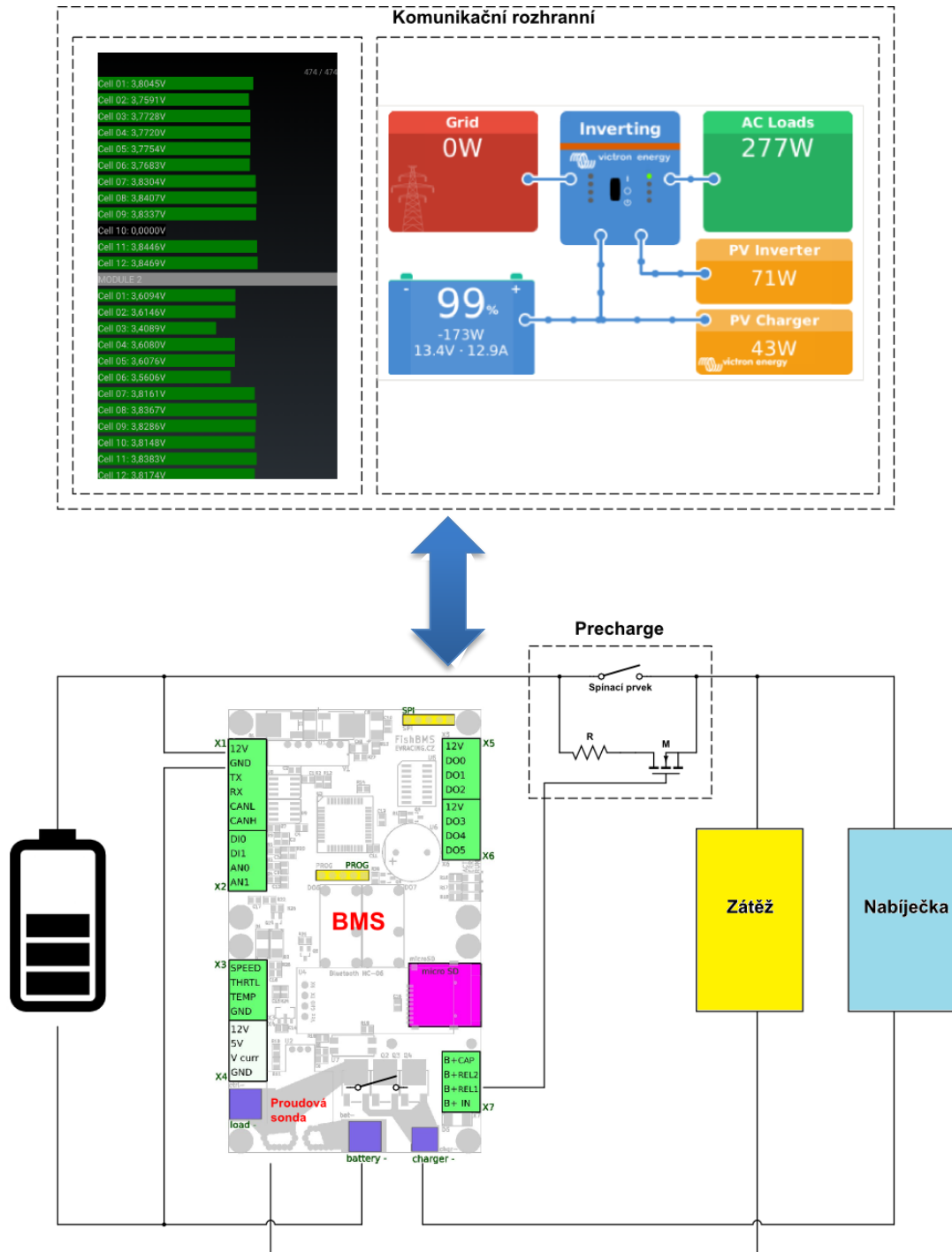
Dnešní elektronická zařízení mají vyšší mobilitu a jsou „zelenější“ než kdy předtím. Pokroky baterií napomáhají tomuto postupu v široké škále výrobků od přenosného elektrického nářadí až po zásuvný hybridní elektrický pohon vozidel. V těchto systémech je nejpoužívanější technologií bezpochyby li-ion baterie. S nástupem této technologie, se začaly vyvíjet i technologie, týkající se monitorování a řízení baterie. Důvodem je potřeba udržet parametry jednotlivých článků v poměrně striktně daných mezích.

Cílem této diplomové práce je navrhnout aktivní systém managementu baterie pro různé typy článků (Li-Pol, Li-ion, LiFePO₄), který bude články chránit před užíváním v nevhodných pracovních režimech. V žádném případě nesmí dojít k opuštění pracovních oblastí článků, které jsou výrobcem udávány v katalogovém listu, neboť by tak mohlo dojít k jeho poškození. Z tohoto důvodu je nutné nabíjecí a vybíjecí cykly co nejpřesněji monitorovat.



2 Popis funkcí nejpoužívanějších BMS u Li-ion baterií

Tato kapitola se zabývá teoretickým popisem základních funkcí BMS u Li-ion baterií, které budou v následujících podkapitolách vysvětleny.



Obrázek 2.1: Blokové schéma BMS.

2.1 Balancování

V současné době se používají dva typy balancování:

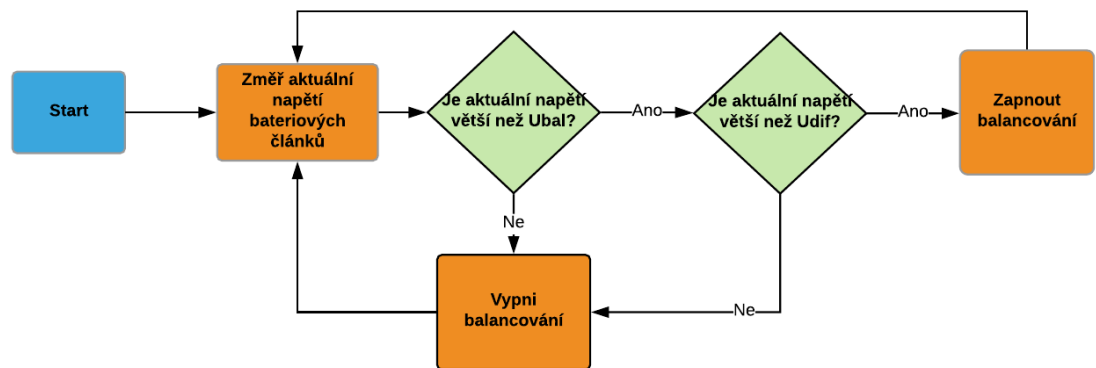
- Aktivní
- Pasivní

Mezi nejpoužívanější patří v současnosti balancování pasivní, které předčí aktivní balancování svou jednoduchostí a ekonomickou stránkou. Základní princip spočívá v přeměně přebytečné elektrické energie z bateriového článku na energii tepelnou.



Obrázek 2.2: Zjednodušené schéma balancovacího obvodu.

Na (obr. 2.2) je zobrazeno základní schéma takového obvodu. Ve většině případů se skládá pouze z odporu, spínacího (nejčastěji tranzistor) a řídicího prvku (MIK). Pro ukázkou logiky řízení a monitorování je zobrazen vývojový diagram (Obr. 2.3).



Obrázek 2.3: Zjednodušené blokové schéma logiky řízení balancování.

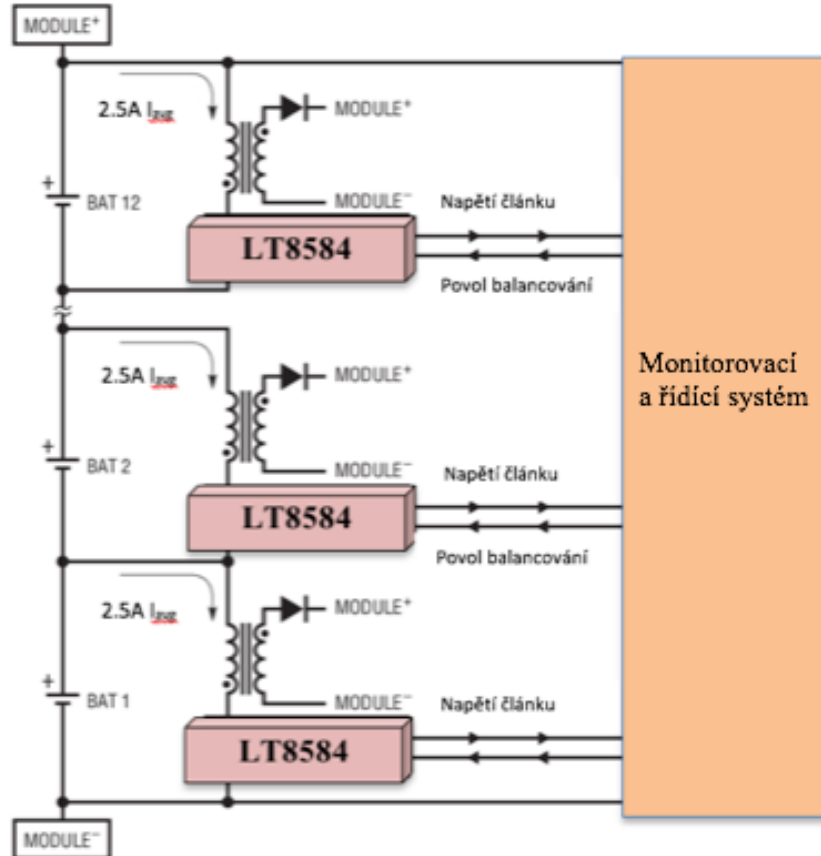
U_{BAL} ... Nastavená mezní hodnota napětí, od které BMS balancuje.

U_{DIF} ... Nastavená mezní hodnota rozdílu napětí jednotlivých článků, od které BMS balancuje.

Druhým typem je balancování aktivní. Tento typ balancování je v současné době spíše „tabu“, jelikož se jedná o velmi komplexní a ekonomicky nákladné řešení. Základním principem je pomocí transformátoru a spínacího prvku (tranzistoru) přenést náboj z více nabitého článku do článku méně nabitého. Více viz. (obr. 2.4). Zatímco pasivní balancování přeměňuje tuto přebytečnou energii v teplo, aktivním balancováním se vrací tato energie zpět do baterie. Další výhodou aktivního balancování je to, že pasivní balancování se obvykle provádí pouze při nabíjení bateriových článků. Z toho plyne, že nelze balancovat napětově nesrovnané bateriové články při



vybití (cca pod 50% SoC), což snižuje využitelnou kapacitu baterie (SoC se počítá podle napětíově nejslabšího článku).

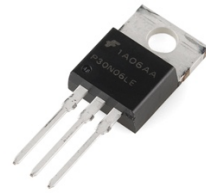


Obrázek 2.4: Zjednodušené schéma obvodu aktivního balancování [2].

Princip (obr 2.4) spočívá v tom, že pomocí integrovaného obvodu LT8584, který se v podstatě skládá z NPN tranzistoru doplněného o monitorovací a řídicí funkce, spínáme bateriový článek. Vyvolaný proudový impuls indukuje na sekundární straně transformátoru napětí o něco vyšší než je napětí bateriového packu a vlivem rozdílu napětí se vyvolá proud který se vrací zpět do baterie a dobíjí slabší bateriové články.

2.2 Ochranný obvod

Další důležitou součástí dnešních BMS je možnost připojení/odpojení baterie k/od zátěže. Hlavním úkolem je držet baterii ve vymezené pracovní oblasti a v případě opuštění této oblasti, odpojit baterii od zátěže, či nabíjecího zařízení. Mezi nejpoužívanější spínací prvky, patří prvky polovodičové a různé typy relátek (zejména bistabilní), které jsou zobrazeny na (obr. 2.5 a 2.6).



Obrázek 2.5: Spínací prvek (Tranzistor) [3].

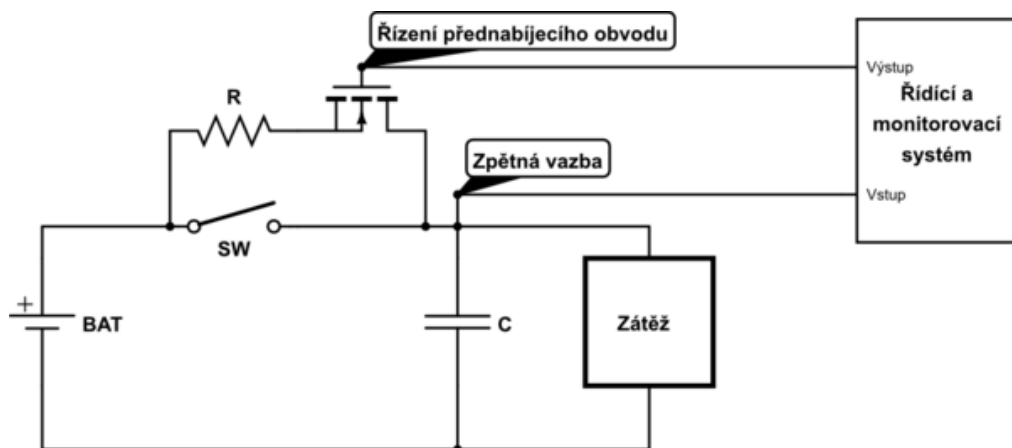


Obrázek 2.6: Bistabilní relé.

Schématické zapojení spínacích prvků je znázorněno na (obr. 2.7), kde spínač bývá zapojen mezi baterií a zátěží. Při spínání obvodu, nejprve MIK zkontroluje, zda úspěšně proběhl precharge (více viz následující podkapitola) a teprve poté sepne spínací prvek a tím připojí bateriový obvod k zátěži. V opačném případě, při odepínání zátěže od baterie, MIK vyhodnotí možnost poruchy baterie (nízké napětí, vysoká teplota) a odpojí baterii od zátěže. Tímto způsobem je baterie ochráněna před zničením.

2.3 Přednabíjecí obvod (Precharge)

Většina dnešních zařízení pracujících s bateriovými články (elektromobil, solární bateriové uložení atd.) využívají střídače napětí, které transformují stejnosměrné napětí na napětí střídavé. Užití střídače má však jednu nevýhodu, a to, že mají na vstupu velký kapacitor. Uvažovali bychom spínací obvod, jako je na (obr. 2.7), došlo by bez použití přednabíjecího obvodu k velkému proudovému rázu, který by mohl poškodit spínací prvek.



Obrázek 2.7: Zjednodušené schéma přednabíjecího obvodu.



Základním principem přednabíjecího obvodu je tedy nabití kapacitor pomocí předřadného odporu R na určitou procentuální hladinu napětí baterie (70% až 80%). Po dosažení této hladiny napětí na kapacitoru se rozpojí přednabíjecí obvod a sepne hlavní silový kontakt. Tím se baterie připojí přímo k zátěži.

2.4 Měření proudu

Měření proudu je nedílnou součástí BMS. Hlavním důvodem měření proudu, který teče z/do zátěže, je výpočet odebrané kapacity [Ah] z bateriového článku. Pro měření se v dnešní době hojně využívají Hallovy sondy a odporové bočníky. Hallovy sondy se používají spíše v aplikacích vyšších výkonů, jelikož galvanicky oddělují měřící obvod od obvodu silového. Kdežto odporové bočníky se využívají spíše v nízkovýkonových aplikacích. Jejich výhodou je vyšší přesnost a odolnost proti rušení. Pro ukázkou jsou oba měřící senzory zobrazeny na následujících obrázcích.



Obrázek 2.8: Bočník [4].



Obrázek 2.9: Hallův senzor [5].

2.5 Měření SoC (stav náboje)

Odhad stavu nabití bateriového článku je velice důležitý. Dá se říci, že z pohledu uživatele je to jeden z nejdůležitějších ukazatelů aktuálního stavu baterie, vyjádřen v [%]. Většina dnešních BMS využívají pro odhad stavu nabití Coulombovu metodu. Tato metoda je založena na integraci odebraného/dodaného proudu za čas. Rovnice pro výpočet SoC pomocí Coulombovi metody je dána:



$$SoC = SoC(0) + \frac{1}{C_n} \int (I_{bat} - I_{loss}) dt$$

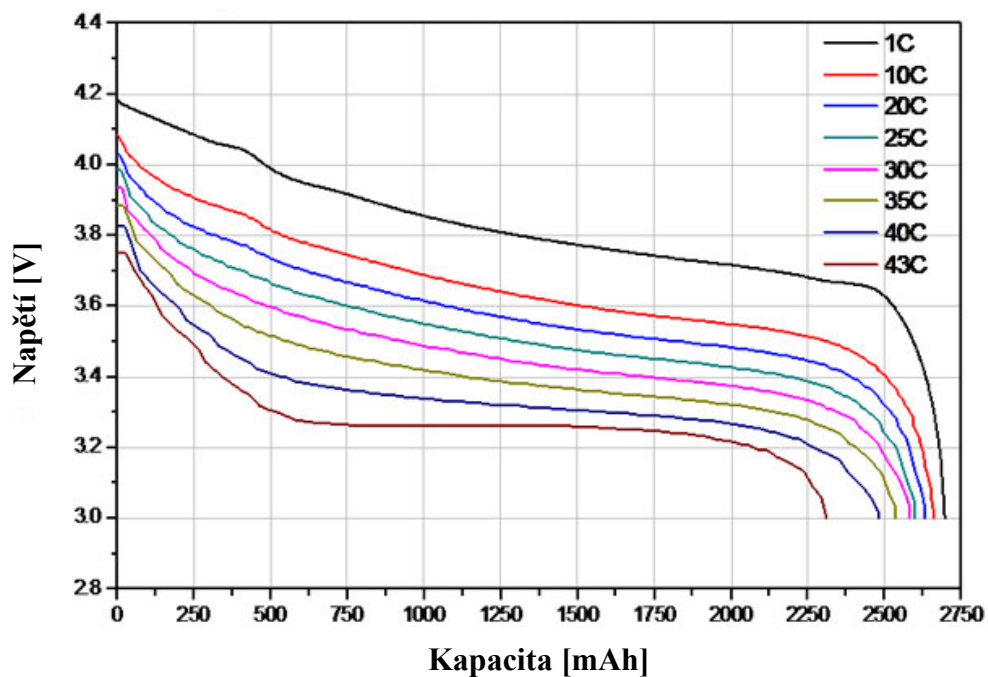
$SoC(0)$... počáteční odhad SoC

C_n ... jmenovitá kapacita v ampérsekundách

I_{bat} ... kladná hodnota proudu pro nabíjení a záporná hodnota pro vybíjení

I_{loss} ... proud ztrátou chemické reakce

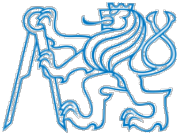
Coulombova metoda má však zásadní nedostatek. Při zapojení více článků v sérii vzniká tzv. akumulací chýba. Ta vzniká vlastní spotřebou článku, která není do výpočtu zahrnuta a v konečném výsledku se může vypočtená hodnota stavu nabití lišit od skutečné hodnoty. Z toho důvodu není metoda SoC realizována pouze počítáním náboje pomocí Coulombovi metody, ale je doplněna o naměřené hodnoty $U_{oc} = f(SoC)$ získaných od výrobce akumulátoru při nulovém zatížení. Z těchto dat se poté koriguje hodnota SoC v okamžiku, kdy není z baterie odebírán proud, nebo jen nepatrná hodnota. V opačném případě, kdyby byla hodnota SoC počítána pouze z naměřených hodnot $U_{oc} = f(SoC)$, došlo by též ke zkreslení hodnoty SoC. V okamžiku, kdy začneme dodávat/odebírat proud, tak se změní charakteristika $U = f(SoC)$ podle velikosti proudu. Na (obr. 2.10) jsou zobrazeny typické průběhy pro různě velký proud. Při hodnotě odebíraného proudu 40C a napětí 3,5 V, dotaneme SoC 90%. Kdežto kdybychom vycházeli pouze z charakteristiky $U_{oc} = f(SoC)$ dostali bychom SoC někde okolo 10%, což je nepřipustné.



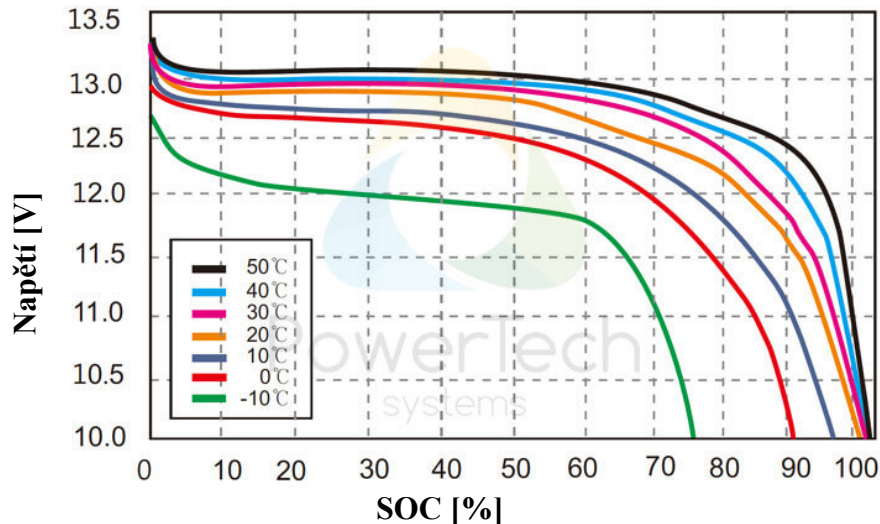
Obrázek 2.10: Průběhy $U=f(Soc)$ při různě velkých proudech [6].

2.6 Měření teploty

Dalším důležitým aspektem je měření teploty bateriových článků. Jednak z důvodu ochrany bateriového článku, tak z důvodu korekce SoC. BMS by měl bateriové články chránit před používáním mimo pracovní teploty. V případě přehřátí by měl BMS omezit výkon odebíraný z baterie, či úplně odpojit zátěž, aby nedocházelo k přehřívání článků. V opačném případě při velmi nízkých teplotách je důležité korigovat závislost $U_{oc} = f(SoC)$, jelikož nám klesá kapacita baterie. Tyto průběhy jsou zobrazeny na (obr. 2.11). U komplexnějších zařízení, jako jsou například elektromobily Tesla, se problém s nízkou teplotou bateriových článků řeší tak, že BMS na počátku



jízdy zakáže rekuperování, omezí výkon odebíraný z baterie a povolí pouze vybíjení (uvažují během jízdy), kterým se bateriové články zahřejí. Po dosažení určité teploty článků (přibližně 20 °C) se tyto omezení zruší.



Obrázek 2.11: Závislost $U = f(\text{SoC})$ při různých teplotách a stejné hodnotě vybíjecího proudu [7].

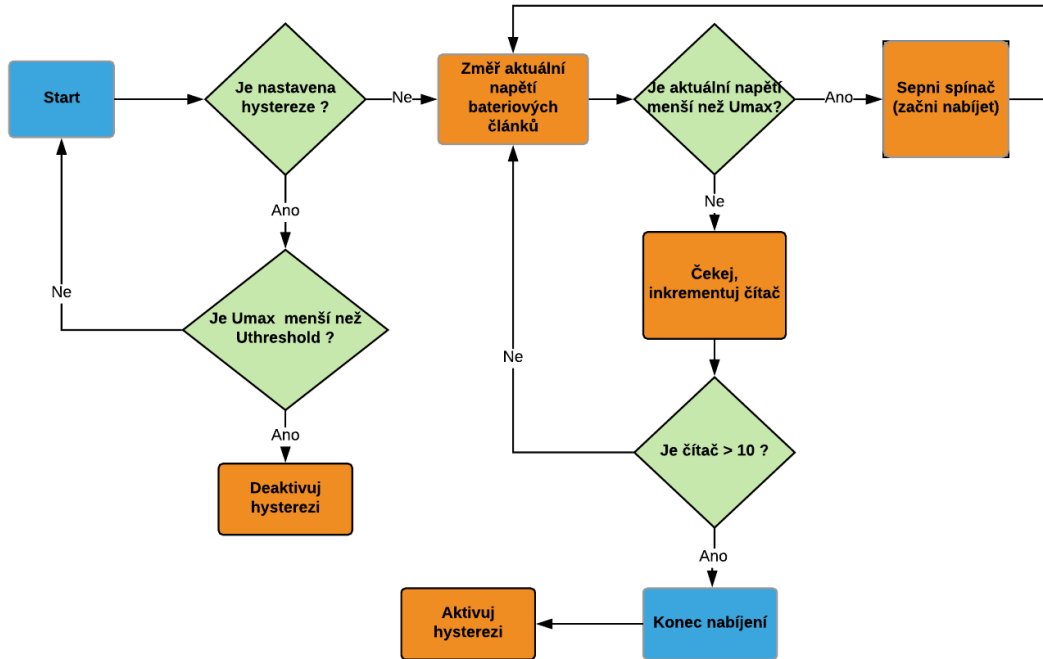
Typ baterie	Teplota nabíjení	Teplota vybíjení	Poznámka
Pb	-20 °C až 50 °C	-20 °C až 50 °C	Nabíjení pod bodem mrazu je omezeno proudem 0,3 C. Snížení nabíjecího napětí o 3 mV/°C pro vyšší teploty.
NiCd, NiMH	-20 °C až 45 °C	-20 °C až 65 °C	Nabíjení při teplotách mezi -18 °C a 0 °C je omezeno proudem 0,1 C. Pro nižší teploty se výrazně snižuje účinnost nabíjení
Li-ion	0 °C až 45 °C	-20 °C až 60 °C	Nabíjení pod bodem mrazu je zakázané. Kapacita roste s teplotou, ale za cenu snížení životnosti.

Tabulka 1: Teplotní rozsahy sekundárních článků proudu [9].

Tabulka 2.1 zobrazuje pracovní teploty sekundárních článků, které musí BMS permanentně hlídat. Důležité je poznamenat, že se tyto hodnoty mohou lišit podle výrobce.

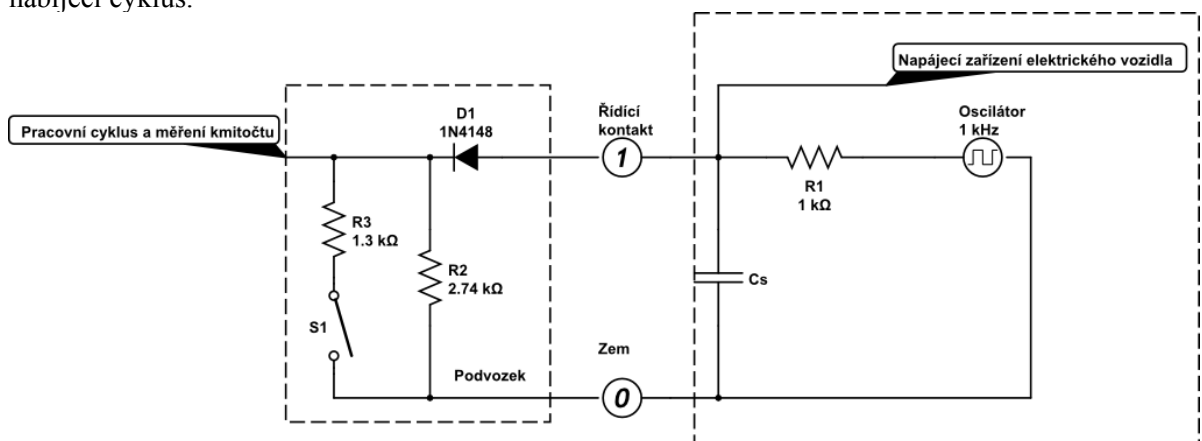
2.7 Nabíjení

BMS podle napětí bateriových článků řídí nabíjecí cyklus, což lze provést dvěma způsoby. V prvním případě BMS řídí přímo spínací prvek, kterým je nejčastěji tranzistor (MOSFET), či relé. Dojde-li k nabití baterie, tak se spínací prvek rozepne a tím se přeruší nabíjecí cyklus. Tento způsob se používá spíše v aplikacích nižších výkonů, jelikož při stejnosměrném nabíjení nám vznikají problémy s zhášením oblouku. Na následujícím obrázku je zobrazen zjednodušený vývojový diagram řízení nabíjecího cyklu.



Obrázek 2.12: Zjednodušený vývojový diagram nabíjecího cyklu.

Druhou variantou je přímé řízení nabíjecího zařízení přes vhodné komunikační rozhraní. Například v solárních uložištích se k nabíjení bateriových článků využívají MPPT trackery, které řídí BMS a v okamžiku nabití baterie pošle příkaz k vypnutí nabíjení. Druhým příkladem je AC nabíjení elektromobilů, kde BMS ovládá spínací kontakt S1, který je zobrazen na (obr. 2.13). Dojde-li k sepnutí/rozepnutí kontaktu, tak se změní hodnota odporu daná paralelní kombinací R2 a R3, tím se změní hodnota napětí na těchto odporech a nabíjecí stanice podle těchto stavů řídí nabíjecí cyklus.



Obrázek 2.13: Ukázka řízení nabíjecího zařízení v elektromobilu.

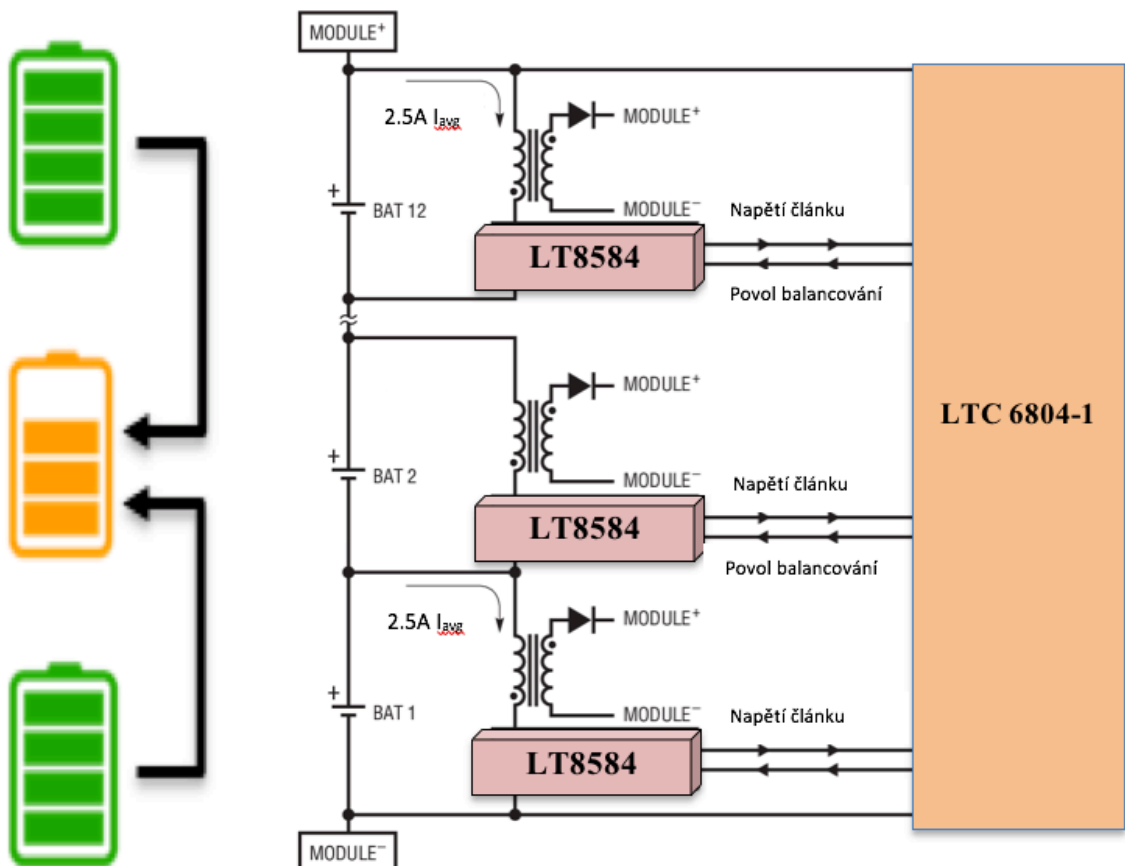


3 Návrh, realizace a ožiování modulu aktivního balancování

V této části bude stručně popsán návrh jednotlivých částí a vlastnosti modulu aktivního balancování. Základ modulu aktivního balancování tvoří IO LTC6804-1 a LT8584 od Linear Technology. Výsledné schéma zapojení se nachází v příloze číslo 3. Kapitola vychází ze zdrojů [1] a [2].

3.1 Blokový návrh

Blokové schéma vychází z katalogového listu IO LT8584 a LTC6804-1, jak je zobrazeno na obr. 3.1. Modul aktivního balancování (dále jen MAB) musí být možno připojit k libovolnému počtu článků, které bude schopen aktivně balancovat a vyčítat potřebná data pro zajištění jejich správné funkce. Dojde-li k odpojení napájení, popřípadě dosažení minimální hodnoty napětí bateriového článku udávané výrobcem, nesmí MAB odebírat žádnou energii, aby jej nepoškodil.



Obrázek 3.1: Blokové schéma modulu aktivního balancování [2].



LT8584 - popis

LT8584 je monolitický DC/DC konvertor, který slouží k aktivnímu balancování vysokonapěťových baterií. Vysoká účinnost spínacího prvku výrazně zvyšuje balancující proud a zároveň snižuje tepelné ztráty. Aktivní balancování umožňuje obnovu náboje bateriového článku, který je součástí velkého baterie s nižší hodnotou kapacity než články ostatní.

LT8584 obsahuje integrovaný spínač, který snižuje návrhovou složitost aplikačního obvodu. IO je uzpůsoben tak, aby ho bylo možné řídit pomocí IO řady LTC680x, čímž odpadá řada nepříjemností týkajících se řízení výkonových spínacích prvků. LT8584 také poskytuje systémovou telemetrii včetně monitorování proudu a teploty při použití s řadou IO LTC680x. V neaktivním stavu, je celková spotřeba proudu z baterie menší než 20nA

Souhrn technických parametrů LT 8584:

- 2,5A balancující proud
- Integrovaný 6A, 50V výkonový spínač
- Kompatibilní s IO LTC680x
- Nízká spotřeba v režimu spánku
- Teplotní senzor
- Proudový senzor
- Komunikační rozhraní: pomocí napěťových hladin
- 16 pinové TSSOP pouzdro

3.2 Popis cyklu LT8584

1 Primární strana – nabíjení

Po sepnutí vnitřního NPN tranzistoru se na primární straně transformátoru objeví napětí $U_{CEsat} - U_{in}$. V důsledku toho začne primárním vinutím linárně narůstat proud na hodnotu $(U_{CEsat} + U_{in})/L_{pri}$. Vstupní napětí se transformuje na sekundární vinutí jako $-N \cdot (U_{CEsat} - U_{in})$ a sekundárním vinutím by tím pádem měl téci proud vyvolaný rozdílem napětí. Tomu však zabraňuje sekundární dioda. Tím pádem se energie ukládá v jádře transformátoru.

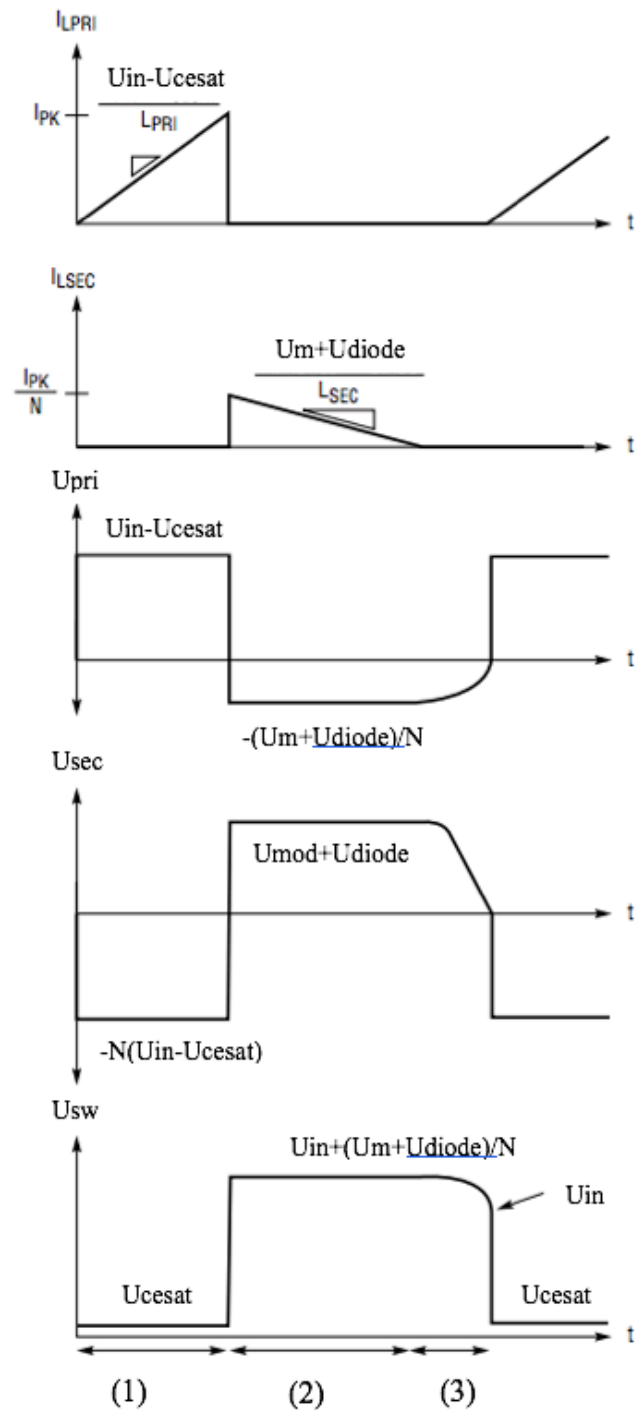
2 Sekundární strana – přenos energie

Dosáhne-li vstupní proud maximální hodnoty, tak dojde k rozepnutí NPN tranzistoru a na sekundární straně transformátou dojde k přenosu energie. Energie uložená v jádře transformátoru vyvolá na sekundáru napětí větší než $U_{module} + U_{diode}$, které otevře výstupní diodu a začne procházet proud, který nabíjí výstupní kondenzátor, či baterii. Během této doby se na primární straně transformátoru objeví napětí $(\frac{U_{module} + U_{diode}}{N})$.



3 Detekce nespojitého režimu

Po vyčerpání energie, uložené v transformátoru se na kolektoru spínacího prvku objeví nulové napětí, respektive napětí bateriového článku U_{in} . V okamžiku, kdy komparátor IO LT8584 změří napětí na kolektoru menší než $(U_{in} + 95 \text{ mV})$, čímž dojde k novému spínacímu cyklu.



Obrázek 3.2: Zobrazení typického průběhu jednoho spínacího cyklu [2].



3.3 Návrh balancování

Řídící část MAB je totožná s řídicí částí z mé bakalářské práce [1]. V této práci se budu zabývat pouze návrhem obvodu aktivního balancování, tzn. aby bylo možné použít předchozí IO LTC680x a stejné komunikační rozhraní. Všechny tyto kladené podmínky splňuje právě IO LT8584, který pochází z rodiny Linear Technology a je určen právě k použití s obvody LTC680x. V přechozí podkapitole je detailněji rozebrán. Avšak LT8584 nemá integrovány všechny potřebné komponenty v pouzdře a je zde potřeba navrhnout chybějící komponenty, mezi které patří: transformátor, výstupní dioda, výstupní kapacitor a RCD odlehčovač. Návrh dílčích komponent je popsán v následující části.

3.3.1 Výběr transformátoru

Při výběru transformátoru byl kladen požadavek na malé rozměry a vysokou účinnost, která by měla být větší než 80%. Důvodem je redukce tepelných ztrát, aby mohl být transformátor použit na vysoce integrovaných plošných spojích bez přídavných tepelných chladičů.

Jako počáteční podmínka byla použita frekvence spínacího prvku a vrcholová hodnota proudu 6A dána též spínací prvkem. Převodní poměr transformátoru by měl být vybrán dle datasheetu [2] podle efektivní hodnoty vybíjecího proudu. Efektivní hodnota proudu je dána vztahem:

$$I_{ef} = I_{pk} \sqrt{\frac{f_{BM} \cdot t_{ON}}{3}} = 6 \cdot \sqrt{\frac{10 \cdot 10^4 \cdot 10 \cdot 10^{-6}}{3}} \cong 1,1 \text{ A}$$

I_{pk} ... Vrcholová hodnota proudu

t_{ON} ... Doba sepnutí

f_{BM} ... Hraniční frekvence spínacího prvku

Efektivní hodnotu proudu lze měnit zvyšováním, nebo snižováním poměru mezi dobou sepnutí a vypnutí. Doba vypnutí je nastavena převodním poměrem transformátoru N . Následující rovnice nastaví dobu vypnutí přibližně na 1/3 doby sepnutí k optimalizaci přenosu energie a účinnosti.

$$N = \frac{p_1}{p_2} = \frac{U_{module}}{3 \cdot U_{in}} = 28$$

p_1 ... Počet závitů primárního vinutí

p_2 ... Počet závitů sekundárního vinutí

U_{module} ... Napětí bateriového packu

U_{in} ... Napětí článku

Hodnota doby vypnutí by neměla klesnout pod 1/5 hodnoty doby sepnutí, aby byla zaručena dostatečná účinnost. Na druhou stranu v některých aplikacích je potřeba, za prvé nižší hodnota efektivního proudu a za druhé nižší tepelné ztráty. Oba tyto požadavky mohou být upraveny zvýšením převodního poměru N . Následující rovnice vyjadřuje velikost indukčnosti primárního vinutí:



$$L_{pri} = \frac{1}{I_{pk} \cdot f_{Bm} \cdot \left(\frac{1}{U_{in}} + \frac{N}{U_{module}} \right)} = \frac{1}{6 \cdot 10 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{1}{3,6} + \frac{1}{28,8} \right)} = 4,5 \mu\text{H}$$

Hodnota primární indukčnosti by měla být v rozmezí 2,2 μH do 10 μH . Nižší hodnota způsobí že spínací prvek LT8584 vyhodnotí sekundární obvod jako rozpojený a vyšší hodnota způsobí chybový stav, který detekuje impedanční detektor.

Ve výsledku byl vybrán transformátor NA6252 [8], který doporučuje výrobce IO LT8584. Důvodem jsou právě zmiňované parametry, vhodné hodnoty indukčnosti (primární, sekundární a rozptylová), prověření a vyzkoušení funkčnosti se zmiňovaným integrovaným obvodem.

3.3.2 RCD odlehčovač

RCD odlehčovače slouží pro ochranu a zlepšení výkonu polovodičových spínacích součástek (v našem případě LT8584). Jejich cílem je:

- Omezit nebo eliminovat napěťové nebo proudové špičky
- Omezit di/dt nebo du/dt
- Omezit celkové spínací ztráty
- Omezit EMI utlumením napěťových a proudových zákmitů.

Vlivem rozptylové indukčnosti transformátoru, může během spínacích procesů vznikat přídatné napětí na vnitřním kolektoru NPN tranzistoru IO LT8584, které zvyšuje spínací ztráty. V některých případech může dojít i k poškození spínacího prvku. Z těchto důvodů je potřeba navrhnout RCD odlehčovač. Při návrhu vycházím ze známe rozptylové indukčnosti vinutí transformátoru a spínací frekvence IO.

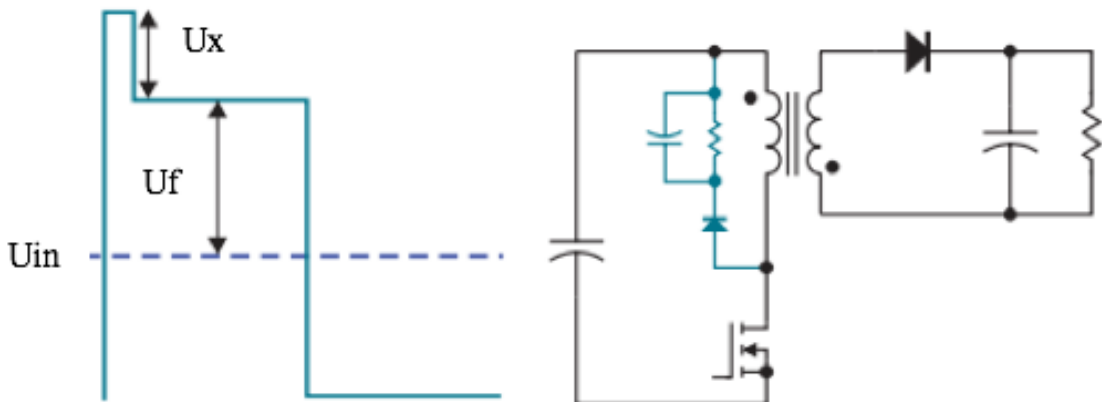
Nejprve si určíme maximální výkon uložený v rozptylové indukčnosti, který bude potřeba absorbovat v RCD obvodu:

$$P_l = \frac{1}{2} \cdot L_{leak} \cdot I_p^2 \cdot f_s = \frac{1}{2} \cdot 76 \cdot 10^{-12} \cdot 6^2 \cdot 71428 = 96,4 \text{ mW}$$

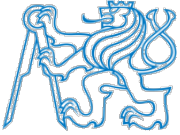
L_{leak} ... Rozptylová indukčnost.

I_p ... Vrcholová hodnota proudu.

f_s ... Frekvence spínacího prvku.



Obrázek 3.3: Průběh napětí na spínacím prvku [2].



Volba odporu je rozhodující při určování maximálního napětí U_x (Předpokládá se $U_x=0,5U_f$) který by měl být vybrán podle následujících vztahu. Pro nejnižší možnou hodnotu napětí baterie 9,9 V, vyjde hodnota odporu následovně:

$$R_s = \frac{2 \cdot U_f^2 \cdot T_s}{L_{leak} \cdot I_p^2} = \frac{2 \cdot 7,4 \cdot 14 \cdot 10^{-6}}{75 \cdot 10^{-9} \cdot 6^2} \cong 1,3 \text{ k}\Omega$$

A pro nejvyšší možnou hodnotu napětí baterie 42 V vyjde hodnota odporu:

$$R_s = \frac{2 \cdot \left(\frac{42}{1,33}\right)^2 \cdot 10^{-6}}{76 \cdot 10^{-9} \cdot 6^2} \cong 10,3 \text{ k}\Omega$$

U_x ... Maximální hodnota napětí.

T_s ... Perioda spínání spínacího prvku.

U_f ... Vrcholová hodnota proudu.

Optimální hodnota R_s byla zvolena pro nejpoužívanější konfiguraci 16 v sérii zapojených bateriových článků, která je rozdělena na 2 MAB. Tedy 8 v sérii zapojených článků na jeden MAB s $U_{nom} \cong 3,6V$. Odpor R_s vyšel podle předchozích vztahů $\cong 4,9 \text{ k}\Omega$

Následně byl vybrán typ pouzdra rezistoru R_s , podle maximálního ztrátového výkonu, který je vypočítán pro možnost s maximálním napětím baterie to 42 V (10 v sérii; 4,2 V na článek):

$$P_s = \frac{U_f^2}{R_s} = \frac{\left(\frac{42}{1,33}\right)^2}{4900} \cong 0,2 \text{ W}$$

V poslední fázi návrhu RCD odlehčovače byla vypočítána hodnota kapacity podle následujícího vztahu:

$$C_s = \frac{\frac{3}{2} U_f}{\Delta U_s \cdot R_s \cdot f_s} = \frac{\frac{3}{2} \cdot 42}{4,7 \cdot 4900 \cdot 71000} \cong 29 \text{ nF}$$

ΔU_s ... Zvlnění napětí (Přípustné hodnoty jsou 5 až 10%)

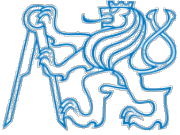
3.3.3 Výstupní dioda

Výstupní dioda byla vybrána na základě maximálního opakovatelného špičkového závěrného napětí (U_{RRM}) a střední hodnoty proudu $I_{F(AVG)}$. Hodnota U_{RRM} byla vybrána vyšší, než je hodnota ($U_{module} + N \cdot U_{in}$):

$$U_{rrm} = U_{module} + N \cdot U_{in} = 50,4 + 1,33 \cdot 4,2 = 56 \text{ V}$$

aby nedošlo k poškození během přepětových událostí. Střední hodnotu proudu $I_{F(AVG)}$ určíme podle následujícího vztahu:

$$I_{Favg} = \frac{I_{pk} \cdot U_{in}}{2 \cdot (U_{module} + N \cdot U_{in})} = \frac{6 \cdot 4,2}{2 \cdot (12,6 + 1,33 \cdot 4,2)} = 692 \text{ mA}$$



Další podmínkou při výběru diody, byla doba zpětného zotavení, která by měla být co nejmenší. Proto byla vybrána super rychlá dioda z dobou zpětného zotavení $t_r = 20 \text{ ns}$, $U_{rrm} = 200 \text{ V}$ a $I_{F(AV)} = 1 \text{ A}$.

3.3.4 Výstupní kapacitor

Pro obvody s flyback convertorem je volba výstupního kapacitoru velmi důležitá. Při výběru kapacitoru je důležité brát zřetel na tyto 2 parametry:

- Kapacita
- ESR (ekvivalentní sériová resistance)

Určení minimální výstupní kapacity je funkcí přípustného maximální napětového zvlnění:

$$C_{out(min)} = \frac{I_{out(max)}}{f_s \cdot U_{out(peak)} \cdot Z} = \frac{0,225}{71000 \cdot 9,9 \cdot 0,1} = 2,1 \mu\text{F}$$

Z... Výstupní zvlnění [%]

*I*_{out(max)} ... Maximální výstupní proud ($I_{out} = P_{out(max)}/U_{out}$)

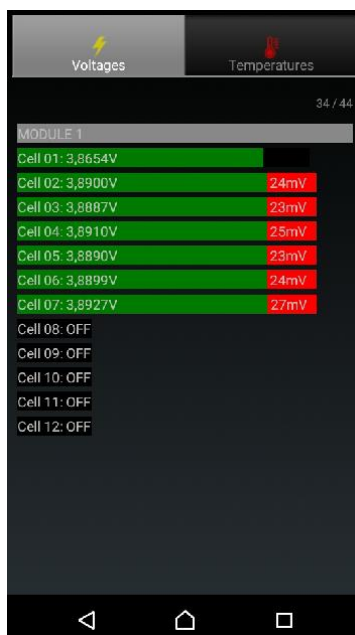
*U*_{out(peak)} ... Výstupní napětí (Zvoleno 9,9 V pro nejnižší možnou variantu zapojení)

Dalším kritériem při výběru kondenzátoru je hodnota ESR, která by měla být pokud možno co nejmenší, aby na ekvivalentním sériovém rezistoru nevznikaly přídavné ztráty, které by zahřívaly příslušný kondenzátor.

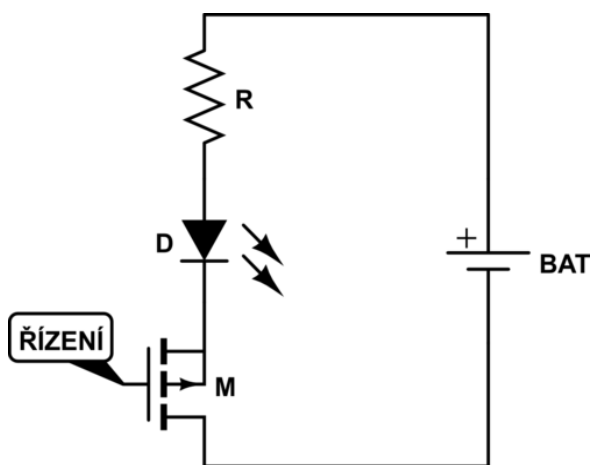


3.3.5 Indikace balancování

K indikaci balancování byla navržena mobilní aplikace a světelná signalizace. Důvodem je informovat uživatele o stavu balancování a případně upozornit na špatné nastavení MAB. Na (obr. 3.4) je zobrazena mobilní aplikace, která informuje o napětí článku a zda článek balancuje, či ne. V případě není-li použita mobilní aplikace, je k indikaci balancování použita světelná signalizace (obr. 3.5). Zde bylo nejprve potřeba vypočítat hodnotu předřadného odporu R_1 , který byl vybrán podle katalogového listu daného typu LED diody. Více o výpočtu předřadného odporu viz [1]. Pro MAB byla vybrána modrá LED dioda a podle toho dopočítána hodnota předřadného odporu $R = 120 \Omega$.



Obrázek 3.4: Mobilní aplikace.



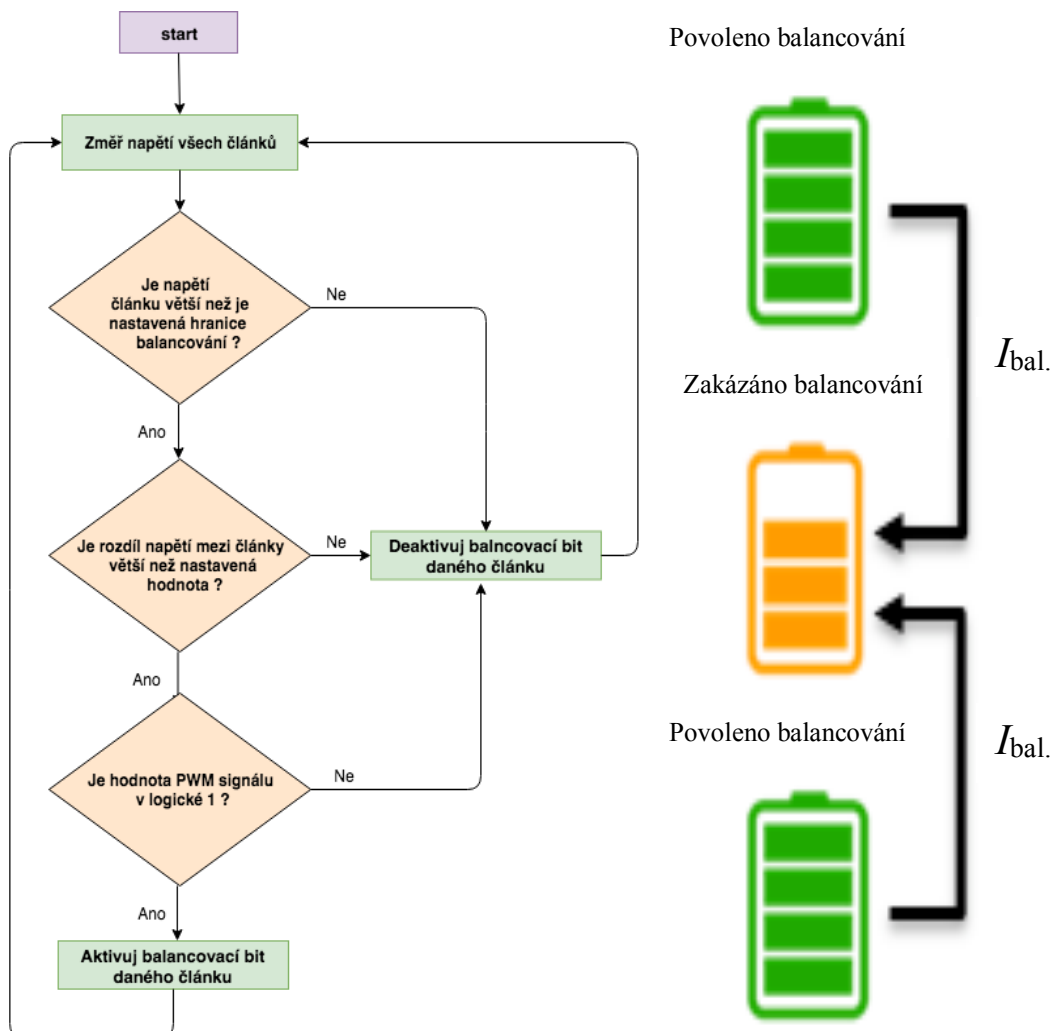
Obrázek 3.5: Schéma zapojení diody.



3.3.6 Vývojový diagram balancování

Vývojový digram na (obr. 3.6) zobrazuje podmínky balancování jednotlivých článků. První podmínkou je, že napětí na článku musí být větší, než je nastavená dolní mez napětí, kterou si nastaví sám uživatel a MAB by pod touto mezí neměl již daný článek balancovat. Je to z důvodu, aby se zamezilo možnému podbití bateriových článků od balancéru. Uvedu-li příklad: mám 3 v sérii zapojené články, z nichž mají dva 3,6 V a jeden 3,2 V a nastavená mez je na 3,5 V. V tomto případě by mělo dojít k balancování pouze dvou článků, jejichž napětí je 3,6 V.

Druhá podmínka sleduje rozdíl mezi jednotlivými články. Je-li zase rozdíl větší než nastavená hodnota od uživatele, tak dojde k balancování. Více informací o těchto podmínkách viz předchozí práce [1]. U MAB je doplněna možnost řízení střídání balancování, která u modulu s pasivním balancováním nebyla potřeba. Je to z důvodu, aby uživatel mohl měnit střední hodnotu balancovacího proudu.

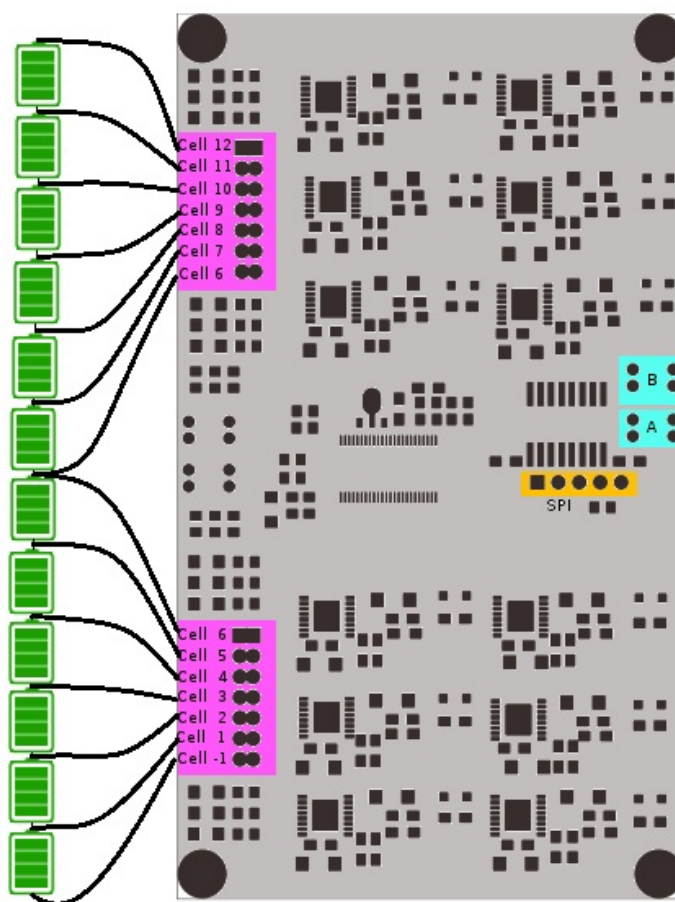


Obrázek 3.6: Vývojový diagram průběhu balancování.



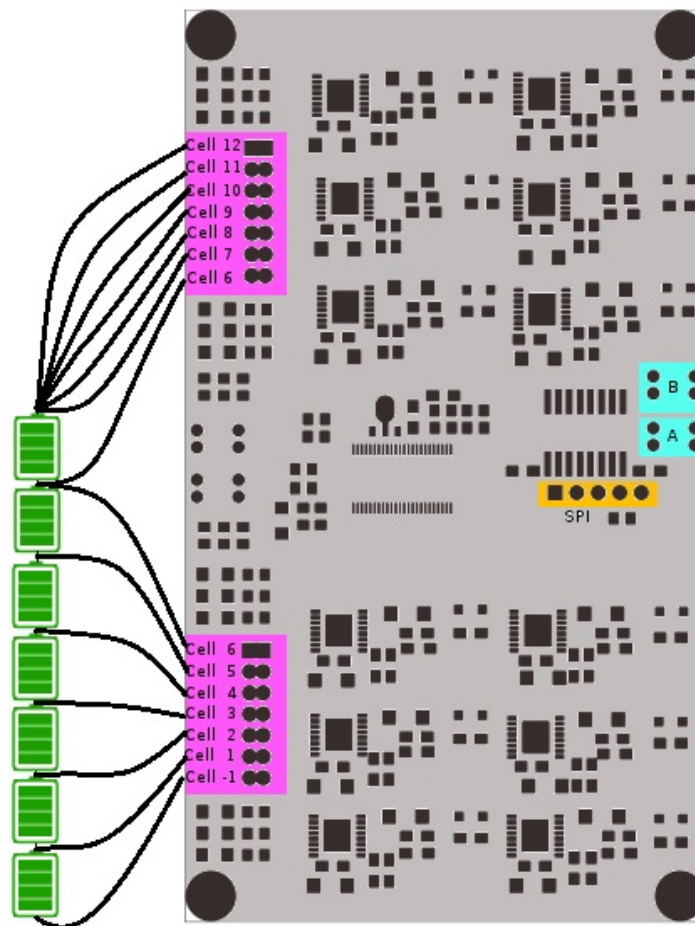
3.3.7 Zapojení bateriových článků

Při zapojení všech 12 článků k MAB nejsou potřeba žádná dodatečná opatření na zapojení článku a vše lze zapojit podle (obr. 3.7).



Obrázek 3.7: Zapojení všech 12-ti bateriových článků.

Při zapojení méně než 12 článků je nutné udělat dvě podstatné věci. Nejprve je potřeba vypočítat nominální napětí (U_{nom}) sériově zapojených článků. Dle katalogového listu použitých transformátorů a měřicího chipu LTC6804-1 musí být U_{nom} větší než 9V, aby byla zajištěna správná funkčnost celého MAB. Za druhé je potřeba správně zapojit bateriové články. Tzn. Bude-li použito méně než 12 článků v sérii, je potřeba zbylé volné piny propojit s nejvyšším článkem, který se v bateriovém packu nachází, více viz. (obr. 3.7).



Obrázek 3.8: Zapojení méně než 12-ti bateriových článků.

3.4 Oživení a odladění modulu aktivního balancování

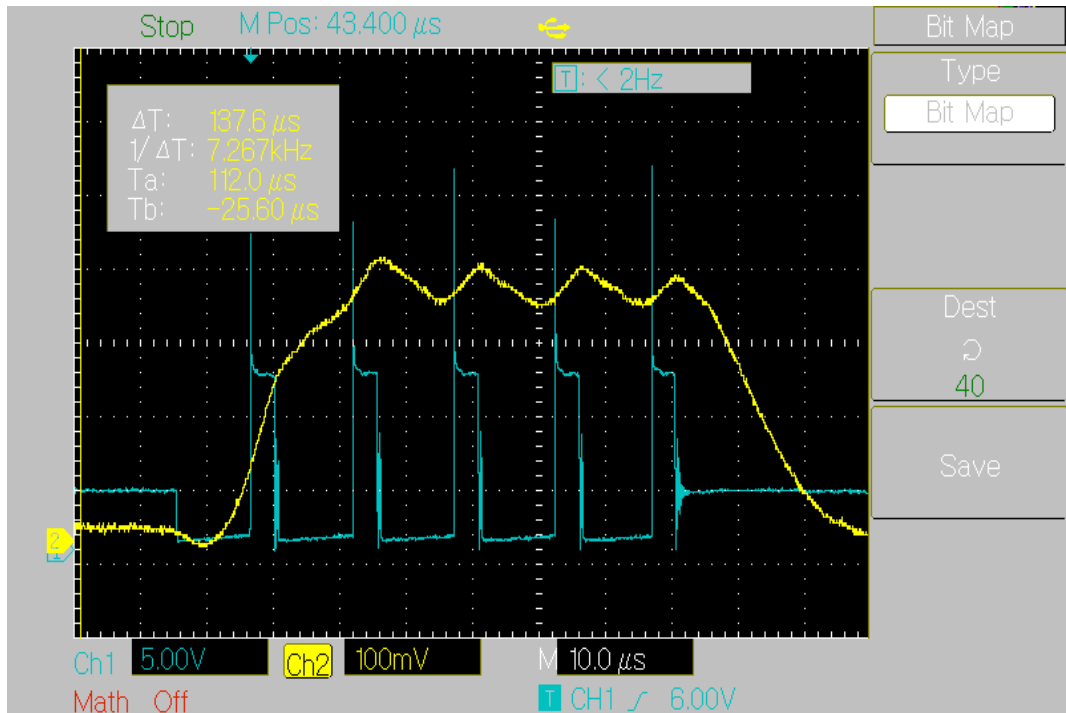
Ožívování a odladění MAB bylo rozděleno do několika hlavních kroků, v jejichž průběhu byly postupně odladěny jednotlivé funkční části.

Konkrétní funkční části:

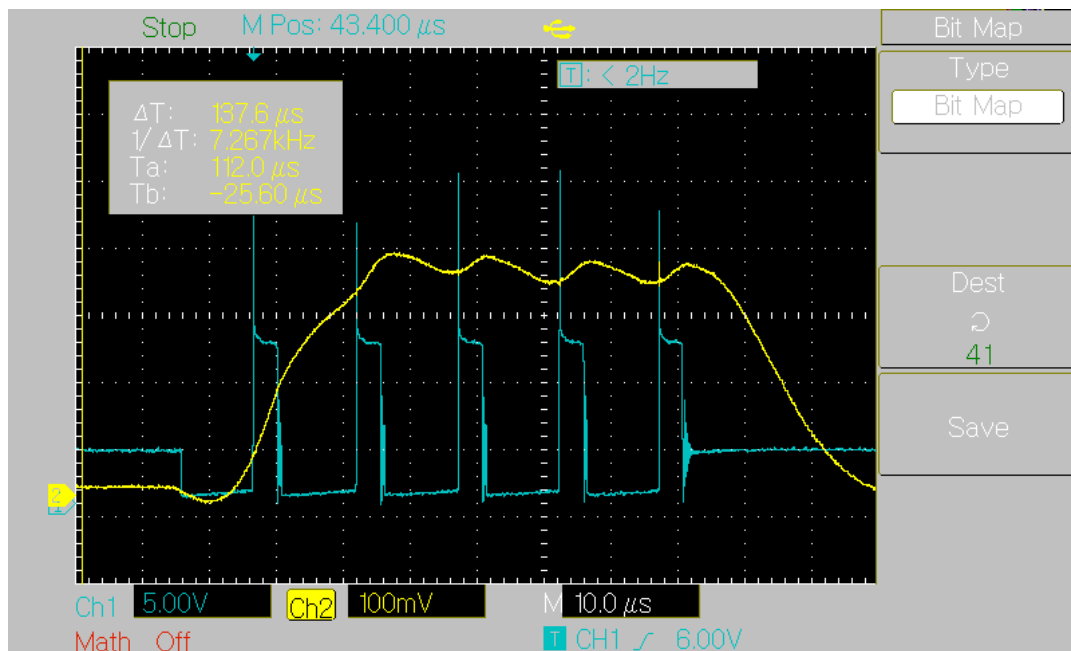
- Optimalizace vstupních kondenzátorů
- Aplikace RC snuboru
- Optimalizace řídicího algoritmu

3.4.1 Vyhlazení vstupního proudu

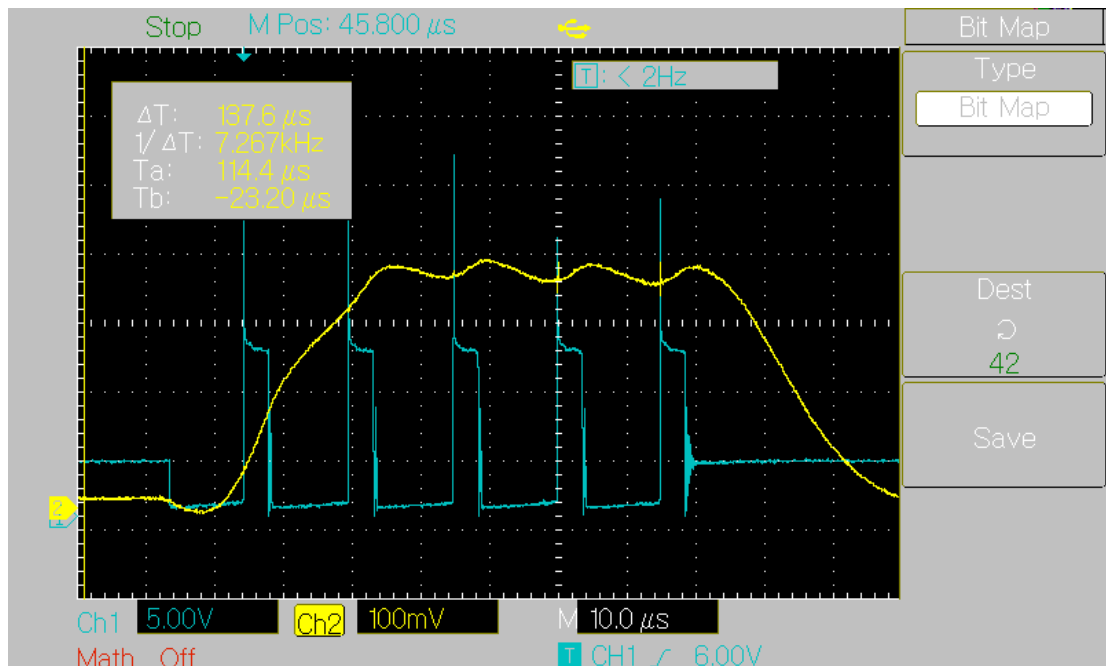
Ke snížení zvlnění proudu a tedy i k indukovanému napětí $U_i = L \frac{di}{dt}$ na přívodních vodičích, byly upraveny hodnoty kapacity vstupních kondenzátorů.



Obrázek 3.9: Vstupní proud při použití vstupní kapacity 94 μF (Žlutá – proud 100mV/A, Modrá - napětí).



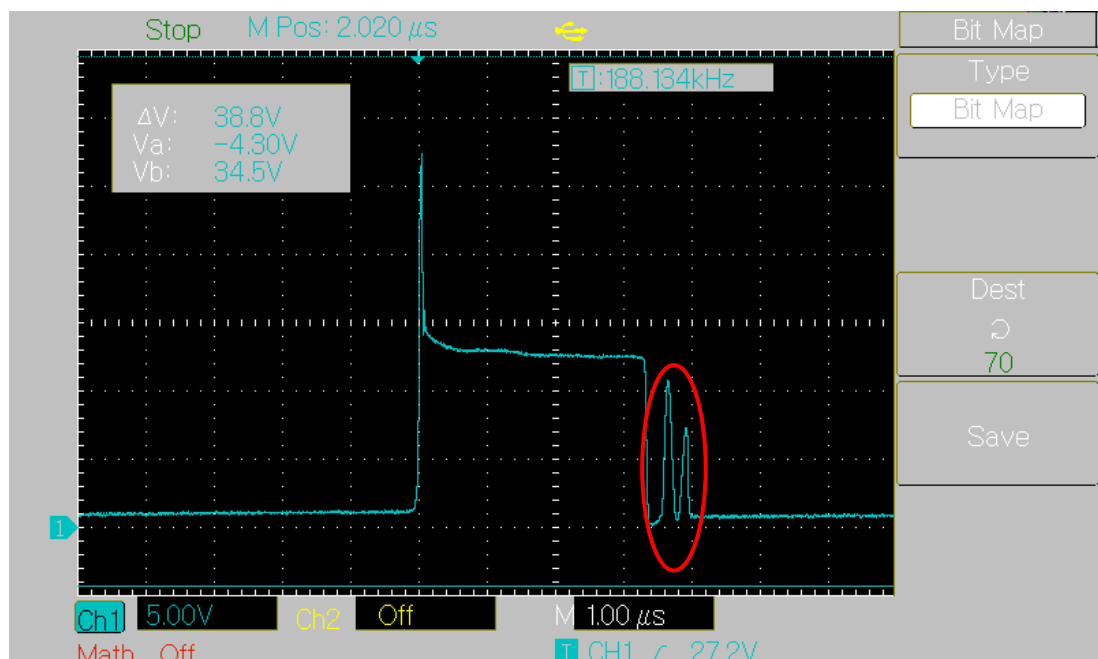
Obrázek 3.10: Vstupní proud při použití vstupní kapacity 141 μF (Žlutá – proud 100mV/A, Modrá - napětí).



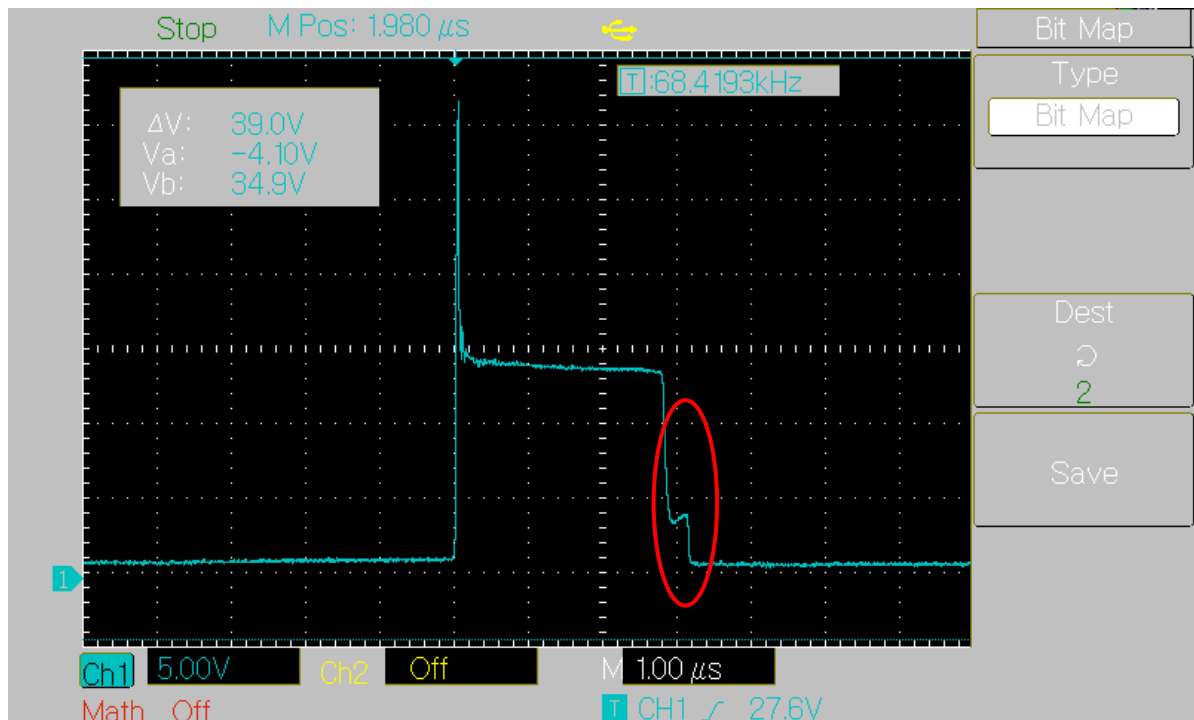
Obrázek 3.11: Vstupní proud při použití vstupní kapacity 188 μF (žlutá–proud 100mV/A, modrá–napětí).

3.4.2 Přidání RC odlehčovacího obvodu pro snížení zákmitů napětí na spínacím prvku v okamžiku spínání

Pro optimální účinnost spínacího prvku bylo nutné navrhnout vhodný RC odlehčovací obvod na sekundární straně transformátoru. Důvodem byly velké spínací ztráty, které vedly k nadměrnému oteplení spínacího prvku. Na (Obr. 3.12 a 3.13) je zobrazen rozdíl spínacích ztrát s a bez RC odlehčovače. Výpočet vychází teoreticky z předchozího návrhu RCD odlehčovacího obvodu.



Obrázek 3.12: Napětí na svorkách spínacího prvku bez použití RC snubberu na výstupu (modrá–napětí).



Obrázek 3.13: Napětí na svorkách spínacího prvku (s RC snubrem na výstupu) (modrá-napětí).

3.4.3 Optimalizace řídicího algoritmu balancování

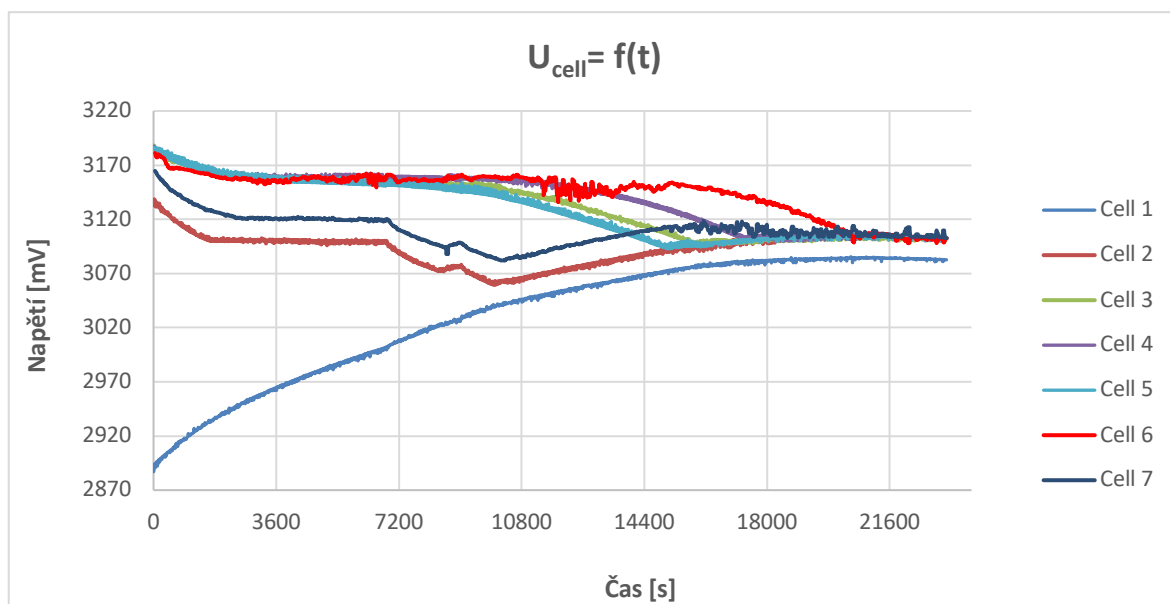
V současné době vyšel na trh nový IO LTC6811, který podporuje řízení balancování pomocí pulzně šířkové modulace (PWM). Pulzně šířková modulace vyřeší problémy s balancováním článků s nižší hodnotou kapacity, kde docházelo k deformaci monitorovaných veličin. To bylo způsobeno velkou hodnotou proudu, který může pro některé lithiové články nabývat hodnot až 2C. Tím u měkkých článků napětí značně poklesne, vlivem úbytku na vnitřním odporu článku a změřená hodnota napětí neodpovídá vnitřnímu napětí článku U_i , nýbrž $U_i - R \cdot i$. U IO LTC6811 bude možné měnit střední hodnotu proudu a tím se tento problem vyřeší.



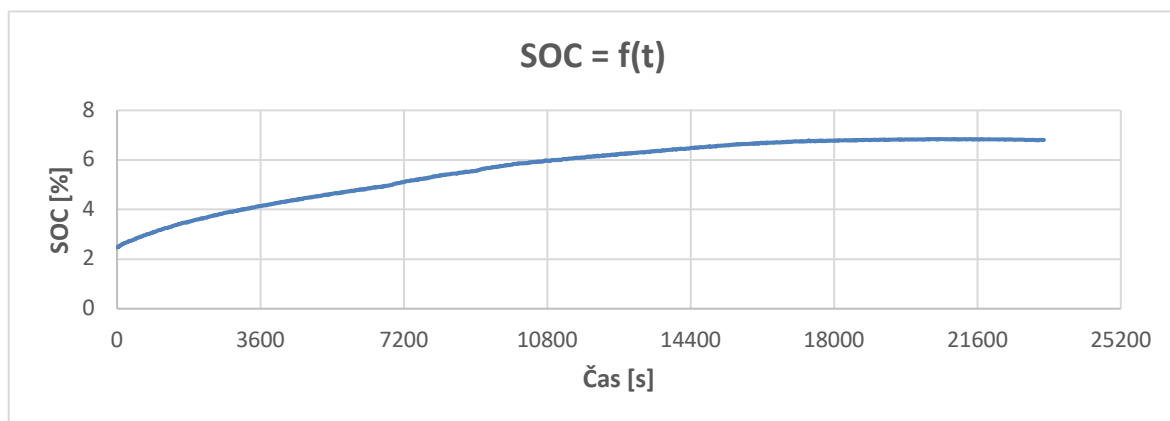
4 Porovnání aktivního balancování na různých technologiích bateriových článků

4.1 Aktivní balancování článků LiFePO₄ (Winston 100Ah)

Nastavené hodnoty: $U_{\max} = 3,8 \text{ V}$, $U_{\min} = 2,5 \text{ V}$, $U_{\text{diff}} = 50 \text{ mV}$, $U_{\text{bal}} = 3 \text{ V}$



Obrázek 4.1: Průběh napětí LiFePO₄ článků při aktivním balancování.



Obrázek 4.2: Průběh SOC LiFePO₄ článků při aktivním balancování.



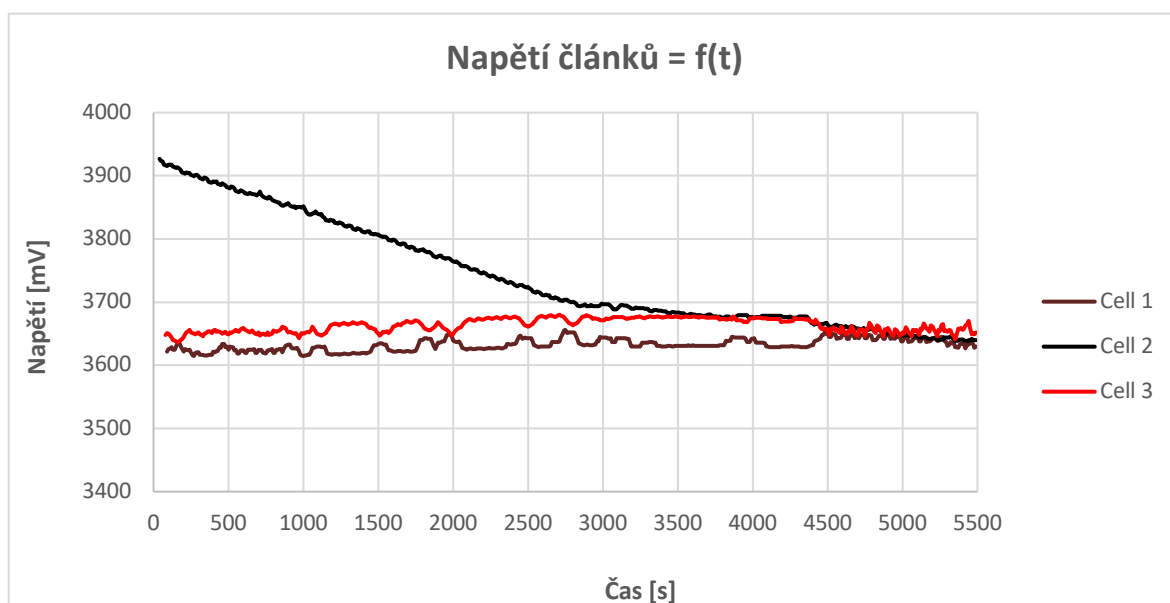
Obrázek 4.3: Bateriový článek Winston 100Ah.

Z obr. 4.1 je vidět postupné vyrovnání napětí jednotlivých článků. Dochází k přenosu energie z více nabitých článků do článků méně nabitých. Dále stojí za povšimnutí průběh napětí článků cell 7 a cell 2, kde na počátku dochází k vybíjení a pak k následnému nabíjení. Je to způsobeno nevhodným řídicím algoritmem. To je potřeba vyřešit úpravou řídicího algoritmu, tak aby předpovídal konečné napětí v průběhu balancování a v okamžiku, dosáhne-li článek předpovídaného napětí, tak se přestane balancovat.

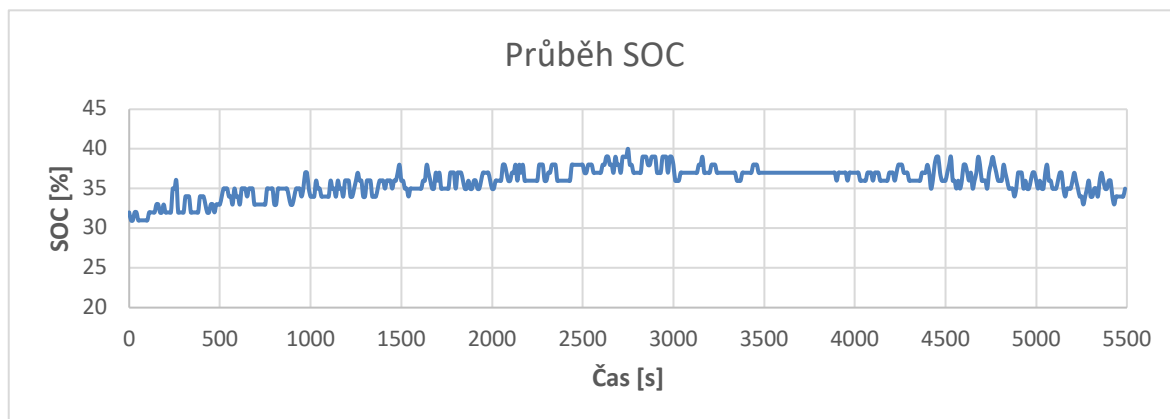
Na obr. 4.2 je znázorněn průběh SOC v závislosti na čase. Je vidět nárůst SOC a tím i využitelná kapacita celého bateriového packu, neboť SOC se stanovuje podle nejméně nabitého článku (v okamžiku vybíjení), či podle nejvíce nabitého článku (při nabíjení). Dojde-li tedy k nabití nejslabšího článku v baterii, tak dojde k nárůstu SOC. V tomto případě vzrostlo SOC o 5%.

4.2 Aktivní balancování článků Li-ion (Samsung IRN18650 30Q 3Ah)

Nastavené hodnoty: $U_{\max} = 4,2 \text{ V}$, $U_{\min} = 2,8 \text{ V}$, $U_{\text{diff}} = 30 \text{ mV}$, $U_{\text{bal}} = 3 \text{ V}$



Obrázek 4.4: Průběh napětí Li-ion článků při aktivním balancování.



Obrázek 4.5: Průběh SOC Li-ion článků při aktivním balancování.



Obrázek 4.6: Bateriový článek Samsung IRN18650 30Q.

Obr. 4.4 zobrazuje průběh napětí Li-ion článků s kapacitou 3 Ah. Oproti předchozím článkům (winston 100 Ah) je zde vidět značné kolísání napětí v průběhu balancování. To je způsobeno vybíjecím proudem větším než 1C (špičková hodnota $I_{BAL} = 6$ A), který způsobí pokles napětí na článku v okamžiku balancování. V okamžiku měření napětí je balancování zakázáno a v bateriovém článku se ustalují chemické procesy a tím i napětí. Jelikož však měření probíhá na frekvenci okolo 20 kHz, nestihne se napětí ustálit.

Obr. 4.5 znázorňuje kolísavý průběh SOC v závislosti na čase. Kolísání SOC je způsobeno též velikostí proudu. V tomto případě vzrostlo SOC o cca 5%.



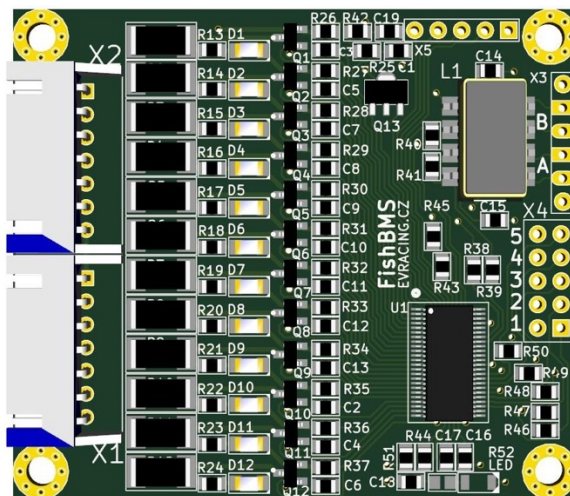
5 Zhodnocení jednotlivých systémů z hlediska energetických a ekonomických parametrů

Tato kapitola se zabývá zhodnocením aktivního a pasivního balancování z hlediska energetických a ekonomických parametrů.

5.1 Ekonomické zhodnocení

Pro ekonomické zhodnocení jsou zde zobrazeny 3 tabulky, kde je uveden seznam položek potřebných na výrobu jednoho balancovacího modulu aktivní/pasivní. Dále je uvažován počet součástek potřebných na 12 v sérii zapojených článků. V ceně není uvažována práce ani doprava, jelikož se jedná o prototypy. Dále uvedené ceny jsou bez DPH a cena za součástku se uvažuje při koupi nejmenšího množství kusů potřebných na osazení těchto modulů pro 12 článků.

5.1.1 Nízko výkonový modul pasivního balancování (I_{bal} 150 mA)



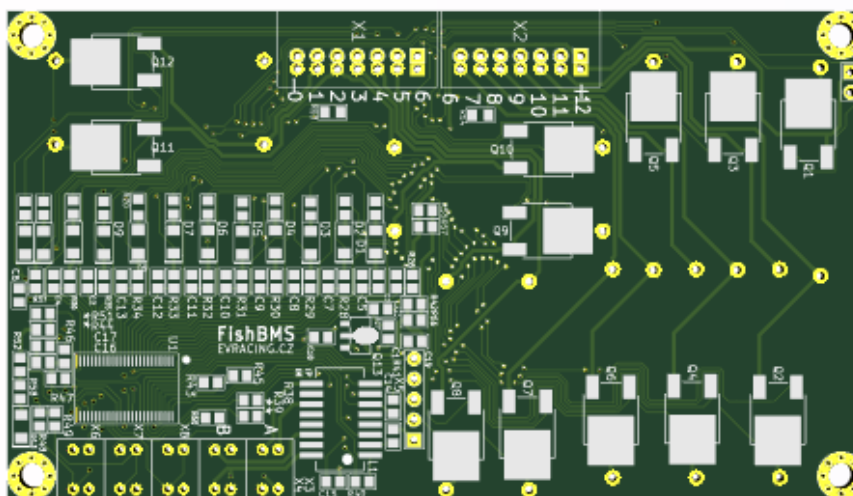
Obrázek 5.1: 3D model modulu nízkovýkonového pasivního balancování (navrženo v Kicadu).



Součástka	Počet	Cena za Kus [Kč]	Výsledná cena [Kč]
R 100 Ω	28	4,4	123,2
R 1 K Ω	2	0,26	0,52
R 120 Ω	2	0,33	0,66
R 10 K Ω	6	1,01	6,06
R 1,8 K Ω	1	0,176	0,176
R 330 Ω	1	0,176	0,176
R 33 Ω	12	0,79	9,48
NTC 10 K Ω	2	0,96	1,92
C 1 μ F	3	0,57	1,71
C 27 pF	2	0,39	0,78
C 10 nF	12	2,3	27,6
C 100 nF	13	0,39	5,07
LED DIODA	13	1,54	20,02
L H1102NL	1	26,6	26,6
LTC6804	1	411,1	411,1
MOSFET P (SOT23)	12	0,95	11,4
Konektor (JST-XH)	2	10,5	21
Plošný spoj	1	27	27
SUMA			694,3

Tabulka 2: Souhrn kusů a cen pro nízko výkonové pasivní balancování (Balancující proud 150 mA)

5.1.2 Výkonový modul pasivního balancování ($I_{bal. 1 A}$)



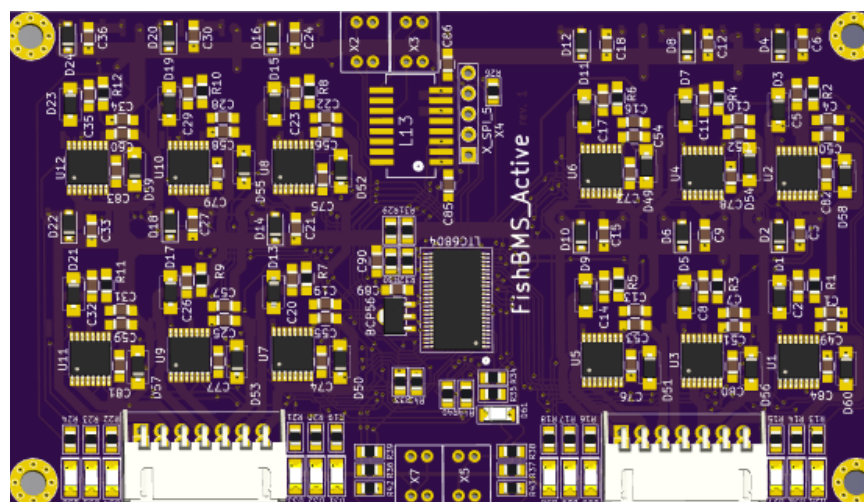
Obrázek 5.2: 3D model modulu výkonového pasivního balancování (navrženo v Kicadu).



Součástka	Počet	Cena za Kus [Kč]	Výsledná cena [Kč]
R 100 Ω	28	4,4	123,2
R 1 K Ω	2	0,26	0,52
R 120 Ω	2	0,33	0,66
R 10 K Ω	6	1,01	6,06
R 1,8 K Ω	1	0,176	0,176
R 330 Ω	1	0,176	0,176
R 4 Ω	12	3,6	43,2
NTC 10 K Ω	2	0,96	1,92
C 1 μ F	3	0,57	1,71
C 27 pF	2	0,39	0,78
C 10 nF	12	2,3	27,6
C 100 nF	13	0,39	5,07
LED DIODA	13	1,54	20,02
L H1102NL	1	26,6	26,6
LTC6804	1	411,1	411,1
MOSFET P (DPAK)	12	6,58	78,96
Konektor (JST-XH)	2	10,5	21
Plošný spoj	1	27	27
SUMA			795,6

Tabulka 3: Souhrn kusů a cen výkonového pasivního balancování (Balancující proud 1 A)

5.1.3 Výkonový modul pasivního balancování (I_{bal} 2,5 A)



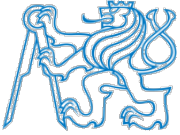
Obrázek 5.3: 3D model modulu aktivního balancování (navrženo v Kicadu).



Součástka	Počet	Cena za Kus [Kč]	Výsledná cena [Kč]
R 100 K Ω	12	0,25	3
R 12 m Ω	12	5,9	70,8
R 4,99 K Ω	12	0,25	3
R 100 Ω	20	4,4	88
R 120 Ω	4	0,33	1,32
R 10 K Ω	12	1,01	12,12
R 1,8 K Ω	2	0,176	0,352
R 330	2	0,176	0,352
C 100 μ F	24	20,4	489,6
C 22 nF	12	0,39	4,68
C 1 μ F	18	0,57	10,26
C 47 nF	12	0,39	4,68
C 27 pF	4	0,39	1,56
C 100 nF	2	0,39	0,78
LED	14	1,54	21,56
L NA5743	12	85,5	1026
L H1102NL	1	26,6	26,6
D Schotky	24	6	144
D transil	24	8,3	199,2
LT8584	12	77	924
LTC6804	1	411,1	411,1
Konektor (JST-XH)	2	10,5	21
Plošný spoj	1	50	50
SUMA			3385,4

Tabulka 4: Souhrn kusů a cen pro aktivní balancování

Z tabulek je možno porovnat výsledné ceny, které se od sebe razantně liší. Tento fakt hraje velkou roli právě v zastoupení pasivního balancování ve většině aplikacích a to právě díky nízké pořizovací ceně oproti aktivnímu balancování. Pořizovací cena pro 12 v sérii zapojených článků se liší o **2691 Kč** u nízkovýkonového balancéru a o **2590 Kč** u výkonového balancéru.



5.2 Energetické zhodnocení

Tato část se zabývá energetickým zhodnocením aktivního a pasivního balancování. Kritériem k hodnocení systémů, je použití vysoce integrovaných balancérů bez použití přídavných chladičů.

Pasivní balancování:

Současné vysoce integrované pasivní balancovací obvody, jsou schopny balancovat v rozmezí 100 až 1000 mA při cca. 50% pracovního cyklu. Důvodem je, že druhou polovinu pracovního cyklu většina integrovaných obvodů měří aktuální napětí bateriových článků a aby toto napětí nebylo nějak zkresléno vlivem úbytku napětí vyvolané balancujícím proudem, tak je balancování během měření zakázáno. Nyní si vypočteme ampérhodiny, které se přemění během balancování na teplo, budu-li uvažovat balancující proud 100mA:

$$C = \frac{I_{bal} \cdot T \cdot P_{prac}}{T} = \frac{0,1 \cdot 3600 \cdot 0,5}{3600} = 50 \text{ mAh}$$

I_{bal} balancující proud

P_{prac} ... pracovní cyklus spínacího prvku

T ... Počet sekund za hodinu

Budeme-li uvažovat užití tohoto systému například v solárních uložištích, kde se používají bateriové články s kapacitou okolo 100 Ah, tak by tomuto systému trvalo necelé 3 měsíce, než by dokázal článek zcela vybit, tím mohou vznikat problémy. Například při montáži bateriových článků, kdy se zapomene na inicializační balancování a bateriové články se pospojují rozbalancovány do packu. Pak uživatel využívá baterii pouze se zlomkem výkonu, jelikož se systém řídí podle nejvíce (při nabíjení) a nejméně (při vybíjení) nabitého článku.

Aktivní balancování:

Budeme-li uvažovat podobně, jako v předchozím případě, tzn. že spínací prvek bude pracovat s 50% pracovního cyklu, dále předpokládáme střední hodnotu balancovacího proudu 2,5 A (vycházím-li z datasheetu LT8584) a kapacitu bateriového článku 100 Ah.

$$C = \frac{I_{bal} \cdot T \cdot P_{prac}}{T} = \frac{2,5 \cdot 3600 \cdot 0,5}{3600} = 1,25 \text{ Ah}$$

Tímto způsobem bychom dokázali baterii se zmiňovanou kapacitou vybit cca za 3 dny, kdyby se energie z baterie přelávala do jiného článku. V tomto ohledu je aktivní balancování výkonnější než balancování pasivní.

Dalším přínosem aktivního balancování je, že v případě rozbalancovaných článků spojených do série dokáže “přelít” energii z více nabitého článku do článku méně nabitého a tím zvýšit využitelnou kapacitu bateriového celku. Více viz. například (obr. 4.1). To v případě pasivního balancování nelze.

6 Závěr

Hlavním cílem diplomové práce bylo navrhnout a realizovat modul aktivního balancování, jeho ekonomické a energetické porovnání s balancováním pasivním. V dnešní době se v převážné míře používají lithiové články. Přesto jsou moduly schopny pracovat s články NiCd a NiMH.

Zhotovený přípravek byl otestován na různých typech lithium-iontových technologií. V kapitole 4 jsou pro názornost zobrazeny grafické průběhy balancování pro články LiFePO₄ a Li-ion. Z grafů je patrné, že zařízení funguje dle zadání a je možné sledovat časovou změnu napětí a SOC. V konečné fázi balancování je vidět jak vzrostlo SOC a napětí jednotlivých článků se srovnali.

V další fázi práce jsem ekonomicky a energeticky porovnal aktivní a pasivní balancování. Načež z ekonomické stránky je názorně vidět, že je systém aktivního balancování jednoznačně dražší, téměř 3-krát. Z energetického hlediska je však výhodnější balancování aktivní. Důvodem je zvýšení využitelné kapacity bateriové sady v okamžiku, kdy jsou bateriové články rozbalancovány. Samozřejmě z dlouhodobého hlediska stojí za zmínku další výzkum, zda se aktivní balancování aktivně vyplatí, či ne.

Celkově bych systém aktivního balancování doporučil využívat jako například inicializační balancování bateriových článků, či využití ve výkonových aplikacích, kde dochází k častému rozbalancování článků. I přes to bude i nadále používání aktivních balancérů spíše kuriozitou, neboť v současnosti je kladen důraz hlavně na cenu komponentu, kterou nikdy nepředčí pasivní balancéry.

Při realizaci Diplomové práce jsem se naučil mnoho nových věcí, zvláště v oblasti návrhu RCD odehčovacích obvodů a práce se softwarem. Jedná se například o programování IOS aplikací.

Seznam použité literatury

- [1] Lípa, Pavel. Systém managementu baterie pro elektrokolo: bakalářská práce FEL ČVUT Praha 2016. [cit. 2018-04-20]. Dostupné z URL :
<<https://dspace.cvut.cz>>
- [2] Farnel LT8584 [online]. [cit. 2018-04-20]. Dostupné z URL:
<<http://www.farnell.com/datasheets>>
- [3] Elementa [online]. [cit. 2018-04-20]. Dostupné z URL :
<<http://www.elementa.rs>>
- [4] HWPRO [online]. [cit. 2018-04-20]. Dostupné z URL :
<<http://www.hwpro.cz>>
- [5] Newark element 14[online]. [cit. 2018-04-20]. Dostupné z URL:
<<http://www.newark.com>>
- [6] sparkfun [online]. [cit. 2018-04-20]. Dostupné z URL:
<<https://learn.sparkfun.com>>
- [7] PowerTech systems [online]. [cit. 2018-04-20]. Dostupné z URL:
<<https://www.powertechsystems.eu>>
- [8] Mouser NA6252 [online]. [cit. 2018-04-20]. Dostupné z URL:
<<https://cz.mouser.com/datasheet/>>
- [9] Knotek, Vojtěch. Vliv teploty na parametry baterií: individuální projekt FEL ČVUT

Seznam obrázků

OBRÁZEK 2.1: BLOKOVÉ SCHÉMA BMS.	- 9 -
OBRÁZEK 2.2: ZJEDNODUŠENÉ SCHÉMA BALANCOVACÍHO OBVODU.	- 10 -
OBRÁZEK 2.3: ZJEDNODUŠENÉ BLOKOVÉ SCHÉMA LOGIKY ŘÍZENÍ BALANCOVÁNÍ.	- 10 -
OBRÁZEK 2.4: ZJEDNODUŠENÉ SCHÉMA OBVODU AKTIVNÍHO BALANCOVÁNÍ [2].	- 11 -
OBRÁZEK 2.5: SPÍNACÍ PRVEK (TRANZISTOR) [3].	- 12 -
OBRÁZEK 2.6: BISTABILNÍ RELÉ.	- 12 -
OBRÁZEK 2.7: ZJEDNODUŠENÉ SCHÉMA PŘEDNABÍJECÍHO OBVODU.	- 12 -
OBRÁZEK 2.8: BOČNÍK [4].	- 13 -
OBRÁZEK 2.9: HALLŮV SENZOR [5].	- 13 -
OBRÁZEK 2.10: PRŮBĚHY $U=f(SOC)$ PŘI RŮZNĚ VELKÝCH PROUDECH [6].	- 14 -
OBRÁZEK 2.11: ZÁVISLOST $U = f(SOC)$ PŘI RŮZNÝCH TEPLOTÁCH A STEJNÉ HODNOTĚ VYBÍJEJÍCÍHO PROUDU [7].	- 15 -
OBRÁZEK 2.12: ZJEDNODUŠENÝ VÝVOJOVÝ DIAGRAM NABÍJECÍHO CYKLU.	- 16 -
OBRÁZEK 2.13: UKÁZKA ŘÍZENÍ NABÍJECÍHO ZAŘÍZENÍ V ELEKTROMOBILU.	- 16 -
OBRÁZEK 3.1: BLOKOVÉ SCHÉMA MODULU AKTIVNÍHO BALANCOVÁNÍ [2].	- 17 -
OBRÁZEK 3.2: ZOBRAZENÍ TYPICKÉHO PRŮBĚHU JEDNOHO SPÍNACÍHO CYKLU [2].	- 19 -
OBRÁZEK 3.3: PRŮBĚH NAPĚTÍ NA SPÍNACÍM PRVKU [2].	- 21 -
OBRÁZEK 3.4: MOBILNÍ APLIKACE.	- 24 -
OBRÁZEK 3.5: SCHÉMA ZAPOJENÍ DIODY.	- 24 -
OBRÁZEK 3.6: VÝVOJOVÝ DIAGRAM PRŮBĚHU BALANCOVÁNÍ.	- 25 -
OBRÁZEK 3.7: ZAPOJENÍ VŠECH 12-TI BATERIOVÝCH ČLÁNKŮ.	- 26 -
OBRÁZEK 3.8: ZAPOJENÍ MÉNĚ NEŽ 12-TI BATERIOVÝCH ČLÁNKŮ.	- 27 -
OBRÁZEK 3.9: VSTUPNÍ PROUD PŘI POUŽITÍ VSTUPNÍ KAPACITY 94 μF (ŽLUTÁ – PROUD 100MV/A, MODRÁ - NAPĚTÍ).	- 28 -
OBRÁZEK 3.10: VSTUPNÍ PROUD PŘI POUŽITÍ VSTUPNÍ KAPACITY 141 μF (ŽLUTÁ – PROUD 100MV/A, MODRÁ - NAPĚTÍ).	- 28 -
OBRÁZEK 3.11: VSTUPNÍ PROUD PŘI POUŽITÍ VSTUPNÍ KAPACITY 188 μF (ŽLUTÁ – PROUD 100MV/A, MODRÁ - NAPĚTÍ).	- 29 -
OBRÁZEK 3.12: NAPĚTÍ NA SVORKÁCH SPÍNACÍHO PRVKU BEZ POUŽITÍ RC SNUBBERU NA VÝSTUPU (MODRÁ - NAPĚTÍ).	- 29 -
OBRÁZEK 3.13: NAPĚTÍ NA SVORKÁCH SPÍNACÍHO PRVKU (S RC SNUBBEREM NA VÝSTUPU) (MODRÁ - NAPĚTÍ).	- 30 -
OBRÁZEK 4.1: PRŮBĚH NAPĚTÍ LiFePO4 ČLÁNKŮ PŘI AKTIVNÍM BALANCOVÁNÍ.	- 31 -
OBRÁZEK 4.2: PRŮBĚH SOC LiFePO4 ČLÁNKŮ PŘI AKTIVNÍM BALANCOVÁNÍ.	- 31 -
OBRÁZEK 4.3: BATERIOVÝ ČLÁNEK WINSTON 100AH.	- 32 -
OBRÁZEK 4.4: PRŮBĚH NAPĚTÍ Li-ION ČLÁNKŮ PŘI AKTIVNÍM BALANCOVÁNÍ.	- 32 -
OBRÁZEK 4.5: PRŮBĚH SOC Li-ION ČLÁNKŮ PŘI AKTIVNÍM BALANCOVÁNÍ.	- 33 -
OBRÁZEK 4.6: BATERIOVÝ ČLÁNEK SAMSUNG IRN18650 30Q.	- 33 -
OBRÁZEK 5.1: 3D MODEL MODULU NÍZKOVÝKONOVÉHO PASIVNÍHO BALANCOVÁNÍ (NAVRŽENO V KICADU).	- 34 -
OBRÁZEK 5.2: 3D MODEL MODULU VÝKONOVÉHO PASIVNÍHO BALANCOVÁNÍ (NAVRŽENO V KICADU).	- 35 -
OBRÁZEK 5.3: 3D MODEL MODULU AKTIVNÍHO BALANCOVÁNÍ (NAVRŽENO V KICADU).	- 36 -

Seznam tabulek

TABULKA 1: TEPLTNÍ ROZSAHY SEKUNDÁRNÍCH ČLÁNKŮ [6].	- 15 -
TABULKA 2: SOUHRN KUSŮ A CEN PRO NÍZKO VÝKONOVÉ PASIVNÍ BALANCOVÁNÍ (BALANCUJÍCÍ PROUD 150 MA).....	- 35 -
TABULKA 3: SOUHRN KUSŮ A CEN VÝKONOVÉHO PASIVNÍHO BALANCOVÁNÍ (BALANCUJÍCÍ PROUD 1 A).....	- 36 -
TABULKA 4: SOUHRN KUSŮ A CEN PRO AKTIVNÍ BALANCOVÁNÍ	- 37 -

Seznam příloh

SCHÉMA MODULU AKTIVNÍHO BALANCÉRU 1/2	44
SCHÉMA MODULU AKTIVNÍHO BALANCÉRU 2/2	45

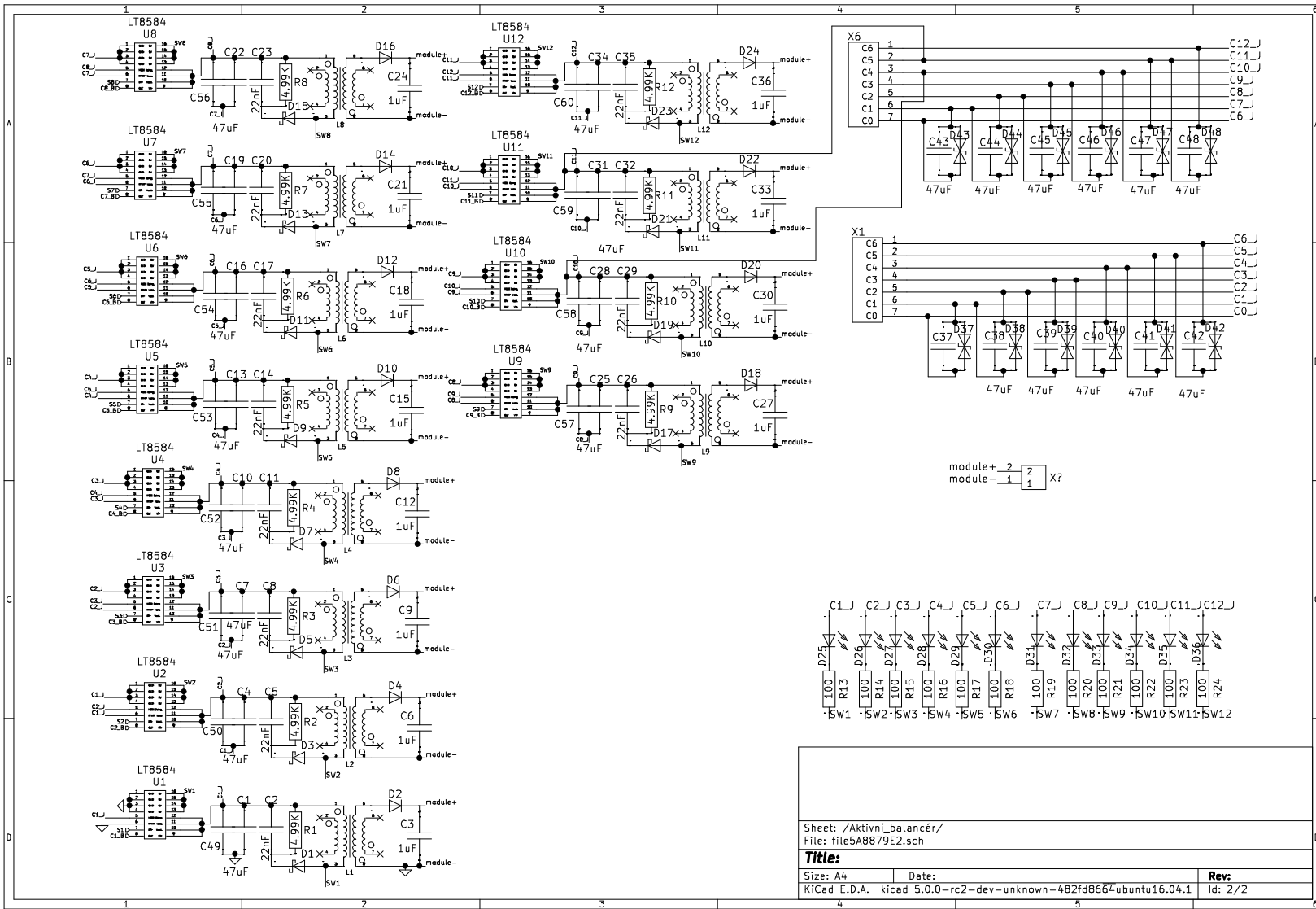


Schéma modulu aktívneho balancéru 2/2