

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky

## **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

2011

Michal Kelnar

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra měřicí a řídicí techniky

Modul správy napájení pro řídicí systém mobilního  
robotického zařízení  
Energy Management Module for Mobile Robotic Device

## Zadání bakalářské práce

Student: **Michal Kelnar**  
Studijní program: B2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 2601R004 Měřicí a řídicí technika  
Téma: Modul správy napájení pro řídicí systém mobilního robotického zařízení  
Energy Management Module for Mobile Robotic Device

### Zásady pro vypracování:

Práce se bude zabývat úpravou hardware modulu správy napájení a potřebnými změnami ve firmware. Modul je součástí distribuovaného řídicího systému průzkumného vozidla. Výsledkem práce bude nová verze modulu s upraveným nabíjecím a balancovacím systémem baterie.

1. Možnosti zdrojů energie pro mobilní roboty.
2. Nabíjení baterií.
3. Operační systémy pro vestavěné aplikace.
4. Výběr součástí pro úpravu modulu správy napájení.
5. Návrh schéma zapojení a desky plošných spojů.
6. Úprava FW modulu správy napájení.
7. Sestavení modulu.
8. Testování řídicího systému.
9. Zhodnocení dosažených výsledků.

### Seznam doporučené odborné literatury:

1. CAO, Jian - SCHOFIELD, Nigel - EMADI, Ali. Battery Balancing Methods : A Comprehensive Review. In *IEEE VPPC '08 Vehicle Power and Propulsion Conference 3-5 September, 2008 Harbin, China*. Piscataway, NJ(USA): IEEE, 2008. s. 1-6. ISBN 978-1-4244-1848-0.
2. *FreeRTOS* [online]. [cit. 2010-11-08]. URL: <<http://www.freertos.org>>.
3. CAI, Chenghui - DU, Dong - LIU, Zhiyu. Advanced Traction Rechargeable Battery System For Cableless Mobile Robot. In *Proceedings. 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2003. AIM 2003 20-24 July, 2003 Port Island, Kobe, Japan*. Piscataway, NJ(USA): IEEE, 2003. s. 234-239. ISBN 0-7803-7759-1. ISBN 0-7803-7760-5 (CD-ROM).
4. PRESSMAN, Abraham I. - BILLINGS, Keith - MOREY, Taylor. *Switching power supply design*. 3rd ed. New York, NY(USA): McGraw-Hill, 2009. 841 s. ISBN 974-0-07-148272-1. MHID 0-07-148272-5.

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

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Kotzian, Ph.D.**

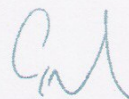
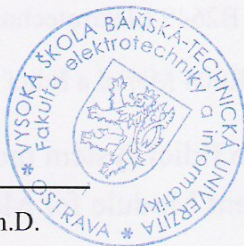
Datum zadání: 19.11.2010

Datum odevzdání: 06.05.2011



---

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



---

prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
*děkan fakulty*

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci na téma Modul správy napájení pro řídicí systém mobilního robotického zařízení vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Datum

Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Jiřímu Kotzianovi, Ph.D. za odbornou pomoc, podporu a cenné rady při zpracování bakalářské práce. Dále děkuji rodině, kolegům a přátelům za velmi významnou podporu během celého studia zejména pak při řešení bakalářské práce.

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem nové verze modulu správy napájení průzkumného vozidla. Nabíjecí systém bude schopen nabíjet i velmi malým proudem, což umožňuje použití alternativních zdrojů pro nabíjení akumulátoru. Návrh nové verze obnáší zavedení hardwarových úprav za účelem snížení výkonových ztrát a tím zvýšení účinnosti nabíjení akumulátoru vozidla. V práci je popsán návrh nabíječky, balanceru, implementace nabíjecího algoritmu pro řídicí mikrokontrolér. Dále jsou popsány také úpravy přímo na řídicí desce modulu správy napájení, jež bylo nutné provést, včetně příslušných softwarových úprav.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Balancer, FreeRTOS, nabíjení, vyvažování, Li-Pol

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis deals with a design of the new version of the power management exploration vehicle. The charging system will be able to charge with a very small current, which allows the use of alternative sources for charging the battery. The proposal involves the introduction of hardware modifications in order to reduce power losses and thus increase the efficiency of charging the vehicle battery. The paper describes the design of the recharger, balancer and recharging algorithm for the implementation of microcontroller. The following describes the adjustments directly on the control board module of power management, which was necessary, including appropriate software modifications.

## **KEY WORDS**

Balancer, FreeRTOS, charging, balancing, Li-Pol

## Seznam použitých symbolů a zkratek

ADC	-	(Analog-Digital Converter), analogově digitální převodník
C	-	Programovací jazyk
CAN	-	(Controller Area Network), datová sběrnice místní sítě (volný překlad)
CCCV	-	Metoda nabíjení akumulátoru (Constant Current - Constant Voltage)
CW	-	CodeWarrior
DPS	-	Deska Plošných Spojů
EATR	-	(Energetically Autonomous Tactical Robot), energeticky nezávislý taktický robot
EEPROM	-	(Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory), elektricky programovatelná i mazatelná paměť
FB	-	(Feedback), zpětná vazba
HCS12	-	Označení výrobní řady 16-ti bitových mikrokontrolérů firmy Freescale
HW	-	Hardware
OS	-	Operační systém
OZ	-	Operační zesilovač
PWM	-	(Pulse Width Modulation), pulsně šířková modulace
RAM	-	(Random Access Memory), paměť s libovolným přístupem
RTOS	-	Operační systém reálného času
RTOS	-	(Real-Time Operating System), operační systém reálného času
SMD	-	(Surface Mount Device), součástka pro povrchovou montáž
SMT	-	(Surface Mount Technology), technologie povrchové montáže součástek
SW	-	Software

## Obsah

1	ÚVOD.....	1
2	Zdroje energie pro mobilní roboty.....	2
2.1	Elektrický akumulátor.....	2
2.1.1	Obecné vlastnosti akumulátorů.....	3
2.1.2	NiCd akumulátory.....	4
2.1.3	NiMH akumulátory.....	5
2.1.4	Li-Ion akumulátory.....	5
2.1.5	Li-Pol akumulátory.....	6
2.1.6	Srovnání nejpoužívanějších druhů akumulátorů.....	6
2.2	Palivový článek.....	7
2.3	Solární článek.....	8
2.4	Biomasa.....	8
3	Metody nabíjení akumulátorů.....	9
3.1	Nabíjení konstantním napětím.....	9
3.2	Nabíjení konstantním proudem.....	9
3.3	Nabíjení lithiových akumulátorů.....	9
3.4	Ukončení nabíjení.....	10
3.5	Vyvažování článků Li-Pol baterie.....	11
3.5.1	Techniky vyvažování.....	11
3.5.2	Metody vyvažování.....	12
4	Operační systémy pro vestavěné aplikace.....	13
4.1	Vestavěné systémy.....	13
4.2	Operační systém reálného času.....	13
4.3	FreeRTOS.....	14
5	Modul správy napájení.....	15
5.1	Popis modulu správy napájení.....	15
5.1.1	Zdroj nabíjecího proudu.....	17
5.1.2	Měřicí zesilovače.....	17
5.2	Úpravy stávajícího řešení.....	18
5.2.1	Zdroj nabíjecího proudu.....	18
5.2.2	Měřicí zesilovače.....	18
5.2.3	Změna v systému řízení správy napájení.....	18



5.3	Výběr součástí pro úpravu modulu.....	18
6	Návrh desky balanceru.....	20
6.1	Formica.....	20
6.2	Cadence OrCAD.....	20
6.3	Zdroj nabíjecího proudu .....	20
6.3.1	Výkonová část .....	20
6.3.2	Řídicí část .....	21
6.4	Měřicí část .....	22
6.5	Vyvažovací obvod.....	24
6.6	Návrh desky plošných spojů.....	24
7	Firmware modulu správy napájení.....	26
7.1	CodeWarrior .....	26
7.2	Struktura firmwaru.....	26
7.3	Proces BatteryManagementTask .....	26
7.4	Přepoččet naměřené hodnoty.....	28
7.5	Funkce Charge() .....	28
8	Sestavení modulu správy napájení.....	30
8.1	Výroba DPS modulu balanceru .....	30
8.2	Úprava DPS řídicího modulu správy napájení .....	30
8.3	Sestavení modulu.....	31
9	Testování řídicího systému .....	32
9.1	Měření napětí článků .....	32
9.2	Zdroj nabíjecího proudu .....	32
9.2.1	První etapa testování.....	33
9.2.2	Druhá etapa testování .....	33
9.3	Verifikace funkčnosti modulu správy napájení .....	34
10	Závěr .....	35
11	Použitá literatura .....	36
12	Seznam příloh .....	38

# 1 ÚVOD

V dnešní době protkané moderními technologiemi si život jako takový zpříjemňujeme a značně usnadňujeme používáním různorodých technických vymožeností. Stále přibývá lidí co si ani nedokáží představit den bez výpočetní techniky, mobilního telefonu nebo jiného mobilního zařízení. Ovšem technologie mobilních zařízení se neuplatňují pouze v zařízeních pro zpříjemnění lidského života, ale velmi vhodným, žádaným a stále nutnějším uplatněním je nahrazení lidské práce zejména v případech, když jde o práci v nebezpečném prostředí. Právě do této kategorie mobilních zařízení spadají průzkumná vozidla, která slouží například pro prohledávání trosk po zemětřesení.

Tato bakalářská práce se zabývá vývojem nové verze modulu správy napájení pro distribuovaný řídicí systém průzkumného vozidla. Předmětem vývoje je zvýšení účinnosti nabíjecího systému baterie vozidla a úprava stávajícího softwarového vybavení řídicího mikrokontroléru, s cílem navýšení efektivity využití zdrojů energie pro napájení vozidla i nabíjení baterie.

Úvodní kapitola se zabývá možnostmi zdrojů energie pro mobilní zařízení. Dále rozdělením základních typů elektrických akumulátorů, jejich popisem, rozbořem charakteristických vlastností a srovnáním jednotlivých typů.

Následující kapitola rozebírá metody nabíjení různých typů akumulátorů. Ale zaměřuje se zejména na nabíjení lithiium polymerových akumulátorů. Úzkou vazbu k nabíjení lithiových akumulátorů má i vyvažování napětí článků baterie, které je popsáno rovněž v této kapitole.

Modul správy napájení je vestavěný systém a na řídicím procesoru je tvořena základní programová výbava operačním systémem. Definicí a popisem základních vlastností operačních systémů pro vestavěné aplikace, se zabývá kapitola 4.

Kapitola 5 uvádí podrobný popis modulu správy napájení a zároveň definuje problémy předchozí verze desky balanceru. Dále kapitola nastiňuje způsob, kterým je možné tyto nedostatky vyřešit nebo alespoň dostatečně potlačit.

Návrh zapojení zdroje nabíjecího proudu, vyvažovacích obvodů, měřicích obvodů a signalizačních obvodů balanceru popisuje kapitola 6. Kapitola se také zabývá návrhem desky plošných spojů k obvodovému zapojení desky balanceru.

Kapitola 7 pojednává o programovém vybavení řídicího mikrokontroléru, strukturou uživatelských funkcí a zejména procesem přímo svázaným se správou napájecí sítě průzkumného vozidla. V této kapitole jsou nastíněny principiální změny řídicího algoritmu včetně způsobu jeho implementace.

Popisu realizace navržených hardwarových změn je věnována kapitola 8.

Kapitola 9 se věnuje popisu testování řídicího systému.

Poslední kapitola 10 obsahuje zhodnocení práce a případné návrhy na zlepšení.

## 2 Zdroje energie pro mobilní roboty

Účelem robotického zařízení je vykonávání určité práce a pro svou funkci vždy potřebuje zdroj energie. Zjednodušeně řečeno zdroj energie přeměňuje energii jednoho druhu na energii jiného druhu, která odpovídá požadavkům daného zařízení. Z pohledu výstupní energie lze zdroje pro mobilní robotická zařízení rozdělit na zdroje mechanické, hydraulické, pneumatické a elektrické energie.

Mnoho zařízení využívá zároveň více druhů zdrojů energie, velmi často se v robotech používají systémy vyžadující současně elektrickou a mechanickou energii, ale výjimkami nejsou ani jiné kombinace. Zároveň je z hlediska mobility robota velmi zásadní, aby celý zdroj byl součástí robota a nevyžadoval tak trvalé připojení k jinému externímu zařízení, které by omezovalo jeho mobilitu nebo funkcionalitu.

Vývoj robotiky ukázal, že neoptimálnějším řešením je použití zdroje elektrické energie jako primárního zdroje. V případě potřeby lze následně implementovat do zařízení zdroje energie jiného charakteru, které budou mít na vstupu elektrickou energii z primárního zdroje. Tento zdroj by měl splňovat především tyto požadavky na kontinuální dodávání energie, účinnost, životnost a spolehlivost.

Mezi zdroje vyhovující těmto kritériím patří zejména elektrický akumulátor, generátory poháněné spalovacím motorem, dále některé z alternativních zdrojů energie například palivové a solární články. Objevují se i zdroje založené na spalování biomasy, jejichž přínos je velmi nadějný díky využívání různorodých, všudypřítomných materiálů.

V souladu s moderními trendy se nejčastější zdroj elektrické energie pro mobilní robotická zařízení skládá z bateriového zdroje a jednoho nebo více alternativních zdrojů, prodlužujících výdrž zdroje energie nebo umožňují autonomní dobíjení baterií.

### 2.1 Elektrický akumulátor

Elektrický akumulátor je elektrochemický zdroj elektrické energie v odborné literatuře označované také jako sekundární elektrochemický článek. Každý sekundární článek se skládá ze tří hlavních složek

- Anoda (záporná elektroda) – oxidační elektroda, je ta která při elektrochemické reakci uvolňuje elektrony do externího obvodu a zároveň oxiduje (platí pro vybíjecí část cyklu).
- Katoda (kladná elektroda) – redukční (palivová) elektroda, přijímá při elektrochemické reakci elektrony z externího obvodu a je redukována (platí pro vybíjecí část cyklu).
- Elektrolyt – iontový vodič, kterým probíhá přenos iontů uvnitř článku mezi elektrodami

Proud procházející akumulátorem vyvolá vratné změny v chemické struktuře článku, které se na venek projeví rozdílným potenciálem na elektrodách.

### **Druhy sekundárních článků**

- a) Olověné akumulátory
- b) Akumulátory na bázi niklu (NiCd, NiMH, Ni-Fe, Ni-Zn)
- c) Akumulátory na bázi lithia (Li-Ion, Li-Pol, LiFePo)
- d) Akumulátory na bázi alkalických elektrolytů s  $MnO_2$

Podle konstrukce se akumulátory dělí na otevřené (prizmatické) a uzavřené (hermetické).

#### **2.1.1 Obecné vlastnosti akumulátorů**

Vlastnosti akumulátorů jsou druh od druhu velmi odlišné a při výběru akumulátoru je nutné pečlivě zvážit nároky na vlastnosti akumulátoru, protože následně mohou mít přímý vliv na celkovou funkčnost zařízení.

- a) Hustota energie – udává množství energie v jednotce objemu akumulátoru (častěji vztažena ke hmotnosti).
- b) Jmenovitá kapacita – množství elektrického náboje, které je akumulátor schopen uchovat. Tento parametr se stanovuje měřením podle normou předepsaného postupu. Skutečná kapacita akumulátoru je odlišná od jmenovité, protože se mění s časem, teplotou, nabíjecím i vybíjecím procesem a mnoha dalšími vlivy.
- c) Jmenovité napětí – stanoveno měřením podle normou stanoveného postupu zpravidla výrobcem (uvedeno na štítku). Napětí je odlišné od skutečného napětí naměřeného na svorkách akumulátoru, z důvodu závislosti na množství náboje v akumulátoru, vnitřním odporu, teplotě a jiných vlivech.
- d) Doporučený maximální nabíjecí proud – závisí na typu akumulátoru a vnitřní konstrukci, je udáván výrobcem. Udává se absolutně nebo v násobcích jmenovité kapacity (označeno písmenem C). Při nedodržení doporučeného maximálního nabíjecího proudu zpravidla klesá životnost a může dojít i k poškození akumulátoru.
- e) Maximální vybíjecí proud – vybíjecí proud se u některých typů akumulátoru dělí na maximální kontinuální a maximální špičkový. Hodnoty obou těchto proudů jsou závislé na typu akumulátoru a stanovuje je výrobce včetně podmínek dodržování (velikost proudové špičky, závislost proudu na teplotě a další). Nedodržení hodnot vybíjecího proudu může mít za následek poškození akumulátoru.
- f) Samovybíjení – je vlastnost akumulátoru, která udává míru ztráty elektrického náboje na vnitřním odporu akumulátoru. Závisí na typu akumulátoru.

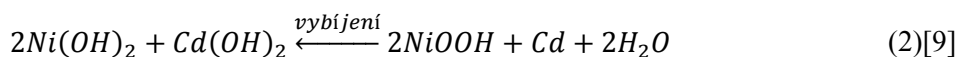
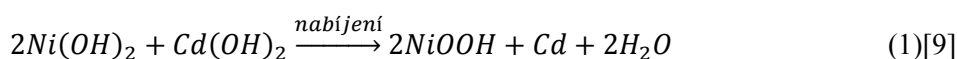
- g) Počet cyklů – říká, kolikrát je možné akumulátoru opakovaně vybit a nabít. Stanovuje se při dodržení předepsaných podmínek pro nabíjení i vybíjení akumulátoru.

### 2.1.2 NiCd akumulátory

Katoda článku je tvořena hydroxidem niklu ( $Ni(OH)_2$ ), anodu tvoří kadmium ( $Cd$ ) a mezi nimi separátor obsahující jako elektrolyt hydroxid draselný ( $KOH$ ).

Elektrochemické reakce na elektrodách NiCd článku popisují souhrnné rovnice (1) pro nabíjení článku a rovnice (2) pro vybíjecí část cyklu.

Oxid nikelnatý  $NiOOH$  se při vybíjení redukuje na  $Ni(OH)_2$  a tím vznikají ionty  $OH^-$ . Ty reagují s kadmiovou elektrodou a za vzniku hydroxidu kadmínatého  $Cd(OH)_2$ . Elektrolyt, kterým je vodný roztok  $KOH$ , nevstupuje do reakce přímo, ale při vybíjení se malá část iontů  $OH^-$  a  $H^+$  váže na aktivní hmoty.[9]



Významnou vlastností tohoto typu akumulátoru je malý vnitřní odpor, který se při dodržování zásad správného zacházení, takřka nezmění i po mnoha cyklech. Další výhodou oproti jiným typům je relativně vysoká proudová přetížitelnost při vybíjení i nabíjení a široký rozsah pracovních teplot.

Kadmiové akumulátory disponují mimo zmíněných výhod i velmi zásadní nevýhody. Jednou nevýhodou je zdraví nebezpečné kadmium, z něhož je vyrobena záporná elektroda. Tou druhou je pak možnost vzniku paměťového efektu.

#### Vysvětlení paměťového efektu

Paměťový efekt je opředen velkým mýtem, který vznikl z konkurenčního boje neseriózních distributorů akumulátorů, a neodborná veřejnost si jejich mystifikující prezentaci paměťového jevu dále náležitě přikrášlila. Takto vznikly například hypotézy o vlivu paměťového jevu na nevratnou ztrátu kapacity akumulátoru, přičemž skutečnou příčinou špatné funkce článku bývá často špatné zacházení, porušení obalu, špatné nabíjení nebo výrobní vada.

Paměťový jev sice opravdu existuje a podle původní definice vzniká při mnohočetném (řádově stovky cyklů) opakovaném vybíjení NiCd akumulátorů na malou, vždy stejnou hodnotu napětí a to při konstantní teplotě. Čímž dochází ke změnám krystalové struktury záporné kadmiové elektrody, ale tento jev není nezvratný, lze jej snadno odstranit úplným vybitím a nabitím akumulátoru. Paměťový jev se projevuje poklesem napětí (~100 mV) ve vybíjecí charakteristice článku (označováno jako druhý vybíjecí stupeň).[10][14]

Někdy se lze setkat s případy nepřesného označení paměťový efekt ve smyslu původní definice, pro druhé vybíjecí stupně vzniklé jinými jevy než zmíněné změny krystalické struktury

kadmiové elektrody, a to protože i v odborných kruzích panuje nejednotnost v používání tohoto pojmu.

### 2.1.3 NiMH akumulátory

Tyto články mají podobnou vnitřní strukturu jako NiCd, kladná elektroda je rovněž tvořena hydroxidem niklu, elektrolyt obsažený v separátoru je také alkalický elektrolyt KOH, ale záporná elektroda je tvořena kovovou slitinou schopnou vázat vodík (většinou tvořena slitinou niklu a lantanu). V průběhu cyklu dochází k procesu, který lze popsat rovnicí (3) pro nabíjení a rovnicí (4) pro vybíjení.[14]



V obou rovnicích  $M$  označuje slitinu kovu použitého na elektrodu a  $MH$  hydrid této slitiny.

Akumulátory tohoto typu mají vyšší hustotu energie než články s kadmiovou elektrodou avšak na úkor vyššího svévolného vybíjení. Tímto výčet kladných výsledků srovnání vlastností NiCd a NiMh končí, protože další parametry mají mnohem výhodnější akumulátory NiCd. Důvodem pro nahrazování NiCd článků články NiMH je zejména bezpečnost (kadmium je jedovaté).

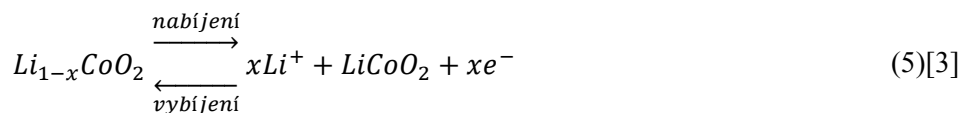
Speciálním případem jsou články tzv. Nové generace NiMH akumulátorů vyznačující se specifickými vlastnostmi.

- Menší kapacita než u klasických akumulátorů.
- Velmi nízké samovybíjení.
- Menší vnitřní odpor (typicky 180 mΩ), ale nejsou stavěné pro velké proudové odběry.
- Velký rozsah pracovních teplot (-10 °C až 50 °C).

### 2.1.4 Li-Ion akumulátory

Elektrody těchto článků jsou velice tenké (řádově stovky μm) a jsou z interkalačních sloučenin, to jsou sloučeniny, které mohou do krystalové mřížky přijmout cizí atom nebo molekulu, v tomto případě lithium (Li). Pro kladnou elektrodu se používá oxid kovu s vrstevnatou strukturou například kobaltitan lithný ( $LiCoO_2$ ), záporná elektroda bývá nejčastěji vyrobena z uhlíku (C), může být ve formě mikrokrystalického uhlíku nebo ve formě grafitu, teoreticky lze použít rovněž vícevrstvý materiál, tato varianta se však nepoužívá. Jako elektrolyt se používá sůl lithia v organickém rozpouštědle.

Aktivní materiály v Li-Ion člancích (materiály elektrod) si mezi sebou předávají ionty lithia, bez významné strukturální změny materiálu článku, tento proces se označuje jako interkalační (podobně pracují katalyzátory či sorbenty). Rovnice (5) popisuje chemický děj na katodě a rovnice (6) na anodě sekundárního lithiového článku. [3][13]



Akumulátory Li-Ion mají poměrně velký vnitřní odpor, proto se nehodí pro napájení zařízení s velkým proudovým odběrem. Samovolné vybíjení je velmi malé a spolu s vysokou energetickou hustotou tvoří tento parametr hlavní přednost tohoto typu akumulátoru. Nevýhodou těchto článků jsou vyšší nároky na zacházení s články při nabíjení, vybíjení, ale i skladování. Články mají velký rozdíl napětí mezi úrovní napětí v plně nabitém stavu a úrovní ve vybitém stavu ( $\Delta U \approx 1,6 V$ ). Při špatném zacházení s články při nabíjení a vybíjení (při jejich přetěžování) může dojít k poškození článku, navíc zahříváním článku může dojít ke změně skupenství kapalného elektrolytu na plynné skupenství a následně se článek může stát zdrojem úrazu uživatele.

### 2.1.5 Li-Pol akumulátory

Tyto sekundární články jsou ve své struktuře podobné Li-Ion článkům. Elektrody jsou z totožných materiálů a rozdíl je pouze v pevném elektrolytu, který zároveň slouží i jako separátor. Díky tomu lze lithium polymerové akumulátory vyrábět velmi tenké (o tloušťce několika milimetrů), libovolného tvaru a dají se velmi snadno formovat nebo ohýbat. Použití pevného elektrolytu snižuje nároky na pevnost obalu akumulátoru, takže ve výsledku se používá hliníková fólie potažená izolačním plastovým materiálem.

Lithium-polymerové akumulátory dosahují vyšší energetické hustoty v článku než lithium-iontové a tím i vyšší kapacity. Ale hlavní výhodou těchto článků jsou poměrně vysoké vybíjecí proudy (2-3 násobek oproti Li-Ion).

### 2.1.6 Srovnání nejpoužívanějších druhů akumulátorů

Vlastnosti jednotlivých druhů akumulátorů lze srovnávat pouze přehledově vzhledem k lišícím se údajům z různých zdrojů, nejvíce se údaje liší ve velikostech vybíjecích proudů a počtu cyklů. Přehledové srovnání vlastností pro nejpoužívanější typy akumulátorů ukazuje tabulka (Tab. 1).

**Tab. 1 Vlastnosti vybraných typů akumulátorů[6]**

Technologie:		Pb	NiCd	NiMH	Li-Ion	Li-Pol	LiFe(Y)PO4
Parametr:							
Specifická hustota energie	[Wh/kg]	40	70	100	180	250	150
Volumetrická hustota energie	[Wh/l]	50	100	150	250	330	220
Vybíjecí proud	[-]	< 5 C	< 30 C	< 20 C	< 20 C	< 45/60 C	< 30/60 C
Nabíjecí proud	[-]	< 1 C	1 - 5 C	1 - 2 C	1 C	1 - 6 C	1 - 5 C
Nominální napětí	[V]	2	1.2	1.2	3.6	3.7	3.3
Samovybíjení	%/den	0,5	0,8	1	0,1	0,1	0,1
Nabíjení	[-]	CC/CV	pulsní	pulsní	CV/CC	CV/CC	CV/CC
Počet cyklů	[-]	500	1000	800	< 1000	< 1000	< 2000

## 2.2 Palivový článek

Palivový článek je zařízení, které při elektrochemické reakci přeměňuje chemickou energii paliva přímo na elektrickou energii. Aktivní materiál (palivo) se přivádí na elektrody z externího zdroje, kde katalyticky reaguje s oxidačním činidlem, přičemž samotné elektrody se chemické reakce neúčastní. Teoreticky tedy umožňuje libovolně dlouhý provoz.

Druhy palivových článků se od sebe liší zejména použitým elektrolytem a rozsahem pracovních teplot, tyto údaje jsou uvedeny v závorkách.

- Nízkoteplotní membránový (iontovýměnná membrána, 25 – 100 °C)
- Nízkoteplotní alkalický (hydroxid draselný, 60 – 200 °C)
- Středně teplotní kyselý (kyselina fosforečná, 150 – 200)
- Vysokoteplotní z tavených karbonátů (tavenina alkalických karbonátů, 600 – 700 °C)
- Vysokoteplotní z vodivých oxidů (vodivé keramické oxidy, 650 – 1000 °C)

Nejnámější palivový článek je vodíko-kyslíkový a patří do kategorie nízkoteplotních palivových článků. Princip činnosti článku spočívá v přivádění vodíku (palivo) na anodu článku a zároveň oksyločvadla v podobě čistého kyslíku na katodu palivového článku. Elektrolytem tohoto typu galvanického článku může být vodní roztok *KOH* (cca. 40%). Materiálů, které se dají



použít pro výrobu porézních elektrod je celá řada, nejčastěji se používá platina, dalšími jsou zinek, měď, nikl, stříbro, uhlík nebo jiný materiál, který umožňuje difúzi plynu do elektrolytu.[12]

Palivové články produkují stejnosměrný elektrický proud. Pro zvýšení napětí tohoto zdroje se články řadí sériově, paralelním řazením lze naopak zvyšovat kapacitu zdroje. Jmenovité napětí vodíkového palivového článku je  $U \cong 0,7 \text{ V}$ .

Kromě vodíku lze v podobné konstrukci článku použít jako palivo metan, metylalkohol, propan, oxid uhelnatý a jiné, jako oksyličovadlo se ovšem výhradně používá čistý kyslík.

Mezi základní výhody a vlastnosti palivových článků patří tichý chod, přetížitelnost, ekologický provoz. Na druhou stranu nevýhodami jsou nízké napětí jednoho palivového článku a prozatím drahá (obtěžně získatelná) paliva.

### **2.3 Solární článek**

Solární články jsou založeny na principu přeměny světelné energie na elektrickou, tento proces je definován tzv. fotoelektrickým jevem. Princip fotoelektrického jevu je ve své podstatě inverzní k elektroluminiscenčnímu jevu. Vlivem absorpce elektromagnetického záření materiálem dochází ke tvorbě volných nosičů náboje. V tomto případě se jev nazývá vnější fotoelektrický jev, tedy po předání kvanta energie elektromagnetického záření (fotonu) volnému nosiči náboje (elektronu), opouští nosič prostor polovodičového krystalu přes elektrody.

Solární článek je tvořen vrstvou substrátu (polovodič typu P), na jehož spodní straně je nanášena spojitá vodivá elektroda (anoda). Na horní straně substrátu je vytvořen PN přechod nanášením tenké vrstvy polovodiče s opačným typem vodivosti a nakonec vrstva druhé elektrody (katoda).

Elektrický proud je úměrný kvantu elektronů, které se uvolňují z krystalu polovodiče. Z tohoto vztahu je zřejmé, že velikost výkonu, který je schopen fotovoltaický článek dodat obvodu závisí na celkové ploše PN přechodu.

### **2.4 Biomasa**

Tento typ alternativního zdroje energie je znám a využíván již poměrně dlouhou dobu. Ovšem do oblasti mobilních zařízení vstupuje malými krůčky až nyní. První z vědeckých projektů zaměřený na využití biomasy pro pohon autonomního robota byl zadán americkou armádou v roce 2003. Koncept tohoto robota byl nazván Energetically Autonomous Tactical Robot (EATR). Dle stanovených požadavků by měl být zdroj robota schopný získat elektrickou energii z libovolného, dostupného biologického materiálu jeho úpravou, spalováním a následným poháněním parní turbíny.[11]

## 3 Metody nabíjení akumulátorů

### 3.1 Nabíjení konstantním napětím

Jak název napovídá, jde o metodu při, které se na akumulátoru udržuje konstantní napětí, nezávisle na stavu nabití akumulátoru, až do úplného nabití akumulátoru. Při nabíjení touto metodou lze dobít až 70% kapacity akumulátoru v průběhu zlomku času celého nabíjecího cyklu, protože nabíjecí proud je při největším rozdílu napětí nabíječe (konečného napětí) a skutečného napětí akumulátoru poměrně vysoký. Tato metoda se v ryzí podobě prakticky nepoužívá ze dvou důvodů. Prvním je velký počáteční nabíjecí proud, pro který většina akumulátorů, až na výjimky jako jsou například olověné akumulátory, není stavěná. A druhým je skutečnost, že většina nabíjecích stanic nebo zdrojů pro nabíjení jsou z bezpečnostních důvodů vybaveny proudovou pojistkou.

### 3.2 Nabíjení konstantním proudem

Akumulátor se nabíjí po celou dobu nabíjení konstantním proudem, přičemž je bezpodmínečně nutné v průběhu nabíjení nepřekročit rozsah nabíjecí teploty akumulátoru, která je výrobcem předepsána. Tento typ nabíjení se používá zejména pro hermetické NiCd a NiMH akumulátory. Podle rychlosti nabíjení lze pak proudové nabíjení rozdělit na několik typů

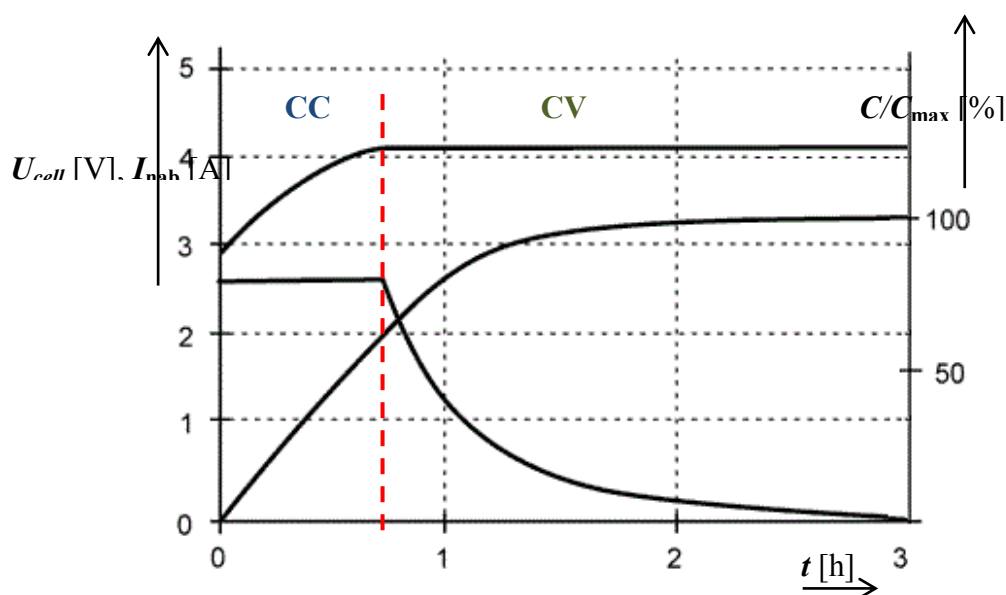
- Konzervační dobíjení – slouží výhradně ke kompenzaci samovybití akumulátoru.
- Trvalé dobíjení – časově neomezené nabíjení velmi malým proudem (0,05 C).
- Normální nabíjení – nabíjení proudem 0,1 C. Vhodné pro nabíjení akumulátorů po dlouhodobém skladování. Standardní teplotní rozsah 0 – 50 °C.
- Zrychlené nabíjení – nabíjí se většinou proudem 0,2 C při doporučeném teplotním rozsahu většinou 5 – 35 °C.
- Rychlé nabíjení – nabíjí se proudem 0,5 – 1 C při povoleném rozsahu teplot 10 – 40°C.
- Velmi rychlé nabíjení – nabíjení proudem o velikosti 1 – 4 C. Tento typ nabíjení se používá pouze pro speciální NiCd akumulátory s elektrodami ze spékaného kovového prášku s aktivním materiálem tzv. sintrované elektrody.

Dělení proudového nabíjení převzato z odborné literatury.[14]

### 3.3 Nabíjení lithiových akumulátorů

Pro lithiové akumulátory je nejvhodnější metoda nabíjení označovaná CCCV (Constant Current Constant Voltage). Tato metoda vychází z principu napěťového nabíjení a je doplněna omezením nabíjecího proudu. Na začátku nabíjecího cyklu se nabíjí konstantním proudem, který pro rychlé nabití akumulátoru zpravidla odpovídá maximálnímu povolenému nabíjecímu proudu. V této fázi nabíjení je nárůst stupně nabití nejvyšší. Po nabití článku na maximální napětí se začne nabíjet konstantním napětím, přičemž nabíjecí proud pozvolna klesá se vzrůstajícím stupněm nabití,

až do ukončení nabíjecího cyklu zpravidla proudovým ukončením. Obrázek (Obr. 1) nastiňuje přibližný průběh napětí, proudu a stupně nabití Li – Pol článku při nabíjení.



Obr. 1 Průběh veličin při nabíjení Li-Pol článků

### 3.4 Ukončení nabíjení

Nabíjení akumulátoru lze ukončit v závislosti na splnění několika různorodých podmínek. Těmi základními jsou

- a) Časové ukončení – nabíjení se ukončí po uplynutí definovaného času, používá se pro normální a zrychlené nabíjení, pro rychlé či velmi rychlé nabíjení se nedoporučuje.
- b) Napěťové
  - VCO – ukončení při dosažení definovaného napětí. Nevýhodou je závislost na teplotě článku a nabíjecím proudem.
  - PKV – ukončení při dosažení vrcholu napětí článku. Vhodné pro rychlé nabíjení, nelze použít při malých ani velkých nabíjecích proudech, protože nelze správně detekovat napěťový vrchol.
  - $\Delta U$  – ukončení rychlého nabíjení při poklesu napětí článku na konci nabíjení o stanovené napětí.
  - $d^2U/dt^2$  – detekce maximální změny napětí článku je velmi šetrná k článku, protože dochází k minimálnímu přebíjení.

c) Teplotní

- TCO – ukončení při dosažení definované teploty akumulátoru.
- $dT/dt$  – ukončení při definované změně teploty článku, nedoporučuje se pro použití při nabíjení částečně vybitého článku.

d) Proudové ukončení je výhradně používané pro lithiové akumulátory. Nabíjení se ukončí při dosažení předem stanoveného proudu, který zpravidla odpovídá 0,05 C.

Velmi často se metody ukončení nabíjení kombinují pro důkladnější zabezpečení vůči poškození akumulátoru, nejpoužívanější kombinace jsou napěťové nebo proudové ukončení spolu s teplotním popřípadě časovým ukončením.

### 3.5 Vyvažování článků Li-Pol baterie

Při vybíjení lithiových baterií dochází k vybíjení jednotlivých článků akumulátoru na různou hodnotu napětí. Důvodem tohoto jevu je skutečnost taková, že ve výrobním procesu nelze zaručit totožné parametry všech článků akumulátoru, zejména se jedná o skutečnou kapacitu článku a vnitřní odpor článku. Pak při následujícím nabíjení baterie dochází k přebíjení článků s nižší kapacitou. Tento jev se opakuje v každém nabíjecím cyklu akumulátoru, tím se snižuje životnost článku a následně i životnost celé baterie.

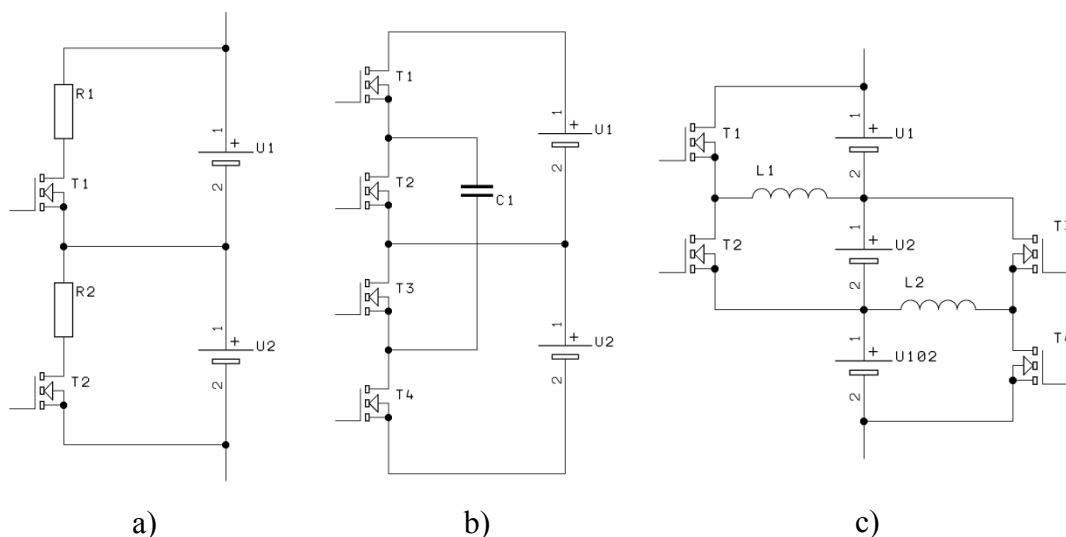
#### 3.5.1 Techniky vyvažování

Způsobem jakým lze tento jev kompenzovat je v průběhu nabíjení vyrovnávat (balancovat) napětí jednotlivých článků. Princip vyvažování článků spočívá v omezení nabíjecího proudu článku s vyšším napětím, čímž se sníží rychlost nabíjení tohoto článku a články s nižším napětím se mezitím nabijí na stejnou hodnotu napětí. Tento obvod pro vyvažování článků se nazývá balancer. Existuje několik technik vyrovnávání v zásadě se od sebe lišících účinností, složitostí konstrukce a nároky na řídicí algoritmus. Techniky vyvažování se dělí na dva základní typy podle způsobu zacházení s energií na pasivní a akumulační.

Akumulační techniky vyvažování se vyznačují vysokou účinností avšak za cenu obtížné realizace a to zejména složitostí řídicích obvodů. Dále je u těchto technik velmi obtížné měřit aktuální napětí jednotlivých článků, z těchto důvodů se tyto techniky příliš nepoužívají. Pro ilustraci jsou akční části dvou typů akumulačního balanceru zobrazeny na schématech (Obr. 2a, b). Nevýhodu složitosti implementace této techniky vyvažování do velké míry kompenzuje nižší míra ztrát na vyvažovacích obvodech a možnost použití téměř bezztrátového vyvažování i v průběhu vybíjení akumulátoru a vytváří tak minimální ztráty, tento princip je znám a patentován pod názvem PowerPump.[1][16]

Oproti akumulačním technikám jsou pasivní metody běžně používané i v profesionálních vyvažovacích obvodech. Základním principem je maření přebytečné elektrické energie vyvažovaného článku na rezistoru, který je spínán PWM signálem řízeným výkonovým

tranzistorem. Tímto vznikají mnohdy nemalé výkonové ztráty a akční prvky je nutné dostatečně ochlazovat. Velikost vyvažovacího proudu závisí na metodě řízení balanceru, nabíjecím proudu a rozvážení článků akumulátoru.



Obr. 2 Typy vyvažovacích obvodů – a) pasivní - spínaný, b) akumuláční kapacitní, c) akumuláční induktivní [7]

### 3.5.2 Metody vyvažování

Vyvažování článků baterie může probíhat v průběhu celého nabíjecího cyklu nebo na konci nabíjení.

Při vyvažování na konci nabíjení je vyrovnávací proud poměrně vysoký a akční prvky balanceru tedy musí být dostatečně robustní, aby byly schopny vyvažovat plný nabíjecí proud. Výhodou této metody je jednoduchá implementace, která spočívá pouze v porovnávání napětí článků a spínání akčních prvků. Hlavní nevýhodou je vysoký ztrátový výkon, který způsobuje poměrně velké oteplení součástek a toto teplo je nutné důsledně odvádět.

Vyvažování v průběhu celého nabíjecího cyklu umožňuje rychleji a účinněji vyrovnávat napětí na člancích akumulátoru než první metoda. Vyvažovací proud je menší než proud při vyvažování první metodou, protože se vyvažuje delší dobu a lépe se tak srovnává napětí na člancích. Další výhodou této metody je skutečnost, že v libovolné fázi nabíjení lze „přibrzdit“ nabíjení a počkat na vyvážení článků. Význam této výhody je zejména při vysokém rozvážení napětí článků. Díky menšímu vyvažovacímu proudu vznikají na akčních prvcích mnohem menší ztráty a součástky mohou být použity rozměrově menší.

## 4 Operační systémy pro vestavěné aplikace

### 4.1 Vestavěné systémy

Jsou to jednoúčelové výpočetní a řídicí systémy založené na mikroprocesorové technice, navržené pro konkrétní aplikaci, jejichž úkolem je vykonávání předem určených úkolů za cílem efektivnější činnosti aplikace a zároveň je systém fyzickou součástí zařízení. Vestavěné systémy (embedded) neslouží k vývoji aplikace, ale aplikace na nich pouze běží.

Vestavěný systém bývá zpravidla nasazován v aplikacích zabývajících se složitými řídicími procesy (ABS v automobilech, avionika letadel, zdravotnické přístroje), kde by nasazení jiných systémů bylo neefektivní či nespolehlivé. Z tohoto důvodu se kladou velké požadavky na spolehlivost HW i SW části systému, bezpečnost, ale také na výrobní cenu. Často se označují i inteligentní mobilní telefony nebo PDA jako vestavěné systémy vzhledem k hardware, přestože softwarové vybavení je všeobecně použitelné, čímž plně nepodléhá definici.

Pro takovýto systém existují v principu dvě možnosti, kterými se dá implementovat softwarová vybavení zařízení, a sice použití nebo nepoužití operačního systému. V prvním případě, tedy bez operačního systému může aplikace zpracovávat pouze jeden proces, ale vývoj jednodušších aplikací je rychlejší, levnější a výsledný program bude mít nižší nároky na výpočetní výkon procesoru. Použití operačního systému oproti tomu umožňuje rychlý vývoj složitějších aplikací, pseudoparalelní zpracování více procesů a snadnou přenositelnost vytvořeného kódu. Pro vestavěné aplikace se výhradně používá tzv. operační systém reálného času (RTOS).

### 4.2 Operační systém reálného času

V odborné literatuře se lze setkat s několika výklady definice RTOS, jednou z nejrozšířenějších je pak definice: „Operační systém reálného času je takový operační systém, který reaguje na nepředvídatelné události předvídatelným způsobem.“ Jinými slovy lze říci, že RTOS je operační systém, který se vyznačuje deterministickým chováním a vysokou stabilitou systému.

Zásadní rozdíl mezi klasickým operačním systémem a operačním systémem reálného času je zejména v tom, že u standardních OS se očekává pouze správný výsledek procesu, oproti RTOS kde záleží na správnosti výsledku stejně, jako záleží na čase dokončení výsledku. Přičemž časem dokončení výsledku se nemíní průměrný čas reakce, ale prodleva reakce v nejhorším možném případě. S tím úzce souvisí další významné rozdíly mezi OS a RTOS, klasické OS mají málo úrovní priorit vláken, nedeterministický plánovač, malé rozlišení časovače a pomalé přepínání kontextu.

RTOS se neformálně dělí do dvou základních kategorií, podle vlastností operačního systému, tou první jsou Hard-RTOS a druhou Soft-RTOS. Hard-RTOS jsou operační systémy, u kterých jsou nároky na včasnou a správnou reakci velmi vysoké, vyplývá to z nasazení těchto operačních systémů v systémech, kde by zpožděná reakce mohla mít katastrofální následky (např. avionika letadla nebo řídicí systémy raketoplánu). Jde tedy o systémy nejvíce se blížících k ideálnímu

systému reálného času. Oproti tomu Soft-RTOS již v základu povolují drobné odchylky v reakcích, z čehož vyplývá, že je lze implementovat pouze do systémů, které nejsou životu nebezpečné (např. bankomaty nebo inteligentní domácí spotřebiče).

Na trhu je dostupných několik operačních systémů reálného času, mezi základní a nejznámější patří LynxOS, QNX, RTLinux, VxWorks, Windows CE, OSE nebo FreeRTOS.

### 4.3 FreeRTOS

Tento operační systém reálného času je určen pro malé vestavěné aplikace, je volně stažitelný a šířitelný pod licencí GNU-GPL. FreeRTOS je oficiálně dostupný pro 27 různých architektur, ale lze jej velmi snadno modifikovat pro použití na dalších architekturách. Jádro operačního systému FreeRTOS je vyvinuto s ohledem na nízký výpočetní výkon malých vestavných aplikací stejně jako s ohledem na nízké paměťové nároky jádra.

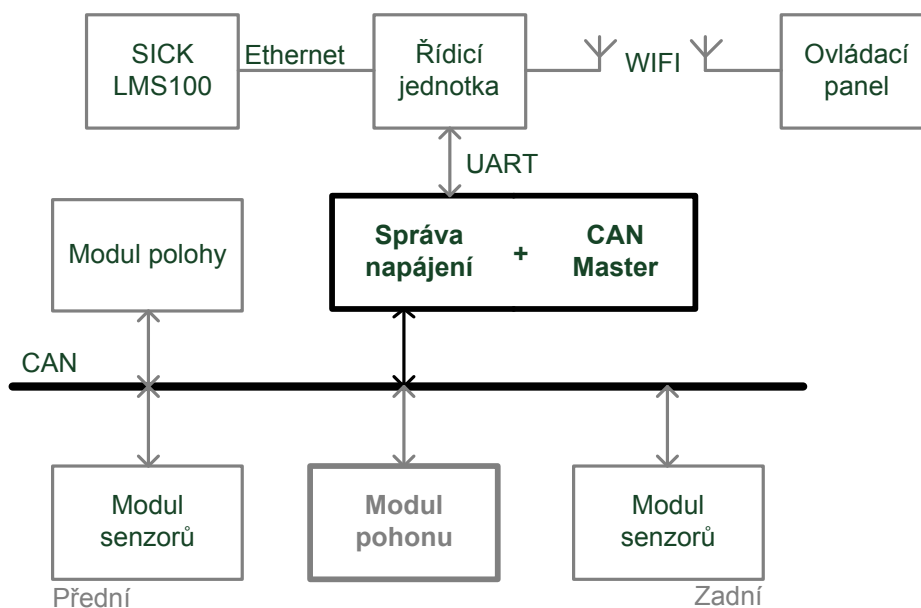
Pro usnadnění vývoje aplikací jsou na webových stránkách tvůrců ([2]) dostupné příklady ke stažení včetně zdrojových souborů operačního systému. FreeRTOS je vytvořený ve standardním programovacím jazyce C, až na několik klíčových částí napsaných v assembleru, takže je s tímto jazykem plně kompatibilní, což usnadňuje vývoj aplikace i případné změny v kódu operačního systému. Samotné jádro operačního systému je složeno ze tří souborů list.c, queue.c a tasks.c, které se přidávají do uživatelského projektu.

Shrnutí základních vlastností FreeRTOS

- a) Preemptivní, kooperativní i hybridní konfigurace plánování.
- b) Synchronizace procesů pomocí front, semaforů nebo mutexu.
- c) Mutex s děděnou prioritou.
- d) Podpora softwarových časovačů.
- e) Detekce přetečení zásobníku.
- f) Žádné programové omezení na počet vláken nebo použitých priorit.

## 5 Modul správy napájení

Modul správy napájení je součástí distribuovaného řídicího systému průzkumného vozidla a slouží pro distribuci energie z akumulátoru do jednotlivých modulů řídicího systému vozidla. Řídí nabíjení baterie, kontroluje průběh jejího vybíjení a řídí spínání napájecích větví. Dále tvoří také datový most mezi nadřazeným systémem a CAN sběrnici. Rozčlenění vozidla na jednotlivé moduly je vidět na obrázku (Obr. 3).



Obr. 3 Blokové schéma modulů průzkumného vozidla

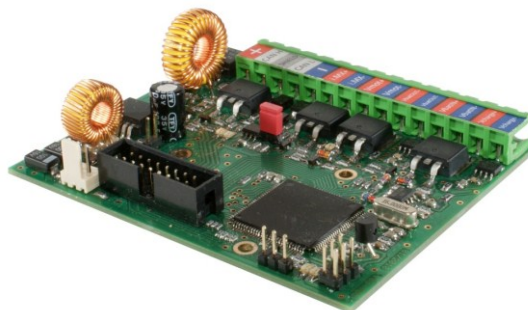
### 5.1 Popis modulu správy napájení

Správa napájení je částí řídicího systému průzkumného vozidla, která spravuje napájecí síť celého systému. Při zapnutí vozidla se nejprve spustí správa napájení a provede se diagnostika stavu baterie i napájecí sítě. Následně se zapínají jednotlivé napájecí větve, je-li kontrola akumulátoru úspěšná. V opačném případě zůstanou napájecí větve zapnuty a začne nabíjení baterie nebo se ozve varovný tón, nelze-li započít nabíjení.

Modul správy napájení je řízen mikrokontrolérem MC9S12DP512, který je vystavěn na 16-ti bitové architektuře. Mikrokontrolér obsahuje 512 KB programové flash paměti, 14 KB datové RAM a 4 KB datové EEPROM paměti, dále je mikrokontrolér vybaven mnoha perifériemi zahrnujícími zejména 10-ti bitový A/D převodník, osmi kanálový PWM modulátor a komunikační rozhraní CAN sběrnice. Softwarová výbava modulu je tvořena operační systém reálného času FreeRTOS V6.0.2 a uživatelskými procesy.

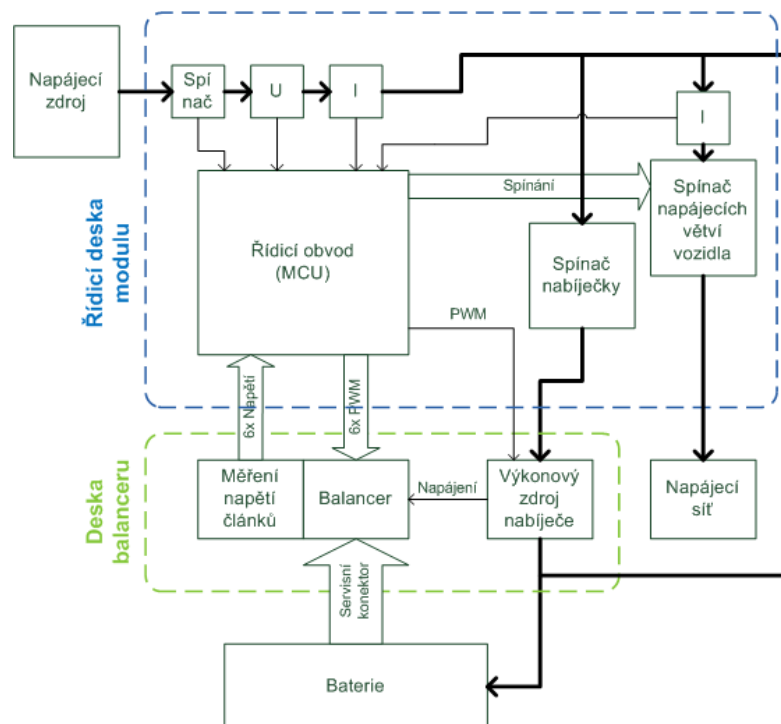


Z konstrukčního hlediska jsou k modulu správy napájení připojeny přímo všechny výkonové napájecí trasy. Svorky napájecích větví jsou umístěny na jedné straně desky pro snadný a přehledný přístup (Obr. 4).



Obr. 4 Modul správy napájení

Správa napájení je tvořena hlavní částí (řídící deska) a balancerem s nabíječkou (deska balanceru). Principiální schéma zapojení modulu správy napájení je zobrazeno na obrázku (Obr. 5). Tyto dva moduly jsou vzájemně propojeny signálovým a výkonovým spojem. Signálový spoj zahrnuje šest kanálů vedoucích signál měřících zesilovačů z modulu balanceru na vstup ADC mikrokontroléru na řídícím modulu. Dále jsou tímto spojem vedeny PWM signály pro řízení vyvažovacích obvodů a jeden signál řídicí výkonový spínací zdroj nabíječky. Pro správnou funkci nabíječky baterie musí být nabíječka připojena paralelně k baterii, toto zapojení je implementováno výkonovým spojem.



Obr. 5 Blokové schéma modulu správy napájení

### 5.1.1 Zdroj nabíjecího proudu

Stávající řešení se zakládá na použití lineárního zdroje nabíjecího proudu, který jako akční prvek regulátoru používá unipolární tranzistor s pracovním bodem v lineární oblasti výstupní charakteristiky tranzistoru. Při plném nabíjecím proudu pak na tomto tranzistoru vznikají nemalé výkonové ztráty, takže tranzistor musí být umístěn na robustním chladiči. Maximální nabíjecí proud je omezen tepelnými ztrátami tranzistoru na  $I_{nab} = 2 \text{ A}$ .

Tranzistor je řízen přímo PWM signálem vyfiltrovaným přes dolnoprostupní filtr.

### 5.1.2 Měřicí zesilovače

Pro měření se používá A/D převodník integrovaný v mikrokontroléru s výstupním slovem nabývající maximálně 1024 hodnot včetně nuly. Referenční napětí převodníku je rovno napájecímu napětí mikrokontroléru tedy  $U_{Ref} = 5 \text{ V}$ .

Na vstup převodníku pro měření napětí každého článku je zapojen operační zesilovač v zapojení rozdílového zesilovače. Zesílení rozdílového zesilovače je nastaveno na  $A = 1$ . Stávající zapojení umožňuje měřit napětí na člancích akumulátoru i během běžného provozu vozidla, měření není závislé na tom, je-li aktivní nabíjení.

Maximální rozlišení měření převodníkem je  $U_{Res} = 4,8828 \text{ mV}$ . Napětí článků se může měnit v rozmezí  $2,5 - 4,2 \text{ V}$  a přesně takto je přes rozdílový zesilovač se zesílením  $A = 1$  přivedeno

napětí na vstup převodníku. Takže změřený údaj nesoucí informaci o stavu napětí na článku využívá pouze 34 % rozsahu převodníku nebo 24 % neklesá-li napětí článku pod  $U_{\text{cell}} = 3 \text{ V}$ .

## **5.2 Úpravy stávajícího řešení**

V dosavadním řešení je nutné provést několik drobných i zásadních úprav hardwarové části modulu stejně jako softwarové s cílem zvýšit účinnost nabíjení lithiového akumulátoru. Podrobněji jsou úpravy rozepsány v následujících podkapitolách.

### **5.2.1 Zdroj nabíjecího proudu**

Jedním z hlavních požadavků nové verze nabíječky je omezení výkonových ztrát na akčním prvku nabíječky. Z tohoto důvodu byl zvolen spínaný zdroj nabíjecího proudu. Po konzultaci s vedoucím bakalářské práce bylo rozhodnuto, že primární vlastností nabíječky nebude zejména rychlost nabíjení baterie, nýbrž schopnost kvalitně nabíjet i malým proudem. V závislosti na tomto usnesení bude zdroj nabíjecího proudu schopen lépe regulovat malý proud. Důvodem této optimalizace je požadavek na možnost nabíjet vozidlo alternativním zdrojem energie například fotovoltaickým panelem.

### **5.2.2 Měřicí zesilovače**

Drobným nedostatkem měření napětí článků ve stávající verzi je nízká rozlišovací schopnost měření. Pro její zvýšení je nutné upravit měřicí systém po hardwarové i softwarové stránce. Měřicí zesilovače budou upravovat rozsah napětí článku  $2,5 - 4,2 = 1,7 \text{ V}$  na celý vstupní rozsah A/D převodníku  $0 - 5 \text{ V}$ . Následně bude v programu mikrokontroléru provedena inverzní operace, kterou se získá zpět údaj o reálné hodnotě napětí článku.

Další úprava, kterou bude vhodné provést, se týká doplnění ochrany vstupu A/D převodníku proti přepětí, při případné poruše měřicích obvodů.

### **5.2.3 Změna v systému řízení správy napájení**

Stávající verze firmwaru není zcela dořešena v záležitostech týkajících se správného spínání napájecích větví. Při startu správy napájení se zároveň provede i zapnutí všech napájecích větví a až poté se kontroluje stav baterie. Dále není prozatím dořešeno vypnutí ostatních napájecích větví při nabíjení baterie nebo při vyslání zprávy k vypnutí z nadřazeného modulu. Tyto nedostatky je nutné příslušným způsobem napravit.

## **5.3 Výběr součástí pro úpravu modulu**

Výběr součástí pro realizaci úpravy nabíječky se týká zejména samotného zdroje nabíjecího proudu. Po odborné konzultaci s vedoucím práce bylo rozhodnuto, že se zdroj nabíječky bude

skládat z integrovaného step-down spínaného měniče a řídicího obvodu. Důvodem, který vedl k tomuto závěru, byla volba vyšší spínací frekvence zdroje, protože pro vyšší frekvenci se snižuje velikost (takže i cena) akumulací cívky. Nejvyšší možná frekvence, kterou lze řídit spínání přímo procesorem je 160kHz. Proto byl vybrán step-down měnič LM22673, který pracuje na frekvenci 500kHz.

Měřicí zesilovače jsou založeny na stejném typu operačního zesilovače jako v předchozí verzi. Operační zesilovač LM324 je typu tzv. „to zero“ na výstupu. Maximální napětí operačního zesilovače je  $U_{CC} = 32 \text{ V}$  v unipolárním zapojení. Vstupní napěťový offset  $U_{of} = 2 \text{ mV}$  je menší než hodnota citlivosti A/D převodníku.

Vyvažovací obvody se oproti stávajícímu stavu výrazně nemění. Hlavní změna je ve snížení maximálního vyvažovacího proudu a s tím souvisí hodnota rezistoru spínaného tranzistorem. Na rezistoru se bude trátit poměrně velký výkon až  $P_R = 1,76 \text{ W}$ . Proto byl zvolen rezistor s maximálním ztrátovým výkonem 2 W. Jako spínací tranzistor se je použit IRLML2502.

## 6 Návrh desky balanceru

### 6.1 Formica

Formica je softwarový nástroj pro kreslení elektrotechnických schémat a návrh desek plošných spojů. Návrhové studio se skládá ze dvou nezávislých programů

- a) Schematic Editor (nástroj pro kreslení schémat).
- b) Layout Editor (nástroj pro návrh desek plošného spoje).

Tyto dva programy jsou na sobě nezávislé na rozdíl od jiných systémů (např. Eagle), možností kterou je lze propojit je vygenerování speciálního souboru (tzv. netlist) v editoru schémat a následně jej načíst v editoru desky plošného spoje.

Při vypracování této práce byla použita Formica verze 4.40 se školní licencií.

### 6.2 Cadence OrCAD

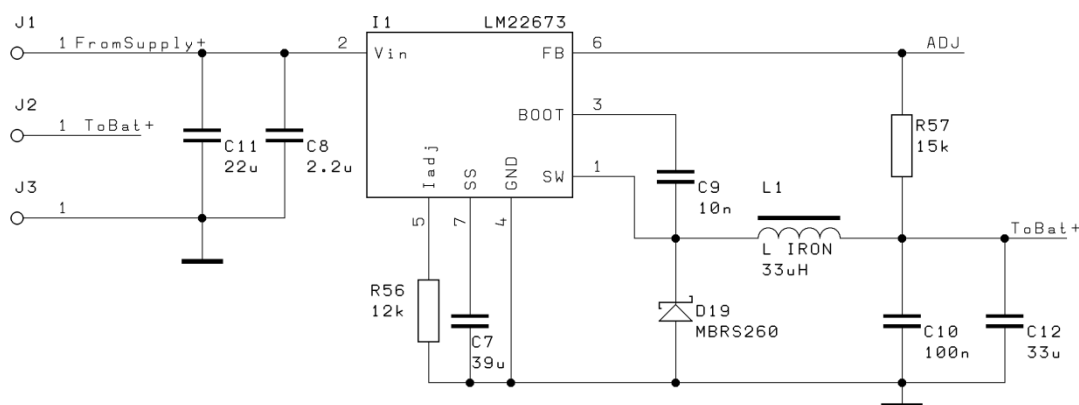
Cadence OrCAD je softwarový balík programů pro komplexní návrh elektrotechnických zařízení, zahrnuje kreslení schémat, simulaci zapojení, návrh plošného spoje a další podpůrné programy. Pro simulaci obvodů se používá Cadence PSpice A/D využívající volně šiřitelné simulační jádro SPICE.

Pro vypracování této práce byla použita volně stažitelná demoverze Cadence OrCAD Release 16.3 za účelem průběžné simulace částí zapojení modulu balanceru.

### 6.3 Zdroj nabíjecího proudu

#### 6.3.1 Výkonová část

Výkonová část je tvořena integrovaným obvodem Step-Down měniče LM22673 v katalogovém zapojení. Měnič pracuje na frekvenci 500 kHz s maximálním výstupním proudem 3 A, pro tyto parametry jsou vypočteny hodnoty akumulací cívky a výstupního filtru pomocí interaktivního návrhového studia WEBENCH Designer, dostupného z webových stránek výrobce ([5]). Pro omezení špičkových proudů na interním spínacím tranzistoru v obvodu slouží rezistor R56. Velikost výstupního napětí se v katalogovém zapojení řídí napětíovou zpětnou vazbou tvořenou děličem napětí na vstup zpětné vazby (FB) měniče, pro účely regulace napětí je toto zapojení upraveno a napětí se řídí signálem ADJ z řídicí části zdroje. Schéma zapojení výkonové části zdroje nabíjecího proudu lze vidět na obrázku (Obr. 6).



Obr. 6 Schéma zapojení výkonové část zdroje

V průběhu testování byla po odborné poradě s vedoucím práce provedena změna v hodnotách kondenzátorů na vstupu (C8, C11) i výstupu (C10, C12) spínaného měniče. Protože se při měření ukázalo, že výstupní napětí je velmi zvlněné. Dalším důvodem pro toto zvlnění bylo nesprávné rozmístění těchto kondenzátorů na DPS a nesprávně vedeny zemní spoje. Tyto nedostatky byly odstraněny na druhé verzi desky balanceru. Schéma pro zavedení této úpravy lze vidět v příloze (Příloha III -).

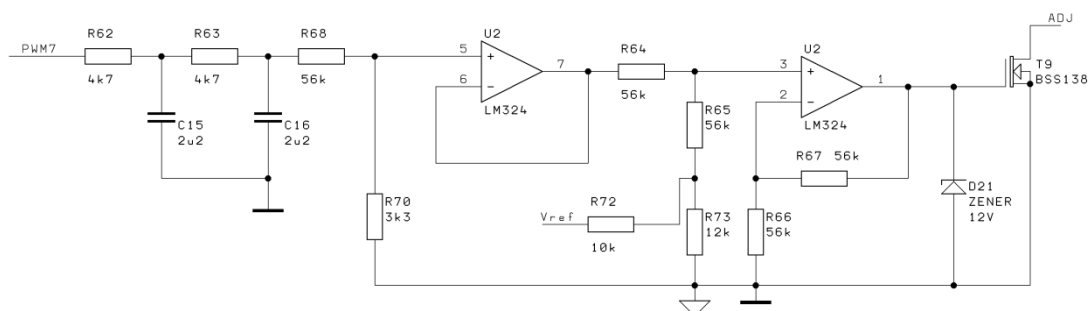
Protože měření proudu na řídicí desce modulu správy napájení se ukázalo jako nespolehlivé a nepřesné i při použití digitálního filtru. Bylo rozhodnuto o umístění obvodu pro měření nabíjecího proudu přímo na desku balanceru. Nepřesnosti byly způsobeny zejména vlivem vlastního rušení spínaným zdrojem a rušením z napájecích větví průzkumného vozidla.

Pro měření proudu byl zvolen proudový senzor založený na principu Hallova jevu ACS712. Tento obvod je schopen měřit maximální proud  $I_{\max} = 5$  A. Senzor byl zapojen dle doporučeného katalogového zapojení.

### 6.3.2 Řídicí část

Řídicí část je tvořena filtrem PWM signálu z modulu správy napájení, obvodem pro úpravu napětí a tranzistoru T9, který spolu s R57 tvoří zpětnou vazbu měniče. Velikost napětí na výstupu filtru může být podle aktuální střídy PWM v rozmezí 0 – 5 V, tímto napětím nelze přímo řídit tranzistor T9, protože prahové napětí tohoto tranzistoru je dle katalogu 1,3 V a řízení by bylo značně nepřesné. Z tohoto důvodu je předřazen převodní obvod složený ze dvou operačních zesilovačů (schéma na Obr. 7). Dělič napětí R68 a R70 upraví rozsah napětí filtru na rozsah 0 – 0,28 mV, toto napětí se následně přes sledovač napětí přivede na součtový neinverující zesilovač, který napětí sečte s napěťovým offsetem odpovídajícím prahovému napětí tranzistoru. Tímto zapojením se docílí poměrně přesného řízení tranzistoru v oblasti pracovního bodu.

Hodnoty rezistorů R70 a R72 byly v průběhu testování přizpůsobeny skutečnému prahovému napětí tranzistoru T9. Dále byly provedeny změny v hodnotách součástek C15 a C16, s cílem zvýšení kvality filtrace PWM signálu. Provedené změny lze vidět na schématu v příloze (Příloha III -).



Obr. 7 Schéma zapojení obvodu pro řízení zdroje

#### 6.4 Měřicí část

Protože se napětí vyvažovaného článku může měnit v rozmezí 2,5 – 4,2 V a nejvyšší přesnosti měření se A/D převodníkem se dosahuje při plném využití jeho rozsahu 0 – 5 V, je použito zapojení rozdílového zesilovače s operačním zesilovačem, které umožňuje převádět rozdíl napětí článků na plný rozsah A/D převodníku. Rozdílový zesilovač (schéma na Obr. 8) implementuje matematickou funkci danou rovnicí (9), kde  $U_{SC}$  je napětí na výstupu zesilovače,  $\Delta U_C$  skutečné napětí článku,  $U_0$  referenční napětíový offset a  $S$  kalibrační konstanta.

$$U_{SC} = S \cdot (U_{cell}^+ - U_{cell}^- - U_0) = S \cdot (\Delta U_C - U_0) \quad (7)$$

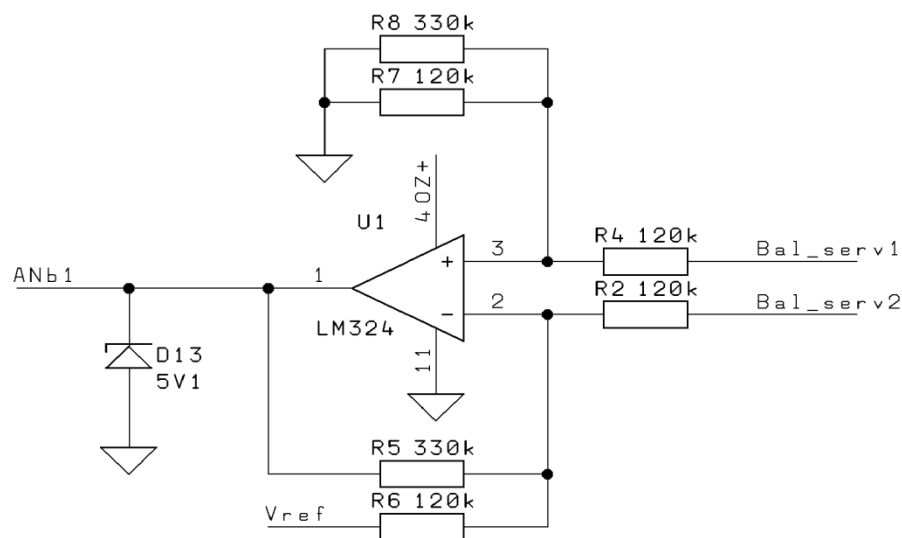
Z rovnice (9), známé napětíové reference, která je rovna minimálnímu napětí Li-Pol článku  $U_0 = 2,5 V$ , maximálního napětí jednoho článku  $\Delta U_C = 4,2 V$  a napětí odpovídajícímu horní hranici rozsahu A/D převodníku  $U_{SC} = 5 V$ , lze vypočítat kalibrační konstantu  $S = 2,94$ .

Obvod s takto navrženým zesílením není z praktického hlediska ideální, protože neumožňuje detekovat přítomnost správně zapojeného článku nebo případnou poruchu na měřicím zesilovači. Z tohoto důvodu bude výsledné zesílení nastavené na nižší hodnotu  $A = S = 2,75$ . Rozdílový zesilovač má nastaveno zesílení pomocí operační sítě tvořené rezistory. Rovnice pro výpočet zesílení (10) lze odvodit z Kirchhoffova zákona, po úpravě a vyjádření je zesílení definováno vztahem (11).

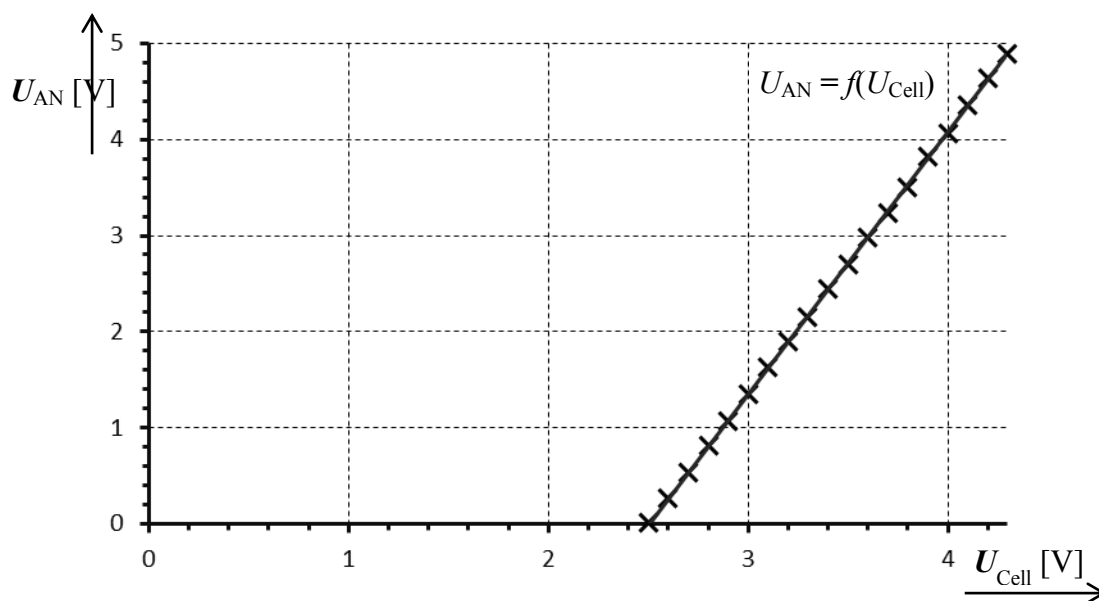
$$\frac{U_{Out} - U_0}{R_5} + \frac{U_{ref} - U_0}{R_6} + \frac{U_1 - U_0}{R_2} = 0, U_0 = U_2 \frac{R_7 \parallel R_8}{R_4 + R_7 \parallel R_8} \quad (8)$$

$$A = \frac{R_5(R_2 \cdot R_6 + R_2 \cdot R_5 + R_6 \cdot R_5)}{R_2 \cdot R_6(R_2 + 2R_5)} \quad (9)$$

Potenciál virtuální nuly OZ posunut o napětový offset  $V_{ref} = U_0 = 2,5 \text{ V}$ . Stabilizační dioda D13 na výstupu zesilovače slouží pro ochranu vstupu procesoru v případě špatného zapojení článku nebo případné poruchy.



Obr. 8 Schéma měřicí části



Obr. 9 Kalibrační křivka měřicího zesilovače

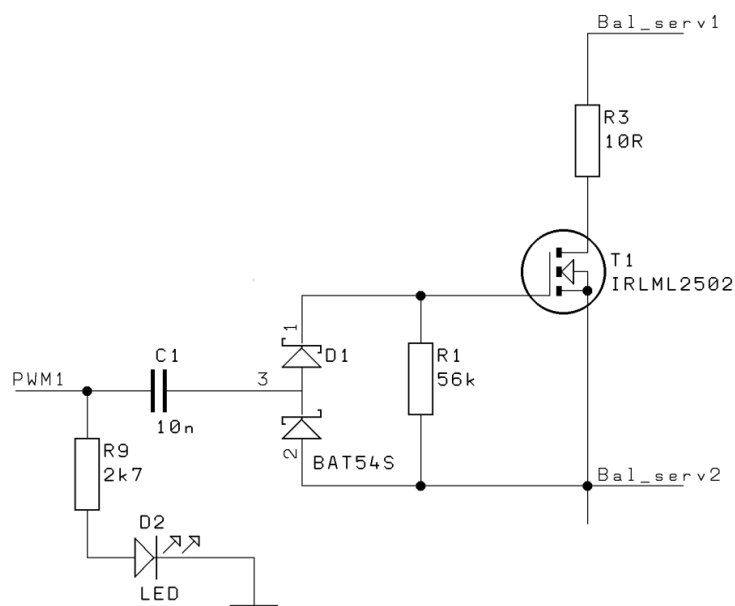
V průběhu testování se ukázalo, že toto zapojení nemá stabilní přesnost měření, ale výstupní napětí se mění (snižuje) v závislosti na napětí článku, který je zapojený blíže k zemi. Tento jev byl způsoben přivedeným referenčním napětím na invertující vstup OZ, kde je zároveň



zapojena zpětná vazba, a přes spoj ( $R_2, R_6, V_{ref}$ ) bylo napětím „spodního“ článku ovlivněno zesílení zesilovače. Měřicí zesilovač jevil dobré vlastnosti pouze v případě, že na vstupu zesilovačů bylo nezávislé (plovoucí) napětí, což byl případ testování přesnosti měření s použitím laboratorního zdroje. Tento neduh byl po konzultaci s vedoucím práce odstraněn změnou zapojení (Příloha III -, Příloha IV -). Řešením bylo připojením záporné offsetové reference na neinvertující vstup vůči zemi. Druhá verze desky balanceru s touto změnou již počítá.

## 6.5 Vyvažovací obvod

Tranzistor T1 slouží jako akční člen balanceru, který ke článku paralelně spíná výkonový rezistor, na němž se maří přebytečný výkon. Maximální vyvažovací proud je stanoven tímto rezistorem R3 na hodnotu 420 mA. Vyvažování článku se řídí signálem PWM z řídicí jednotky. Při log. 0 PWM signálu je kondenzátor C1 tímto připojen k digitální zemi a nabíjí se na napětí v source tranzistoru snižené o úbytek napětí na „spodní“ diodě diodového bloku D1. Následně při log. 1 PWM signálu se napětí kondenzátoru přičte k úrovni napětí PWM a přes „horní“ diodu bloku D1 se napětí přivede na gate tranzistoru T1, který se sepne. Rezistor R9 spolu s luminiscenční diodou D2 slouží k indikaci aktivního vyvažování příslušného článku.



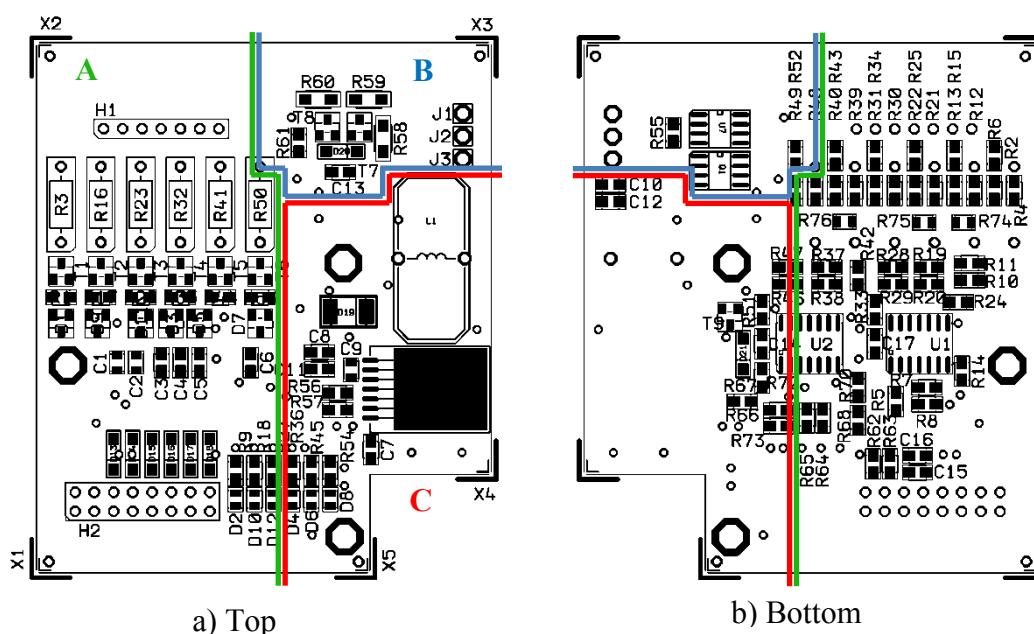
Obr. 10 Schéma zapojení vyvažovacího obvodu

## 6.6 Návrh desky plošných spojů

Deska plošného spoje byla s ohledem na složitost zapojení, počet součástek, rozměr desky a odolnost vůči rušení, navržena jako dvouvrstvá. Při návrhu byl kladen důraz na správné rozmístění součástek tak, aby se minimalizoval vliv vzájemného rušení měřicích, vyvažovacích

a nabíjecích obvodů. Na obrázku (Obr. 11) je zaznačeno rozdělení horní strany desky na tři úseky A, B a C podle míry rušení.

- A) Oblast s minimálním rušením, ve které se nacházejí měřicí obvody spolu s vyvažovacími. Rušení měřicích obvodů ve vrstvě BOTTOM, vyvažovacími ve vrstvě TOP je minimální, protože v okamžiku měření napětí A/D převodníkem mikrokontroléru jsou vyvažovací obvody vypnuté.
- B) Oblast pro zdroj referenčního napětí a spínač napájení operačních zesilovačů. Rušení je zanedbatelné, protože k němu dochází pouze při zapnutí nabíjení.
- C) Oblast s vysokým rušením díky spínanému zdroji, jež je v této oblasti situován ve vrstvě TOP. Přímo pod spínaným zdrojem se nenacházejí prakticky žádné součástky a prostor je vyhrazen pro souvislou vrstvu silové země, čímž se sníží i míra rušení pronikajícího do řídicího modulu správy napájení, nad nímž je tato DPS umístěna.



Obr. 11 Rozmístění součástek na DPS

První návrh desky plošného se ukázal při testování jako nevyhovující a vyžadoval několik oprav. Jedna úprava se týkala rozvržení součástek spínaného step-down měniče a s tím související změny vedení výkonové země. Dále byla na desku balanceru umístěna luminiscenční dioda pro indikaci, bylo změněno zapojení měřicích zesilovačů a zavedeny všechny potřebné změny. Druhá verze předlohy DPS včetně rozmístění součástek je k příloze (Příloha VI -).

## 7 Firmware modulu správy napájení

### 7.1 CodeWarrior

CodeWarrior je prostředí pro kompletní vývoj programového vybavení mikrokontrolerů, mikroprocesorů a signálových procesorů Freescale. Studio se skládá z textového editoru, kompilátoru, debuggeru, simulátoru a dalších nástrojů pro vývoj aplikace například Processor Expert, který významným způsobem zjednodušuje konfiguraci periférií mikrokontroléru.

Vývoj softwaru pro tuto práci probíhal ve verzi CodeWarrioru 5.1 optimalizované pro mikrokontroléry typové řady HCS12.

### 7.2 Struktura firmwaru

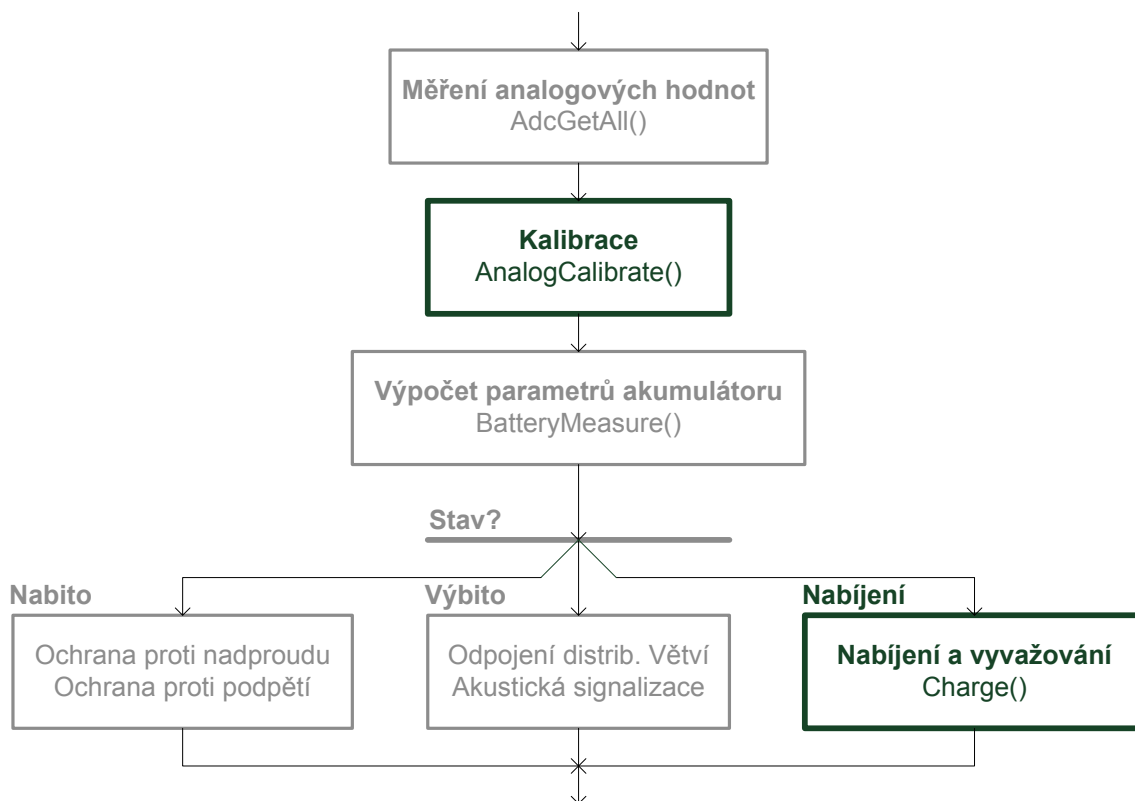
Programové vybavení modulu správy napájení je tvořeno operačním systémem reálného času FreeRTOS. Pod tímto systémem běží několik procesů, které se starají o všechny funkce modulu. Priorita jednotlivých procesů může nabývat hodnot od 0 po 4 (nejvyšší). Seznam vláken s popisem funkce je seřazen podle priority

- vCpuTimeThread – sledování vytíženosti procesoru
- vEEPromStoreTask – zálohování údajů do stálé paměti
- vUartRxTask – zpracování příchozích dat po sériové lince
- vCANRxTask – obsluha dat příchozích po sběrnici CAN
- vCANTxTask – odesílání dat po sběrnici CAN
- vCANOpenTxSyncTask – synchronizace správ na síti
- vUartTxTask – odesílání dat po sériové lince
- vBatteryManagementTask – sledování stavu baterie a nabíjení
- vSpeakerTask – generování informačních nebo výstražných zvukových signálů
- vLedTask – poskytování informace o stavu operačního systému

Tímto ovšem výčet spuštěných vláken zcela nekončí, v systému běží i další vlákna, která jsou „skrytá“ a netýkají se úprav firmwaru.

### 7.3 Proces BatteryManagementTask

Vlákno BatteryManagementTask zajišťuje opakované sledování energetických poměrů v napájecí síti průzkumného vozidla. Vlákno sleduje s periodou 10 ms stav akumulátoru, spravuje režim chodu vozidla, zajišťuje ochranu proti přetížení napájecí sítě a v neposlední řadě řídí celý proces nabíjení akumulátoru. Principiální nastínění posloupnosti zpracování procesu BatteryManagementTask lze vidět na obrázku (Obr. 12).



Obr. 12 Blokové schéma procesu BatteryManagementTask

Pro vypnutí nebo zapnutí napájecích větví byly doplněny funkce `SuspendAllModules()` pro vypnutí a `ResumeAllModules()` pro zapnutí všech napájecích větví. Napájecí větve se spínají přes spínací tranzistory signálem na příslušném výstupu procesoru `VoutImxEn`, `Power14VEn`, `VoutCanEn` a `VoutMotorEn`. Při testování vypínání napájecích větví bylo zjištěno, že pouhým vypnutím napájení větví (mimo napájení motorů), dochází k „zamrznutí“ mikrokontroléru. K tomuto dochází, protože vlákna pro příjem dat ze sériové linky a sběrnice CAN čekají na zprávu z ostatních modulů. Pro ošetření tohoto jevu byla zvolena cesta vypnutím vláken pro obsluhu mezimodulové komunikace.

Aby bylo možné libovolné vlákno vypnout nebo jiným způsobem řídit jeho stav, je potřeba znát tzv. handle na příslušné vlákno. Původní verze firmwaru při vytvoření vlákna s tímto faktem nepočítala a handle neukládala. Založení vlákna vypadalo přibližně takto

```
xTaskCreate(vUartRxTask, "UartRx", 2*MINIMAL_STACK_SIZE, NULL, 2, NULL);
```

Zavedená změna se týkala posledního argumentu, kde adresa ukazatele na zapsání handle, nabývala hodnoty `NULL`, do podoby

```
xTaskCreate(vUartRxTask, "UartRx", 2*MINIMAL_STACK_SIZE, NULL, 2, &xHandle);
```

Proměnná typu `xTaskHandle` `xHandle` je lokální proměnná a pro přístup z jiných částí programu musela být uložena v globální proměnné. Proto byla založena nová struktura globálních proměnných `BatteryModul.SystemInfo`, do které se ukládají handles jednotlivých vláken.

Funkce `SuspendModuleAllModules()` pak byla doplněna o zavolání `vTaskSuspend()` pro všechna vlákna příjmu komunikace. A funkce `ResumeAllModules()` byla doplněna o volání `vTaskResume()` rovněž pro všechna vlákna obsluhy příjmu komunikace.

#### 7.4 Přepočítání naměřené hodnoty

Rozsah hodnot na výstupu 10-ti bitového A/D převodníku procesoru odpovídá  $\{0; 2^N - 1\}$ ;  $N = 10$  takže nejvyšší hodnota na výstupu A/D převodníku je 1023. Pro přepočítání na skutečnou hodnotu napětí slouží vztah (12).

$$U_{SC} = K \cdot U_{ADC} + Q \quad (10)$$

Kalibrační konstanta  $K$  se vypočítá z upraveného vztahu (x) při předpokladu nulového vstupního offsetu.

$$K = \frac{U_{SC}}{U_{ADC}} = \frac{5000}{1024} = 4,883 \text{ mV} \quad (11)$$

Dalším krokem je zavedení substituce do vztahu (9) uvedeného v kapitole (6.4). A zároveň z důvodu minimalizace množství matematických operací vykonávaných procesorem je vztah (9 a 13) přepsán do podoby (14), která je již připravena pro softwarovou implementaci.

$$\Delta U_{SC} = \frac{K \cdot U_{ADC} + Q}{S} + U_0 = K_S \cdot U_{ADC} + Q_S + U_0 \quad (12)$$

Tímto postupem vypočtené konstanty jsou pouze teoretické a s ohledem na přesnost měření napětí bude postup výpočtu zopakován s hodnotami naměřenými na reálném výrobku.

#### 7.5 Funkce Charge()

Funkce `Charge()` je vláknem `BatteryManagementTask` volána každých 10 ms, jsou-li splněny podmínky spuštění nabíjení baterie. Mezi podmínky patří přítomnost externího zdroje pro nabíjení, korektně připojený akumulátor a napětí baterie leží hodnotou mimo hysterezní okno spínání nabíječe. Algoritmus nabíjení byl rozčleněn z důvodu vyšší přehlednosti a modularity do několika funkcí správně volaných z hlavní funkce `Charge()`, základní princip algoritmu a struktura funkce `Charge()` je podchycena diagramem (Příloha IX -).

Na začátku funkce se vypočte skutečná hodnota nabíjecího proudu. Ten je dán proudem změřeným na vstupu modulu správy napájení, od kterého se odečte vlastní spotřeba modulu a spotřeba napájecích větví vozidla. Vypočtený proud se uloží do struktury globálních proměnných (`BatteryModul.NabijeciProudRealny`).

Následně se znovu otestují podmínky pro nabíjení baterie, ale nyní je kontrola důkladnější. Testuje se nejen napětí baterie, napětí nabíjecího zdroje, ale i součet napětí na všech článcích nebo napětí na jednotlivých článcích. Podle výsledku diagnostiky se zvolí režim nabíjení nebo se nabíjení ukončí.

První, nejobvyklejší možností nabíjení je tzv. normální nabíjení, takto je pojmenována standardní metoda CCCV a jako taková je implementována funkcí `NormalCharge()`. Funkce hlídá napětí baterie a podle jeho velikosti nastavuje velikost požadovaného nabíjecího proudu `BatteryModule.Charger.PozadovanyNabijeciProud`. Jestliže napětí baterie vzroste nad komparační hladinu stanovenou pomocí konstanty `MAXIMAL_BATT_VOLTAGE`, změní se režim nabíjení a udržuje se na baterii konstantní napětí rovné maximálnímu napětí článku. V průběhu tohoto módu nabíjení jsou vyvažovací obvody trvale aktivní. Změna vyvažovacího proudu se děje ve funkci `CalcBalancingCurrent()`. Modifikovaný vývojový diagram funkce `NormalCharge()` se nachází v příloze (Příloha XI -).

Druhý mód nabíjení se používá k tzv. obnovovacímu nabíjení. Hlavním principem je nabíjet baterii velmi malým proudem definovaným konstantou `SAFE_CHARGE_CURRENT`, která je prekompilátorem vypočtena z kapacity baterie. Pokud ani jeden článek baterie nepřesahuje maximální napětí lithiového článku, tak se nabíjí s vypnutým vyvažováním. Modifikovaný vývojový diagram funkce `SafeCharge()` se nachází v příloze (Příloha X -).

Funkce `StopCharge()` byla vytvořena jako univerzální řešení vypínání nabíječky nebo vyvažování v závislosti na předávaném požadavku. Funkci se předá argument, který slouží jako přepínač mezi stavy vypnutí. Vývojový diagram se nachází v příloze (Příloha XI -).

Funkce `CalcBalancingCurrent()` počítá míru rozvážení článků akumulátoru vyjádřenou nejnižším napětím článků, tato hodnota je vždy zaznamenána do globální proměnné `BatteryModule.Balancer.MinCellVoltage` pro další možná vyhodnocení. Z minimální hodnoty a hodnoty napětí každého článku se vypočítá rozdílové napětí, které se rovněž ukládá do globální proměnné. Obě hodnoty slouží pro určení velikosti střídavy PWM signálu, pro řízení vyvažování. Vývojový diagram lze rovněž najít v příloze (Příloha X -).

Další a poslední funkce `UpdatePWM()` byla vytvořena jako nástroj pro přímý přístup k nastavování střídavy pulsně šířkového modulátoru a tvoří jediné přímé spojení s HW. Z bezpečnostních důvodů jsou střídavy omezeny pouze na definovaný rozsah, důvody k této úpravě jsou orientovány směrem k zabránění případného poškození HW nebo mohou sloužit pro nastavení maximálních požadovaných hodnot. Vývojový diagram se nachází v příloze (Příloha X -).

## 8 Sestavení modulu správy napájení

### 8.1 Výroba DPS modulu balanceru

Deska plošného spoje byla vyrobena metodou známou jako negativní fotocesta.

Prvním krokem tohoto technologického procesu je správné vygenerování předlohy pro prosvěcování, kde místa k odleptání jsou na předloze vytištěny barvou na průhledné fólii. S tímto souvisí i fakt, že potištěná strana předlohy musí být přiložena přímo na fotocitlivou vrstvu cuprexitové desky. Takto vygenerované předlohy se ostříhnou, zarovnajjí a slepí tak, aby se prokovy obou vrstev vzájemně překrývaly. Do takto vytvořené kapsy je vložena oboustranná cuprexitová deska s fotocitlivou vrstvou a prosvětluje ultrafialovým světlem po dobu udanou technologickým postupem (pro tento případ 90 s). Dalším krokem je vyvolání prosvícené desky ve vývojce, která je tvořena roztokem  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  s koncentrací 1 %. Správně vyvolaná deska se pozná podle zcela odhalené vrstvy měděného povrchu v místech určených pro odleptání. Následuje leptání ve vodném roztoku chloridu železitého ( $\text{FeCl}_3$ ) o koncentraci pohybující se v rozmezí 30 – 50 %. Po vyleptání lze zbytek leptacího fotorezistu odstranit acetonem nebo stripprem, doporučuje se tento krok provést až po vyvrtání, protože povrch fotorezistu je tmavší i méně lesklý než povrch měděné vrstvy a lépe se tak vrták při ručním vrtání, navádí do středu díry.

Vykonáním tohoto postupu byla deska plošných spojů připravena na vrtání. Vrtání děr pro vývody součástek v klasickém provedení a vrstvových propojek probíhalo na stojanové vrtačce vrtáky vhodné velikosti vzhledem k rozměrům vývodů součástek. Po odvrtání byly odstraněny zbytky fotorezistu. Následně byla DPS ošetřena proti oxidaci aerosolem FLUX SK 10.

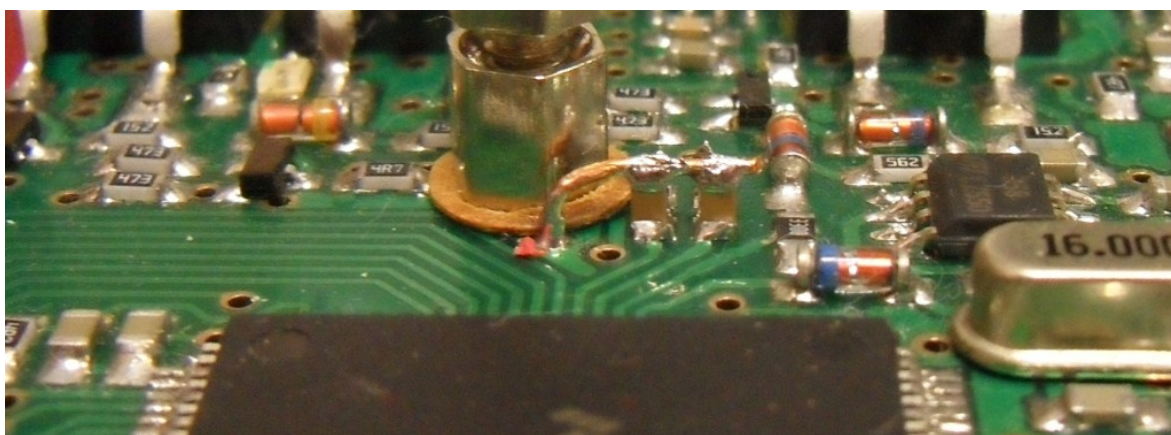
Pro pájení většiny součástek byla použita pájecí stanice CT-938ESD a trubičková pájka firmy Shallin Electronics typové řady SN7343x se složením SnPb 60/40. Integrovaný obvod spínaného zdroje nemohl být takto zapájen z důvodu nutnosti zapájet velkou pájecí plochu sloužící jako zem i pro odvod tepla, umístěné na spodní straně pouzdra, proto byla použita horkovzdušná pájecí stanice.

### 8.2 Úprava DPS řídicího modulu správy napájení

Řídicí modul správy napájení vyžadoval úpravu v podobě doplnění filtračních kondenzátorů mezi vstup všech měřicích kanálů A/D převodníku a zem. Tato úprava musela být na desce vytvořena improvizovaně, připájením kondenzátorů kolmo k povrchu desky ze strany TOP a to přímo k pájecí plošce rezistorů, které již jsou na každém kanálu z důvodu ochrany portu mikrokontroléru, umístěny. A druhou pájecí plošku kondenzátoru spojit „vzduchem“ drátovým vodičem se zemí. Provedené změny jsou vidět na fotografiích (Obr. 13, Obr. 14).



Obr. 13 Fotografie doplnění kondenzátorů pro měření napětí



Obr. 14 Fotografie doplnění kondenzátorů pro měření proudu

### 8.3 Sestavení modulu

Deska balanceru je navržena tak, aby roztečemi děr pro uchycení k řídicímu modulu přesně pasoval k roztečím distančních sloupků, a signálový konektor je rovněž umístěn tak, aby pasoval do protikusu na řídicím modulu. Samotná montáž desky balanceru a propojení signálového konektoru je tedy velmi jednoduchá, stejně jako připojení servisního konektoru baterie. Trochu komplikovanější je situace při zapojování silových obvodů, protože vodiče nejsou opatřeny konektorem se zámkem proti otočení a při špatném zapojení může dojít k poškození obvodů nebo baterie. Proto je nutné dbát na správné zapojení silových obvodů, které je nejlépe patrné ze schématu (Příloha VIII -).



## 9 Testování řídicího systému

Z bezpečnostních důvodů bylo prvotní testování každého funkčního celku prováděno na samotném desce balanceru bez připojení řídicího modulu správy napájení stejně jako bez připojení baterie.

Testování obvodů nebylo možné, jednoduchým způsobem rozdělit po realizační stránce, na postupné kompletní otestování jednotlivých funkčních celků, protože jsou tyto celky obvodově provázány mezi sebou a zároveň i s řídicím modulem. Proto byla nejprve otestována funkčnost obvodů pro měření napětí článků spolu s obvodem pro řízení nabíječky. Následovalo testování samotné nabíječky. Testování vyvažovacích obvodů bylo nezávislé na úspěšném ověření ostatních obvodů a právě proto bylo ponecháno jako poslední krok testování.

Následně po úspěšném ověření obvodů samostatného modulu balanceru byl modu připojen k řídicímu modulu i baterii a posloupnost testování byla opakována.

Protože by bylo nepřehledné popisovat testování ve stejné posloupnosti, jak probíhalo ve skutečnosti, je v následujících podkapitolách popsáno vždy kompletní testování jednotlivých funkčních celků modulu balanceru.

### 9.1 Měření napětí článků

Pro testování měření napětí bylo nutné odpojit napájení operačních zesilovačů od výstupu nabíječky a připojit je na externí laboratorní napájecí zdroj se stabilizovaným napětím v rozmezí 18 – 25 V. Důvodem k tomuto postupu bylo snížit riziko zničení operačních zesilovačů při prvotním testování, právě k tomu slouží proudová pojistka laboratorního zdroje, a zároveň zvýšit přesnost měření při měření kalibračních křivek.

K simulování napětí v rozmezí 2,5 – 4,3 V byl použit laboratorní zdroj s vysokou citlivostí regulace napětí a pro nastavení offsetu, který simuloval napětí článků „pod“ měřeným článkem (0 – 21 V), byl použit druhý kanál laboratorního zdroje. Tímto způsobem byly postupně otestovány všechny měřicí kanály, výsledky měření jsou zapsány v tabulce (viz. Příloha VII -).

### 9.2 Zdroj nabíjecího proudu

U zdroje nabíjecího proudu bylo nutné ověřit jednak schopnost spínaného měniče nastavit požadovaný rozsah napětí 0 – 27 V na výstupu nabíječky, dále pak kvalitu výstupního napětí a v neposlední řadě se ověřovala i proudová zatížitelnost nabíječky. Kvalitou se rozumí zejména stabilita úrovně napětí a zvlnění napětí. Vzhledem k zapojení regulační smyčky nabíječky bylo testování rozděleno do dvou etap.

Důvodem k tomuto přístupu je zejména fakt, že by testování stability spínaného měniče mohlo být zkresleno rušením z obvodu pro řízení napětí, které by přes regulační tranzistor pronikalo do napěťové zpětné vazby měniče. V první etapě testování se nabíjecí obvod rozdělil na část výkonovou a regulační. Druhá etapa testování pak již probíhala na celé nabíječce.

Jako výkonový napájecí zdroj pro nabíječku byl použit laboratorní zdroj s proudovou pojistkou z důvodu ochrany obvodů při případném přetížení nebo chybě ve fyzickém zapojení součástek.

### 9.2.1 První etapa testování

Pro ověření funkčnosti zdroje nabíjecího proudu byla rozpojena zpětná vazba spínaného zdroje a regulační tranzistor byl nahrazen proměnným rezistorem. Následně byl na vstup měniče připojen externí laboratorní zdroj a byla ověřena regulovatelnost napětí na prázdko. Dalším krokem testování bylo připojení aktivní zátěže na výstup spínaného zdroje a na něm bylo nastaveno napětí  $U = 26 \text{ V}$ . Při postupném zatěžování měniče bylo osciloskopem měřeno výstupní napětí. Výstupní napětí první verze zdroje se ukázalo už v prvním kroku zatěžování, které odpovídalo proudu  $I_z = 0,5 \text{ A}$ , jako značně zvlněné  $\Delta U \approx 2 \text{ V}$ . Toto zvlnění bylo značně potlačeno zvýšením kapacit kondenzátoru na výstup a zejména na vstupu měniče, tímto zásahem zvlnění pokleslo na úroveň  $\Delta U \approx 0,1 \text{ V}$ .

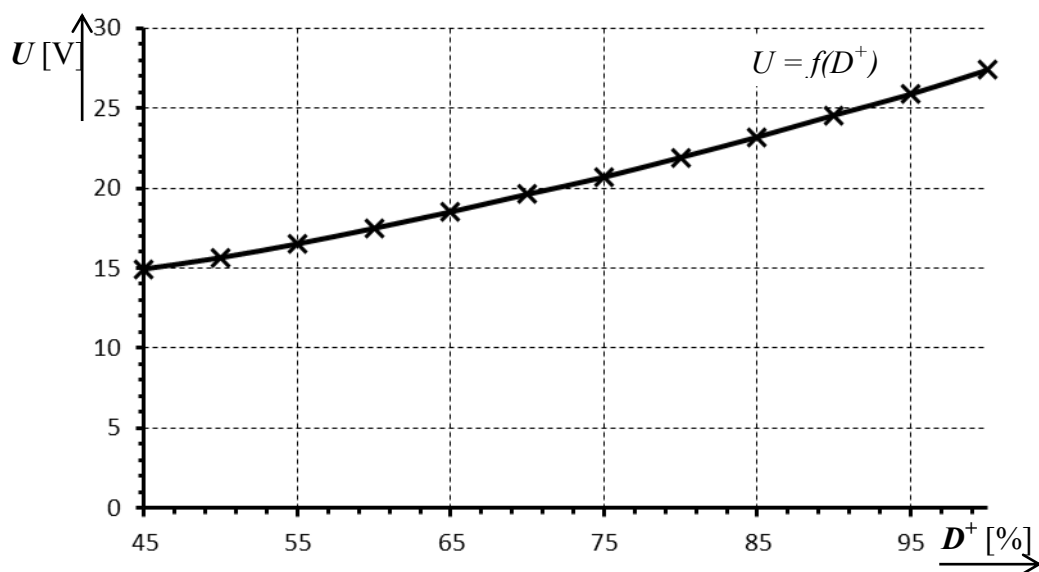
Testování regulačního obvodu si vyžádalo připojení pevného rezistoru mezi drain regulačního tranzistoru a napájecí napětí. Na vstup obvodu byl připojen PWM signál, pro kontrolu funkčnosti bylo měřeno napětí na výstupu děliče, který byl tvořen připojeným rezistorem a tranzistorem. Dále byly rezistory R70 a R72 (viz. schéma v příloze (Příloha I -)) nahrazeny proměnnými rezistory. Pomocí R72 byl nastaven pracovní bod tranzistoru a potenciometrem R70 byl přednastaven nastaven rozsah změny výstupního napětí.

### 9.2.2 Druhá etapa testování

Dosud byly ověřeny obě části zdroje nabíjecího proudu. Pro testování celku byly opětovně propojeny oba funkční celky. Testování probíhalo principiálně shodně s postupem uvedeným pro testování výkonové části v první etapě.

Nejprve se na měniči nastavilo konstantní napětí a na výstupu bylo zvlnění shodné s výsledkem testování v první etapě. Rovněž byla ověřena šířka nastavitelného rozsahu výstupního napětí. Rozsah napětí byl řídicím obvodem, pro dosažení vyšší přesnosti regulace napětí, omezený spodní hranicí rozsahu, která je posunuta na  $U_{\min} = 15 \text{ V}$ .

Následně byla vzestupně nastavována střída PWM signálu a bylo měřeno výstupní napětí naprázdno, výsledky měření jsou zobrazeny v grafu na obrázku (Obr. 15).



Obr. 15 Závislost výstupního napětí měniče na střídě

### 9.3 Verifikace funkčnosti modulu správy napájení

V tomto kroku testování bylo cílem ověřit správnost kalibračního přepočtu měřeného napětí, správnou funkci řízení vyvažovacích obvodů, regulaci nabíjecího proudu a správné ukončování nabíjení. Po dílčím testování byla deska balanceru kompletně připojena k řídicí desce modulu správy napájení a do řídicího mikrokontroléru byl nahrán editovaný firmware.

Po spuštění vozidla byly v datovém okně debuggeru odečteny hodnoty napětí na článcích, které byly přibližně rovny skutečnému napětí článků. Drobné odchylky v údajích byly způsobeny chybami měření a aproximací při výpočtu kalibračních konstant.

Dalším krokem verifikace bylo ověření řízení vyvažovacích obvodů. K tomuto testování byla uměle vyvolána funkce Charge(). Pro sledování rozvážení článků a ověření správného vyvažování byla do globálních proměnných přidána struktura dat s informacemi o aktuálním rozvážení a minimální hodnotě napětí článku akumulátoru. Sledováním těchto údajů a jejich srovnáním s nastavenou střídou vyvažovacích PWM signálů byla správná funkce úspěšně ověřena.

Při verifikaci regulace nabíjecího proudu byly v řídicím algoritmu nejprve vypnuty části kódu pro ukončování nabíjení. Následně byly sledovány hodnoty proudů tekoucích ze zdroje do modulu správy napájení, vlastní spotřeba, nabíjecí proud a skutečný nabíjecí proud měřený ampérmetrem. Nabíjecí proud měřený mikrokontrolérem po korekci kalibračních konstant odpovídal skutečnému nabíjecímu proudu. Při tomto měření byla ověřena i funkčnost snížení vlastní spotřeby vozidla během nabíjení. Úspory odpovídaly zejména odběru vypnutých napájecích větví.

## 10 Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout a vytvořit novou verzi modulu správy napájení mobilního robotického zařízení. Pro úspěšné splnění cíle jsem nastudoval metodiku nabíjení a vyvažování lithiových baterií. Dále jsem navrhnul obvodové zapojení desky balanceru, která obsahuje nabíječku i obvody pro měření napětí článků baterie a jejich vyvažování. K zapojení jsem provedl návrh desky plošného spoje a následně jsem ji vyrobil, osadil a otestoval. Při testování jsem zjistil drobné chyby v návrhu, a proto jsem provedl návrh a výrobu desky balanceru, která tyto chyby napravila. Po úspěšném otestování hardwarové stránky modulu správy napájení jsem sestavil nabíjecí algoritmus a provedl jeho implementaci do firmwaru řídicího mikrokontroléru.

Srovnáním s předchozí verzí je nová verze energeticky účinnější zejména ze dvou důvodů. Prvním je použití spínaného měniče pro zdroj nabíjecího proudu a lepší optimalizaci nabíjecího algoritmu. Tím druhým důvodem je úspěšná implementace vypínání napájecích větví při nabíjení baterie.

Průběh práce byl konzultován s vedoucím bakalářské práce a členy týmu, kteří se v minulosti podíleli na vývoji první verze modulu správy napájení.

Cíle bakalářské práce se podařilo splnit. Do budoucna by však bylo vhodné doplnit modul správy napájení o měření teploty na vyvažovacích rezistorech a integrovaném obvodu spínaného měniče. Další vhodnou úpravou by bylo implementovat do řídicího systému možnost zaslání zprávy do ovládacího panelu vozidla o plánovaném vypnutí napájecích větví těsně před startem nabíjení.

## 11 Použitá literatura

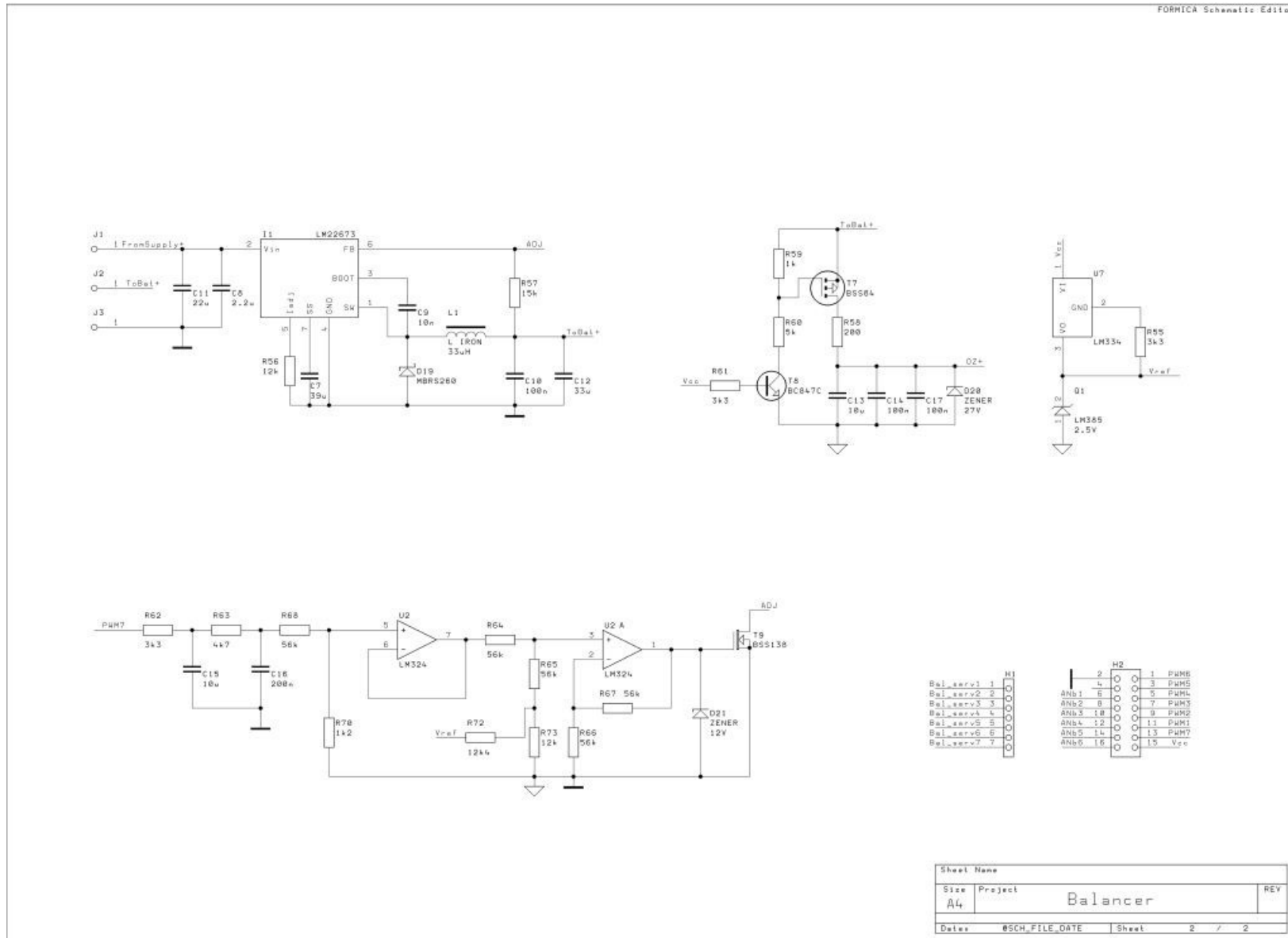
- [1] CAO, Jian – SCHOFIELD, Nigel – EMADI, Ali. Battery balancing methods: A Comprehensive Review. In *IEEE VPPC '08 Vehicle Power and Propulsion Conference 3 – 5 September, 2008 Harbin, China*. Piscataway, NJ (USA): IEEE, 2008. s. 1 – 6. ISBN 978-1-4244-1848-0.
- [2] *FreeRTOS* [online]. [cit. 2010-11-08]. URL: <<http://www.freertos.org>>.
- [3] CAI, Chenghui – DU, Dong – LIU, Zhiyu. Advanced Traction Rechargeable Battery System for Cableless Mobile Robot. In *Proceedings. 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2003. AIM 2003 20 – 24 July, 2003 Port Island, Kobe, Japan*. Piscataway, NJ (USA): IEEE, 2003. s. 234 – 239. ISBN 0-7803-7759-1. ISBN 0-7803-7760-5 (CDROM).
- [4] PRESSMAN, Abraham I. – BILLINGS, Keith – MOREY, Taylor. *Switching power supply design*. 3rd ed. New York, NY (USA): McGraw – Hill, 2009. s. 841. ISBN 974-0-07-148272-1. MHID 0-07-148272-5.
- [5] *National Semiconductor* [online]. 2011 [cit. 2011-01-30]. Webench. URL: <<http://national.com/analog>>.
- [6] JANDURA, Pavel. Přehled vlastností současných akumulátorů používaných v elektromobilech. In *Studentská konference Fakulty mechatroniky, informatiky a mezioborových studií 2010, 15. Červen 2010, Liberec, Česká republika*. Technická univerzita v Liberci.
- [7] ERSHAG, Olov. *A Balancing and Monitoring System for Battery Cell Stacks in Electrical Vehicles*. Luleå, 2008. 56s. Diplomová práce. Luleå University of Technology. ISSN: 1402-1617. ISRN: LTU-EX--08/219--SE.
- [8] RÖßLER, Werner. Boost Battery Performance with Active Charge Balancing. *EETimes-Asia: Battery Circuit Management* [online]. 2008, 16-31, [cit. 2010-11-23]. URL: <<http://www.eetasia.com>>.
- [9] NAVRÁTIL, Jan. *Kladná elektroda pro Ni-Cd akumulátory*. Brno, 2008. 36 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [10] BUCHMANN, Isidor. *Batteries in a Portable World*. 2nd ed. Nürnberg: Cadex Electronics Inc., 2001. Ni-Cd Memory: Myth or Fact?, 8 s. ISBN 0-9682118-2-8.
- [11] *Robotic Technology Inc.* [online]. 2011 [cit. 2011-03-30]. EATR. URL: <<http://www.robotictechnologyinc.com/index.php/EATR>>.

- [12] NOVÁK, Vít. Tzbinfo [online]. 2010-07-05 [cit. 2011-03-30]. Obnovitelná energie. URL: <<http://energie.tzb-info.cz>>.
- [13] *Maxim* [online]. 2008-06-07 [cit. 2011-01-16]. Understanding Li+ Battery Operation Lessens Charging Safety Concerns. URL: <<http://www.maxim-ic.com>>.
- [14] *Battex* [online]. 2009 [cit. 2011-01-16]. Baterie a akumulátory. URL: <<http://www.battex.info>>.
- [15] HUSNÍK, Ondřej. *Mikroprocesorem řízená nabíječka baterií*. Brno, 2010. 60 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [16] *HW* [online]. 2009 [cit. 2011-04-02]. Jak aktivně pečovat o Li-Ion články. URL: <<http://hw.cz/teorie-a-praxe/art3216-jak-aktivne-pecovat-o-liion-clanku.html>>.

## 12 Seznam příloh

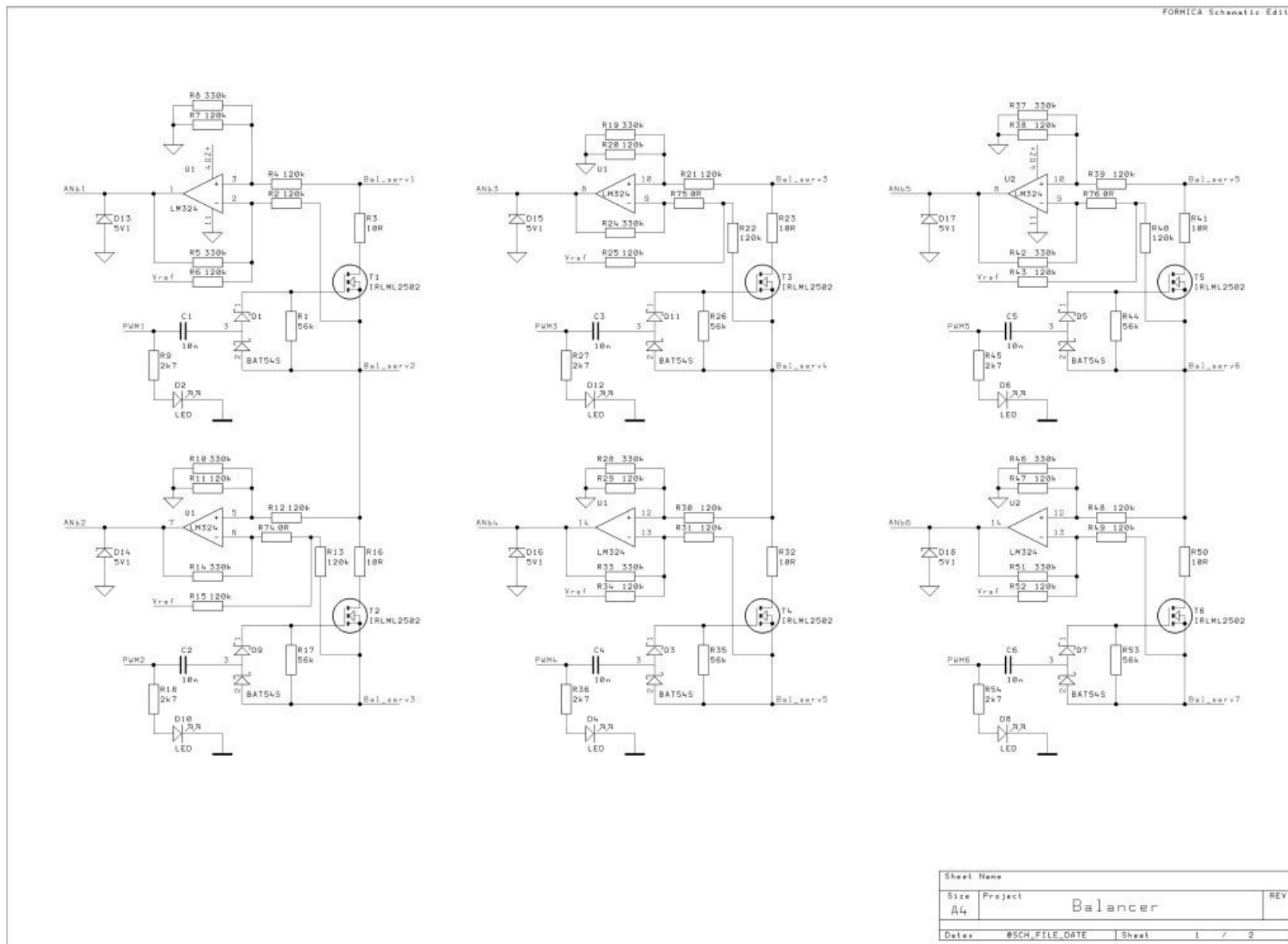
Příloha I	-	Schéma zapojení balanceru (1. část).....	I
Příloha II	-	Schéma zapojení balanceru (2. část).....	II
Příloha III	-	Schéma zapojení balanceru - druhá verze (1. část).....	III
Příloha IV	-	Schéma zapojení balanceru – druhá verze (2. část).....	IV
Příloha V	-	Deska plošného spoje balanceru.....	V
Příloha VI	-	Deska plošného spoje balanceru v2.....	VI
Příloha VII	-	Tabulka hodnot kalibračního měření.....	VII
Příloha VIII	-	Schéma zapojení modulu.....	VIII
Příloha IX	-	Přehledový diagram funkce Charge().....	IX
Příloha X	-	Vývojové diagramy (1. část).....	X
Příloha XI	-	Vývojové diagramy (2. část).....	XI

# Příloha I - Schéma zapojení balanceru (1. část)

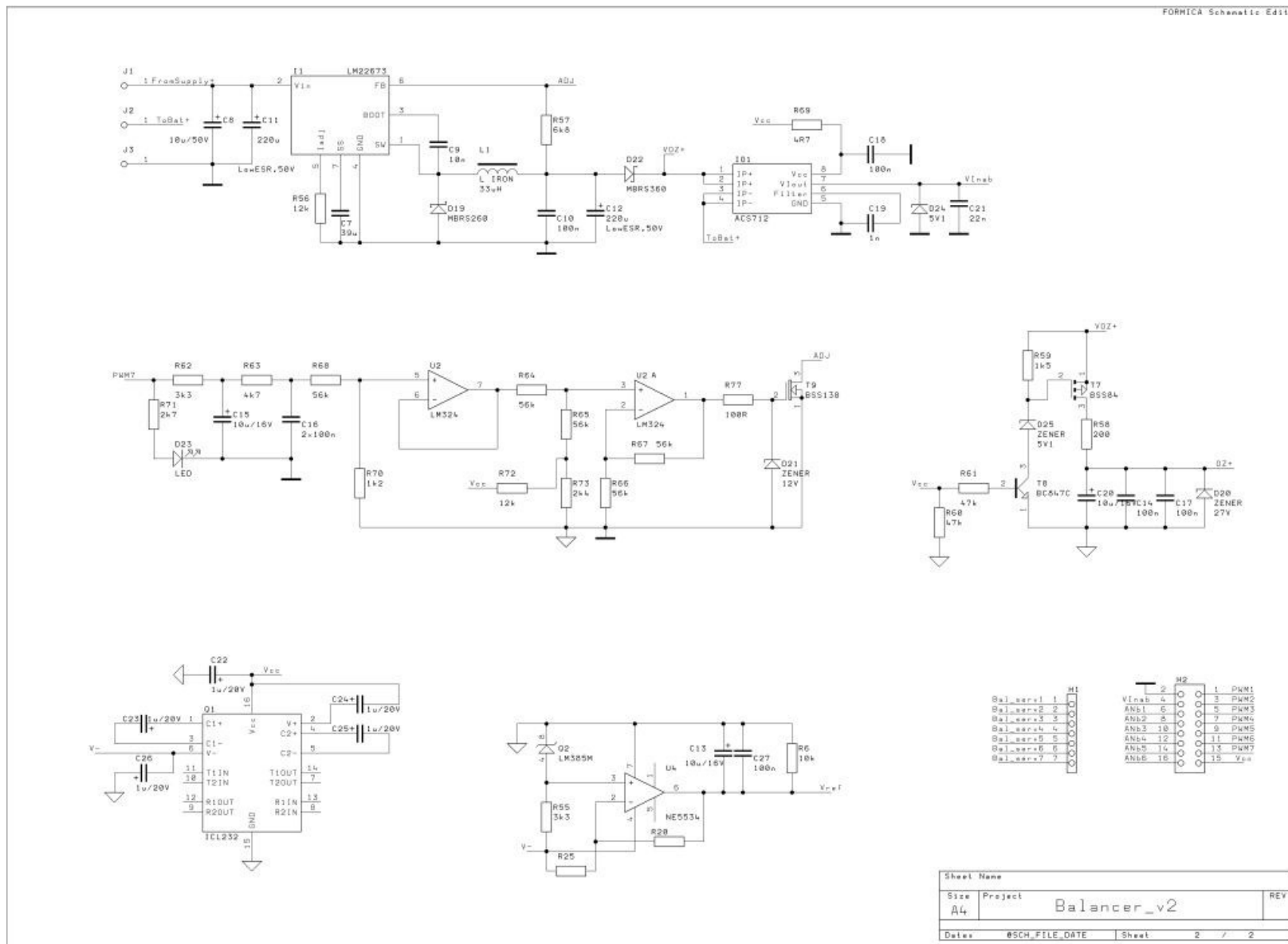




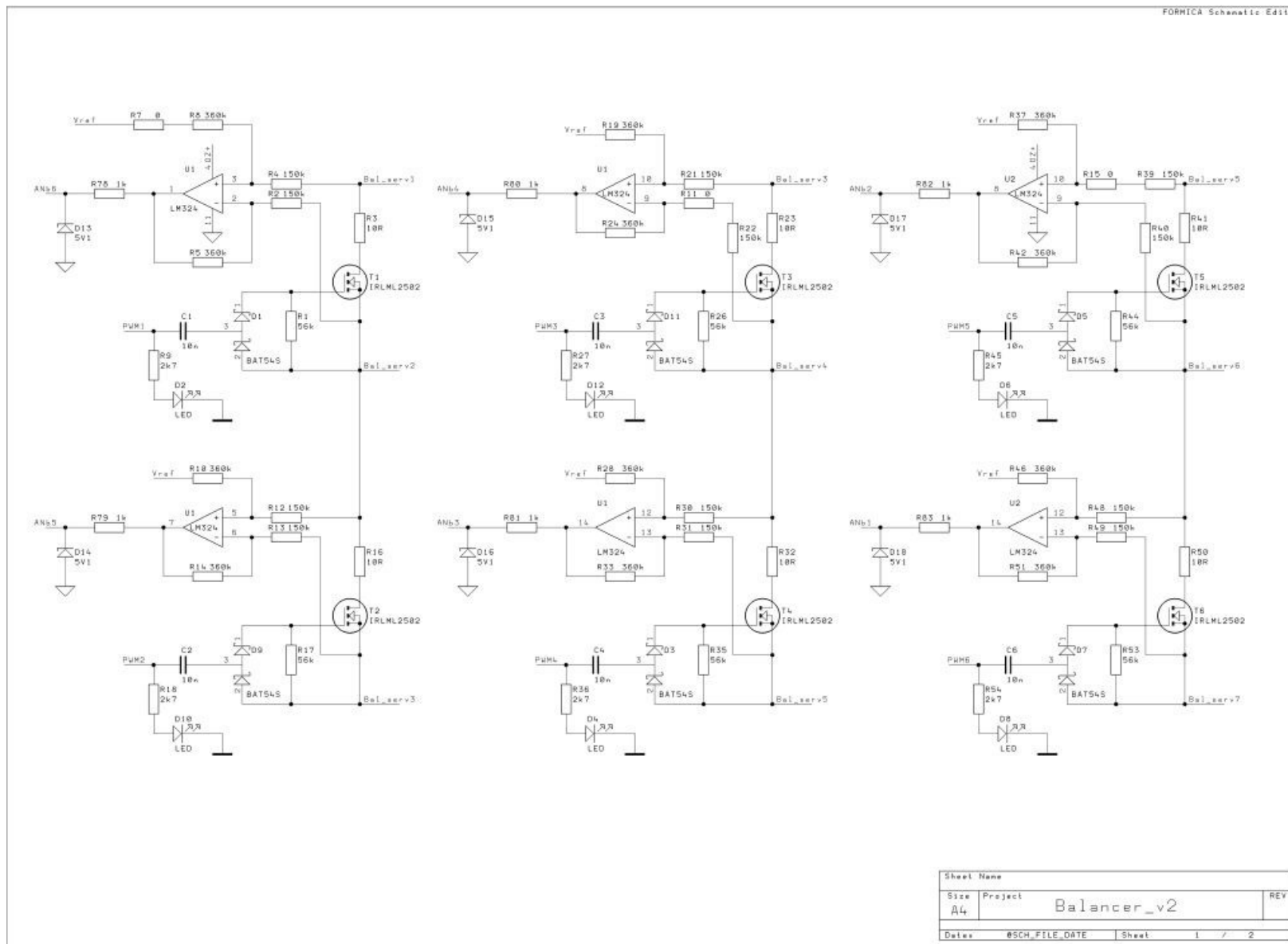
## Příloha II - Schéma zapojení balanceru (2. část)



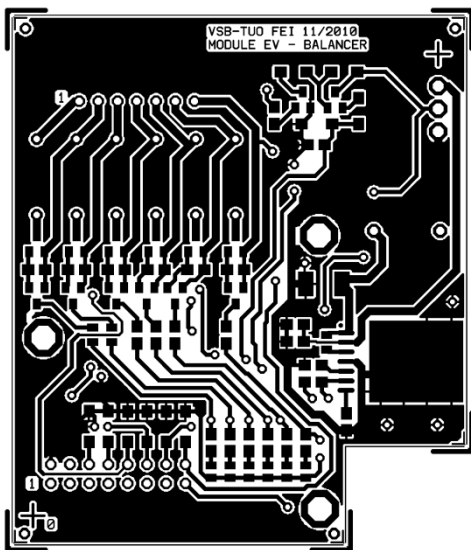
# Příloha III - Schéma zapojení balanceru - druhá verze (1. část)



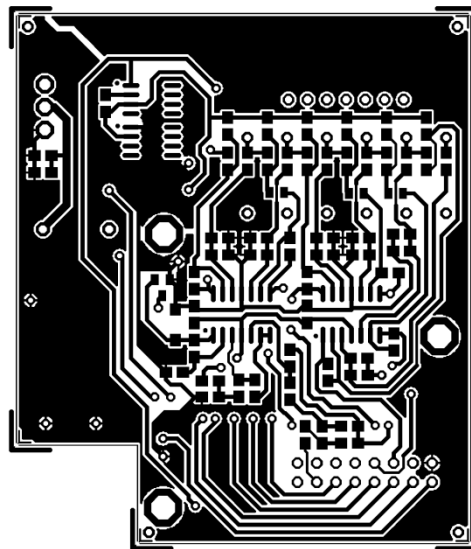
## Příloha IV - Schéma zapojení balanceru – druhá verze (2. část)



## Příloha V - Deska plošného spoje balanceru

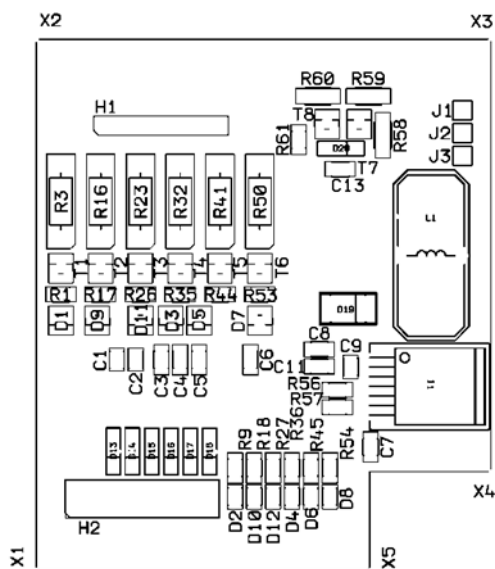


a) TOP (1:1)

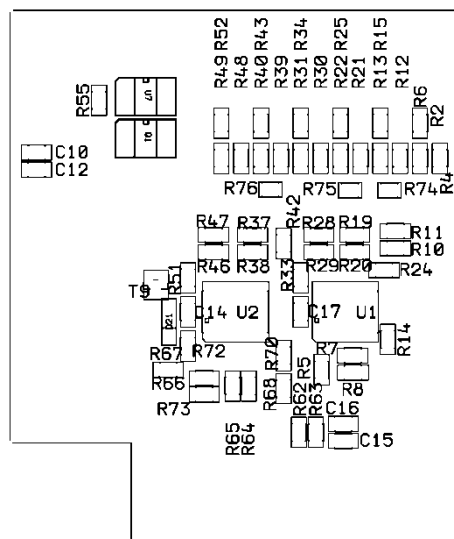


a) BOTTOM (1:1)

DPS první verze balanceru



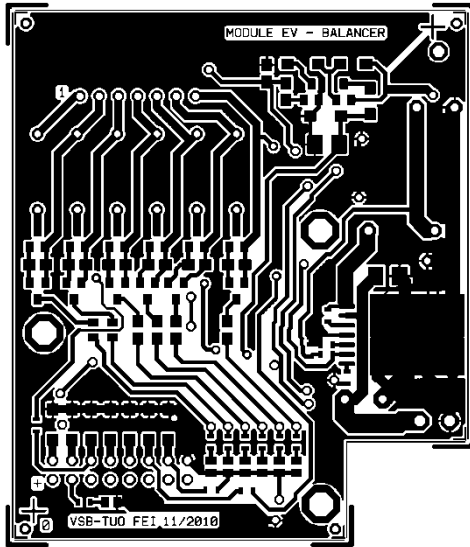
TOP (1:1)



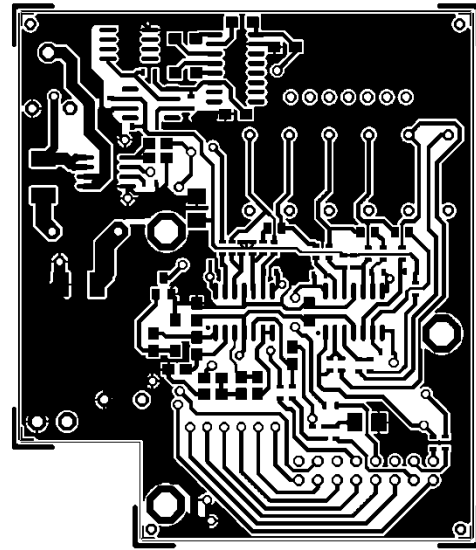
BOTTOM (1:1)

Osazovací schéma první verze balanceru

## Příloha VI - Deska plošného spoje balanceru v2

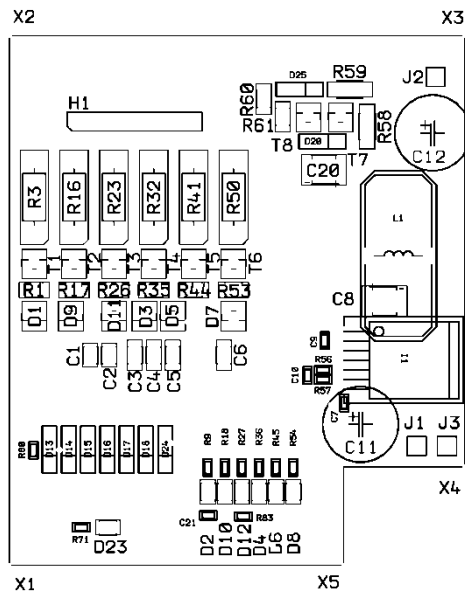


TOP (1:1)

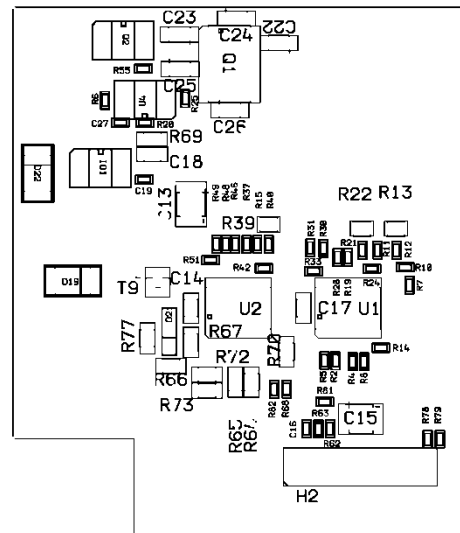


BOTTOM (1:1)

DPS druhé verze balanceru



TOP (1:1)



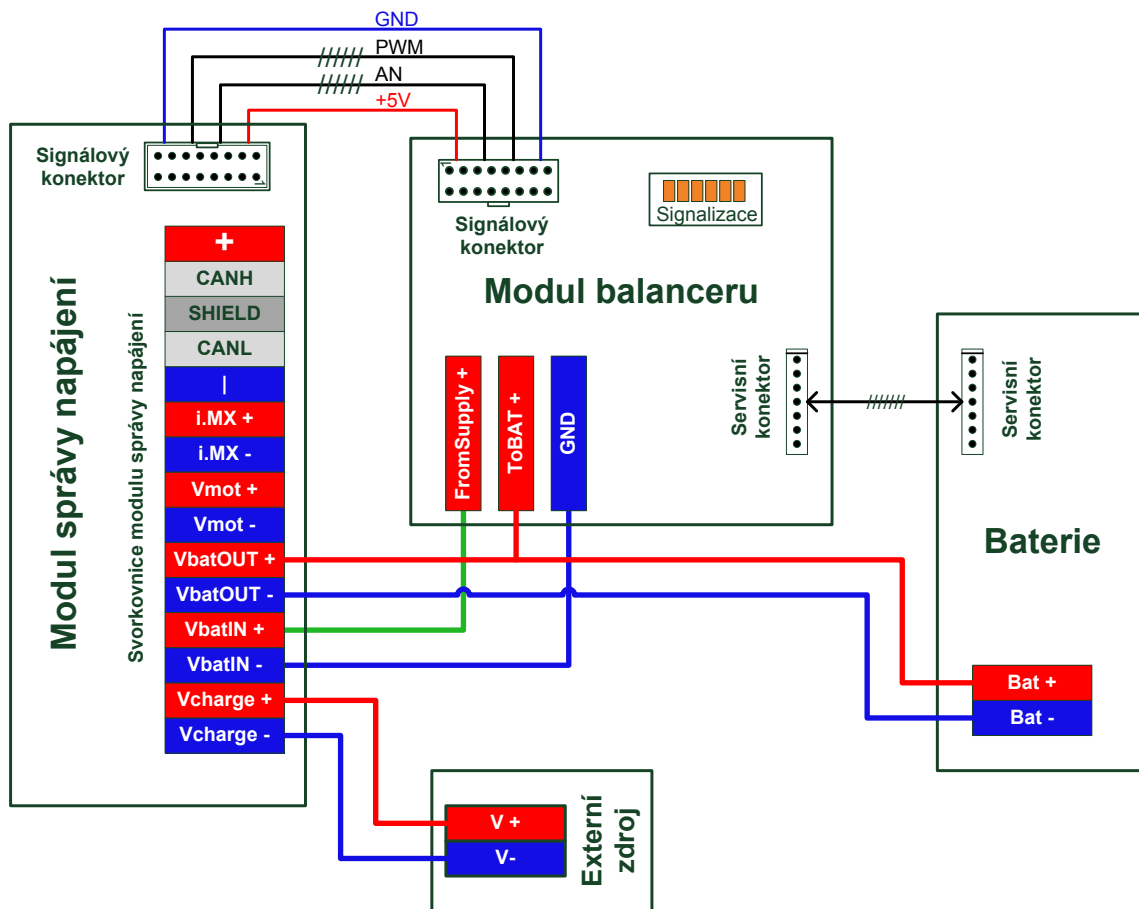
BOTTOM (1:1)

Osazovací plán DPS druhé verze balanceru

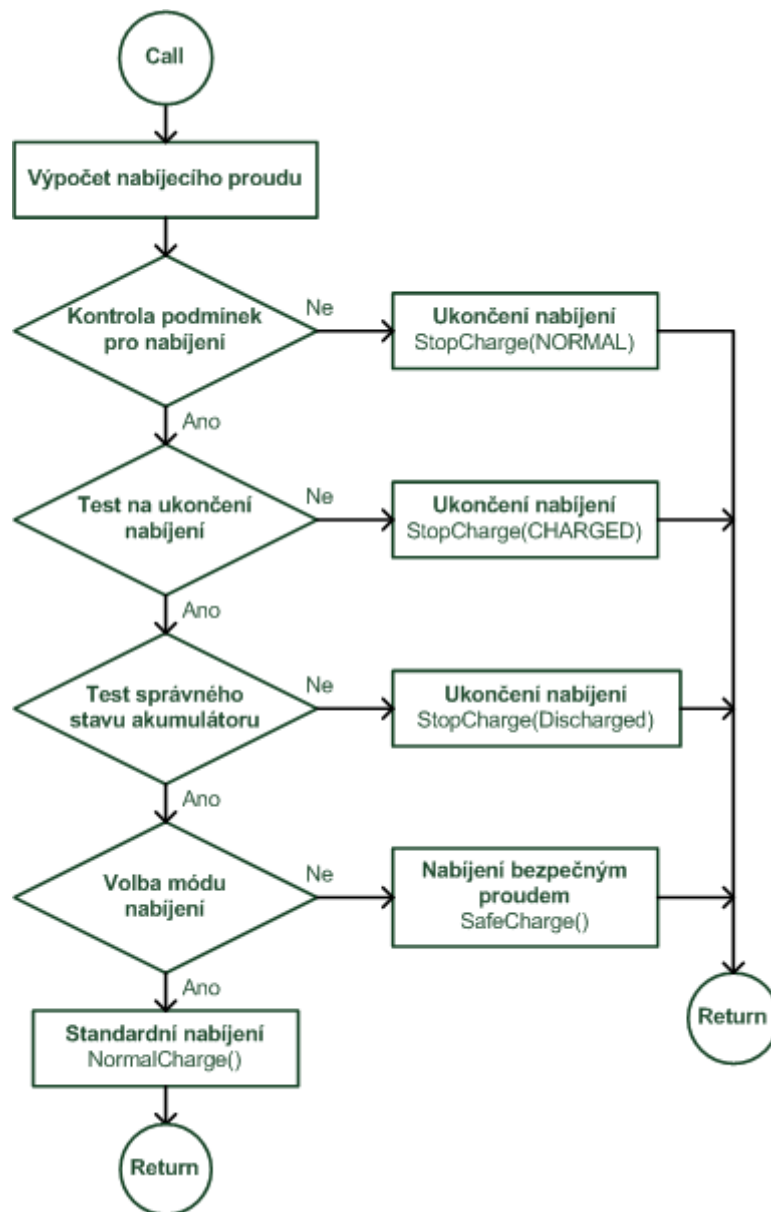
## Příloha VII - Tabulka hodnot kalibračního měření

$\Delta U_{\text{cell}}$	$U_{\text{AN1}}$	rawAN1	$U_{\text{AN2}}$	rawAN2	$U_{\text{AN3}}$	rawAN3	$U_{\text{AN4}}$	rawAN4	$U_{\text{AN5}}$	rawAN5	$U_{\text{AN6}}$	rawAN6
[V]	[V]	[-]	[V]	[-]	[V]	[-]	[V]	[-]	[V]	[-]	[V]	[-]
2500	0,012	5	0,045	14	0,013	2	0,011	2	0,012	2	0,032	3
2600	0,265	60	0,296	68	0,189	47	0,227	52	0,226	55	0,274	57
2700	0,540	117	0,575	125	0,459	103	0,492	107	0,516	110	0,523	113
2800	0,815	176	0,856	182	0,734	157	0,757	163	0,791	164	0,825	174
2900	1,075	231	1,112	235	1,003	213	1,022	218	1,058	223	1,086	229
3000	1,354	289	1,387	292	1,264	270	1,289	275	1,328	287	1,367	288
3100	1,627	342	1,648	350	1,549	325	1,565	329	1,586	339	1,652	343
3200	1,901	404	1,913	404	1,801	385	1,822	387	1,862	388	1,915	404
3300	2,157	458	2,208	463	2,094	436	2,104	444	2,135	445	2,208	460
3400	2,441	513	2,472	517	2,372	498	2,364	499	2,401	504	2,482	518
3500	2,698	570	2,713	571	2,619	550	2,625	551	2,674	567	2,746	575
3600	2,975	628	2,996	630	2,903	607	2,905	617	2,952	620	3,028	632
3700	3,237	683	3,265	685	3,174	661	3,158	665	3,226	675	3,301	691
3800	3,501	738	3,547	742	3,427	717	3,452	722	3,485	731	3,586	746
3900	3,817	795	3,815	797	3,712	775	3,702	775	3,768	789	3,852	803
4000	4,061	873	4,086	860	3,972	830	3,982	830	4,035	867	4,121	856
4100	4,352	915	4,356	913	4,234	889	4,243	896	4,313	964	4,412	922
4200	4,631	956	4,621	968	4,525	943	4,526	956	4,577	958	4,690	986
4300	4,893	1019	4,882	1021	4,781	995	4,797	1001	4,867	1021	4,922	1022

## Příloha VIII - Schéma zapojení modulu

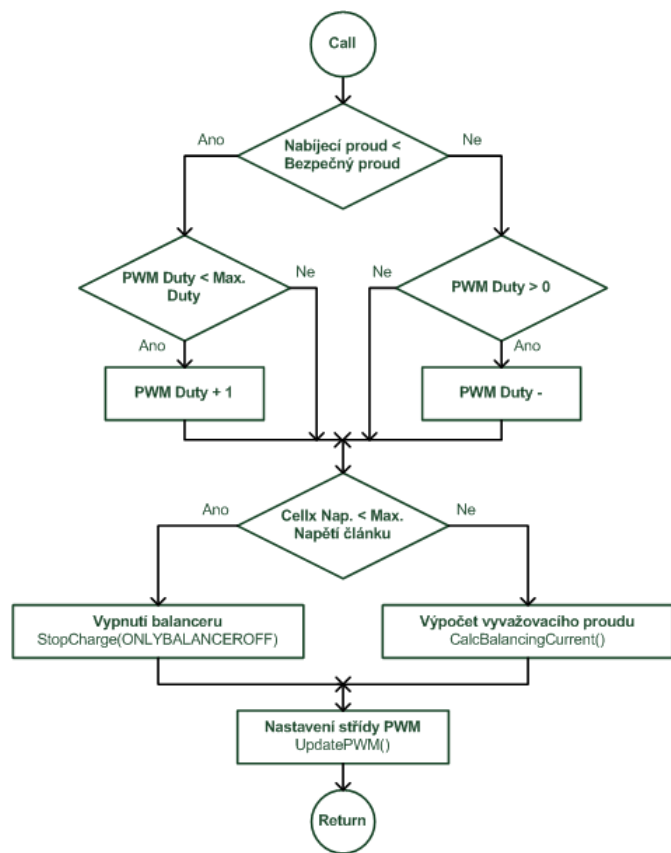


## Příloha IX - Přehledový diagram funkce Charge()

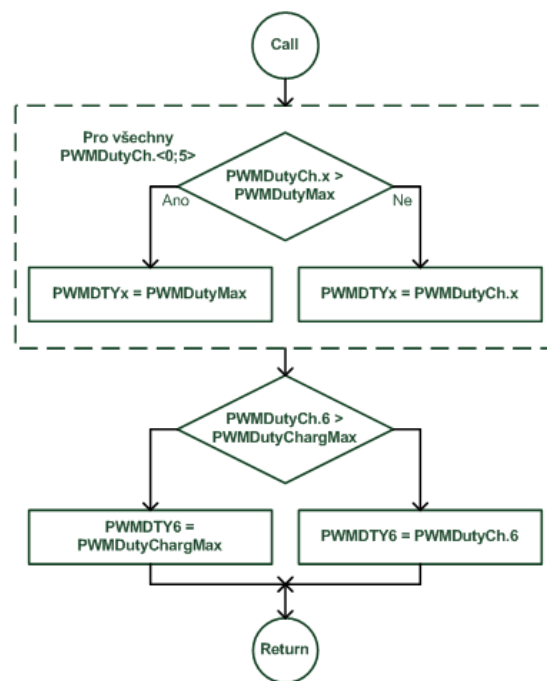




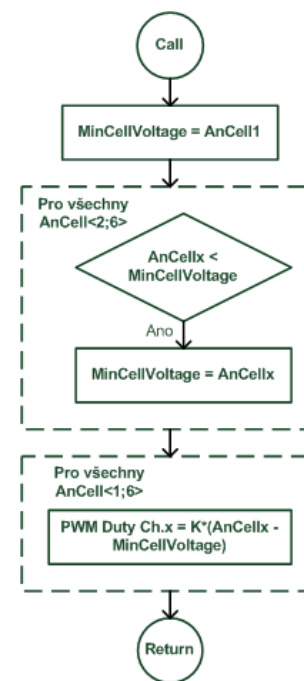
## Příloha X - Vývojové diagramy (1. část)



SafeCharge()

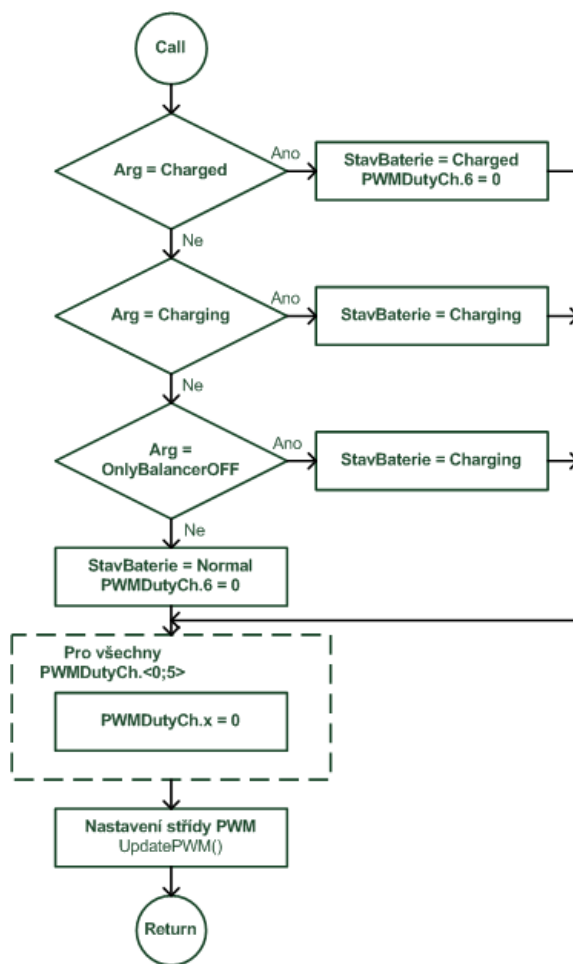


UpdatePWM()

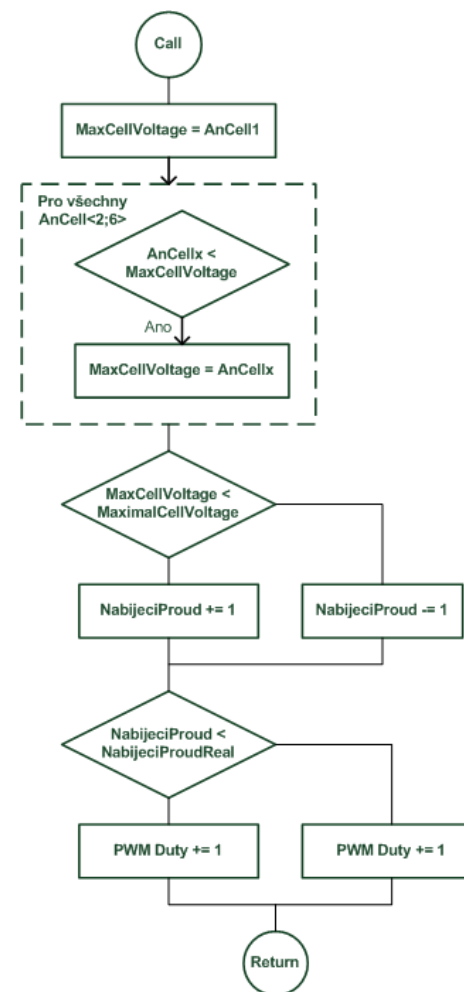


CalcBalancingCurrent()

## Příloha XI - Vývojové diagramy (2. část)



StopCharge()



NormalCharge()