

UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2013

Bc. Ondřej Sadílek

Univerzita Pardubice

Dopravní fakulta Jana Pernera

Energetická zdrojová soustava pro studentský experimentální elektromobil

Bc. Ondřej Sadílek

Diplomová práce

2013



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej Sadílek**
Osobní číslo: **D11766**
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**
Studijní obor: **Dopravní infrastruktura: Elektrotechnická zařízení**
Název tématu: **Energetická zdrojová soustava pro studentský experimentální elektromobil**
Zadávající katedra: **Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Analýza současného stavu vozidla
2. Analýza požadavků z hlediska energetické náročnosti
3. Návrh zdrojové soustavy
4. Návrh systému nabíjení trakčních baterií
5. Návrh systému kontroly stavu nabití baterií
6. Realizace prototypu navržených systémů a jejich oživení
7. Testování vlastností realizovaného prototypu

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

1. MOHAN, Ned. Power electronics: converters, applications, and design. India: Wiley India, 2007. ISBN 812651
2. HUMLHANS, Jan. Inteligentní nabíječky s obvody Maxim pro řízení nabíjení akumulátorů NiCd. NiMH a Li-Ion. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2000. ISBN 80-86056-83-X
3. FAKTOR, Zdeněk. Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje. Praha: Ben - technická literatura, 2002. ISBN 80-86056-91-0
4. KREJČÍK, CSC., Ing. Alexandr. Spínané zdroje. A Radio: Konstrukční elektronika. 2000, roč. 2000, č. 4.
5. ATMEGA324PA-AU 8-bit Microcontroller: Datasheet. 2009, 460 s. Dostupné z: www.atmel.com/Images/doc8152.pdf

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Ondřej Černý, Ph.D.

Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě

Datum zadání diplomové práce: **17. ledna 2013**

Termín odevzdání diplomové práce: **23. května 2013**

prof. Ing. Bohumil Culek, CSC.
děkan

L.S.

doc. Ing. Radovan Doležek, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 25. února 2013

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury. Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 25.3. 2013

Bc. Ondřej Sadílek

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Ondřeji Černému, Ph.D. za vedení této diplomové práce a také za jeho konstruktivní rady, inspiraci a diskuze nejen při vypracování této diplomové práce, která vznikla v rámci řešení projektu „IVINTEP - Inženýrské vzdělávání jako interakce teorie a praxe“, reg. č. CZ.1.07/2.2.00/15.0352

ANOTACE

Diplomová práce se ve své stati zabývá koncepčním návrhem i reálnou konstrukcí energetické zdrojové soustavy pro studentský experimentální elektromobil. Experimentálním elektromobilem se rozumí upravená invalidní tříkolka doplněná o potřebnou elektro výzbroj. V diplomové práci je nejprve analyzován současný stav vozidla včetně uvedení jeho geometrických a mechanických vlastností. Dále je navržena trasa, kterou by vozidlo mělo bezpečně na jedno nabití urazit. Na základě charakteru trasy je sestrojen výškový profil a následně vypočtena celková energetická náročnost v obou jízdních směrech. Dle vypočtené energetické náročnosti je dále vybrána baterie splňující jak kapacitní, tak elektrické požadavky. S bateriemi souvisí i návrh a realizace vhodného nabíječe. Napájení nabíječe trakční baterie je vyřešeno pomocí spínaného síťového zdroje, který disponuje výstupy kompatibilními s nabíječem trakčních baterií. Dozorčí systém nad všemi komponenty, hlavně pak nad bateriemi, tvoří systém BMS. K akumulaci energie jsou vybrány Li-pol baterie, které pro svou korektní činnost vyžadují monitoring provozních parametrů. Těmito parametry jsou teplota, maximální a minimální napětí článku. Pokud by systém BMS detekoval hodnotu některé z měřených veličin mimo předem stanovený rozsah, učiní akční zásah v podobě rozpojení trakčního obvodu či přerušení nabíjení daného článku.

KLÍČOVÁ SLOVA

Elektromobilismus, vozidlo, baterie, nabíječ, spínaný zdroj, BMS systém

TITLE

Energy source system for student experimental electric vehicle

ANNOTATION

The content of this diplom work is the conceptual design and real construction energy source system for student experimental electric vehicle. Experimental electric vehicle is the modified wheel tricycle completed with the necessary electrical equipment. The diplom work first analyzes the present condition of the vehicle, including the introduction of geometrical

and mechanical properties. It is also proposed route taken by the vehicle should securely on a single charge offend. Based on the nature of the route is constructed altitude profile and then calculated the total energy intensity in both travel directions. According to the calculated energy consumption is further selected batteries, which suit in capacitive and electrical requirements. With the batteries also relate the design and implementation of a suitable charger. Powering of traction battery charger is solved using a switching power supply that has outputs compatible with the charger for batteries. The supervisory system over all components, especially over the batteries, is BMS system. For accumulation of energy are selected Li-poly batteries, which need for correct operation requires monitoring of operating parameters. These parameters are the temperature, the maximum and minimum cell voltage. If the BMS system has detected some value out of range, system makes action invention in the form of traction circuit disconnection or interruption of charging.

KEYWORDS

Electromobility, vehicle, battery, charger, switching mode power supply, BMS system

OBSAH

ÚVOD.....	11
1 TECHNICKÝ POPIS ŘEŠENÉHO VOZIDLA.....	12
2 ANALÝZA ENERGETICKÝCH POŽADAVKŮ.....	14
2.1 Výběr konkrétní trasy vozidla.....	14
2.2 Výpočet energetické náročnosti zvolené trasy.....	15
2.2.1 Použité vztahy při výpočtech energetické náročnosti.....	16
2.2.2 Sumarizace vypočtených výsledků.....	23
3 KONCEPČNÍ SCHÉMA ELEKTRICKÉ VÝZBROJE	27
4 NÁVRH A VÝBĚR TRAKČNÍ BATERIE.....	29
4.1 Potřebná vstupní data	29
4.2 Výběr vhodného druhu trakční baterie.....	29
4.2.1 Popis vlastností standartní Li-pol baterie.....	29
4.2.2 Popis vlastností Li-pol baterie typu LiFePO ₄	31
4.3 Požadavky na proudové dimenzování trakční baterie.....	32
4.4 Výpočet potřebné kapacity trakční baterie.....	32
4.5 Ověření dojezdu pro danou kapacitu trakční baterie (acu-packu)	35
4.6 Výběr konkrétního modelu článku trakční baterie (acu-packu).....	36
5 NÁVRH SYSTÉMU NABÍJENÍ TRAKČNÍCH BATERÍ	38
5.1 Požadavky na nabíječ trakčních baterií.....	38
5.2 Popis obvodu LTC4002	41
5.2.1 Základní parametry obvodu	41
5.2.2 Funkce jednotlivých pinů.....	42
5.2.3 Principiální funkce obvodu	45
5.3 Obvodový návrh nabíječe	47
5.3.1 Volba nabíjecího proudu.....	47
5.3.2 Výběr spínacího tranzistoru	47
5.3.3 Výběr vhodné akumulární tlumivky.....	49
5.4 Realizace nabíječe.....	50
6 NÁVRH SÍŤOVÉHO SPÍNANÉHO ZDROJE	52
6.1 Požadavky na síťový zdroj, vlastnosti jednotlivých koncepcí	52
6.1.1 Vlastnosti různých druhů síťových zdrojů.....	52

6.1.2	Požadavky na síťový spínaný zdroj	53
6.2	Volba topologie spínaného zdroje.....	54
6.2.1	Princip funkce spínaného zdroje typu Flyback.....	54
6.3	Teoretický a obvodový návrh spínaného zdroje	56
6.3.1	Návrh vstupního bloku zdroje.....	56
6.3.2	Výběr vhodného řídicího obvodu	58
6.3.3	Princip činnosti řídicího obvodu.....	60
6.3.4	Návrh transformátoru – primární indukčnost	63
6.3.5	Návrh transformátoru – jádro a vzduchová mezera.....	65
6.3.6	Návrh ochranného RC snubberu.....	68
6.3.7	Návrh výstupních obvodů.....	72
6.3.8	Návrh zpětné vazby	73
6.4	Realizace spínaného zdroje	77
7	NÁVRH SYSTÉMU KONTROLY STAVU BATERIÍ (BMS).....	79
7.1	Požadavky na systém BMS	79
7.2	Koncepce systému BMS	80
7.2.1	Blokové schéma BMS	81
7.3	Vlastnosti jednotlivých funkčních částí	82
7.3.1	Zdroj 5V, +-12V	82
7.3.2	Zpracování signálu ze snímače proudu.....	84
7.3.3	Analogové vyhodnocení napětí článků.....	86
7.3.4	Blok MCU.....	87
7.3.5	Komunikace RS232	90
7.3.6	Rozhraní USB.....	91
7.3.7	LCD display	92
7.4	Funkce jednotky BMS.....	93
7.4.1	Algoritmus režimu nabíjení a režimu jízdy	93
7.5	Realizace jednotky BMS	97
8	VALIDACE NAMĚŘENÝCH HODNOT.....	99
8.1	Měření nabíjecí charakteristiky.....	99
8.2	Měření celkové účinnosti nabíjení	101
8.2.1	Vlastnosti síťového zdroje	103
8.2.2	Vlastnosti nabíječe	104

8.2.3	Ztráta na vodičích	105
8.2.4	Shrnutí výsledků	105
9	IMPLEMENTACE SYSTÉMU NA VOZIDLO.....	109
10	VÝHLED NAVAZUJÍCÍCH ČINNOSTÍ.....	110
11	ZÁVĚR	111
12	POUŽITÁ LITERATURA	112
13	SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK	114
	Seznam obrázků	114
	Seznam tabulek	115
14	SEZNAM PŘÍLOH	116
	Příloha A – návrhy plošných spojů	116
	Příloha B – kompletní schéma	116
	Příloha C – umístěna na CD.....	116

ÚVOD

Elektromobilismus patří v současné době k hojně diskutovaným tématům, opředeným mnoho pozitivními i negativními přívlastky. Mnozí vidí v elektromobilismu výrazné klady, jiní ho berou pouze jako slepou vývojovou uličku. V současné době můžeme pronést tvrzení, že žijeme v technicky vyspělé době a veškerého komfortu je nadbytek. Toto platí i pro oblast dopravní techniky, zvláště osobních dopravních prostředků. Většina osobních dopravních prostředků využívá k tvorbě trakční a přídavné energie spalovací motory, tedy zařízení, která pro svoji činnost spotřebovávají produkty z neobnovitelných zdrojů, konkrétně z ropy. Na popud eliminace vyčerpávání neobnovitelných zdrojů a snižování nežádoucích exhalací se v současnosti setkáváme s propagací alternativních zdrojů, mezi které patří nejčastěji elektřina. Předními výhodami elektrického pohonu je jeho vysoká účinnost, nulové chemické exhalace v místě spotřeby a nízká tvorba hluku. Mezi nevýhody patří složitost elektronického vybavení pro dosažení vysokého jízdního komfortu a především vyčerpateľný zásobník energie.

Cílem diplomové práce je návrh systému akumulace energie pro studentský experimentální elektromobil. Elektromobilem se ve stati této práce rozumí upravená invalidní jednomístná tříkolka, doplněná o nutné technologické komponenty. Mezi řešené úkoly patří výběr vhodné trasy pro provoz elektromobilu. Na základě vypočtených parametrů trasy určit její energetickou náročnost včetně výběru vhodného akumulátoru energie. Celkově by měl energetický zdrojový systém bezpečným způsobem dodávat energii elektrickému pohonu a dobíjet akumulátory z univerzální rozvodné sítě 230V. Dále by měl obsahovat nadřazený dozorčí systém, monitorující provozní veličiny pohonu a akumulátorů. Veškeré kritické veličiny by měly být systémem zaznamenány a bezpečně vyhodnoceny tak, aby aktivovaly příslušný akční zásah.

Součástí diplomové práce budou teoretické výpočty, návrhy a fyzický návrh jednotlivých komponent včetně jejich sestavení a oživení.

1 TECHNICKÝ POPIS ŘEŠENÉHO VOZIDLA

Experimentální studentský elektromobil je založen na rámu invalidní tříkolky tuzemského výrobce Loped. Konkrétně se jedná o sériovou tříkolku typu 114S. Zásadními úpravami vozidla prošla trubková konstrukce v těsné blízkosti zadní pevné nápravy pro zvýšení ložné hmotnosti. Konstrukce byla dodatečně mechanicky zpevněna a doplněna o šasi pro upevnění trakčních motorů, acu-packu a elektrické výzbroje. Otočné šlapky byly aretovány a nyní slouží jako pevné stupačky. Tříkolka disponuje provozní třecí brzdou, umístěnou na předním kole. Celkově se jedná o kvalitní základ pro realizaci experimentálního elektromobilu. V níže uvedených tabulkách je tabelována sumarizace technických parametrů vozidla včetně parametrů zamýšleného elektrického pohonu. Na níže uvedeném obrázku č.1 je uveden stav invalidní tříkolky před zásadními úpravami. Na fotografii již tříkolka disponuje rozetami pro přenos tažné síly z jednotlivých motorů.



Obrázek 1 - Původní stav invalidní tříkolky

Tabulka 1 - Parametry vozidla, zdroj[13]

Veličina	Hodnota
Počet kol	3
Počet hnaných kol	2
Předpokládaná vlastní hmotnost (včetně baterií)	60 kg
Ložná hmotnost	120 kg
Celková maximální hmotnost	180 kg
Průměr kol	600 mm, 24"
Maximální konstrukční rychlost	18 km/h
Rozvor	1 m
Rozchod	0,5 m
Výška řídítek	1 m
Výška sedadla	0,8m

Tabulka 2 - Parametry pohonu a vozidlové odpory, zdroj [13]

Veličina	Hodnota
Počet trakčních motorů	2
Výkon jednoho motoru	600 W
Jmenovité napětí motoru	24 V
Jmenovitý proud motoru	33 A
Jmenovité otáčky motoru	3600 min ⁻¹
Celkový převodový poměr motor-kolo	1:22,7
Předpokládaná účinnost převodovky	90%
Předpokládaná střední účinnost motoru	85%
Předpokládaná účinnost měniče	94%
Předpokládaná účinnost nabíjení baterie	70%
Měrný valivý odpor v ložiscích	0,00244 N/kg
Měrný valivý odpor kolo-silnice	0,05233 N/kg
Ekvivalent rotačních hmot	24 kg
Součinitel aerodynamického odporu	0,058 N/(km/h) ²

2 ANALÝZA ENERGETICKÝCH POŽADAVKŮ

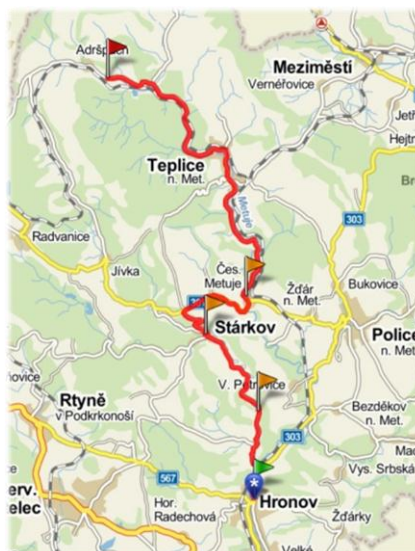
2.1 Výběr konkrétní trasy vozidla

Při návrhu komponent vozidla je nutno primárně stanovit požadavky na jeho výsledné trakční parametry. Na tento úkol lze nahlížet ze dvou směrů. Vozidlo má být určeno buď pro univerzální využití v neznámém terénu, či pro přesně danou trasu. Pro první případ volby parametrů je nutno určit výstupní parametry vozidla dle nejběžnějších uživatelských požadavků a případně cenových dispozic cílové skupiny zákazníků. Výstupem návrhu je univerzální vozidlo s udanými hodnotami maximální rychlosti, zrychlení, ložné hmotnosti a dojezdu. Při zpracování návrhu vozidla dle druhého přístupu se jedná o vozidlo s parametry vypočtenými pro překonání odporů dané vytyčené trasy. Vozidlo tedy musí disponovat takovými výstupními parametry, aby i při mírné degradaci akumulacních prvků bylo schopno překonat nejextrémnější stupání dané výškovým profilem trati. Snahy výrobců podobných vozidel jsou zcela jistě z důvodů zvýšení prodejnosti ubírány směrem první varianty volby parametrů, tedy vytvořit parametrově co nejdokonalejší univerzální výrobek za nejpříznivější cenu.

Pro účely studentského experimentálního vozidla a volbu jeho výstupních trakčních parametrů se při návrhu vychází z druhého přístupu. Vozidlu je určena trasa z oblasti Krkonoš, konkrétně se jedná o spojnici měst Hronov – Adršpach a cestu zpět. Tato trasa je vybrána z důvodu různorodosti terénu, obsahuje množství dílčích stoupání a klesání.



Obrázek 2 - Známkování výškového profilu trasy



Obrázek 3 - Vyznačení trasy na mapě

2.2 Výpočet energetické náročnosti zvolené trasy

Dalším krokem návrhu bateriového systému je výpočet energetické náročnosti zvolené trasy. Výpočtem energetické náročnosti trasy se rozumí výpočet celkové potřebné energie pro překonání všech traťových a vozidlových odporů. Na základě potřebné energie lze vypočítat potřebnou kapacitu acu-packu. Mezi stěžejní traťové odpory lze zařadit odpor ze stoupání. Mezi odpory vozidlové potom valivý odpor na styku kolo-silnice, valivý odpor v ložiscích a dále aerodynamický odpor. Celková potřebná energie musí být navýšena o ztráty v jednotlivých komponentech pohonu. Těmito komponentami se rozumí mechanická převodovka, trakční motor, měnič a baterie.

Dle vyznačeného výškového profilu v obrázku č.2 lze usoudit, že určená trasa ve směru Hronov-Adršpach má převážně stoupavý charakter. Předpokládá se značné energetické vydání a malé procento rekuperace. Pro cestu zpět platí opačná závislost. Pro zjednodušení energetických výpočtů je výškový profil po částech linearizován. Tímto je daná trasa rozdělena do pěti úseků o různých délkách s příslušným stoupáním. V tuto chvíli lze celou trasu snadněji popsat a postupně provést energetické výpočty samostatně pro oba směry jízdy.

V níže uvedené tabulce č. 3 jsou sepsány charakteristiky jednotlivých úseků včetně zvolených dílčích rychlostí s ohledem na předpokládané možnosti vozidla. Z údajů je možno dopočítat energetickou náročnost konkrétního úseku a po součtu dílčích výsledků získat energii, kterou je na daný dojezd potřeba vynaložit.

Tabulka 3 - Parametry jednotlivých traťových úseků

	Úsek číslo	Délka úseku ΔL [km]	Převýšení Δh [m]	Stoupání s [‰]	Doba jízdy Δt [h:m:s]	Rychlost v [km/h]
Hronov-Adršpach	1	7,5	60	8	0:30:00	15
	2	2,25	120	53,3	0:13:30	10
	3	3,0	-112	-37,3	0:10:03	17,9
	4	7,50	40	5,3	0:30:51	14,6
	5	6,75	58	8,6	0:33:36	12,1
	Průměr			7,59		13,9
	Σ	27	166		1:58:00	
Adršpach-Hronov	5	6,75	-58	-8,6	0:22:35	17,9
	4	7,5	-40	-5,3	0:29:55	15
	3	3	112	37,3	0:18:00	10
	2	2,25	-120	-53,3	0:07:32	17,9
	1	7,5	-60	-8	0:29:58	15
	Průměr			-7,59		15,18
	Σ	27	-166		1:48:00	
	Průměr celk.			0		14,5
	$\Sigma\Sigma$	54	0		3:46:00	

2.2.1 Použité vztahy při výpočtech energetické náročnosti

Vozidlové odpory:

$$F_0 = F_{lož} + F_{val} + F_{aero} \quad (1)$$

$$F_0 = (F_{lož_{měrný}} + F_{val_{měrný}}) \cdot m_{celk} + \text{souč. aero odporu} \cdot v^2 =$$

$$= (0,00244 + 0,05233) \cdot 180 + 0,058 \cdot v^2 = 0,44 + 9,42 + 0,058 \cdot v^2 \text{ N}$$

Kde:

F_0 – celkový vozidlový odpor [N]

$F_{lož}$ – odporová síla v ložiscích [N]

$F_{lož_{měrný}}$ – měrná odporová síla v ložiscích [N/kg]

F_{val} – valivý odpor kol [N]

$F_{val_{měrný}}$ – měrný valivý odpor kolo – silnice [N/kg]

F_{aero} – aerodynamický odpor [N]

m_{celk} – celková hmotnost vozidla [kg]

$$F_{aero} = \text{součinitel aerodynamického odporu} \cdot v^2 \quad (2)$$

Kde:

v – rychlost [km/h]

Trat'ové odpory:

$$F_s = \frac{s \cdot g \cdot m_{celk}}{1000} \quad (3)$$

$$F_s = \frac{s \cdot 9,81 \cdot 180}{1000} = s \cdot 1,7658 \text{ N}$$

Kde:

F_s – odpor ze sklonu [N]

s – stoupání [‰]

g – tíhové zrychlení [m/s^2]

Trakční síla:

$$F_t = F_0 + F_s \quad (4)$$

$$F_t = 1,7658 \cdot s + 0,44 + 9,42 + 0,058 \cdot v^2 = 1,7658 \cdot s + 9,86 + 0,058 \cdot v^2 \text{ N}$$

Kde:

F_t – trakční síla [N]

Trakční výkon:

$$P_t = \frac{F_t \cdot v}{3,6} \quad (5)$$

$$P_t = \frac{(1,7658 \cdot s + 9,86 + 0,058 \cdot v^2) \cdot v}{3,6} \text{ W}$$

Kde:

P_t – trakční výkon [W]

Práce na překonání valení:

$$\Delta A_v = \frac{(F_{val} + F_{lož}) \cdot \Delta L}{3,6} \quad (6)$$

$$\Delta A_v = \frac{(0,44 + 9,42) \cdot \Delta L}{3,6} Wh$$

Kde:

ΔA_v – práce na překonání valení [Wh]

ΔL – délka úseku [km]

Práce na překonání aerodynamického odporu:

$$\Delta A_a = \frac{\text{součinitel aero.odporu} \cdot v^2 \cdot \Delta L}{3,6} \quad (7)$$

$$\Delta A_a = \frac{0,058 \cdot v^2 \cdot \Delta L}{3,6} Wh$$

Kde:

ΔA_a – práce na překonání aerodynamického odporu [Wh]

Práce na překonání stoupání:

$$\Delta A_s = \frac{F_s \cdot \Delta L}{3,6} \quad (8)$$

$$\Delta A_s = \frac{s \cdot 1,7658 \cdot \Delta L}{3,6} Wh$$

Kde:

ΔA_s – práce na překonání stoupání [Wh]

Práce na překonání traťových a vozidlových odporů:

$$A_{os} = \frac{F_t \cdot \Delta L}{3,6} \quad (9)$$

$$\Delta A_{os} = \frac{(1,7658 \cdot s + 9,86 + 0,058 \cdot v^2) \cdot \Delta L}{3,6} Wh$$

Kde:

A_{os} – práce na překonání traťových a vozidlových odporů [Wh]

Práce na urychlení setrvačných hmot:

$$A_k = \frac{0,5 \cdot m_{setrvačné} \cdot (v_{koncová}^2 - v_{počáteční}^2)}{3,6^2 \cdot 3600} \quad (10)$$

$$A_k = \frac{0,5 \cdot 204 \cdot (v_{koncová}^2 - v_{počáteční}^2)}{46656} = \frac{51 \cdot (v_{koncová}^2 - v_{počáteční}^2)}{23328} Wh$$

$$m_{setrvačné} = \text{ekvivalent rotačních hmot} + m_{celk} = 24 + 180 = 204 kg \quad (11)$$

Kde:

A_k – práce na urychlení setrvačných hmot [Wh]

$v_{počáteční}$ – počáteční rychlost v daném úseku [km/h]

$v_{koncová}$ – koncová rychlost v daném úseku [km/h]

$m_{setrvačné}$ – celková hmotnost povýšená o ekvivalent rotačních hmot [kg]

Trakční práce:

$$A_t = A_{os} + A_k \quad (12)$$

Kde:

A_t – trakční práce [Wh]

A_{os} – práce na překonání traťových a vozidlových odporů [Wh]

Trakční práce vyjadřuje celkové množství energie, které je nutno dodat vozidlu na to, aby bylo přemístěno z jednoho bodu do bodu druhého. Chceme-li zjistit množství odebrané množství energie z baterie vozidla, musí být vypočtená energie povýšena o energetické ztráty na jednotlivých komponentách pohonu. Při výpočtech ztrát na komponentách sledujeme tok energie. Rozlišujeme motorický a generátorický režim.

Energetická ztráta na převodovce:

*pokud: $A_t > 0$ tzn. motorický režim
tak:*

$$\Delta A_{př} = \frac{A_t \cdot (100 - \eta_{př})}{\eta_{př}} \quad (13)$$

$$\Delta A_{př} = \frac{A_t \cdot (100 - 90)}{90} = \frac{A_t}{9} Wh$$

*pokud: $A_t < 0$ tzn. generátorický režim
tak:*

$$\Delta A_{př} = -\frac{A_t \cdot (100 - \eta_{př})}{100} \quad (14)$$

$$\Delta A_{př} = \frac{A_t \cdot (100 - 90)}{100} = -\frac{A_t}{10} Wh$$

Kde:

$\Delta A_{př}$ – energetický úbytek na převodovce [Wh]

$\eta_{př}$ – účinnost převodovky [–]

Energetická ztráta na motoru:

*pokud: $A_t > 0$ tzn. motorický režim
tak:*

$$\Delta A_{tm} = \frac{A_t \cdot 100 \cdot (100 - \eta_{tm})}{\eta_{př} \cdot \eta_{tm}} \quad (15)$$

$$\Delta A_{tm} = \frac{A_t \cdot 100 \cdot (100 - 85)}{90 \cdot 85} = \frac{30 \cdot A_t}{153} Wh$$

*pokud: $A_t < 0$ tzn. generátorický režim
tak:*

$$\Delta A_{tm} = - \frac{A_t \cdot \eta_{př} (100 - \eta_{tm})}{100 \cdot 100} \quad (16)$$

$$\Delta A_{tm} = - \frac{A_t \cdot 90 \cdot (100 - 85)}{100 \cdot 100} = - \frac{27 \cdot A_t}{200} Wh$$

Kde:

ΔA_{tm} – energetický úbytek na motoru [Wh]
 η_{tm} – účinnost motoru [–]

Energetická ztráta na měniči:

*pokud: $A_t > 0$ tzn. motorický režim
tak:*

$$\Delta A_{mě} = \frac{A_t \cdot 10000 \cdot (100 - \eta_{mě})}{\eta_{př} \cdot \eta_{tm} \cdot \eta_{mě}} \quad (17)$$

$$\Delta A_{mě} = \frac{A_t \cdot 10000 \cdot (100 - 94)}{90 \cdot 85 \cdot 94} = \frac{600 \cdot A_t}{7191} Wh$$

*pokud: $A_t < 0$ tzn. generátorický režim
tak:*

$$\Delta A_{mě} = - \frac{A_t \cdot \eta_{př} \cdot \eta_{tm} (100 - \eta_{mě})}{100 \cdot 100 \cdot 100} \quad (18)$$

$$\Delta A_{mě} = - \frac{A_t \cdot 85 \cdot 85 \cdot (100 - 94)}{100 \cdot 100 \cdot 100} = - \frac{459 \cdot A_t}{10000} Wh$$

Kde:

$\Delta A_{mě}$ – energetický úbytek na měniči [Wh]
 $\eta_{mě}$ – účinnost měniče [–]

Celková účinnost kombinace měnič-trakční motor-převodovka:

$$\eta = \frac{\eta_{př} \cdot \eta_{tm} \cdot \eta_{mč}}{10000} \quad (19)$$

$$\eta = \frac{90 \cdot 85 \cdot 94}{10000} = \frac{7191}{100} = 71,9 \%$$

Celková energie potřebná pro jízdu (bez rekuperace):

pokud: $A_t > 0$ tzn. motorický režim

tak:

$$A_{bv} = \frac{A_t}{\eta} \cdot 100 \quad (20)$$

$$A_{bv} = \frac{A_t}{71,9} \cdot 100 \text{ Wh}$$

pokud: $A_t < 0$ tzn. generátorický režim

tak:

$$A_{bv} = 0 \quad (21)$$

Kde:

A_{bv} – energie potřebná pro jízdu [Wh]

η – účinnost pohonu [–]

Celková rekuperovaná energie:

pokud: $A_t > 0$ tzn. motorický režim

tak:

$$A_{bn} = 0 \quad (22)$$

*pokud: $A_t < 0$ tzn. generátorický režim
tak:*

$$A_{bn} = \frac{A_t \cdot \eta \cdot \eta_{bat}}{10000} \quad (23)$$

$$A_{bn} = \frac{A_t \cdot 71,9 \cdot 70}{10000} = \frac{5033 \cdot A_t}{10000} Wh$$

Kde:

A_{bn} – *rekuperovaná energie [Wh]*
 η_{bat} – *účinnost nabíjení baterie [–]*

Ztráta energie na baterii při rekuperaci:

$$\Delta A_b = \frac{A_{bn} \cdot (100 - \eta_{bat})}{\eta_{bat}} \quad (24)$$

$$\Delta A_b = \frac{A_{bn} \cdot (100 - 70)}{70} = \frac{3 \cdot A_{bn}}{7} Wh$$

Kde:

ΔA_b – *úbytek energie na baterii při rekuperaci [Wh]*

Energetická náročnost celé trasy:

$$A_{celk} = A_{bv} - A_{bn} \quad (25)$$

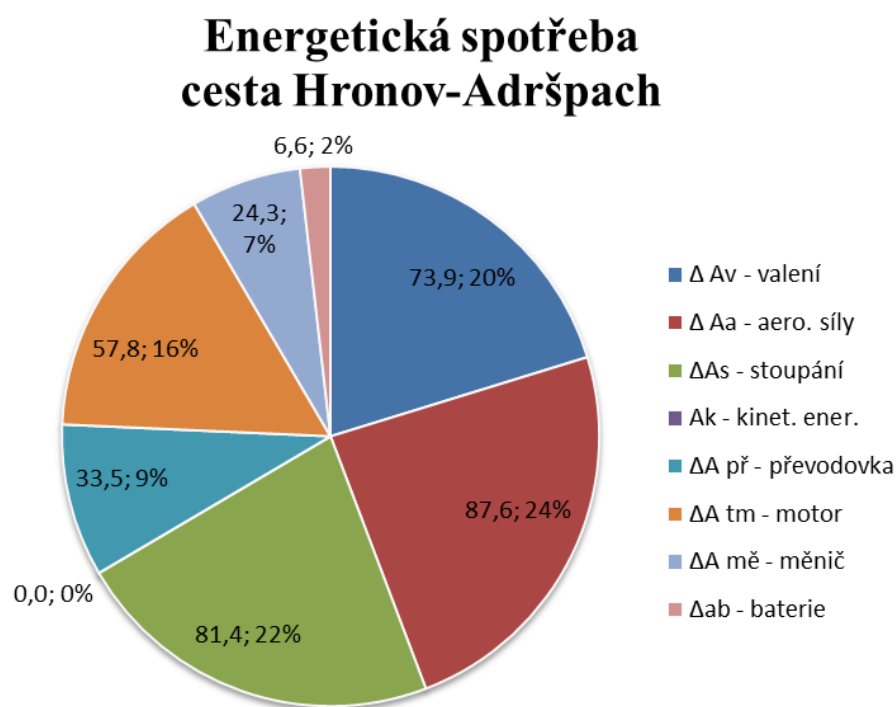
Kde:

A_{celk} – *energetická náročnost celé trasy [Wh]*

2.2.2 Sumarizace vypočtených výsledků

Výše uvedené vzorce slouží jako podrobné modelové schéma výpočtu celkové energetické náročnosti. V práci jsou uvedeny pouze vzorce se základním dosazením konstant, neboť výčet výpočtů všech traťových úseků by byl zbytečně dlouhý. Při výpočtech pomohl

tabulkový procesor MS Excel, pomocí kterého byly vytvořeny i příslušné grafy. Přesnost výpočtu závisí pouze na přesnosti vstupních dat, tedy hlavně na přesnosti aproximace jednotlivých traťových úseků. V rámci návrhu vozidla lze pokládat rozdělení trasy na pět úseků jako dostatečně přesné. Účinnost jednotlivých komponent byly před výpočtem samotným buď experimentálně změřeny, či v případě obtížného měření odhadnuty na základě katalogových listů podobných komponent. Pro detailnější analýzu energetických toků bylo provedeno i procentuální grafické znázornění spotřeb jednotlivých spotřebičů energie. Při důkladném vývoji vozidla by dané údaje mohly sloužit jako podklad pro pozdější vylepšení vlastností jednotlivých problematických komponent.

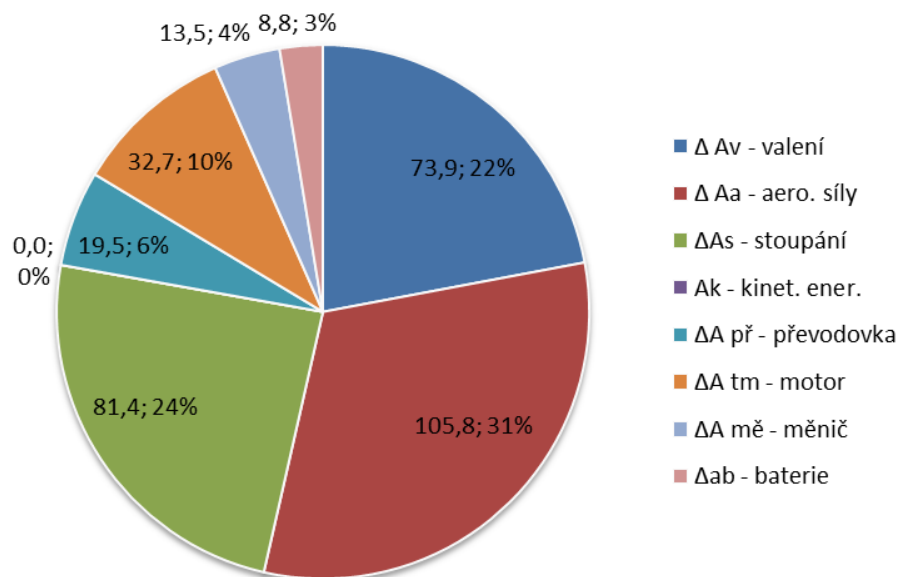


Obrázek 4 – Dílčí spotřebiče energie pro cestu Hronov-Adršpach, [Wh, %]

Tabulka 4 - Spotřeba energie, trasa Hronov-Adršpach

	Úsek číslo	Spotřebovaná energie [Wh]	Postupný přírůstek spotřebované energie [Wh]
Hronov-Adršpach	1	107,9	107,9
	2	95,1	203
	3	-15,5	187,5
	4	91,2	278,7
	5	86,5	365,2
	Σ, A_{H-A}	365,2	

Energetická spotřeba cesta Adršpach-Hronov



Obrázek 5 - Dílčí spotřebiče energie pro cestu Adršpach-Hronov, [Wh, %]

Tabulka 5 - Spotřeba energie, trasa Adršpach-Hronov

	Úsek číslo	Spotřebovaná energie [Wh]	Postupný přírůstek spotřebované energie [Wh]
Adršpach - Hronov	5	35,6	35,6
	4	38,9	74,5
	3	94,1	168,6
	2	-20,4	148,2
	1	24,5	172,7
	Σ, A _{A-H}	172,7	

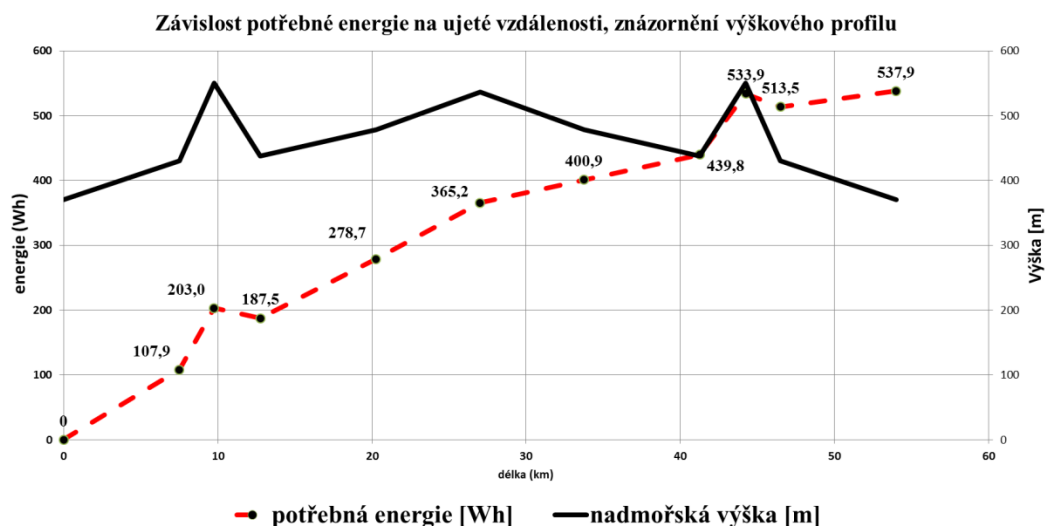
Pro celkovou energetickou náročnost celé trasy platí:

$$\begin{aligned}
 A_{\text{celk}} &= A_{H-A} + A_{A-H} \\
 &= 365,2 + 172,7 = 537,9 \approx \mathbf{538 \text{ Wh}}
 \end{aligned}
 \tag{26}$$

Kde:

A_{H-A} – energetická náročnost trasy Hronov – Adršpach [Wh]

A_{A-H} – energetická náročnost trasy Adršpach – Hronov [Wh]



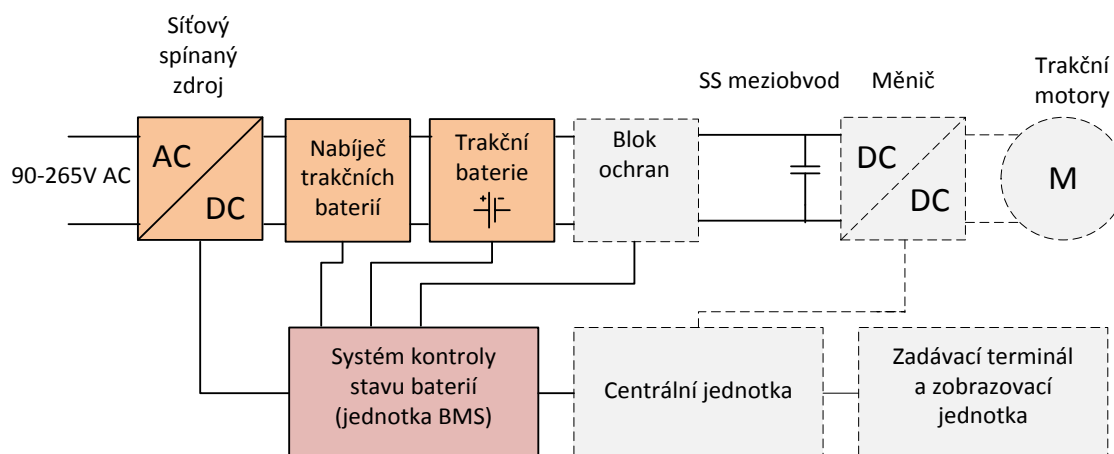
Obrázek 6 - Závislost potřebné energie na ujeté vzdálenosti, znázornění výškového profilu

Na koláčových grafech č. 4 a č. 5 je zobrazen podíl ztrát na jednotlivých komponentech pohonu, traťových a vozidlových odporech pro daný jízdní směr. Z grafů vyplývá skutečnost, že majoritními spotřebiči energie jsou odpor ze stoupání, odpor vyvolaný aerodynamickými silami a odpor valivý. Minoritními, ale neméně důležitými, spotřebiči jsou pak ztráty na převodovém ústrojí, motoru, měniči a při rekuperaci na baterii. Ze znalosti uvedených ztrátových poměrů se lze při ladění celkové účinnosti pohonu zaměřit již na příslušné elementy. Odpor ze stoupání je veličinou pevně danou, na rozdíl od ostatních odporů. Valivý odpor lze minimalizovat použitím vhodnějších pneumatik s dostatečným huštěním, aerodynamický odpor lze minimalizovat mechanickým zásahem do tvaru vozidla. Ostatní ztráty, především elektrotepelného charakteru, je možno více či méně eliminovat výběrem kvalitnějších komponent a dostatečným průřezem silových vodičů. Důležitým aspektem při výběru všech komponent představuje jejich pořizovací cena. Je tedy nutno stanovit určitou maximální přijatelnou hodnotu poměru ceny versus účinnosti. Nejen pro oblast elektrotechniky platí, že dvojnásobná cena neznamená nutně dvojnásobnou kvalitu komponenty. Na grafu č. 6 je znázorněn výškový profil vytyčené trasy vozidla. Jedná se ve své podstatě o znázornění nadmořské výšky v závislosti na ujeté vzdálenosti. Druhý průběh grafu ilustruje závislost potřebné energie na ujeté vzdálenosti po dané trase, včetně znázornění dílčích spotřeb. Z rostoucího charakteru křivky lze usoudit značné energetické vydání a minimální rekuperaci. Dle trakčních výpočtů vychází celková potřebná energie pro překonání všech odporů pro cestu vozidla ve směru Hronov-Adršpach a zpět na 538Wh, jedná se o součet sum spotřebované energie z tabulky č. 4 a č. 5. Tuto energii je tedy třeba v bateriích vozidla, včetně jistých rezerv, naakumulovat.

3 KONCEPČNÍ SCHÉMA ELEKTRICKÉ VÝZBROJE

Před zahájením popisu návrhu jednotlivých komponent bateriového systému je nejdříve nutno nastínit celkové blokové schéma vozidla. Bloky vyplněné šedivou barvou nejsou předmětem této práce, nicméně jsou pro celistvou představu elektrické výzbroje vozidla krajně důležité.

Návrh elektrické výzbroje experimentálního vozidla je týmovým projektem, přičemž každý z řešitelů má pevně stanoveny řešené úkoly. V případě této práce jsou předmětem řešení bloky síťového napájecího zdroje, nabíječe trakčních baterií, jednotky battery managementu a blok trakčních baterií. Ostatní bloky schématu jsou předmětem činnosti druhého řešitele týmového projektu.



Obrázek 7 - Blokové schéma elektrické výzbroje vozidla

Jádro pohonu vozidla tvoří trakční baterie, stejnosměrný meziobvod, měnič a trakční motory. V případě nabíjení z rozvodné sítě jsou aktivovány další dva bloky a to síťový spínaný zdroj s nabíječem trakčních baterií. Doplňující bloky řízení tvoří jednotka BMS, centrální jednotka a zadávací terminál. Níže uvedený text velice stručně popisuje komponenty tvořící pohon vozidla. Kompletní návrhy a schémata jsou dostupné z [12, 13].

Trakční motory jsou koncepčně zvoleny jako stejnosměrné s cizím buzením s konstantním magnetickým tokem, konkrétně s permanentními magnety. Na vozidle jsou motory umístěny dva, každý motor poskytuje svou tažnou sílu vždy jednomu kolu nezávisle

přes planetovou převodovku a řetězový převod do pomala s celkovým převodovým poměrem 22,7. Jmenovité napětí motorů je 24V DC, maximální proud 33A, výkon 600W a maximální otáčky 3600 ot/min. Jejich vzájemné zapojení je ve své podstatě paralelní, přičemž každý motor má svůj vlastní měnič (v našem konkrétním případě vlastní část jednoho měniče).

Silová část trakčního měniče je koncepčně zvolena jako sloučený dvojité H můstek se společným středním párem tranzistorů. Pro tento účel posloužil monolitický třífázový můstek od firmy IXYS.

Logické jádro měniče tvoří centrální jednotka, ve které se odehrávají veškeré regulační výpočty, vyhodnocují se naměřené veličiny a činí patřičné akční zásahy. Jednotka je založena na mikroprocesoru řady AVR spolu s potřebným hardwarem.

Zadávací terminál slouží jako uživatelské rozhraní, prostřednictvím kterého lze celé vozidlo tlačítky ovládat. Součástí terminálu je i zobrazovací jednotka, vyobrazující aktuální provozní parametry pohonu vozidla. Tato jednotka je svázána s jednotkou centrální pomocí sériového komunikačního kanálu. Zadávací terminál též vyhodnocuje informaci o žádaném momentu z elektronické plynové rukojeti a informaci o aktuálním natočení řidítek.

Blokem ochrany je míněn soubor akčních členů, konkrétně elektromagnetických relé, která vyhodnocují nebezpečné stavy vozidla a v případě překročení provozních parametrů vozidlo odpojí od napájení. Každá z uvedených řídicích jednotek snímá jisté veličiny (proudy, napětí, teploty, apod.), tyto veličiny mají v provozním stavu daný pracovní rozsah. Při překročení rozsahu hrozí přetěžování postižených součástí pohonu či jejich nevratná destrukce. Jestliže některá z jednotek tento poruchový stav vyhodnotí, předá informaci bloku ochrany v podobě napěťového signálu a zapříčiní odpad hlavního trakčního relé. Tímto systémem by měly být hlavní komponenty pohonu a bateriového systému ochráněny před poruchovými a nestandardními stavy.

Následující kapitoly této práce se budou zabývat návrhem a dimenzováním jednotlivých komponent ve směru „od pohonu“. Dle požadavků na pohon bude v kapitole č. 4 vybrán vhodný typ baterií a stanoveno vhodné uspořádání. V návaznosti na použitý typ baterií bude v kapitole č. 5 navrhnout vhodný nabíječ trakčních baterií. Kapitola č. 6 bude na předcházející kapitolu navazovat návrhem síťového spínaného zdroje. Statí kapitoly č. 7 bude návrh systému kontroly stavu baterií. Jednotlivé kapitoly na sebe budou navazovat tak, aby byl zřejmý reálný postup návrhu jednotlivých komponent.

4 NÁVRH A VÝBĚR TRAKČNÍ BATERIE

4.1 Potřebná vstupní data

V předchozí kapitole č. 4 bylo uvedeno blokové schéma elektrické výzbroje vozidla včetně stručného popisu funkcí jednotlivých komponent. Pro návrh jednotlivých dílčích komponent musí být zachována jistá posloupnost. V případě návrhu a výběru trakční baterie se musí vycházet z parametrů pohonu, kterými jsou:

- Jmenovité napětí motoru 24V
- Limit maximálního trakčního proudu 40A

Dále musí baterie splňovat doplňující kritéria:

- Nízká hmotnost
- Dostatečná energie pro ujetí vytyčené trasy

4.2 Výběr vhodného druhu trakční baterie

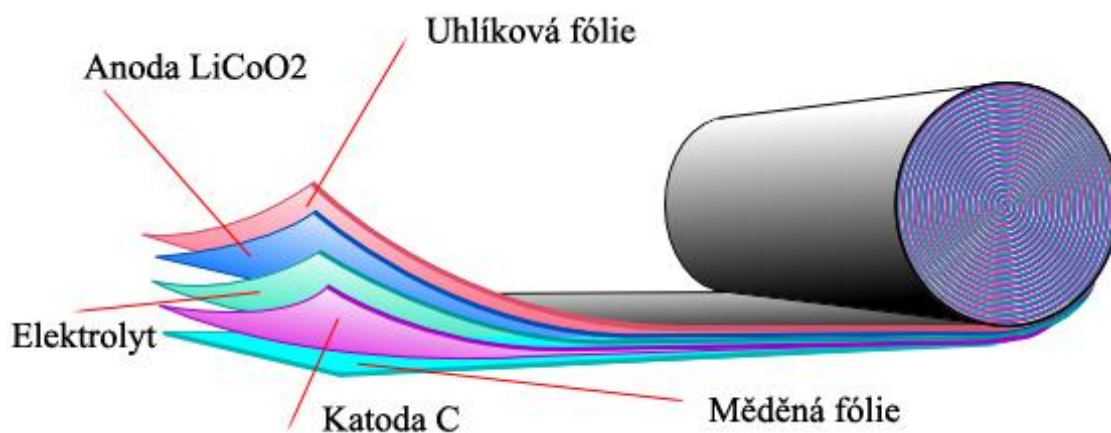
Trakční baterie vozidla musí být vybírána s ohledem na jmenovité napětí, kapacitu, hmotnost, hodnotu vybíjecího proud a cenu. Bereme-li jako samozřejmá kritéria jmenovité napětí a kapacitu, pro naši aplikaci bude hrát rozhodující faktor hmotnost. Ložná hmotnost vozidla je díky trubkovému, byť vyztuženému, rámu omezena. Tudíž se při návrhu vozidla jako celku počítá víceméně s každým kilogramem přidané hmotnosti.

Současný trh nabízí několik základních typů baterií. Olověné Pb, Nikl-metyl hydridové NiMH, Nikl-cadmiové NiCd a Lithium-polymerové LiPol. Po důkladném porovnání provozních parametrů byl vybrán typ baterií LiPol. Poprobnější výpočty a charakteristiky ostatních typů baterií jsou uvedeny v rozšiřující literatuře [1].

4.2.1 Popis vlastností standartní Li-pol baterie

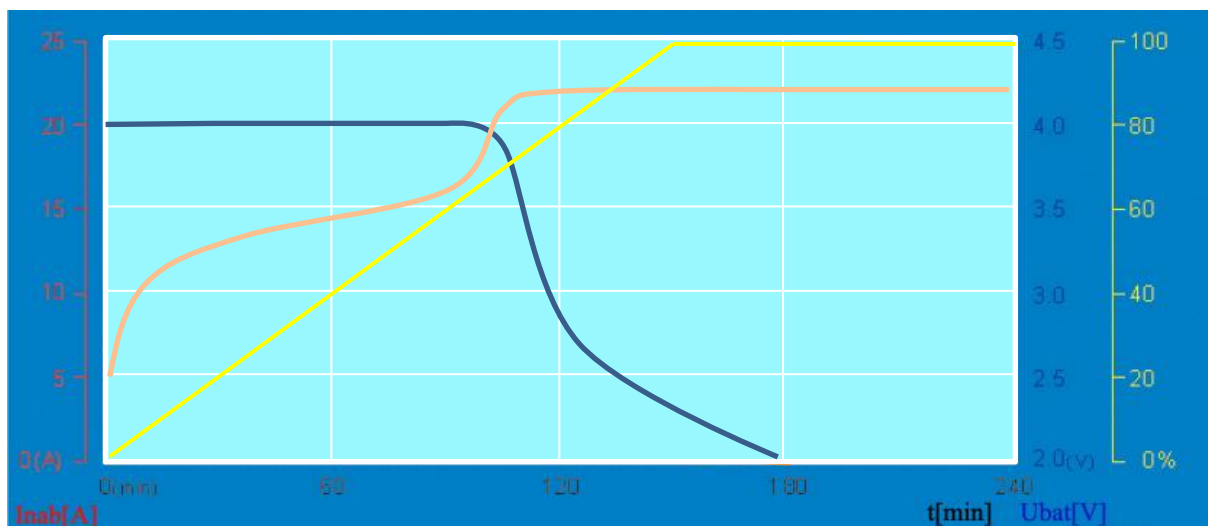
Lithium polymerový akumulátor patří mezi moderní zdroje elektrické energie. Jeho výhodou jsou především malé rozměry a hmotnost v porovnání s Pb, NiCd či NiMh akumulátory. Energie je uložena v oblasti aktivní hmoty, kterou tvoří polotekutý či tuhý elektrolyt, dále kladná plastická elektroda vyrobená z kobaltitanu lithného a záporná elektroda

z uhlíku. Celá aktivní hmota je pokryta ze strany kladné elektrody hliníkovou folií, ze strany záporné elektrody měděnou folií.



Obrázek 8 - Vnitřní uspořádání standardního Li-pol článku

Jmenovité napětí jednoho elementárního článku se pohybuje okolo 3,2V. Minimální provozní napětí článku je 2,8V. Pod touto hodnotou napětí dochází k silné degradaci akumulačních schopností. Maximální provozní napětí článku je 4,2V. Nad touto hodnotou napětí dochází k enormnímu oteplování elektrolytu a vývinu plynů, který může při překročení hodnoty 150°C vygradovat v exotermní reakci a výbuch článku. Náplň článku tvoří v těchto extrémních podmínkách se vzduchem samovznětlivou směs. Ke zvýšenému ohřevu a ničení baterie dochází již při překročení maximálního napětí o desetiny voltu. Díky těmto striktním provozním podmínkám je kladen velice silný důraz na kvalitu nabíječe, který by měl disponovat vhodnou nabíjecí charakteristikou typu IU. V první fázi nabíjení je nabíjeno konstantním proudem o velikosti přibližně poloviny číselné hodnoty kapacity, napětí článku se zvyšuje. Při přiblížení napětí baterie napětí maximálnímu by měl nabíječ plynule přecházet na charakteristiku U. Na baterii je pozvolně připojeno konstantní napětí, které konečnou hodnotu napětí 4,2V stabilizuje a celkový proces nabíjení tak završí. Nabíjecí proud strmě klesá.

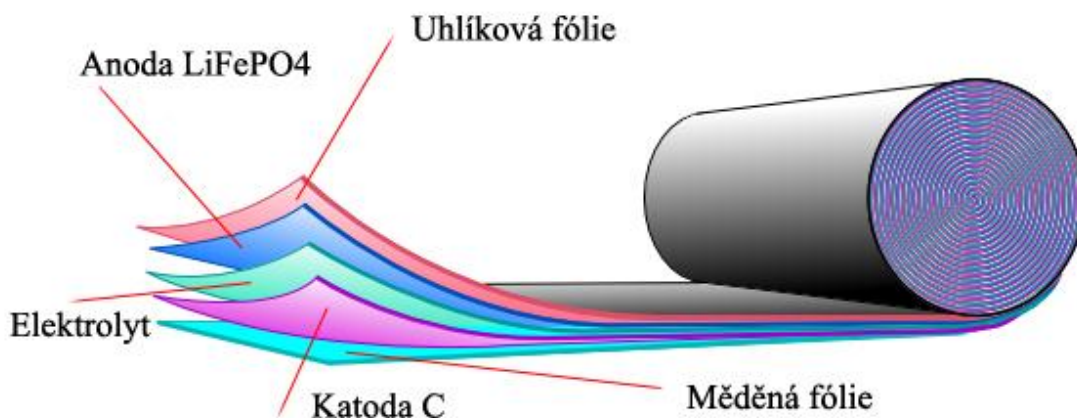


Obrázek 9 - Ilustrační nabíjecí charakteristika Li-pol baterie

Výhodou Li-pol článku je minimální samovybíjecí schopnost. V baterii se prakticky neuplatňuje paměťový efekt, proto není problém článek nabíjet v jakékoli fázi vybití.

4.2.2 Popis vlastností Li-pol baterie typu LiFePO₄

Moderní generací lithium polymerových baterií jsou akumulátory postavené na chemické sloučenině s označením LiFePO₄. Akumulátory nesou toto označení díky použití uvedené sloučeniny pro výrobu kladné elektrody. Hlavní předností akumulátorů s modifikovanou anodou je především zvýšení jejich provozní bezpečnosti. Články lze zatěžovat vyšším proudem bez velikých obav z extrémního vývinu interních plynů a možné exploze. To je dáno silnější chemickou vazbou železa, fosforu a kyslíku než vazbou mezi kobaltem a kyslíkem v klasických Li-pol článcích, přičemž elektrické parametry obou typů článků jsou takřka stejné.



Obrázek 10 - Vnitřní uspořádání LiFePO₄ Li-pol článku

Díky výše uvedeným vlastnostem jsou Li-pol baterie s LiFePO₄ anodou nejvhodnějšími kandidáty pro experimentální trakční účely a tudíž budou ve vozidle použity.

4.3 Požadavky na proudové dimenzování trakční baterie

Experimentální vozidlo a jeho parametry jsou primárně předurčeny pro provoz na předem určené trase se známými traťovými sklony. Při návrhu bylo určeno několik dalších krajních parametrů, které by mělo vozidlo provozně zvládnout. Jedná se o vytyčení maximálního sklonu 10%, ve kterém je vozidlo schopno rozjezdu na danou zlomovou rychlost 10km/h se zrychlením 0,3 m/s². Tomu odpovídá doba zrychlení 10s.

Ze známých traťových a vozidlových odporů byly sestrojeny dvě trakční charakteristiky [13] pro sklon trati 10% a 0% včetně příslušných proudových charakteristik motoru a trakčního odběru z acu-packu. Z těchto charakteristik je nutno odečíst proud, který přísluší danému pracovnímu bodu motoru a tím tak určit proudové nároky na acu-pack. Stanovme dva pracovní body pohonu:

- a) Stoupání 10%, rychlost 10km/h
- b) Stoupání 0%, rychlost 18km/h (maximální rychlost)

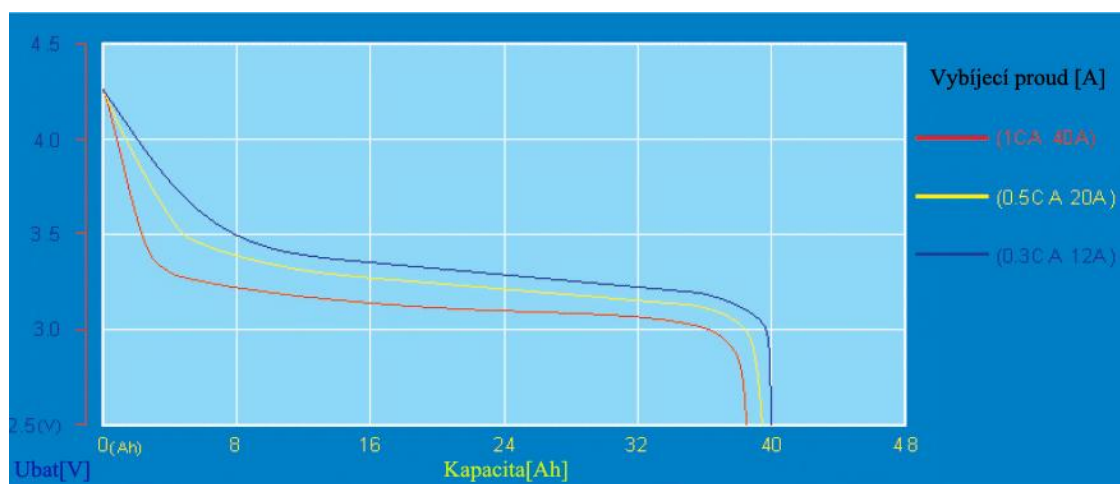
V případě pracovního bodu pro stoupání 10% a rychlost 10km/h dle charakteristik vychází proudové zatížení 40A v součtu pro oba motory. V případě stoupání 0% a rychlosti 18 km/h vychází požadovaný proud 22,6A. Při výběru vhodné baterie je tedy nutno brát v úvahu tyto krajní provozní parametry. Akumulátor by měl mít takové vlastnosti, aby provoz při uvedených podmínkách nedocházelo k dlouhodobému překračování jeho provozních parametrů.

4.4 Výpočet potřebné kapacity trakční baterie

Ve výše uvedených kapitolách byla vypočítána a graficky znázorněna energetická náročnost zadané trasy včetně volby vodného typu trakční baterie. Úkolem je tedy určit hodnotu kapacity baterie tak, aby bylo možno energetický výdaj s dostatečnou rezervou pokrýt. Volbou výrazně vyšší kapacity baterie než je potřebné, se zmenší počet nabíjecích cyklů a zvýší životnost baterie.

V prvním kroku je potřeba určit počet článků v acu-packu tak, aby bylo dosaženo potřebné velikosti výstupního napětí pro pohon a ostatní elektro výzbroj.

Vyjděme ze jmenovitého napětí motorů 24V. Jmenovité napětí jednoho Li-pol článku je 3,2V dle charakteristiky na obrázku č. 11 a katalogových listů [4]. Vybíjecí charakteristika má v případě Li-pol baterií podobný tvar jako charakteristika nabíjecí. Při nabíjení článku konstantním proudem roste jeho napětí dle charakteristiky viz obrázek č. 9. Vybíjecí charakteristika má podobný charakter jako nabíjecí. Při konstantním odběru nejdříve klesne napětí článku s poměrně velkou strmostí až do kolena charakteristiky, které se hodnotou svého napětí blíží jmenovitému. V této oblasti, vymezené napětíovým rozsahem do 0,5V, se nachází většina akumulované energie. Po vyčerpání veškeré energie napětí článku klesá. Za jmenovité napětí článku lze pro trakční výpočty uvažovat střední hodnotu napětí mezi dvěma koleny charakteristiky, to znamená 3,2V.



Obrázek 11 - Vybíjecí charakteristika typického Li-pol LiFePO4 článku

Pro počet článků v acu-packu platí:

$$n_{aku} = \frac{U_{tm}}{U_{1aku}} = \frac{24}{3,2} = 7,5 \cong 8ks \quad (27)$$

Ze zaokrouhleného výpočtu vyplývá, že pro dosažení plného jmenovitého napětí motoru bude potřeba 8 ks Li-pol článků.

Výsledné jmenovité napětí acu-packu je poté dáno výrazem:

$$U_{acu_jmen} = U_{1acu} \cdot n_{aku} = 3,2 \cdot 8 = 25,6V \quad (28)$$

Při výpočtu potřebné kapacity baterie vyjdeme ze vztahu:

$$C_{acu} = \frac{A_{celk}}{U_{acu_jmen}} \cdot k \quad (29)$$

Kde:

C_{acu} – kapacita akumulátoru [Ah]

A_{celk} – energie potřebná pro jízdu [Wh]

U_{acu_jmen} – jmenovité napětí akumulátoru [V]

k – koeficient rezervy, udává 20 % rezervu pro degradaci akumulčních vlastností stárnutím akumulátoru a rezervu pro případ nevyčerpatelné zbytkové energie akumulátoru

Minimální potřebná kapacita baterie je potom:

$$C_{acu} = \frac{538}{25,6} \cdot 1,2 = 25,2 \cong \mathbf{26\ Ah}$$

Pro stanovení potřebné kapacity baterie není třeba pouze znalost energetické náročnosti trasy, která byla nyní vypočítána, ale je nutno brát v úvahu i výkonové nároky pohonu. V kapitole 4.3 jsou uvedeny proudové nároky na použité baterie v daných pracovních bodech. Při návrhu je nutno brát v úvahu nejextrémnější možný případ, tedy proudový odběr 40A oběma trakčními motory dohromady. Při volbě optimální kapacity baterie by se mělo vycházet z teoretického jednohodinového režimu odběru 40A.

Jako optimální kapacita trakční baterie byla zvolena **40Ah**.

4.5 Ověření dojezdu pro danou kapacitu trakční baterie (acu-packu)

Ověření dojezdu spočívá v grafickém vyjádření úbytků energie z baterie o známé kapacitě. Jelikož byla zvolena kapacita baterie s výraznou rezervou pro ujetí dané vzdálenosti, jako důkaz dojezdu pro konkrétní trasu by tento fakt stačil. Nicméně, pro lepší představu energetických pochodů je grafická interpretace názornější.

Nejprve je třeba určit maximální množství energie zvolené baterii s kapacitou 40Ah a jmenovitým napětím 25,6V.

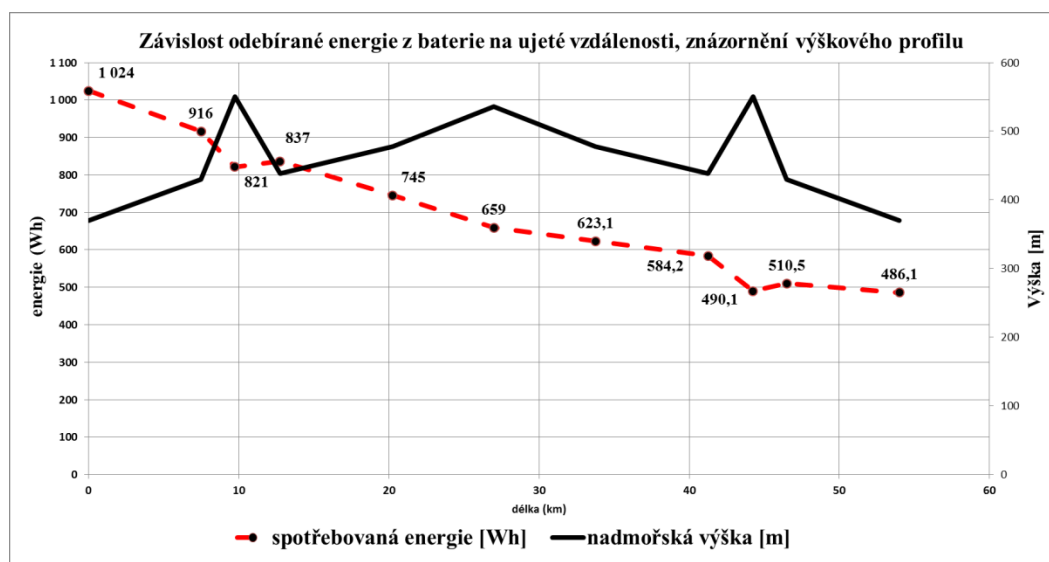
$$A_{max} = C_{acu} \cdot U_{acu_jmen} \quad (30)$$

Kde:

A_{max} – energie plně nabité trakční baterie [Wh]

Potom:

$$A_{max} = 40 \cdot 25,6 = 1024Wh$$



Obrázek 12 - Závislost odebrané energie z trakční baterie na ujeté vzdálenosti

Na obrázku č. 12 je vyobrazena závislost odebrané energie z plně nabitého akumulátoru s energií 1024Wh v závislosti na ujeté dráze dané výškovým profilem. Z grafu je zřejmé, že

se zvyšujícím stoupáním terénu energie v akumulátoru klesá rychleji, než v případě stoupání méně značného. Významný vliv na tvar křivky spotřeby mají též již zmiňované vozidlové odpory, traťové odpory a rychlost vozidla. Ve třetím a devátém úseku zleva je možno sledovat nízké procento rekuperace.

4.6 Výběr konkrétního modelu článku trakční baterie (acu-packu)

Pro účely experimentálního elektromobilu byly vybrány baterie od celosvětově známého výrobce Li-pol baterií Thunder-Sky, konkrétně model TS-LFP40AHA. Cílovými zákazníky uvedené firmy jsou převážně automobilové závody průmyslově vyspělých zemí, jejich acu-packy se instalují do sériově vyráběných osobních vozidel i autobusů. Dostupné propagační materiály firmy dokazují vysokou provozní bezpečnost produktů při nejrůznějších externích vlivech, například při zkratu, přetížení, mechanickém poškození, apod.



Obrázek 13 - Použitý typ článku

Tabulka 6- Parametry jednoho článku TS-LFP40AHA

Veličina	Hodnota
Jmenovité napětí	3,2V
Kapacita	40Ah +/- 5%
Rozsah pracovního napětí (80% nabití)	2,8V-4V
Prahové napětí nevratného zničení	2,5V
Maximální nabíjecí napětí	4,2V
Optimální vybíjecí proud	<0,5C; <20A
Maximální vybíjecí proud (max 15min)	<3C; <120A
Špičkový vybíjecí proud (max 5s v 1min)	<20C; <800A
Optimální nabíjecí proud	<0,5C; 20A
Maximální nabíjecí proud (nutný teplotní monitoring)	<3C; <120A
Maximální provozní teplota článku	80°C
Rozměry š x v x h	116x46x183mm +/- 2mm
Hmotnost	1,6kg +/-150g

V tabulce č.6 jsou uvedeny stručné charakteristiky vybraného modelu článku. Mezi nejdůležitější parametry patří jmenovité napětí, kapacita a rozsah pracovního napětí. Uvedené tabelované údaje jsou převzaty z firemních katalogů [4], kde výrobce počítá s osmdesátiprocentním nabitím, tedy nabitím na maximální napětí 4V. Další údaje bude vhodné zohlednit při návrhu nabíječe trakčních baterií a systému kontroly stavu baterií, jehož úkolem bude monitorování krajních provozních parametrů.

Hodnoty vybíjecích proudů též korespondují s nároky dané aplikace. Dle pracovních bodů je vyžadován krátkodobý odběr v délce 10s o hodnotě 40A (1C) a dlouhodobý odběr 22,6A (0,57C). Z výše uvedených charakteristik lze těchto požadovaných parametrů bezpečně dosáhnout. Proud 40A by měl být schopen akumulátor dle dostupných údajů dodat dostatečně dlouho, neboť výrobce garantuje odběr 120A po dobu 15 minut. Proud 22,6A je sice mírně nad limitem optimálního odběru, ale ve spolupráci s dozorčím systémem BMS lze tuto hodnotu brát jako vyhovující.

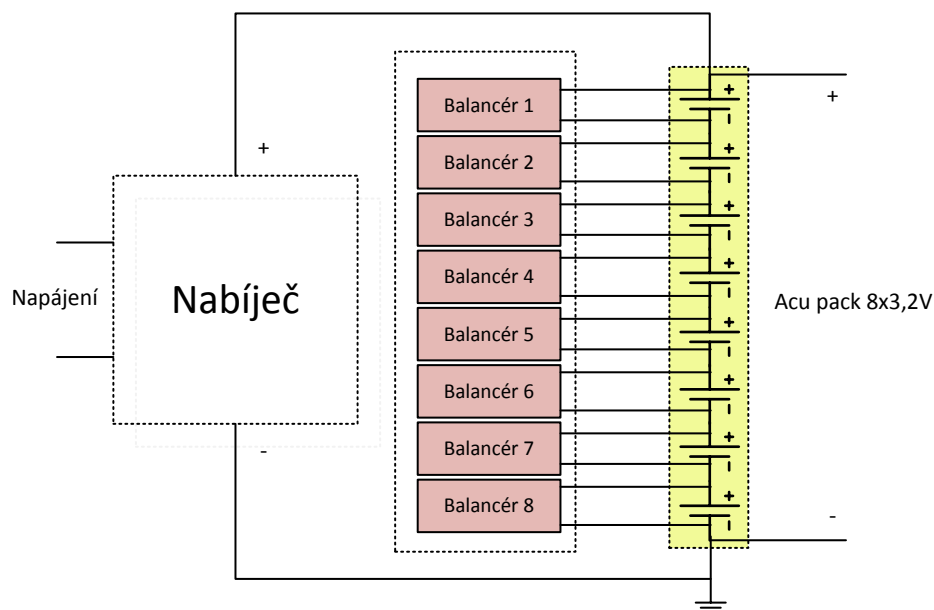
5 NÁVRH SYSTÉMU NABÍJENÍ TRAKČNÍCH BATERIÍ

5.1 Požadavky na nabíječ trakčních baterií

Pro účely akumulace energie pro studentský elektromobil byly vybrány lithium polymerové články, které jsou seskupeny pro dosažení daného pracovního napětí do acu-packu. Jednotlivé články jsou zapojeny do série.

V kapitole 4.6 byly popsány krajní provozní hodnoty vybraného typu modelu Li-pol akumulátoru. Jedná se tedy o minimální pracovní napětí 2,8V na článek a maximální provozní napětí 4,25V. Nabíječ pro tento typ baterie by měl být výhradně typu IU. Typická nabíjecí charakteristika je zobrazena na obrázku č. 9. Baterie by měla být nejprve nabíjena doporučeným konstantním proudem. Po dovršení maximálního napětí 4,25V na článek by měl trakční nabíječ automaticky plynule přejít do režimu konstantního napětí, tedy U.

Důležitým předpokladem pro dlouhou životnost baterie je kvalita nabíjení každého článku acu-packu. Každý článek by měl být nabíjen výhradně dle dané IU charakteristiky tak, aby nebyly překročeny jeho provozní parametry. To znamená, že při aktuálním nabíjení charakteristikou I nesmí být překročen nastavená velikost proudu a při charakteristice U nesmí být překročeno maximální dovolené napětí 4,25V. Provozními parametry je dále míněna teplota článku. V případě zapojení článků v sérii a nabíjení nabíječem celého acu-packu vzniká riziko nestejnomyšlného nabití jednotlivých článků. To je způsobeno byť minimálními rozdíly ve stavu článků. Je tedy nutno napětí každého článku monitorovat a v případě plného nabití tento článek přemostit a vyřadit tak z nabíjecího procesu. Obvody, které se pro tuto funkci používají, nazýváme balancéry. Nabíjecí systémy využívající pro vyrovnaní nabití jednotlivých sériových článků balancéry patří v dnešní době mezi nejrozšířenější varianty řešení. K nabíjení acu-packu se díky vyrovnávacím obvodům využívá pouze jednoho nabíječe, tímto se tato varianta jeví jako ekonomicky výhodnější. Na níže uvedeném obrázku č. 14 je vyobrazeno principiální schéma nabíječe s balancéry.

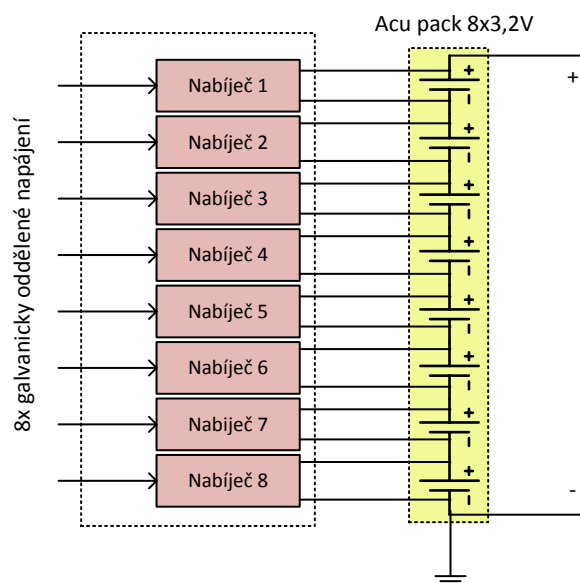


Obrázek 14 - Principiální schéma nabíječe s balancéry

Další možností, jak jednotlivé články sériové kombinace stejnoměrně nabít je nabíjení každého článku samostatným nabíječem. Jedná se o variantu v praxi méně využívanou převážně díky složitější obvodové koncepci a větším nárokům na napájecí zdroj. Hlavní výhodou je řízené nabíjení každého elementárního článku přesně dle nastavených charakteristik. Každý článek je monitorován jak z hlediska elektrických parametrů, tak i tepelných. V případě překročení limitní hodnoty jakéhokoli parametru je nabíjení ukončeno. Nabíjení pokračuje po odeznění poruchového stavu či po restartu celého systému.

Dle principiálního schématu dle obrázku č. 15 je patrné, že každý z nabíječů musí být od ostatních nabíječů galvanicky oddělen. V případě porušení izolačního stavu mezi jednotlivými nabíječi by došlo k tvrdému zkratu. Galvanicky oddělený musí tím pádem být i napájecí zdroj.

I přes uvedenou konstrukční náročnost je vyhodnocen tento typ nabíjecího systému pro experimentální vozidlo jako vhodný. Na vozidle bude tedy využit nabíjecí systém využívající pro nabíjení trakčních baterií osm nezávislých nabíječů napájených z galvanicky odděleného síťového zdroje.



Obrázek 15 - Principiální schéma nabíječe s individuálním nabíjením

Sumarizace požadavků na řídicí obvod elementárního nabíječe (1-8):

- Charakteristika IU
- Možnost nastavení nabíjecího proudu
- Vstup pro externí vypnutí
- Vysoká účinnost
- Monitoring limitních elektrických parametrů
- Monitoring teploty článku
- Možnost nabíjet 1 článek
- Možnost nastavit nabíjecí proud
- Široký rozsah napájecího napětí
- Ochrana proti zkratu

Výrobou jednoúčelových nabíjecích obvodů s danými charakteristikami se zabývá množství výrobců. Rozhodujícím parametrem je splnění výše uvedených požadavků, ověřená spolehlivost, dostupnost a v neposlední řadě cena. Pro účely experimentálního elektromobilu se jako nejvhodnější varianta jeví jednoúčelový nabíjecí obvod od firmy Linear Technology s typovým označením LTC4002.

5.2 Popis obvodu LTC4002

5.2.1 Základní parametry obvodu

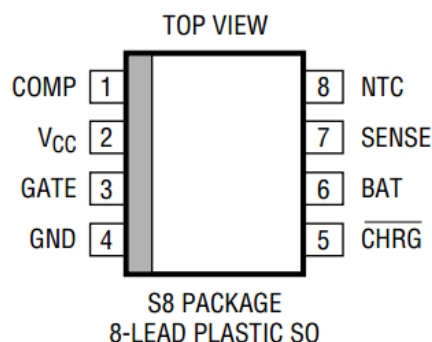
Nabíjecí obvod amerického výrobce Linear Technology patří do kategorie cenově dostupných a parametrově vhodných kandidátů, hodících se pro aplikaci experimentálního vozidla. Obvod je vyráběn ve dvou variantách, pro nabíjení jednoho článku (maximální napětí 4,2V) či pro nabíjení dvou článků (maximální napětí 8,4V). Ve své podstatě se jedná o řídicí obvod snižujícího spínaného zdroje s příslušnou výstupní charakteristikou, monitoringem, indikací a ochranami. Spínací frekvence nabíječe je interně nastavena na 500kHz, regulace výstupního proudu je provedena formou pulsně šířkové modulace. Pro nastavení nabíjecího proudu je využito externího snímacího rezistoru, přičemž přesnost nastavení proudu se odvíjí od toleranční kategorie použitého rezistoru. Zásadní výhodou popisovaného obvodu je absence interně zabudovaného spínacího tranzistoru, který by jinak omezoval proudové možnosti celého nabíječe. Tímto lze nastavit takřka libovolně veliký nabíjecí proud dle dispozic použitých akumulátorů.

Stručné charakteristiky obvodu:

- Široký rozsah napájecího napětí 4,7 – 22V
- Vysoká účinnost
- Detekce konce nabíjení
- Nabíjecí charakteristika IU
- Možnost nastavení nabíjecího proudu
- Přesnost nabíjecího napětí $\pm 1\%$
- Přesnost nabíjecího proudu $\pm 5\%$
- Nabíjecí konzervační režim při dlouhodobě připojeném nabíječi
- Šetrný mód nabíjení pro hluboce vybité akumulátory
- Vyhodnocení teploty ze snímačů

5.2.2 Funkce jednotlivých pinů

Na níže uvedeném obrázku č. 16 je uveden popis výstupních vývodů (pinů) obvodu. Pro uvedenou aplikaci byl zvolen obvod v SMD pouzdře s označením S8.



Obrázek 16 - Popis vývodů SMD pouzdra obvodu

Funkční popis jednotlivých pinů:

COMP, PIN1 (Kompenzace):

Tento pin slouží k pozvolnému zapnutí a vypnutí obvodu. Mezi tento pin a napájecí zem je nutno pro správnou funkci obvodu připojit sériovou kombinaci rezistoru a kondenzátoru. Doporučená hodnota kondenzátoru je 0,47 uF a odporu 2k2 Ω . Nabíjecí cyklus začíná v okamžiku, kdy se na pinu obvodu objeví napětí větší než 800mV. Toto napětí vznikne nabíjením uvedeného kondenzátoru konstantním proudem 100uA z interního proudového zdroje. Zdroj je aktivován, jestliže není interní smyčkou zjištěno nabití akumulátoru. Velikostí kondenzátoru lze měnit časovou konstantu a tím tak zpozdít oživení obvodu. V případě poklesu napětí pod 360mV se obvod automaticky vypne.

V_{CC}, PIN2 (Kladné napájecí napětí):

Tento pin slouží k přímému připojení napájecího napětí. Rozsah napájecího napětí je dán minimální hodnotou, která je o 0,5V vyšší než napětí baterie, a maximální hodnotou 22V. Výrobce doporučuje mezi napájecí pin a zem vložit filtrační (respektive akumulační) nízko impedanční kondenzátor o hodnotě 10uF a keramický 100nF kondenzátor pro zvýšení tvrdosti napájení a minimalizaci rušení.

GATE, PIN3 (Výstup pro gate tranzistoru):

Jedná se o PWM výstup k řídicí elektrodě spínacího P-MOSFET tranzistoru.

GND, PIN4 (Zem):

Na tento pin je připojena napájecí zem. Při pájení tohoto pinu je nutno dodržet vysokou kvalitu pájení, neboť pin slouží i jako chladič interních polovodičových struktur (proudových zdrojů, MOSFET budiče atd.). Při návrhu plošného spoje je výrobcem z důvodů dostatečného odvodu tepla doporučeno pájecí měděnou plošku kolem pinu dostatečně rozšířit.

CHRG neg., PIN5 (Indikace stavu nabití baterie):

V případě korektního nabíjení je tento pin přímo spojen s napájecí zemí prostřednictvím interního N-MOSFET tranzistoru. Po připojení indikační LED na tento pin lze stav nabití opticky signalizovat. Pokud se nabíjecí cyklus přiblíží ke svému konci, je na pin připojen proudový zdroj, přičemž hodnota generovaného proudu je 25uA. Po celkovém dokončení nabíjecího cyklu se na pinu objeví vysoká impedance, interní tranzistor a proudový zdroj je odpojen.

Tento pin lze využít k třístavové indikaci stavu nabití případnému nadřazenému mikrokontroléru. Výstup pinu CHRГ je zpravidla připojen na napěťový dělič, ze kterého jsou snímány příslušné úbytky napětí analogově digitálním převodníkem.

BAT, PIN6 (Snímání napětí baterie):

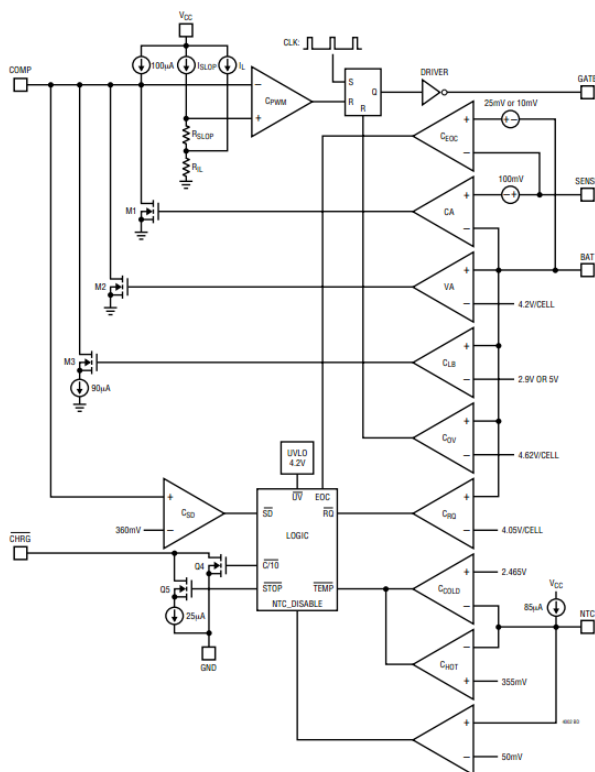
Na tento pin je přivedeno napětí nabíjené baterie za účelem jeho sledování. Pomocí interního napěťového děliče je vstupní napětí upraveno tak, aby byly v příslušných fázích nabití učiněny dané akční zásahy. Tímto je míněno ovládání výstupního pinu COMP, ukončení nabíjení, apod. Dle výrobce je doporučeno mezi tento pin a zem zapojit filtrační nízko impedanční kondenzátor nejméně o hodnotě 22uF, popřípadě o jiné hodnotě dle nabíjecího proudu.

SENSE, PIN7 (Snímání nabíjecího proudu):

Snímání nabíjecího proudu je v případě zvoleného nabíjecího obvodu uskutečněno pomocí snímacího rezistoru. Snímací rezistor je zapojen mezi piny BAT a SENSE, tedy v cestě nabíjecího proudu. Vlivem průchodu proudu se na rezistoru vytvoří příslušný úbytek napětí, který je obvodem snímán a vnitřní regulační smyčkou regulován na konstantní hodnotu. Maximální nabíjecí proud je dán vztahem $I_{\max} = U_{\text{sense}} / R_{\text{sense}}$, přičemž $U_{\text{sense}} = 100\text{mV}$.

NTC, PIN8 (Snímání teploty baterie):

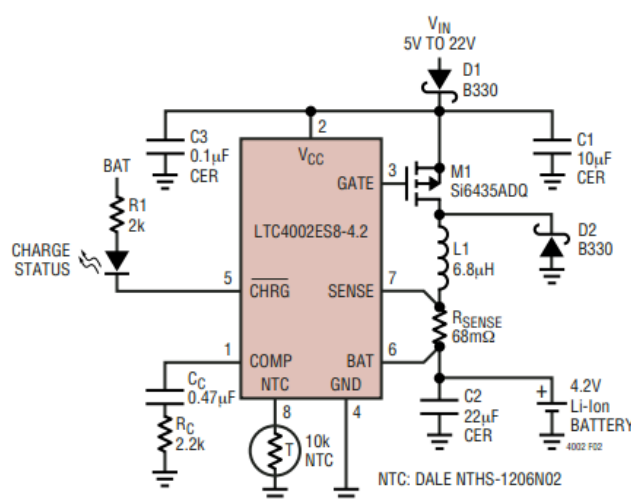
Pin s označením NTC primárně slouží pro připojení termistoru s negativním teplotním koeficientem. Termistor se zpravidla připojuje mezi pin NTC a GND, jeho hodnota by měla být dle katalogového listu $10\text{k}\Omega$. Delším provozem či při větším zatížení roste teplota akumulátoru. Vlivem zvyšující se teploty dochází ke změně elektrického odporu připojeného termistoru. Tímto termistorem prochází konstantní proud, jenž je příčinou sledovaného úbytku napětí. Pokud sledovaný úbytek poklesne pod hodnotu 350mV (50°C), je vyhodnoceno nadměrné oteplení článku a nabíjení je zastaveno. Tuto funkci plní termistor i pro provoz v nízkých teplotách. Jestliže je vyhodnocen úbytek napětí na termistoru větší než $2,465\text{V}$ (0°C), je nabíjení též zastaveno. Vlivem nízké teploty dochází k rapidnímu snížení kapacity baterie, nabíjení by bylo neúčinné. Pin s označením NTC lze využít pro externí spínání nabíjecího obvodu mikrokontrolérem.



Obrázek 17 - Blokové schéma nabíjecího obvodu LTC4002

5.2.3 Principiální funkce obvodu

Na níže uvedeném obrázku je uvedeno doporučené zapojení dle katalogového listu obvodu. Jedná se o zapojení, jenž disponuje nabíjecím proudem až 1,5A. Tato hodnota proudu je pro aplikaci našeho vozidla nedostatečná, tudíž je nutno provést změny v obvodovém zapojení.



Obrázek 18 - Doporučené zapojení nabíjecího obvodu

Napájecí napětí je přivedeno přes Schottkyho diodu na spínací P-MOSFET tranzistor. Dioda je před obvodem umístěna jako ochrana proti případnému přepólování a k zamezení průniku proudu z nabíjené baterie do napájecího zdroje (v případě poruchy spínacího tranzistoru). Před tranzistorem jsou umístěny akumulární a filtrační kondenzátory, které mají za úkol zvýšit tvrdost napájení a zajistit jeho filtraci. Tranzistor a cívka s uzemněnou Schottkyho diodu tvoří snižující měnič. Pokud je spínací tranzistor sepnut, prochází elektrický proud akumulující cívkou do zátěže, přičemž výstupní kondenzátor se nabíjí. Jakmile se spínací tranzistor rozezne, elektrický proud dále vlivem indukčnosti zátěží protéká, akumulární kondenzátor se též vybíjí. Množství naakumulované energie v cívce závisí na velikosti střídavého spínání tranzistoru. Výstupní proud je snímán rezistorem a napětí filtrováno elektrolytickým kondenzátorem. Nabíjecí proces začíná ve chvíli, kdy je na pin V_{CC} připojeno napětí minimálně o 250mV větší než napětí akumulátoru. Pokud je nabíjecím obvodem vyhodnoceno napětí článku menší než 2,9V, je zahájeno šetrné nabíjení proudem o velikosti desetiny maximálního nabíjecího proudu. Tímto režimem je akumulátor nabíjen po dobu 30

minut. Pokud po tuto dobu napětí akumulátoru nevzroste nad kritickou hodnotu 2,9V, je nabíječem článok vyhodnocen jako vadný a nabíjecí proces se předčasně ukončí. V případě zdravého článku je po překročení napěťové hranice 2,9V zahájeno nabíjení maximálním nabíjecím proudem. Tento režim je označován charakteristikou „I“. Článek se nabíjí konstantním proudem a napětí na jeho svorkách roste. Charakteristika „I“ začne přecházet v charakteristiku „U“, tedy konstantního napětí, v okamžiku přiblížení svorkového napětí článku napětí hodnotě 3,9V, viz měřené charakteristiky v kapitole týkající se validace. Jedná se tedy o sklopenou nabíjecí charakteristiku U.

Nabíjecí obvod začne postupně snižovat svůj proud z maximální hodnoty. O tomto stavu fáze nabíjení nás informuje indikační LED dioda svým zhasnutím, neboť je napájena pouze proudovým zdrojem, jehož výstupní proud má velikost 25uA. Po zhasnutí LED diody je inicializován interní časovač, který nabíjecí charakteristiku U aktivuje na dobu třech hodin. Po uplynutí daného časového úseku je nabíjení článku ukončeno. V případě stálého připojení nabíječe na článek je opětovné nabíjení případně aktivováno při poklesu napětí pod 4,05V. Po odpojení napájecího napětí přejde nabíječ do režimu spánku.

Tabulka 7 - Nabíjecí proces

Napětí článku	Nabíjecí proud
< 2,9	1/10 maximálního nastaveného proudu
2,9 - 3,9	Maximální nastavený proud
3,9 – 4,2	Postupný pokles

Při nabíjení článku vyšším proudem je možné sledovat zvýšení jeho teploty. Pokud by teplota článku přesáhla mez 50 °C, hrozí jeho poškození či v krajních případech exploze. Je tedy nutno teplotu článku monitorovat a v případě nadnormativního oteplení učinit akční zásah. Pro tento účel je nabíjecí obvod vybaven vstupem pro NTC termistor, který lze na článek připevnit. V případě překročení teploty změní termistor svůj odpor, tento stav je vyhodnocen nabíjecím obvodem a nabíjecí cyklus je předčasně ukončen. Tuto funkci lze zablokovat spojením pinu s GND.

5.3 Obvodový návrh nabíječe

5.3.1 Volba nabíjecího proudu

V kapitole 4.6 byly uvedeny elektrické a mechanické parametry použitého akumulátoru. Dle tabulky č. 6 je doporučena velikost nabíjecího proudu o hodnotě do 20A (0,5C). Toto je hodnota proudu, kterou není záhodno překračovat, neboť by docházelo k nadměrnému oteplování článku. Pro účely experimentálního vozidla je zvoleno šetrné nabíjení proudem o velikosti 4A. Důvodem výběru právě tohoto proudu jsou nároky na napájecí zdroj. Pokud by byl zvolen nabíjecí proud o větší velikosti, zkrátila by se sice doba nabíjení, ale rapidně by vzrostly nároky na dimenzování napájecího zdroje. S dimenzováním souvisí i jeho výsledná hmotnost, přičemž je snahou hmotnost vozidla co nejvíce minimalizovat.

Pro celkovou dobu nabíjení acu-packu platí:

$$t_{nabíjení} = \frac{C_{acu}}{I_{max_nab}} = \frac{40}{4} = 10h \quad (31)$$

Celková doba nabíjení plně vybitého acu-packu bude trvat tedy 10 hodin, přičemž se tímto počítá s nočním nabíjením vozidla.

Dále je nutno vypočítat hodnotu snímacího odporu pro maximální nabíjecí proud 4A.

$$R_{sense} = \frac{U_{sense}}{I_{max_nab}} = \frac{0,1}{4} = 0,025\Omega \quad (32)$$

Výkonová ztráta na uvedeném snímacím rezistoru je potom dána výrazem:

$$P = R_{sense} \cdot I_{max_nab}^2 = 0,025 \cdot 4^2 = 0,4W \quad (33)$$

5.3.2 Výběr spínacího tranzistoru

Při výběru spínacího prvku je kladen důraz na dostatečné proudové a napěťové dimenzování, na malou kapacitu řídící elektrody a tím spojenou rychlost spínání. Je nutno si uvědomit, že spínací frekvence dosahuje hodnoty 500kHz, spínací ztráty by použitím tranzistoru s vysokou kapacitou zbytečně vzrostly. Tranzistor by měl vydržet vysoký pulsní proud a krátkodobé napěťové špičky. Dalším rozhodujícím parametrem je dostatečně malé

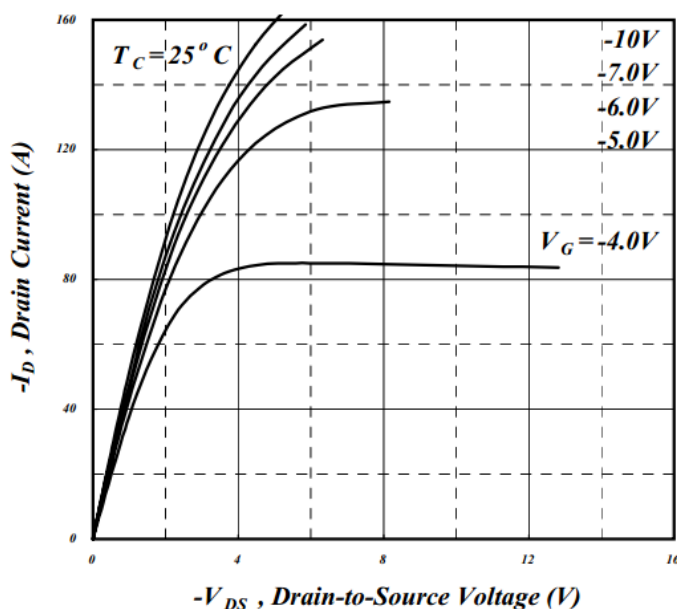
spínací napětí V_G , přičemž je snahou zvolit takový tranzistor, aby byl odpor v sepnutém stavu R_{DSon} co nejmenší. Při napájení nabíječe napětím 12V DC je výstupní hodnota napětí budiče P-mosfet tranzistoru pouze 4V. Tato hodnota budícího napětí znamená pro většinu běžných mosfet tranzistorů vysoký odpor v propustném stavu. Je tedy nutno vybrat takový tranzistor, který bude vyhovovat všem uvedeným kritériím.

Při návrhu nabíječe padla volba na tranzistor s označením AP9579GP od firmy Advanced Power Electronics Corp. Na níže uvedených ilustracích jsou uvedeny maximální hodnoty důležitých veličin, včetně výstupní charakteristiky.

Absolute Maximum Ratings

Symbol	Parameter	Rating	Units
V_{DS}	Drain-Source Voltage	-60	V
V_{GS}	Gate-Source Voltage	± 20	V
$I_D@T_C=25^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, V_{GS} @ 10V	-45	A
$I_D@T_C=100^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, V_{GS} @ 10V	-28.7	A
I_{DM}	Pulsed Drain Current ¹	-160	A
$P_D@T_C=25^\circ\text{C}$	Total Power Dissipation	89.3	W
$P_D@T_A=25^\circ\text{C}$	Total Power Dissipation	2	W
T_{STG}	Storage Temperature Range	-55 to 150	$^\circ\text{C}$
T_J	Operating Junction Temperature Range	-55 to 150	$^\circ\text{C}$

Obrázek 19 - Krajní parametry tranzistoru



Obrázek 20 - Výstupní charakteristika tranzistoru

Dle výše uvedené výstupní charakteristiky tranzistoru vyplývá, že v případě řídicího napětí -4V bude na tranzistoru při průchodu proudu 4A vytvořen úbytek napětí o hodnotě řádově 100mV. Tuto hodnotu úbytku lze považovat za dostatečně malou a pro uvažovanou aplikaci vhodnou.

5.3.3 Výběr vhodné akumulární tlumivky

Jak již bylo v úvodu kapitoly 5 řečeno, nabíjecí obvod spolu s nezbytným hardwarem tvoří spínaný nabíječ, jenž pracuje jako snižující step-down měnič s regulací výstupního proudu. Stěžením prvkem měniče, respektive nabíječe, je akumulární tlumivka. Akumulární tlumivka je prvek, jenž akumuluje elektrickou energii v době sepnutí spínacího prvku a v době rozepnutí tuto energii předává zátěži. Velikostí tlumivky je ovlivněna maximální hodnota výstupního proudu, popřípadě jeho zvlněním.

Indukčnost akumulární tlumivky se vypočítá dle vztahu:

$$L = \frac{U_{\max_clanku}}{f_{spínací} \cdot \Delta i_{L\%} \cdot I_{\max_nab}} \cdot \left(1 - \frac{U_{\max_clanku}}{U_{\max_nap}} \right) \quad (34)$$

Kde:

L – indukčnost akumulární tlumivky [H]

$U_{\max_clanku}$ – maximální napětí nabíjeného článku [V]

$f_{spínací}$ – spínací frekvence tranzistoru [Hz]

$\Delta i_{L\%}$ – maximální požadované procentuální zvlnění proudu [–]

$I_{\max_nab}$ – maximální nabíjecí proud [A]

$U_{\max_nap}$ – maximální hodnota napájecího napětí [V]

Po dosazení lze vypočítat potřebnou hodnotu indukčnosti, přičemž maximální napětí článku je 4,2V, spínací frekvence 500kHz, maximální zvlnění proudu 50%, velikost nabíjecího proudu 4A a maximální napájecí napětí 22V.

$$L = \frac{U_{\max_clanku}}{f_{spínací} \cdot \Delta i_{L\%} \cdot I_{\max_nab}} \cdot \left(1 - \frac{U_{\max_clanku}}{U_{\max_nap}}\right) = \frac{4,2}{500 \cdot 10^3 \cdot 0,5 \cdot 4} \cdot \left(1 - \frac{4,2}{22}\right) =$$

$$= 3,4 \cdot 10^{-6} H = 3,4 \mu H$$

Z výše uvedeného vztahu vychází minimální požadovaná indukčnost akumulární tlumivky 3,4μH. Vzhledem k dostupnosti elektronických součástek byla zvolena tlumivka s indukčností 4μH.

Pro výsledné zvlnění proudu při použití zvolené tlumivky platí následující vztah:

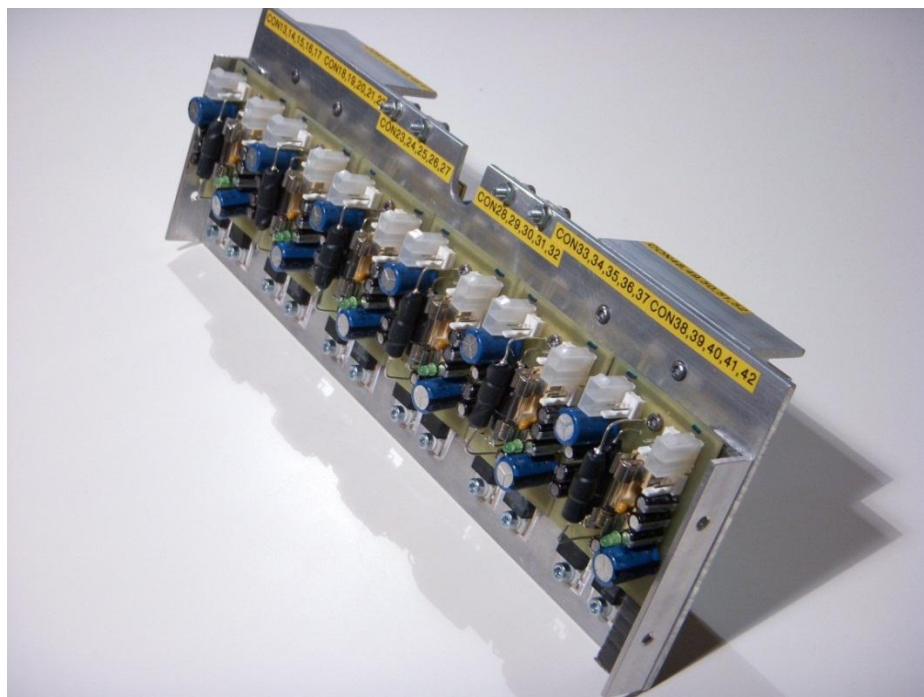
$$\Delta i_L = \frac{U_{\max_clanku}}{f_{spínací} \cdot \Delta L} \cdot \left(1 - \frac{U_{\max_clanku}}{U_{\max_nap}}\right) = \frac{4,2}{500 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 10^{-6}} \cdot \left(1 - \frac{4,2}{22}\right) = 1,7 A \quad (35)$$

5.4 Realizace nabíječe

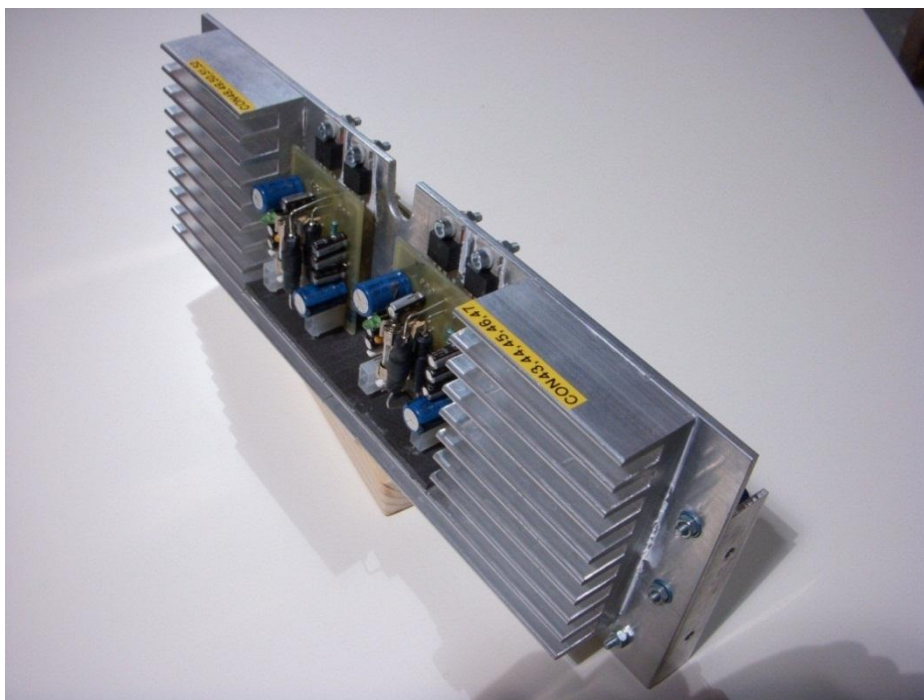
Realizace nabíječe proběhla ve dvou fázích. Nejprve bylo vytvořeno obvodové zapojení založené na doporučeném zapojení nabíjecího obvodu se zohledněním potřebných výstupních parametrů nabíječe. Pro vytvoření elektrických schémat a následný návrh plošných spojů byl využit specializovaný software Eagle verze 6.2.0. Detailní soubor vytvořených schémat nabíječe jako celku je uveden v příloze této diplomové práce.

Po návrhu plošných spojů následovala výroba a osazení jednotlivých nabíječových jednotek pro každý článek acu-packu, dále pak testování, ladění a měření. Každý z nabíječů obsahuje dva hlavní polovodičové prvky, tranzistor a diodu, u kterých se předpokládá vysoký ztrátový výkon daný jak Joulovými ztrátami, tak ztrátami spínacími. Bylo tedy nutno veškeré jednotky umístit na hliníkový chladič. Chladič je upraven dle dispozic instalačního boxu a připraven pro doplnění o přídavné aktivní chlazení. Pasivní součástky byly vybírány s ohledem na vysokou spínací frekvenci, tepelné namáhání a životnost. Pro minimalizaci emise rušení jsou na deskách plošných spojů vytvořeny zemní polygony, které jsou včetně silových cest dodatečně pocínovány.

Na níže uvedených obrázcích je vyobrazen celý nabíječ jako kompletní jednotka s chladičem polovodičových součástek.



Obrázek 21 - Nabíječ trakčních baterií - pohled na dílčí nabíječe šesti článků



Obrázek 22 - Nabíječ trakčních baterií - pohled ze strany žebrovaného chladiče

6 NÁVRH SÍŤOVÉHO SPÍNANÉHO ZDROJE

6.1 Požadavky na síťový zdroj, vlastnosti jednotlivých koncepcí

6.1.1 Vlastnosti různých druhů síťových zdrojů

Výše uvedené kapitoly popisují postupný výběr komponent vozidla dle daných provozních požadavků. Nejprve byly vybrány vhodné baterie, které musejí být nabíjeny vhodným nabíječem. V kapitole č. 6 je uveden popis návrhu další komponenty zdrojové soustavy vozidla a tou je síťový zdroj.

Požadavkem na vozidlo je univerzální možnost nabíjení, tedy nabíjení z rozvodné sítě 230V AC (popřípadě 90-265V AC), ke které má takřka každý v domácnosti přístup. Snahou při návrhu vozidla bylo, aby při případném nabíjení uživateli stačil pouze síťový kabel a volná domovní zásuvka. Tedy, veškerou elektroniku pokud možno umístit přímo na vozidlo, tedy i včetně nabíječe a síťového zdroje.

Při snaze splnit výše uvedené požadavky je nutno jednotlivé komponenty navrhovat tak, aby jejich hmotnost byla co nejmenší. Hmotnost baterií se odvíjí od jejich chemického složení a celkové koncepce. V tomto ohledu byly vybrány, jak již bylo v příslušných kapitolách uvedeno, baterie s velice výborným poměrem hmotnost / kapacita. Nabíječ trakčních baterií má hmotnost oproti bateriím zanedbatelnou. Další zásadní komponentou, co se hmotnosti týče, je síťový zdroj.

V současné době lze vybrat ze dvou typů síťových zdrojů. Jedná se buď o zdroje lineární, využívající principu transformace síťového napětí a proudu o frekvenci 50Hz na jinou hodnotu napětí a proudu pomocí transformátoru. Hmotnost lineárních zdrojů závisí na potřebném disponibilním výkonu. V případě experimentálního vozidla byla vytvořena kalkulace hmotnosti transformátoru, přičemž výsledná hmotnost dosahovala hodnoty 3,5 kg. Další možností je použít takzvané zdroje spínané (v literatuře se lze setkat i s názvy „(im)pulzní zdroj“, popř. „SMPS“ z anglického „switching mode power supply“). Výhodou spínaných zdrojů je to, že síťové napětí a proud o frekvenci 50Hz se nejprve přemění na napětí a proud o stejné velikosti, ale o mnohonásobně vyšší frekvenci. Dále následuje transformace, přičemž použitý transformátor má několikanásobně menší rozměry, potažmo i hmotnost. Tímto se dostáváme k hlavní výhodě spínaného zdroje, na popud které byla tato

koncepce síťového zdroje pro experimentální vozidlo zvolena jako vhodná. Hmotnost spínaného zdroje byla dle potenciálních komponent odhadnuta na maximální hodnotu 1kg.

6.1.2 Požadavky na síťový spínaný zdroj

Zvolená koncepce nabíjecího systému a uspořádání jednotlivých článků v acu-packu určuje požadavky na výstupní parametry spínaného zdroje. Nejdůležitějšími elektrickými parametry jsou výstupní napětí a výstupní proud. Dále by měl zdroj disponovat osmi galvanicky oddělenými výstupy s danými elektrickými parametry.

Výstupní napětí napájecího zdroje by se mělo pohybovat v rozmezí 4,7-22V DC, což je dáno dovoleným napájecím rozsahem nabíjecích obvodů LTC4002. Velikost výstupního napětí jednoho výstupu zdroje byla zvolena na 12V. Důvodem volby právě tohoto napětí je snížení výstupního proudu napájecího zdroje oproti výstupnímu napětí 4,7V a dále možnost kolísání výstupního napětí napájecího zdroje bez omezení funkčnosti nabíječe.

Dále je nutno vypočítat potřebnou proudovou zatížitelnost jednoho výstupu zdroje.

Pro teoretický maximální výstupní výkon nabíječe jednoho článku platí:

$$P_{nab_vystup_max} = I_{max_nab} \cdot U_{max_clanku} = 4 \cdot 4,2 = 16,8W \quad (36)$$

Vypočtená hodnota výkonu 16,8W je označena jako teoretická z toho důvodu, že takto vysokého výstupního výkonu by nemělo být nikdy v provozu třeba. Při výstupním napětí 4,2 se nabíječ nachází v režimu charakteristiky U, dodávaný proud zcela jistě nebude dosahovat hodnoty maximální, viz charakteristika na obrázku č. 53.

Při znalosti teoretické účinnosti nabíječe 70% lze spočítat požadovaný výstupní proud z jedné větve zdroje (respektive vstupní proud nabíječe).

$$I_{zdroj} = \frac{P_{nab_vystup_max}}{U_{zdroj} \cdot \eta_{nab}} = \frac{16,8}{12 \cdot 0,7} = 2A \quad (37)$$

Z výše uvedených informací lze stanovit celkové požadavky na síťový napájecí zdroj:

- Univerzální napájecí napětí zdroje v rozsahu 90-265V AC
- Předpokládaná účinnost 80%
- Výstupní napětí 8 x 12V
- Výstupní proud 8 x 2A
- Galvanicky oddělené výstupní větve
- Výstupní výkon 192W – 8 x 24W
- Předpokládaný příkon 240W při účinnosti 80%

6.2 Volba topologie spínaného zdroje

Volbou topologie spínaného zdroje se rozumí volba typu samotného obvodového zapojení. Pro účely síťových spínaných zdrojů je nejhojněji využíváno některých z níže uvedených zapojení:

- Akumulující zapojení (typ Flyback)
- Topologie push-pull
- Topologie polomost
- Topologie plný most

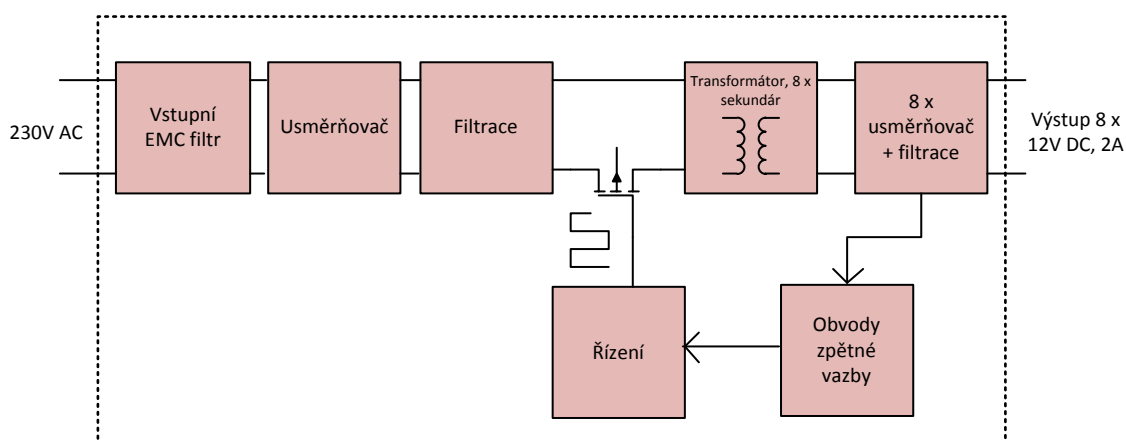
Pro účely experimentálního elektromobilu byla vybrána topologie typu Flyback, především z důvodů potřeby pouze jednoho spínacího prvku a z důvodu jednoduššího návrhu transformátoru.

6.2.1 Princip funkce spínaného zdroje typu Flyback

Principiální schéma spínaného Flyback zdroje je uvedeno na níže uvedeném obrázku č. 23. Vstupní síťové napětí je nejprve ošetřeno vstupním EMC filtrem, dále je usměrněno a vyfiltrováno filtračním kondenzátorem. Touto cestou je síťové střídavé napětí a proud přeměněno na stejnosměrnou formu. Stejnosměrné napětí je poté přivedeno na primární cívku transformátoru a spínací prvek, nejčastěji unipolární MOS-FET tranzistor. Na gate tranzistoru je připojen řídicí obvod, který tranzistor spíná povětšinou v módu PWM modulace. Při sepnutí tranzistoru protéká obvodem proud, jehož směrnice nárůstu je daná primární

indukčností transformátoru, ustálená hodnota je pak dána pouze ohmickým odporem primárního vinutí a připojených vodičů (popřípadě cestami). V době sepnutí tranzistoru se zvyšuje energie magnetického obvodu. Dobou sepnutí tranzistoru lze ovlivnit množství naakumulované energie a tím i výstupní napětí zdroje. V případě rozepnutí tranzistoru se proud přeruší, přičemž elektrická energie je touto změnou transformována na sekundární vinutí.

O stabilitu výstupního napětí se starají obvody zpětné vazby, které informaci o výstupním napětí předávají řídicímu obvodu.



Obrázek 23 - Blokové schéma spínaného Flyback zdroje

Moderní nadstavbou spínaných Flyback zdrojů jsou takzvané kvazi-rezonanční zdroje. Tyto zdroje pracují na stejném principu, jako klasické spínané zdroje, ale s tím rozdílem, že spínání tranzistoru probíhá ve fázi nulového proudu. Tímto jsou takřka eliminovány spínací ztráty tranzistoru a zdroj jako celek vykazuje vyšší hodnoty účinnosti. Kladný vliv má kvazi-rezonanční nadstavba i na EMI, tedy elektromagnetické rušení.

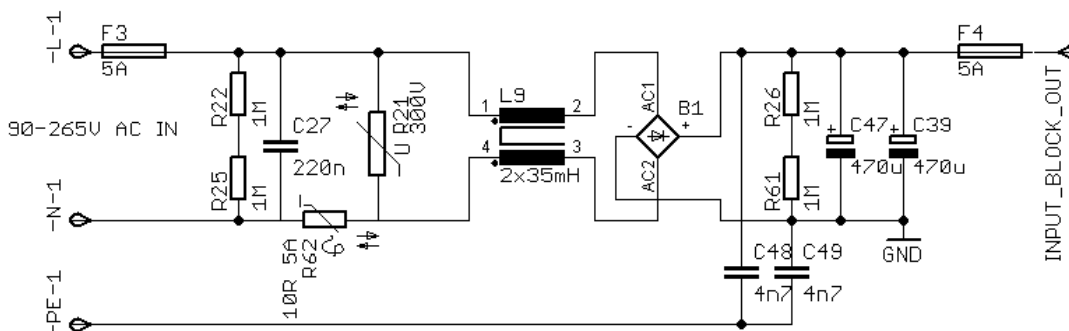
Pro účely experimentálního vozidla bude využito právě této moderní koncepce.

6.3 Teoretický a obvodový návrh spínaného zdroje

6.3.1 Návrh vstupního bloku zdroje

Vstupním blokem zdroje se rozumí vstupní EMC filtr, usměrňovač a filtrační kondenzátory. Vstupní blok upravuje síťové napětí tak, aby ho bylo možno poskytnout v jeho stejnosměrné formě transformátoru a spínacímu prvku.

Na níže uvedeném obrázku je vyobrazeno schéma vstupního bloku zdroje.



Obrázek 24 - Vstupní blok zdroje

Vstupní blok tvoří svorky pro připojení síťového napětí s příznačným označením L, N, PE. První komponentou bloku je tavná pojistka, která má za úkol chránit celý spínaný zdroj v případě poruchového stavu. Její hodnota 5A byla zvolena na základě dále uvedených výpočtů. Jelikož při zapnutí zdroje dochází k proudovému rázu, pojistka byla zvolena s pomalou vybavovací charakteristikou. Po vstupní pojistce následuje samotný blok EMC filtru. EMC filtr, tvořený kondenzátorem a cívkou, je v konstrukci spínaného zdroje velice důležitá část, neboť při spínání proudu primárního vinutí dochází ke značné emisi rušení. Pokud by toto rušení nebylo eliminováno v uvedeném filtru, mohlo by negativně ovlivňovat funkci citlivých zařízení zapojených v blízkosti spínaného zdroje. Filtr elektromagnetického rušení v uvedeném schématu představuje svitkový kondenzátor C27 o hodnotě 220nF a cívka o indukčnosti 2 x 35mH. Následující komponentou bloku je termistor R62, který má za úkol snižovat proudové rázy při zapnutí zdroje. Dále pak varistor R21, který ve vstupním bloku funguje jako přepětíová ochrana s prahovým vybavovacím napětím 420V AC. Pro vybití vstupního kondenzátoru jsou v bloku umístěny dva vybíjecí kondenzátory R25 a R22. Rezistory jsou zapojeny do série z důvodu rozdělení svorkového napětí v poměru 1:1, tím je přispěno ke zvýšení odolnosti jejich izolace proti napětíovému průrazu. Další komponentou je

usměrňovací můstek, který musí být též dimenzován na proud minimálně 5A a napětí 350V. Za usměrňovacím můstkem jsou umístěny hlavní filtrační kondenzátory C47 a C39. Tyto kondenzátory slouží pro zvýšení stability usměrněného napětí při rychlých spínacích dějích. Dodatečná pojistka za hlavními kondenzátory slouží jako rychlá ochrana řídicí části. Při případném zkratu by měla být vybavena vstupní pojistka. Přesto se v kondenzátorech nachází velké množství zbytkové energie, která by mohla řídicí část poškodit dodatečně.

Předpokládejme účinnost zdroje 80% a účiník $\cos\varphi=0,65$. Poté lze příkon zdroje vyjádřit vztahem:

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{\eta} = \frac{192}{0,8} = 240W \quad (38)$$

Pro zdánlivý příkon potom platí:

$$S_{in} = \frac{P_{in}}{\cos\varphi} = \frac{240}{0,65} \cong 369VA \quad (39)$$

Pro vstupní proud při nejnižším napájecím napětí 90V platí:

$$I_{in90V} = \frac{S_{in}}{U_{min}} = \frac{369}{90} = 4,1A \quad (40)$$

Pro vstupní proud při maximálním povoleném napětí platí identický vztah:

$$I_{in265V} = \frac{S_{in}}{U_{max}} = \frac{369}{265} = 1,39A \quad (41)$$

Z výše uvedených výpočtů vyplývá, že maximální provozní proud vstupním obvodem dosahuje hodnoty 4,1A, proto tedy byla zvolena hlavní pojistka o hodnotě 5A.

Při komplexním návrhu zdroje je nutno vypočítat hodnotu kapacity vstupních kondenzátorů.

Pro minimální stejnosměrné napětí na kondenzátorech platí:

$$U_{C47/C39_min} = (U_{min} \cdot \sqrt{2}) - U_{usměřňovač} = (90 \cdot \sqrt{2}) - 2 = 125,3V \quad (42)$$

Kde:

$U_{usměřňovač}$ – napěťový úbytek na usměřňovači [V]

Potom pro potřebnou energii vstupních kondenzátorů platí:

$$E_{C47+C39} = \frac{P_{out}}{2 \cdot f \cdot \eta} = \frac{192}{2 \cdot 50 \cdot 0,8} = 2,4Ws \quad (43)$$

Kde:

f – frekvence sítě [Hz]

Pro výslednou kapacitu filtračních kondenzátorů při zvlnění 15% platí:

$$C_{47} + C_{39} = \frac{2 \cdot E_{C47+C39}}{U_{C47/C39_min}^2 - (0,85 \cdot U_{C47/C39_min})^2} = \frac{2 \cdot 2,4}{125,3^2 - (0,85 \cdot 125,3)^2} = 1100\mu F \quad (44)$$

Při konstrukci vstupního obvodu byly použity dva kondenzátory o kapacitě 470uF, celková kapacita filtračních kondenzátorů činí tedy 940uF. Použité kondenzátory mají kapacitu menší než vypočtenou, spoléhá se na provoz při síťovém napětí 230V. V případě napájecího napětí 90V AC by snížená kapacity vedla ke zvýšení zvlnění napětí. Nejedná se tedy o následky zapříčiňující nefunkčnost zařízení či náchylnost k poruchám.

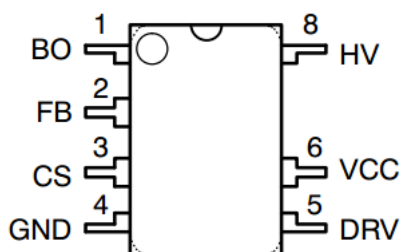
6.3.2 Výběr vhodného řídicího obvodu

Na českém i zahraničním trhu se v současné době nachází nespočet výrobců, kteří disponují produkcí méně či více inteligentních řídicích obvodů spínaných zdroji. Kritériem pro výběr vhodného obvodu byla především dostupnost, cena a hlavně kvalita. Dalším kritériem byla schopnost kvazi-rezonančního provozu.

Po důkladném porovnání dostupných obvodů padl výběr na jednoúčelový řídicí obvod s označením NCP1337 od světově známé firmy ON Semiconductor.

Uvedený obvod disponuje frekvenční regulací, velikost akumulované a transformované energie je ovlivňována změnou spínací frekvence, přičemž střída sepnutí je zachována konstantní. Spínací rozsah obvodu je od 25-130kHz. Obvod obsahuje detekci přepětí, podpětí i přetížení. Po spuštění zdroje je automaticky aktivován po dobu 4ms rozběhový softstart, který minimalizuje zapínací proudové rázy. Veškerý další podrobný popis obvodu lze nalézt v literatuře [5]

Na níže uvedeném obrázku č. 25 je uveden popis jednotlivých vývodů použitého obvodu.



Obrázek 25 –Popis vývodů obvodu NCP1337

Funkční popis jednotlivých pinů obvodu:

Pin1 BO (Brown-out):

Tento pin slouží k detekci velikosti napájecího napětí. Dle nastavení dělicího poměru externích rezistorů lze nastavit pracovní rozsah zdroje. Hlavní funkcí pinu je ochrana zdroje proti příliš nízkému napájecímu napětí. Při nízkém napájecím napětí by mohl odebíraný proud ze sítě překročit únosnou mez a mohl by zdroj nevratně poškodit.

Pin2 FB (Zpětná vazba):

Na tento pin je přiveden signál z optočlenu zpětné vazby.

Pin3 CS (Snímání proudu):

Na tento pin je přiveden úbytek napětí ze snímacího rezistoru, umístěného v primárním okruhu zdroje.

Pin4 GND (Zem):

Na tento pin je připojena napájecí zem obvodu.

Pin5 DRV (Budič MOSFET tranzistoru):

Tento pin slouží k připojení gate spínacího tranzistoru.

Pin6 Vcc (Napájení obvodu):

Na tento pin je přivedeno napájecí napětí obvodu. Napětí je získáno z pomocného sekundárního vinutí impulzního transformátoru.

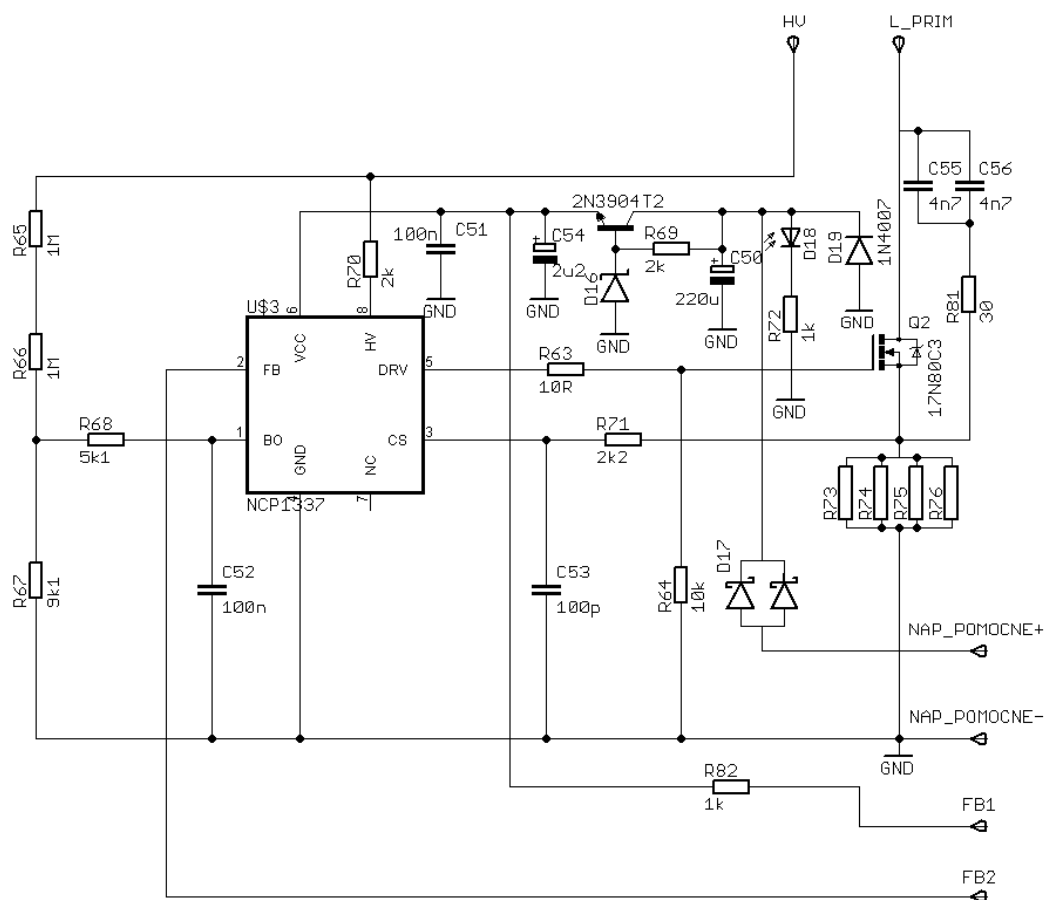
Pin7 – nezapojen z důvodu zvýšení izolace mezi jednotlivými piny**Pin8 HV (Napájení obvodu ze síťového napětí):**

Po spuštění zdroje je obvod napájen z usměrněného síťového napětí přes snižovací rezistor. Napájení touto formou trvá tak dlouho, dokud není dostupné napájení z pomocného vinutí transformátoru.

6.3.3 Princip činnosti řídicího obvodu

Na níže uvedeném obrázku č. 26 je vyobrazeno schéma zapojení řídicího obvodu. Oživení obvodu nastává v okamžiku, kdy se na svorku s označením HV dostane usměrněné síťové napětí. Toto napětí je snímáno z kladné svorky hlavních filtračních kondenzátorů, umístěných ve vstupním bloku zdroje. Usměrněné síťové napětí je vedeno přes rezistor R70 přímo na pin řídicího obvodu HV. V obvodu je integrován interní proudový zdroj, který uvede celý obvod do provozu. Čili je započato spínání hlavního spínacího prvku s označením Q2. Zdroj je nyní v režimu napájení ze svorky HV. Přejít na napájení ze svorky Vcc je aktivováno tehdy, pokud je na svorce Vcc detekováno napětí o korektní hodnotě. Napájení obvodu prostřednictvím pinu Vcc je provedeno pomocí přídavného pomocného vinutí, jehož výstupní jmenovité napětí je 12V. Výstup z pomocné cívky je přiveden na svorky

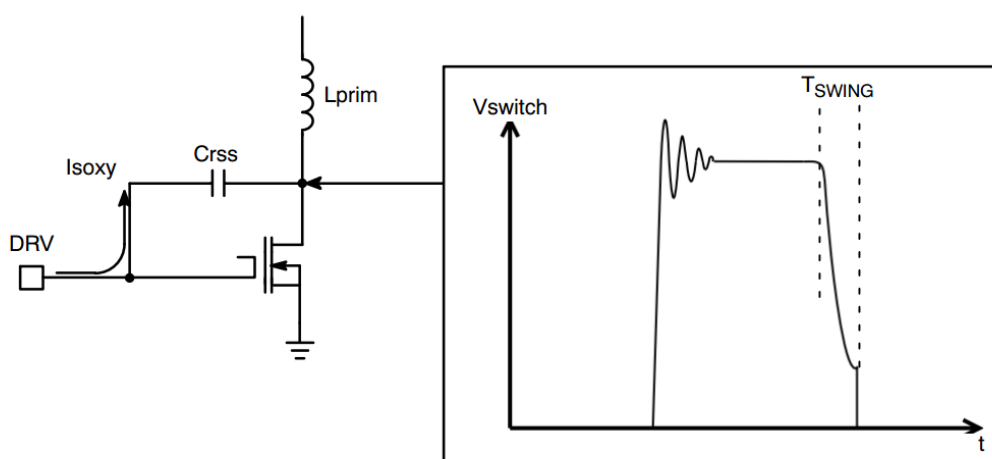
s označením Nap_pomocne+ a Nap_pomocne-. Následuje usměrňovací Schottkyho dioda, dále pak indikace provozu pomocí svítivé LED diody a stabilizátor tvořený tranzistorem a Zenerovou diodou. Stabilizátor složený z diskretních součástek je ve zdrojové části obvodu použit z důvodu nutnosti provozu stabilizátoru i pod hodnotou stabilizačního (Zenerova) napětí. Této funkce nejde u konvenčních monolitických stabilizátorů typu LM78xx dosáhnout, neboť pro svůj provoz potřebují vstupní hodnotu napětí nejméně o 1V větší než napětí výstupní.



Obrázek 26 - Schéma zapojení řídicího obvodu NCP1337

Rezistorová síť tvořená rezistory R65, R66, R67, R68 tvoří dělič pro interní brown-out detektor. Jedná se o detektor nízkého napájecího napětí. Obvodově je zdroj nastaven tak, že jeho probuzení nastává při zvyšování napětí od 0V AC při hodnotě 90V AC, jeho vypnutí nastává při dosažení hodnoty cca 60V. Obvod tedy umožňuje nastavit i velikost této vypínací hystereze.

Další stěžejní částí je výstup budiče MOSFET tranzistoru. Ten je integrován uvnitř obvodu, přičemž je reprezentován výstupním pinem DRV. Mezi gate tranzistoru a pin DRV je vložen tlumicí 10 ohmový rezistor, který eliminuje případné záškuby vyvolané parazitním rezonančním obvodem. Rezistor R64 poté v době nečinnosti stabilizuje vypnutý stav tranzistoru. Další funkcí tohoto pinu je detekce odmagetování primární cívky transformátoru, tzv. soxyless detektor. V okamžiku odmagetování cívky napětí na drainu tranzistoru poklesne vlivem rezonance její indukčnosti a parazitní kapacity tranzistoru. Na napěťovém průběhu se vytvoří typické sedlo. Tato změna napětí způsobí průchod proudu z drainu tranzistoru přes parazitní kapacitu mezi drain a gate do pinu DRV, kde je následně detekován soxyless detektorem. Soxyless detektor poté vyhodnotí ideální okamžik sepnutí tranzistoru, tedy v nule proudu.



Obrázek 27 - Princip detekce odmagetovaného transformátoru

Pin CS slouží ke snímání velikosti proudu procházejícího primární cívku transformátoru. Proud je snímán ve formě úbytku napětí na snímacím rezistoru. Výpočet maximální hodnoty proudu bude uveden v následující kapitole, přičemž jeho hodnota činí 7A.

Pro velikost snímacího odporu platí:

$$R_{sens} = \frac{0,5}{7} = 0,071\Omega \quad (45)$$

Svorky FB1 a FB2 jsou ve schématu připraveny pro připojení optočlenu zpětné vazby.

6.3.4 Návrh transformátoru – primární indukčnost

Jednou z nejstěžejnějších komponent spínaného zdroje je transformátor. Návrhem transformátoru se rozumí výběr koncepce, výpočet potřebného transformačního poměru, výpočet indukčnosti primárního vinutí, výpočet závitů primárního a sekundárního vinutí. Dále pak výpočet vhodné vzduchové mezery.

Pro navrhovaný spínaný zdroj byl transformátor koncepčně vybrán typu EE. Jádru je tedy složeno ze dvou feritových částí, připomínající písmena E. Obě jádra se zasouvají do kostry, na které je namotáno vinutí.

Nejprve je nutno vypočítat transformační poměr N . Vyděme tedy z nerovnice:

$$U_{C_max} + N \cdot (U_{out} + U_d) \leq U_{DS} \quad (46)$$

Nerovnice nám říká, že součet maximálního usměrněného napětí a napětí odraženého, musí být menší nebo roven maximálnímu dovolenému napětí U_{DS} spínacího tranzistoru. Jelikož jsou všechny veličiny v uvedené nerovnici konstanty, lze transformační převod vyjádřit takto:

$$N \leq \frac{U_{DS} - U_{C_max}}{U_{out} + U_d} \quad (47)$$

Kde:

U_{DS} – maximální opakovatelné napětí tranzistoru mezi svorkami D a S [V]

U_{C_max} – maximální hodnota usměrněného síťového napětí [V]

U_{out} – výstupní napětí zdroje [V]

U_d – napěťový úbytek na sekundární usměrňovací diodě [V]

Hodnota napětí U_{DS} je pro účely výpočtu zvolena 550V. Předpokládá se použití tranzistoru s maximálním neopakovatelným napětím o hodnotě 650V, je počítáno se 100V rezervou. Výstupní napětí zdroje je 12V, úbytek na usměrňovací diodě 0,5V

Maximální hodnota usměrněného síťového napětí se spočítá dle vztahu:

$$U_{C_max} = (U_{max} \cdot \sqrt{2}) - U_{d_prim} = (265 \cdot \sqrt{2}) - 2 \cong 373V \quad (48)$$

Po dosazení do rovnice [46] vychází transformační poměr $N \leq 14,16$. Pro následný návrh bude brána hodnota převodu o velikosti $N=12$, neboť se tímto zmenší hodnota odraženého napětí.

Při znalosti transformačního poměru lze vypočítat maximální hodnotu usměrněného síťového proudu v primární části zdroje.

$$I_{prim_max} = 2 \cdot P_{out} \cdot \frac{U_{min} + N \cdot (U_{out} + U_d)}{\eta \cdot N \cdot U_{min} \cdot (U_{out} + U_d)} = 2 \cdot 192 \cdot \frac{125,3 + 12 \cdot (12,5)}{0,8 \cdot 12 \cdot 125,3 \cdot 12,5} = 7A \quad (49)$$

Pro výpočet primární indukčnosti platí vztah:

$$L_p < \frac{1}{2 \cdot f_{sw_min} \cdot P_{out} \cdot \left(\frac{U_{c_min} + N \cdot (U_{out} + U_d)}{\eta \cdot N \cdot U_{C_min} \cdot (U_{out} + U_d)} \right)^2} \quad (50)$$

Kde:

f_{sw_min} – je nejnižší možná frekvence spínání [Hz]

– frekvence se volí nad práh slyšitelné oblasti, tedy 20 kHz

Po dosazení vychází hodnota primární indukčnosti 388,4uH. Při výpočtech bude brána jako směrodatná hodnota 388uH. Pro korektní činnost spínaného musí být dále splněna

dodatečná podmínka. Při 50% zatížení zdroje musí být spínací perioda vyšší než 7,5us. Ověření je provedeno pomocí vzorce 51.

$$f_{sw} \leq \frac{1}{2 \cdot L_p \cdot P_{out_50\%} \cdot \left(\frac{U_{C_max} + N \cdot (U_{out} + U_d)}{\eta \cdot N \cdot U_{C_max} \cdot (U_{out} + U_d)} \right)} \quad (51)$$

Po dosazení dostáváme výslednou frekvenci 98 604Hz, což představuje spínací periodu o délce 10,14us. Tímto je podmínka splněna a je možno přistoupit k dalším bodům návrhu.

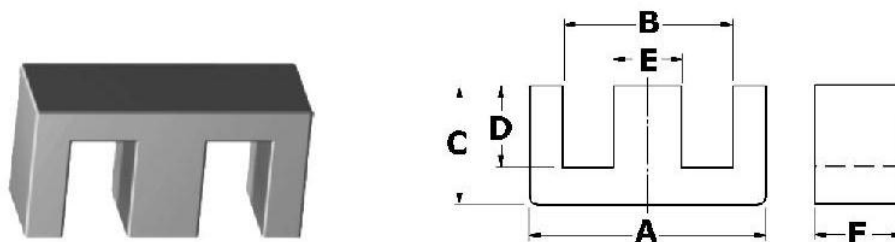
6.3.5 Návrh transformátoru – jádro a vzduchová mezera

V předchozí kapitole byla vypočítána primární indukčnost transformátoru. V této kapitole bude uveden postup návrhu vzduchové mezery a počtu závitů.

Prvním krokem návrhu je výběr vhodného jádra. Při návrhu transformátoru padla volba na jádro s označením E5521 od firmy Semic-trade. Dále byla vybrána vhodná kostra, disponující dvaceti přípojnými piny (2 piny primární vinutí, 2 piny pomocné vinutí, 16 pinů sekundární vinutí). Označení materiálu zvoleného jádra je CF139. Jedná se o materiál založený na bázi sloučeniny zinku a manganu, pro účely spínaného zdroje má ideální vlastnosti.

Mezi důležité parametry jádra CF139 patří:

- Relativní permeabilita jádra 2100+-20%
- Hodnota magnetické indukce, při níž dochází k přesycení 390mT



Obrázek 28 - Rozměrové dispozice jádra (přesné rozměry viz www.semic-shop.cz)

Dle katalogového listu vychází průřez hlavního sloupku $S=354\text{mm}^2$, délka magnetického obvodu poté $l=120\text{mm}$. Koeficient AL konkrétního typu jádra dosahuje hodnoty 6400nH/z^2 .

Nyní je potřeba vypočítat permeabilitu konkrétního typu jádra. Vycházejme ze vztahu:

$$\mu_r = \frac{AL \cdot l}{\mu_0 \cdot S} = \frac{6400 \cdot 10^{-9} \cdot 120 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 354 \cdot 10^{-6}} = 1726 \quad (52)$$

Tímto byla přesně vypočítána relativní permeabilita jádra E5521. Jak je dle výsledku patrné, permeabilita je v tolerancích výrobce.

Dále můžeme vypočítat potřebný počet závitů primární cívky.

$$n_{prim} = \sqrt{\frac{L_p}{AL}} = \sqrt{\frac{388}{6,4}} = 7,8z \approx 8z \quad (53)$$

Při znalosti maximálního primárního proudu 7A, počtu závitů a meze přesycení jádra z materiálu CF139 390mT [14] můžeme ověřit, zda lze transformátor s uvedeným počtem závitů realizovat.

Pro intenzitu magnetického pole platí vztah:

$$H = \frac{n_{prim} \cdot I_{prim}}{l} = \frac{8 \cdot 7}{0,12} = 466,7 \frac{\text{A}}{\text{m}} \quad (54)$$

Poté pro maximální magnetickou indukci platí:

$$B_{\max} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1726 \cdot 466,7 = 1012 \text{ mT} \quad (55)$$

Z výše uvedeného výpočtu vyplývá, že při nejnižším napájecím napětí zdroje 90V AC by byla hodnota maximální magnetické indukce více jak dvojnásobně překročena. Jádru by se nacházelo ve stavu vysokého přesycení, nebylo by tedy možno ze zdroje odebírat požadovaný výkon. Proto je nutno magnetický obvod upravit tak, aby při výše uvedených podmínkách k přesycení nedošlo. Jediným možným způsobem, jak toto učinit, je jádro přerušit přesně definovanou vzduchovou mezerou. Tento zásah se projeví ve snížení relativní permeability magnetického obvodu a ve zvýšení počtu závitů primární cívky transformátoru.

Vzduchová mezera byla vytvořena pomocí ústřížku z papírové čtvrtky. Předpokladem bylo, že má papír relativní permeabilitu blízkou se permeabilitě vzduchu. Tloušťka vzduchové mezery byla zvolena dle použitého papíru 0,622mm.

Pro výslednou permeabilitu použitého jádra potom platí:

$$\mu_e = \frac{\mu_r}{\left(1 + \mu_r \cdot \frac{d}{l}\right)} = \frac{1726}{\left(1 + 1726 \cdot \frac{0,622}{120}\right)} = 173 \quad (56)$$

Koeficient AL lze vypočítat následovně:

$$AL = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S}{l} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 173 \cdot 354 \cdot 10^{-7}}{121 \cdot 10^{-3}} = 636 \frac{\text{nH}}{\text{z}^2} \quad (57)$$

Při znalosti koeficientu AL lze opět vypočítat potřebný počet závitů primární cívky:

$$n_{prim} = \sqrt{\frac{L_p}{AL}} = \sqrt{\frac{388}{0,636}} = 24,7z \quad (58)$$

Pro počet sekundárních závitů platí:

$$n_{sek} = \frac{n_{prim}}{N} = \frac{24,7}{12} = 2,06z \quad (59)$$

Při následné realizace zaokrouhleme závity na celá čísla, tedy počet primárních závitů bude 25, počet závitů sekundárních 2.

Finální ověření vhodnosti takto navrhnutého transformátoru spočívá v ověření maximální magnetické indukce. Nejprve je nutno opět vypočítat maximální intenzitu magnetického pole, stejně jako tomu bylo v úvodu této kapitoly.

$$H = \frac{n_{prim} \cdot I_{prim}}{l} = \frac{25 \cdot 7}{0,12} = 1458,3 \frac{A}{m} \quad (60)$$

$$B_{max} = \mu_0 \cdot \mu_e \cdot H = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 173 \cdot 1458,3 = 316,9mT \quad (61)$$

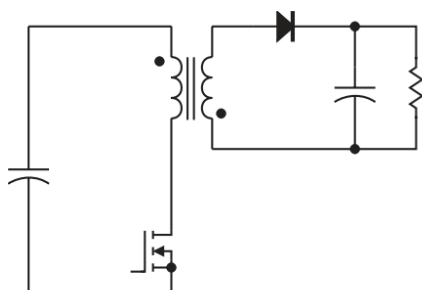
Maximální hodnota magnetické indukce dosahuje hodnoty 316,9mT. Tímto je vhodnost navrženého transformátoru ověřena, viz katalog [14]. Ani při maximálním zatížení a minimálním vstupním napětí nebude jádro transformátoru přesyceno a bude možno zdroj naplno využívat.

6.3.6 Návrh ochranného RC snubberu

Každý spínaný zdroj řízen pulsně šířkovou modulací či modulací frekvenční je náchylný na nebezpečné přepětové špičky, které jsou vyvolány rychlým přerušením proudu primárního

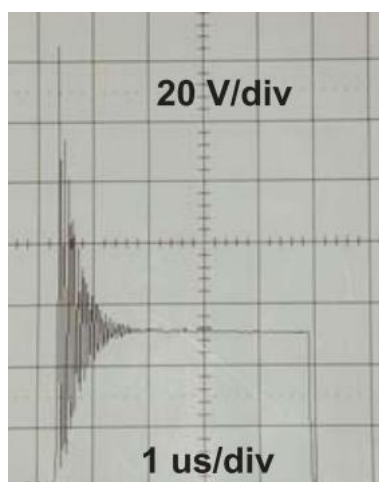
obvodu. Jedná se ve své podstatě o indukované napětí na rozptylové indukčnosti primárního vinutí transformátoru spojené s rezonancí danou právě rozptylovou indukčností a parazitní kapacitou obvodu. Pokud by napěťové špičky nebyly pohlceny vhodným dodatečným obvodem, došlo by k rychlému poškození vnitřní struktury tranzistoru a k jeho napěťovému průrazu. Hodnota rozptylové indukčnosti transformátoru je uvažována jako 3% z celkové indukčnosti transformátoru.

Na obrázku č. 29 je uvedeno základní principiální schéma spínaného zdroje typu Flyback bez ochranného obvodu.



Obrázek 29 - Spínaný zdroj bez ochranného obvodu

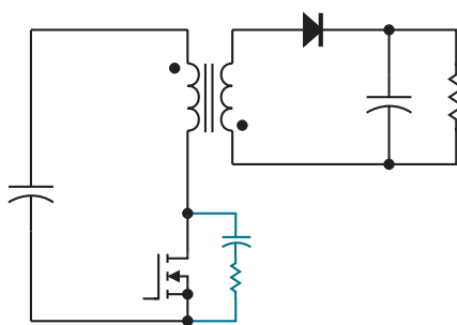
V tomto případě se jedná o zapojení, které by ve funkčním stavu vydrželo dle dimenzování spínacího tranzistoru několik málo period sepnutí. Typický průběh napětí na tranzistoru by mohl vypadat jako na obrázku č. 30.



Obrázek 30 - Průběh napětí na spínacím prvku - bez ochranného obvodu

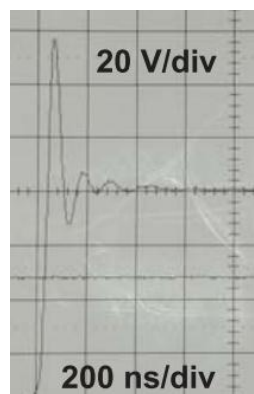
Z ilustračního obrázku č. 30 je patrné, že při rozepnutí tranzistoru vznikne přepětí, jehož maximální velikost dosahuje více než dvojnásobek jmenovitého napájecího napětí. V našem případě je velikost napětí na tranzistoru okolo 300V, v případě přepět'ové špičky by jeho velikost dosahovala hodnoty přes 600V, což se blíží maximálnímu povolenému napětí použitého tranzistoru.

Řešením pro kompenzaci přepět'ového impulsu je použít obvod, který energii, danou plochou pod přepět'ovými peaky, přemění v teplo. Jednou z možností je použít tzv. RC snubber. Jedná se o sériový RC článek, připojený paralelně ke spínacímu prvku. RC článek vytvoří spolu s rozptylovou indukčností tlumený rezonanční obvod, přičemž tlumená energie je vyzářena na rezistoru v podobě tepla. Na níže uvedeném obrázku č. 31 je uvedeno principiální schema zapojení RC snubberu.



Obrázek 31 - Spínaný zdroj s ochranným obvodem

Po zapojení vhodného RC snubberu se většina nežádoucí energie v podobě přepět'ové špičky promění v teplo. Napět'ový průběh při rozepnutí tranzistoru může vypadat podobně, jako je uvedeno na obrázku č. 32. Přepět'ová špička se razantně zmenšila, včetně počtu zákmítů.



Obrázek 32 - Průběh napětí na tranzistoru - zapojen RC snubber

Pro návrh RC snubberu je třeba znát rozptylovou indukčnost primárního vinutí transformátoru. Pro zjednodušený výpočet je brána empirická hodnota činící 3% z celkové primární indukčnosti. V případě primární indukčnosti 388uH vychází rozptylová indukčnost 11,64uH. Dále je nutno změřit frekvenci tlumených kmitů při rozeznutí transformátoru bez zapojeného ochranného obvodu. Frekvence kmitů činí v případě navrhovaného zdroje 571kHz. Pro velikost odporu rezistoru platí vztah:

$$Z = 2 \cdot \pi \cdot \left(f_{osc} - \left(\frac{f_{osc}}{100} \cdot 30 \right) \right) \cdot L_{rozptyl} = 2 \cdot \pi \cdot \left(571 \cdot 10^3 - \left(\frac{571 \cdot 10^3}{100} \cdot 30 \right) \right) \cdot 11,64 \cdot 10^{-6} = 29,2 \Omega \quad (62)$$

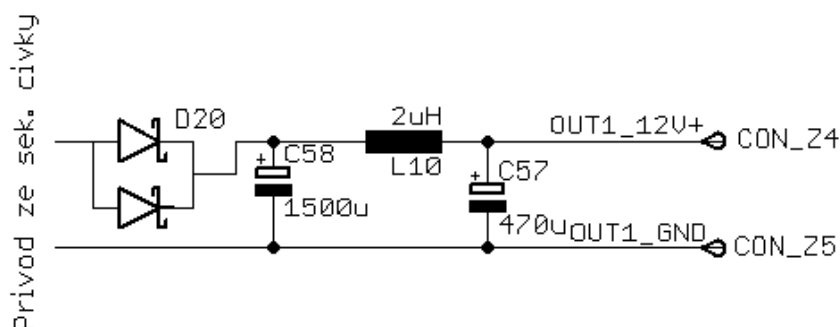
Pro další výpočty budeme uvažovat hodnotu odporu 30Ω. Dále pro hodnotu kapacity kondenzátoru platí:

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \left(f_{osc} - \left(\frac{f_{osc}}{100} \cdot 30 \right) \right) \cdot Z} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \left(571 \cdot 10^3 - \left(\frac{571 \cdot 10^3}{100} \cdot 30 \right) \right) \cdot 29,2} = 13,64 nF \quad (63)$$

Pro realizační účely bude použita z důvodu dostupnosti hodnota 9,4 nF.

6.3.7 Návrh výstupních obvodů

Z principu funkce akumulačního zapojení spínaného zdroje vyplývá, že energie naakumulovaná v primární cívce při sepnutí tranzistoru musí být v době rozpojení tranzistoru předána kondenzátoru sekundárního obvodu.



Obrázek 33 - Schéma výstupního obvodu

Na výše uvedeném obrázku č. 33 je vyobrazeno schéma výstupního obvodu. Výstupní obvod se skládá z jednocestného usměrňovače tvořeného Schottkyho diodou, dále následuje akumulační kondenzátor. Jedná se o kondenzátor, který má ve funkci zdroje zásadní roli, neboť v době vypnutého spínače akumuluje energii, kterou následně předává zátěži. Kapacita akumulačního kondenzátoru se vypočítá dle vztahu:

$$C_{akumul} = \frac{60 \cdot I_{out}}{m \cdot f_{sw} \cdot U_{out}} = \frac{60 \cdot 2}{1 \cdot 20000 \cdot 12} = 500\mu F \quad (64)$$

Kde:

m – zvlnění výstupního napětí [%]

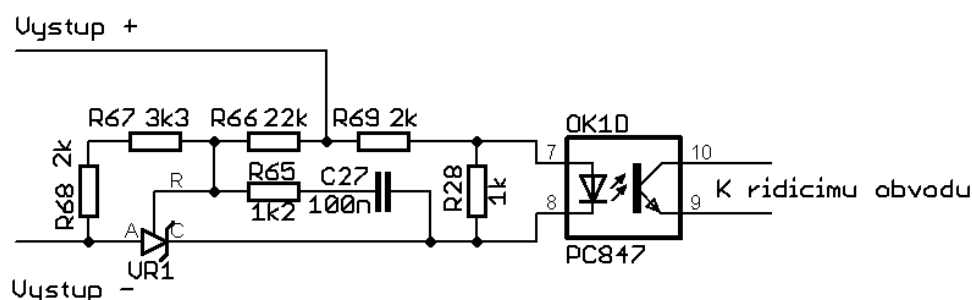
Dle rovnice vychází pro zvlnění 1% hodnota kapacity 500µF. Při realizaci byla využita hodnota 1500µF pro dostatečné dimenzování a možnou degradaci kapacity delším provozem zdroje. Nároky kladené na výstupní kondenzátor jsou vysoké, zvláště potom na parametr kondenzátoru ESR (equivalent series resistance). Jedná se o parazitní odpor přívodních svorek kondenzátoru a odpor napojení svorek na vlastní sktrukturu kondenzátoru. Se zvyšující se frekvencí procházejícího proudu obvodem, ve kterém je kondenzátor zapojen, se zvyšují i

výkonové ztráty právě na tomto parazitním odporu. Tudiž je nezbytně nutné pro konstrukci výstupních obvodů spínaných zdrojů používat výhradně LOW ESR kondenzátorů.

Cívka L10 a kondenzátor C57 tvoří dolnoproustný filtr pro eliminaci případného rušení.

6.3.8 Návrh zpětné vazby

Nedílnou součástí spínaného zdroje je zpětná vazba. Zpětná vazba dává informaci řídicímu obvodu o výstupním napětí zdroje, ten pak upraví spínací frekvenci tak, aby výstupní napětí mělo nastavenou konstantní hodnotu. Tímto lze u spínaného zdroje vytvořit velice tvrdou výstupní napěťovou charakteristiku. Spínaný zdroj nedisponuje proudovou ochranou, spoléhá se na definované proudové požadavky nabíječe trakčních baterií.



Obrázek 34 - Zpětnovazební obvod

Na obrázku č. 34 je uvedeno zapojení zpětnovazebního obvodu. Na svorky Vystup+ a Vystup- je přivedeno výstupní napětí zdroje, které je dále vedeno na odporový dělič tvořený rezistory R68, R67 a R66. Stěžejní součástí zpětné vazby je napěťová reference TL431 označena symboly VR1. Je-li napětí mezi anodou A a referenční elektrodou R vyšší než 2,5 V, TL431 sníží odpor v propustném směru mezi anodou a katodou na minimum, tímto je dioda optočlenu vlivem procházejícího proudu vybudena. Napěťový dělič je navrhnut tak, aby byla dioda optočlenu vybudena právě při 12V výstupního napětí. Pokud je napětí mezi anodou a řídicí elektrodou menší než 2,5V, je TL431 uzavřen. Tedy, výstupní napětí zdroje je řízeno ve smyčce, kde dosažení jmenovitého napětí zdroje je indikováno přechodem optočlenu z vypnutého do zapnutého stavu. Řídicí obvod pak vhodně upravuje spínací frekvenci primárního obvodu. Rezistorem R69 je nastaven maximální proud LED diodou. Sériová

kombinace tvořená R65 a C27 tvoří RC článek eliminující případné oscilace při rychlém spínání a rozepínání. Pro správnou činnost obvodu TL431 je umožnění průchodu proudu alespoň 1mA i když je dioda uzavřena. Obvod zpětné vazby je tedy doplněn o rezistor R28, který toto umožňuje.

Zapojení zpětné vazby pro spínaný zdroj s jednou výstupní větví je poměrně jednoduchá záležitost. V případě zdroje s osmi galvanicky oddělenými výstupními větvemi se situace stabilizace výstupního napětí značně komplikuje. Pokud by byla zapojena zpětná vazba pouze u jedné výstupní větve, vlivem nestejnoměrných odběrů různých větví by mohlo dojít ke kolísání výstupního napětí větví bez zpětné vazby i o stovky procent. Existuje mnoho zapojení, rozšiřující výše uvedený obvod zpětné vazby o partie upravující i napětí dalších výstupních větví, nicméně vždy se jedná o zdroje ne s plně galvanicky oddělenými výstupy (výstupy mají společný střed apod.). Pro zdroj nabíječe trakčních baterií musí být tímto navržen obvod zpětné vazby, který by dokázal regulovat všech osm výstupních větví.

Sumarizujme potřebné parametry jedné výstupní větve zdroje a nabíječe jednoho článku baterie.

- Navržené výstupní napětí jedné větve zdroje 12V
- Napájecí rozsah nabíjecího obvodu LTC4002 4,7-22V

Z výše uvedeného vyplývá, že výstupní napětí zdroje by mohlo bezpečně vzrůst o 8V. Požadavky na tvrdost a stabilitu výstupního napětí zdroje nejsou striktně dané. Důležité jsou pouze meze, tedy 12 – 22V. Napětí pod 12V není žádané, neboť při by při konstantním odběru nabíječe a snižování napětí zdroje rostl odebíraný proud. Veškeré výstupní obvody zdroje jsou dimenzovány na 2A.

Shrňme požadavky na zpětnovazební obvod spínaného zdroje.

- Minimální výstupní napětí 8 x 12V
- Maximální výstupní napětí 8 x 22V (pro rezervu zvoleno 8 x 19V)

Minimální napětí všech větví zdroje je realizováno pomocí zapojení výše uvedené zpětné vazby ke každé výstupní větvi zdroje. LED dioda v příslušném optočlenu je opět vybudena, pokud napětí zdroje přesáhne 12V. Aby řídicí obvod spínaného zdroje dostal relevantní informaci o stavu všech výstupních větví, jsou optočleny všech výstupních větví zapojeny do

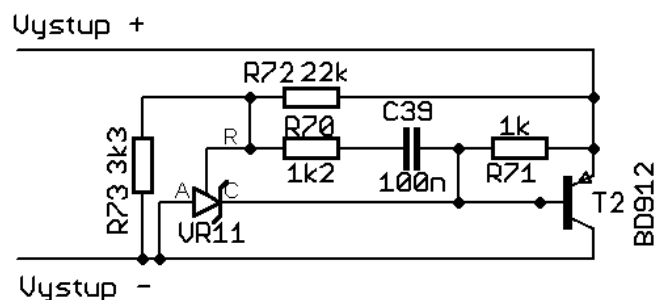
série, jejich signál je poté veden k řídicímu obvodu. Sériová kombinace zajišťuje minimální výstupní napětí 12V na všech výstupních větvích, vyjadřuje funkci AND, potažmo logický součin. Logiku spínání lze pro čtyři výstupy demonstrovat v níže uvedené pravdivostní tabulce.

Tabulka 8 - Logika spínání zpětných vazeb
(log 1 - napětí výstupní větve je $\geq 12V$, log 0 – napětí výstupní větve je $< 12V$)

OUT 1	OUT 2	OUT 3	OUT 4	CELK
0	0	0	0	0
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0
1	1	0	0	0
0	0	1	0	0
1	0	1	0	0
0	1	1	0	0
1	1	1	0	0
0	0	0	1	0
1	0	0	1	0
0	1	0	1	0
1	1	0	1	0
0	0	1	1	0
1	0	1	1	0
0	1	1	1	0
1	1	1	1	1

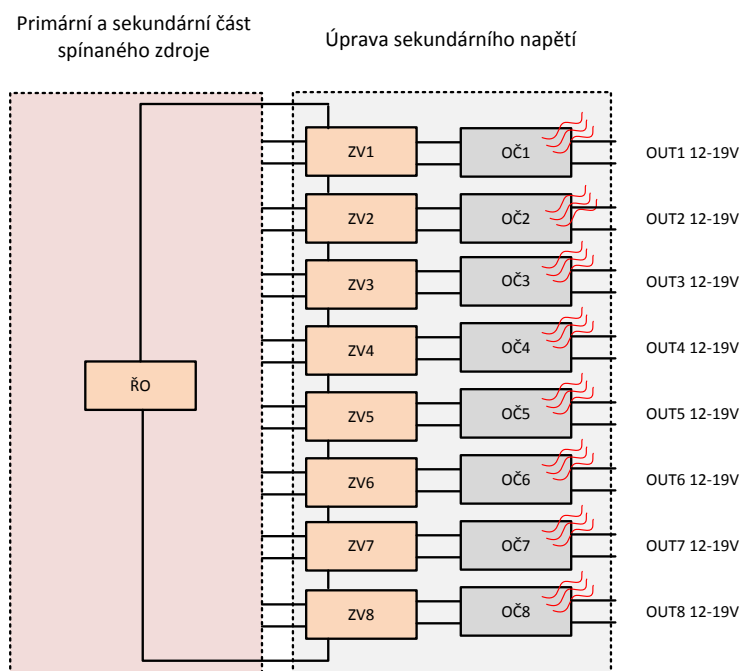
Z tabulky č. 8 je zřejmé, že řídicí obvod nedostane impulz, dokud není na všech výstupech zdroje napětí alespoň 12V.

V případě velikých rozdílů mezi zatížením jednotlivých výstupů hrozí zvýšení napětí odlehčeného výstupu i přes 30V. Toto napětí je třeba strmě omezit, neboť by došlo k poškození řídicího obvodu nabíječe. Ke každému výstupu zdroje je proto připojen obvod, který toto napětí stabilizuje na nastavenou mez – paralelní stabilizátor. Přebytná energie je přeměněna na teplo.



Obrázek 35- Omezovací článek

Výstupní napětí zdroje je přivedeno na svorky Vystup + a Vystup -. Pokud je přivedené napětí vyšší než 19V, TL431 zmenší svůj odpor a tímto sepne tranzistor T2. Princip spínání napěťové reference se shoduje s principem spínání ve zpětné vazbě. Stabilizační účinek je dle praktických zkoušek velice účinný. Tranzistor T2 je nutno umístit na chladič. Maření přebytečné energie v omezovacím článku probíhá pouze při extrémních rozdílech nabití jednotlivých článků acu-packu či při poruše nabíječe. Při standartním provozu je tranzistor uzavřen a žádná energie se v teplo nemaří.

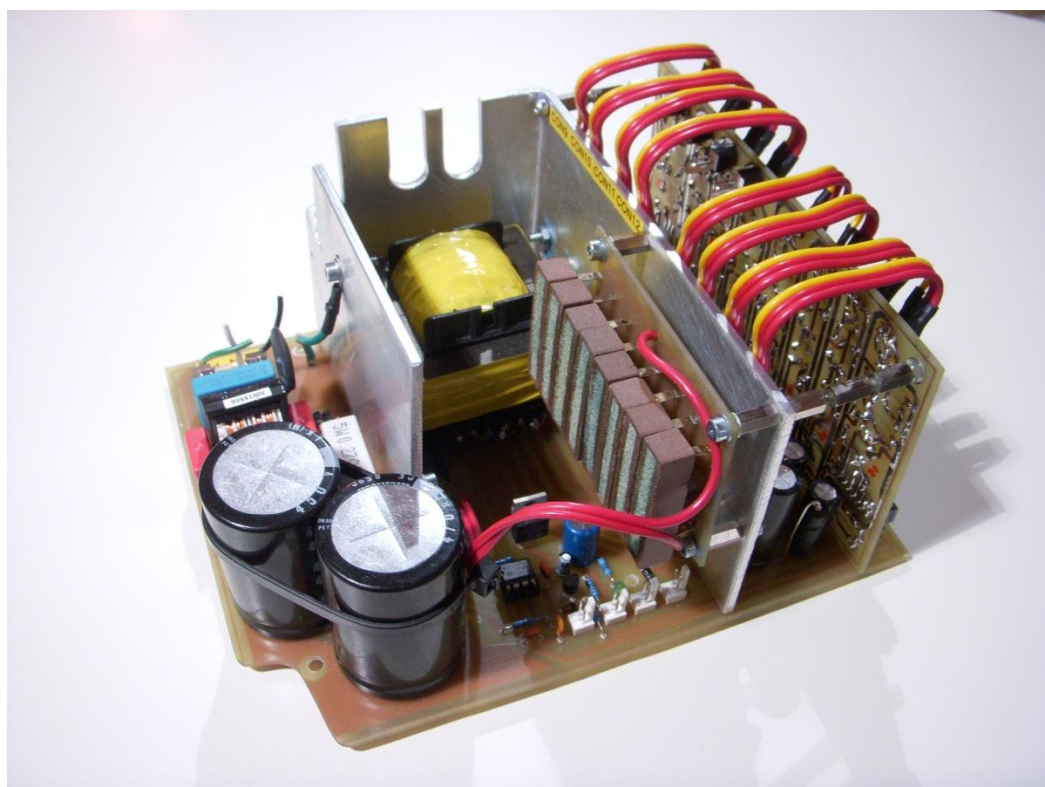


Obrázek 36 - Blokové schéma zpětné vazby s omezovacími články

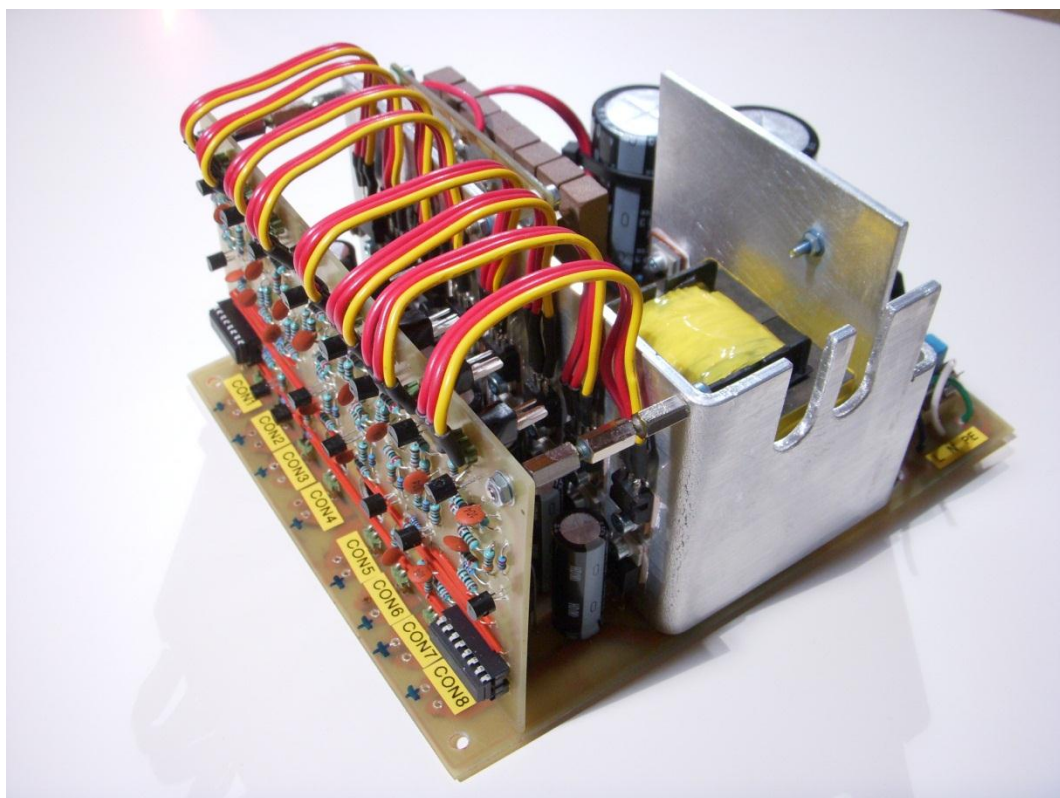
(ŘO – řídicí obvod spínaného zdroje, ZV – zpětná vazba, OČ - omezovací článek)

6.4 Realizace spínaného zdroje

Realizace spínaného zdroje probíhala ve dvou fázích. Nejprve byl vytvořen návrh testovacího spínaného zdroje. Tento zdroj obsahoval všechny potřebné funkční části, včetně osmi výstupních větví. Zpětná vazba byla záměrně napojena pouze na jeden výstup pro účely testování. Na základě zjištěného chování zpětné vazby byl vytvořen návrh finálního spínaného zdroje včetně výše popisovaného bloku zpětné vazby a omezovacích článků. Celý návrh byl vytvořen, stejně jako tomu bylo u nabíječe, v softwaru Eagle 6.2.0. Na základě navrhnutého schématu byl vytvořen plošný spoj, který byl následně osazen patřičnými součástkami. Veškeré výkonové cesty jsou pro snížení Joulových ztrát dodatečně pocínovány. Níže jsou uvedeny ilustrační fotografie spínaného zdroje jako celku.



Obrázek 37 - Spínaný zdroj, pohled na primární část



Obrázek 38 - Spínaný zdroj, pohled na sekundární část

7 NÁVRH SYSTÉMU KONTROLY STAVU BATERIÍ (BMS)

Ve výše uvedených kapitolách byly detailně rozebrány zásadní komponenty zdrojové soustavy experimentálního vozidla. Nejprve byly vybrány trakční baterie (respektive acu-pack), na základě parametrů baterií poté jejich nabíječ. Nabíječ je napájen síťovým zdrojem s výstupními parametry vyžadující nabíječ trakčních baterií. Všechny navržené elektronické komponenty dokáží pracovat zcela autonomně s přijatelnými výstupními parametry. Je nutno si uvědomit, že nejdražší komponentou zdrojové soustavy je acu-pack, který se skládá ve své podstatě z chemikálií, inicializující akumulaci proces. Aby mohla akumulace energie probíhat korektním způsobem, chemické pochody vyžadují definované pracovní podmínky. Výrobce baterií tyto podmínky stanovil a je pouze na uživateli, jak důsledně je bude dodržovat. S přesností dodržování souvisí i celková životnost, potažmo počet nabíjecích cyklů baterie. Je tedy nutno na vozidlo implementovat systém, který by pracovní podmínky jednotlivých článků kontroloval. V zahraniční literatuře je tento systém označován zkratkou BMS (battery management system)

7.1 Požadavky na systém BMS

Požadavky na systém BMS jsou ve své podstatě dané jednak provozními charakteristikami použité koncepce článků baterie a též parametry pohonu. Jak již bylo zmíněno, provozními parametry Li-Pol článku je minimální napětí 2,8V, maximální napětí 4,2V a teplota článku menší než 70°C. Požadavkem ze strany pohonu je disponibilní dodávka proudu o velikosti 40A. Z charakteristik použitých článků acu-packu vyplývá, že proud 40A (1C) nemůže být koncipován jako dlouhodobý, neboť by docházelo k mírnému přetěžování článku a k jeho ohřevu. Aby bylo možno acu-pack využívat v plném pracovním rozsahu, je nutno teplotu snímat a v případě překročení nastavené teploty trakční odběr přerušit.

Dalším požadavkem na BMS systém je identifikace zkratového proudu, procházejícího trakčním obvodem. V tomto případě by měl být vyhodnocen akční zásah s účinkem rozpojení trakčního obvodu. Mezi doplňkové funkce by mohlo patřit zamezení režimu jízdy, pokud je připojen nabíječ síťovou šňůrou do zásuvky apod.

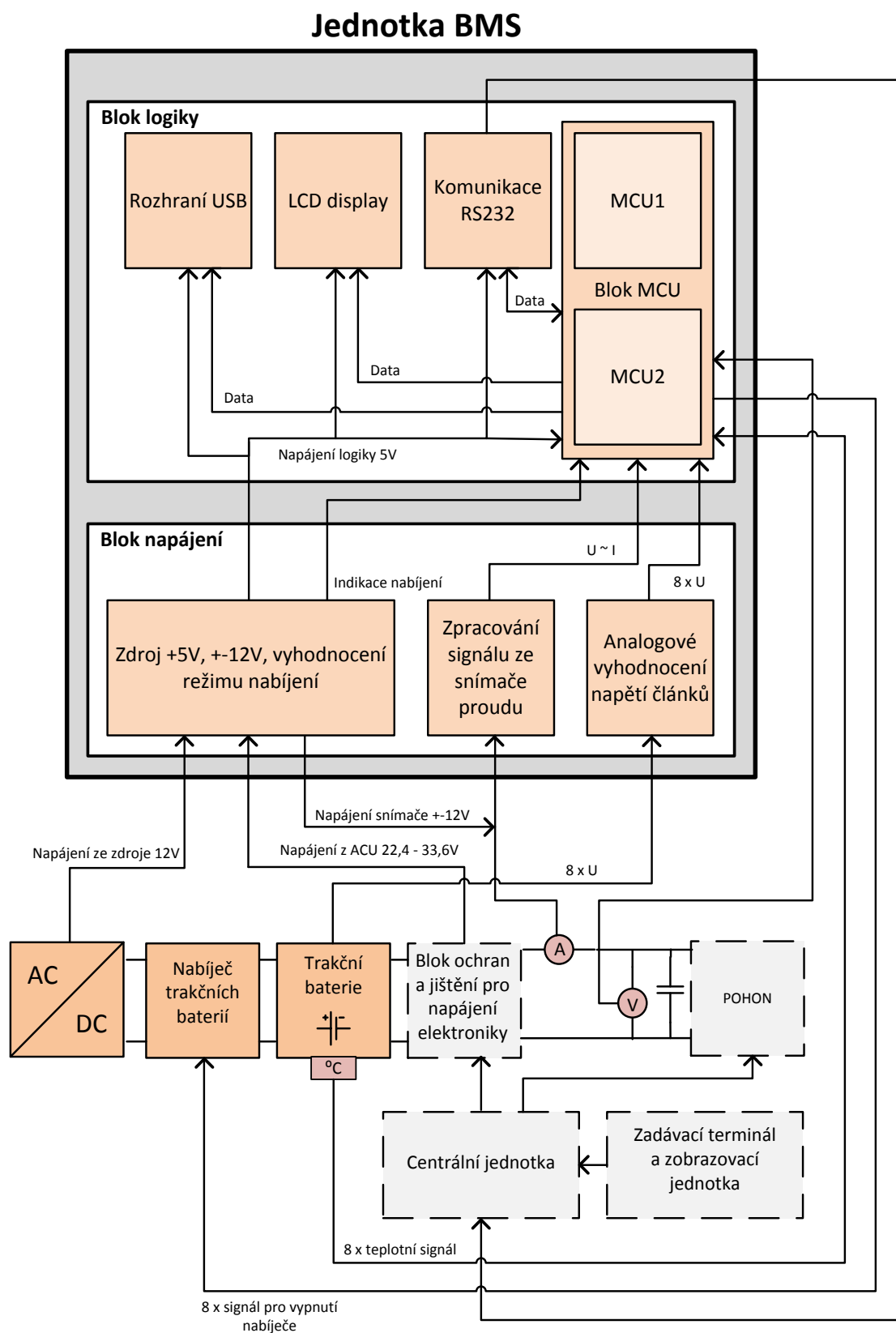
Sumarizace požadavků na systém BMS:

- Snímání napětí všech článků acu-packu
- Snímání teploty všech článků acu-packu
- Snímání vybíjecího (trakčního) proudu
- Snímání napětí ve stejnosměrném meziobvodu (na hlavním akumulacním C)
- Identifikace zkratu
- Identifikace režimu nabíjení a režimu jízdy
- V případě napětí článku $< 2,8V$ přerušit nabíjení či odpojit pohon
- V případě napětí článku $> 4,2V$ přerušit nabíjení či odpojit pohon
- V případě překročení teploty článku přerušit nabíjení či odpojit pohon
- V případě nadproudu (či zkratu) přerušit nabíjení či odpojit pohon
- V případě identifikace režimu nabíjení zakázat režim jízdy

7.2 Koncepce systému BMS

Systém BMS by měl představovat jakési logické jádro zdrojové soustavy vozidla. Jak již z požadavků na systém vyplývá, není možno si z důvodu složitosti algoritmů vystačit pouze s analogovými obvody. Tudiž je při konstrukci využito číslicových obvodů, mikrokontrolérů (dále MCU). Mikrokontroléry v jednotce BMS načítají předem analogově upravená data, ty pak číslicově vyhodnocují a na svých výstupech pak aktivují potřebné akční zásahy. V konkrétním případě i zobrazují měřená data na znakovém LCD display. Tímto je uživateli vozidla umožněno nahlédnout do průběhu vyhodnocovacího algoritmu. V případě akčního zásahu, při kterém je učiněn zásadní zásah do funkčnosti vozidla, například jeho zastavení, je na LCD též zobrazena hláška. Tato informační funkce je shledána jako velice důležitá, neboť uživateli jasně podá zprávu, co přesně je ve zdrojovém systému vyhodnoceno jako iniciátor akčního zásahu. Tímto uživatel ušetří mnoho času hledáním případné poruchy.

7.2.1 Blokové schéma BMS



Obrázek 39 - Blokové schéma BMS

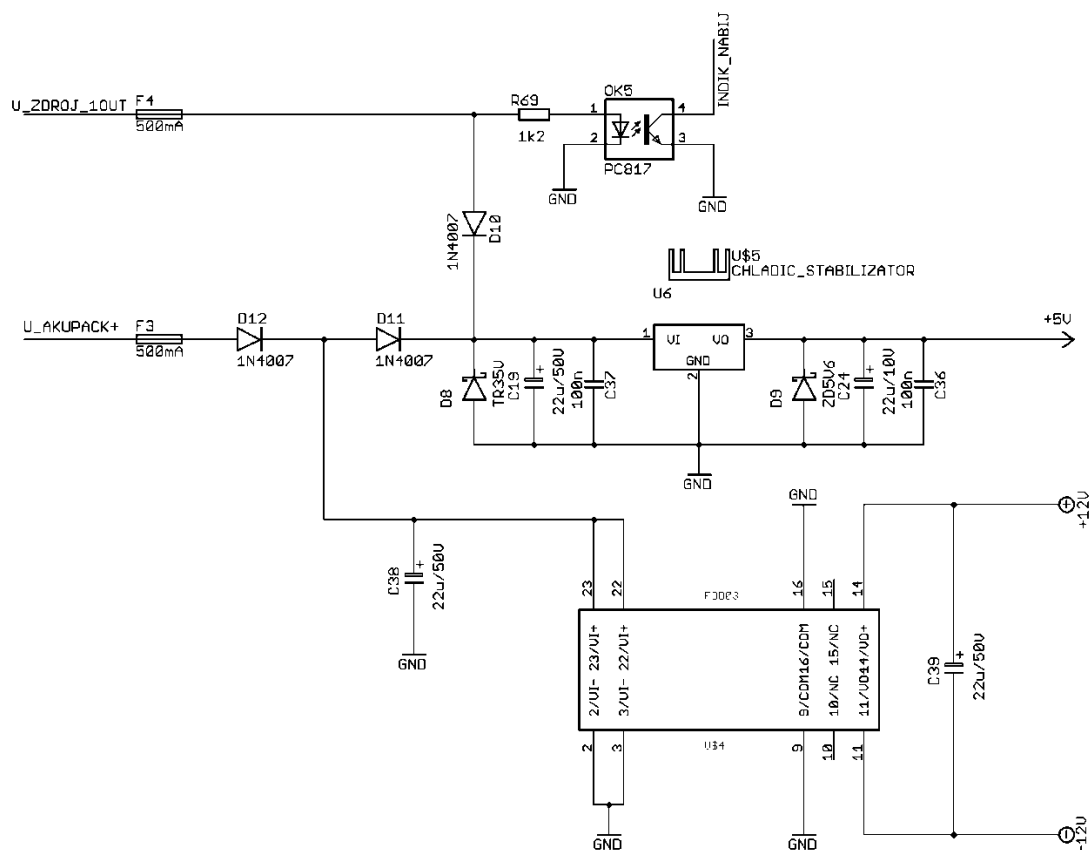
Na výše uvedeném obrázku č. 39 je uvedeno blokové schéma BMS systému. Jednotka BMS se skládá ze dvou dílčích bloků, z bloku napájení a bloku logiky. Každý z bloků je umístěn na samostatném plošném spoji. Blok napájení představuje jakousi napájecí kaskádu pro všechny elektronické obvody použité v systému. Jedná se o napětí $\pm 12\text{V}$ pro snímač proudu a 5V pro napájení mikrokontrolérů, operačních zesilovačů převodníků úrovní apod. V bloku napájení se pro úsporu místa nachází i obvod pro zpracování signálu ze snímače proudu a analogové obvody pro úpravu napětí jednotlivých článků.

V bloku logiky se nachází samotné vyhodnocovací a komunikační segmenty. Nejdůležitější částí bloku logiky je dílčí blok označen jako blok MCU. Jedná se o výpočetní jádro, sestávající se ze dvou osmibitových mikropočítačů. Jádro komunikuje s centrální jednotkou prostřednictvím sériového komunikačního protokolu RS232. Měřené veličiny a chybové hlášky jsou zobrazovány na LCD display. Jelikož je grafický display zapojen jen na jeden z mikrokontrolérů, pro ulehčení ladění programu v mikrokontroléru druhém je do bloku logiky doplněn i převodník pro komunikaci po USB. Je tedy možno žádaná data z druhého MCU logovat do osobního počítače a kontrolovat jejich správnost.

7.3 Vlastnosti jednotlivých funkčních částí

7.3.1 Zdroj 5V , $\pm 12\text{V}$

Pro správnou funkci použitých komponent jednotky BMS je nutno dodržet požadovaný rozsah napájecího napětí. Většina integrovaných obvodů pro svou činnost potřebuje univerzální napájecí napětí o velikosti 5V . Z důvodů použití proudového snímače LEM, bylo nutno zdrojovou část rozšířit o DC/DC měnič s výstupním napětím $\pm 12\text{V}$. Blok zdroje obsahuje i část indikace režimu nabíjení. Na níže uvedeném schématu je uvedeno celkové zapojení zdrojové části.



Obrázek 40 - Napájecí zdroj jednotky BMS

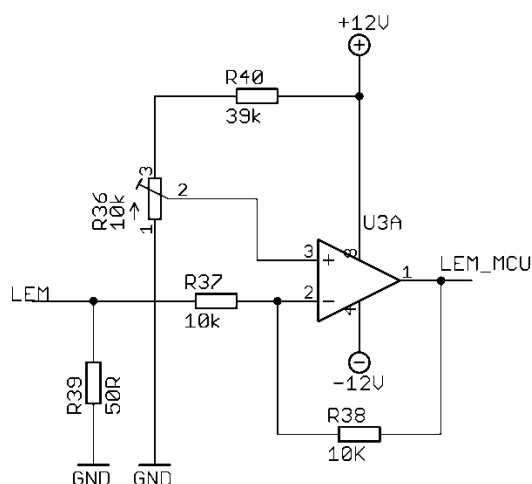
Napájecí zdroj lze napájet dvěma možnými způsoby. V režimu nabíjení je přivedeno výstupní napětí spínaného zdroje 12-19V na svorku s označením U_ZDROJ_1OUT. Dále je vedeno přes ochrannou tavnou pojistku na optočlen OK5. Vybuzením optočlenu a uzemněním sekundárního tranzistoru dostane blok MCU informaci o režimu nabíjení. Dioda D10 slouží k zamezení vybuzení optočlenu při napájení z acu-packu. Dále je napětí přivedeno na lineární stabilizátor U6, jehož výstupní napětí je právě 5V. Před stabilizátorem se nachází ochranný transil o vybavovacím napětí 35V, akumulární a filtrační kondenzátory. Na výstupní straně se nachází Zenerova dioda, chránící napájené obvody proti přepětovým špičkám, dále akumulární a filtrační kondenzátory. V režimu nabíjení není napájena větev generující napětí +-12V. Je to z důvodu minimálního provozního napětí měniče U4 21V. V režimu nabíjení není potřeba měřit velikost trakčního proudu.

Druhým způsobem napájení je napájení přímo z acu-packu. Konkrétně řečeno z bloku ochran, neboť právě zde jsou umístěny hlavní ochranné a jistící prvky pro napájení

elektroniky. V režimu jízdy je tedy přivedeno napětí 22,4 – 33,6V na svorky s označením U_AKUPACK. Dále je vedeno přes ochrannou tavnou pojistku k lineárnímu stabilizátoru. V režimu jízdy je aktivován DC/DC zdroj, měnící vstupní napětí na požadovanou hodnotu +12V. Ze zdrojové desky je poté napětí rozvedeno k příslušným komponentám.

7.3.2 Zpracování signálu ze snímače proudu

Snímání trakčního a zkratového proudu je provedeno pomocí snímače LEM LA-55p. Jak již z výše uvedených kapitol vyplývá, napájecí napětí snímače je +12V, převodový poměr proudu 1:1000, měřicí rozsah +50A a frekvenční rozsah 200kHz. Na níže uvedeném schématu je naznačeno zapojení vyhodnocovacího obvodu.



Obrázek 41 - Vyhodnocovací obvod proudového snímače

Proudový snímač LEM LA-55p patří do skupiny snímačů pracujících na principu Hallova jevu. Snímač tvoří magnetické jádro, které je přerušeno vzduchovou mezerou. Ve vzduchové mezeře je umístěna Hallova sonda. Magnetickým jádrem prochází vodič s trakčním proudem, přičemž průchodem trakčního proudu je vybuzeno magnetické pole, které je soustředěno v magnetickém obvodu. Magnetické siločáry poté procházejí skrz Hallovu sondu, na jejíž protilehlých koncích je generováno Hallovo napětí. Napětí je úměrné procházejícímu proudu. Na magnetickém jádře se nachází cívka, přičemž proud jí procházející se snaží kompenzovat účinek trakčního proudu tak, aby výsledné Hallovo napětí bylo rovné nule. Kompenzační proud je poté převeden na napětí průchodem snímacího rezistoru.



Obrázek 42 - Ilustrační obrázek proudového snímače

Proudový výstup ze snímače je přiveden na svorku s označením LEM. Proud dále protéká přes snímací rezistor R39, na kterém vytvoří úbytek úměrný trakčnímu proudu. Při známém převodu proudu 1:1000 lze vhodně vypočítat velikost snímacího rezistoru. Rozsah analogově-digitálního převodníku (dále AD převodníku) použitého MCU je 0-5V, tedy je nutno rozsah snímaného napětí vhodně upravit. V trakčních výpočtech byl uvažován maximální trakční proud 40A oboupolaritně. Záporný trakční proud vytvoří na snímacím rezistoru záporný úbytek napětí, což je hodnota mimo měřicí rozsah AD převodníku. Proto je nutno snímaný úbytek povýšit o polovinu rozsahu AD převodníku, tedy 2,5V. Dále pak zvolit takovou hodnotu snímacího rezistoru, aby bylo možno rozsah trakčního proudu +-40A bezpečně měřit.

Při známém převodu snímače 1:1000 lze odvodit, že 1A trakčního proudu vyvolá velikost snímaného proudu o velikosti 1mA. Pro trakční proud +-40A je tento rozsah +-40mA. Známe-li rozsah AD převodníku a maximální snímaný proud, lze určit hodnotu rezistoru z výrazu:

$$U_{sens} \leq 2,5V \quad (65)$$

$$R_{sens} \leq \frac{U_{sens}}{\frac{I_{trakční}}{1000}} = \frac{2,5}{\frac{40}{1000}} = 62,5\Omega$$

Z výše uvedeného vztahu byla zvolena hodnota snímacího rezistoru 50 Ω . Při maximálním trakčním proudu bude vyvolán úbytek na snímacím rezistoru o hodnotě +-2V. Tato hodnota snímacího rezistoru byla zvolena z důvodu zvětšení měřicího rozsahu pro případ indikace nadproudu.

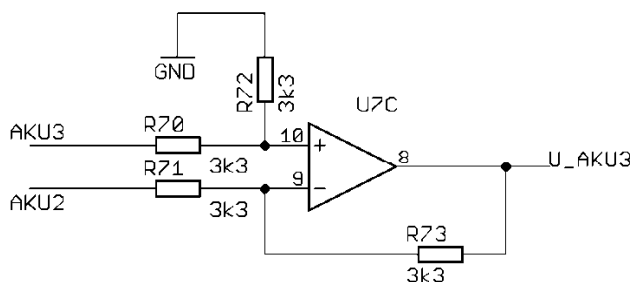
Úbytek na snímacím rezistoru je snímán operačním zesilovačem v zapojení rozdílovém. Rezistory R36 a R40 tvoří dělič pro vytvoření offsetu 2,5V. Dále je rozdíl napětí 2,5V a snímaný úbytek se zesílením 1 převeden na výstup operačního zesilovače.

Výše uvedené schéma v průběhu ladění hardwaru prodělalo jistou úpravu. Napájecí napětí OZ bylo zvoleno 5V a typ OZ byl zvolen koncepce rail to rail. Kdyby v případě původního zapojení došlo k poruše a na vstup OZ by se dostalo napětí vyšší než $\pm 2,5V$, došlo by k poškození AD převodníku použitého MCU vlivem překročení jeho napětového rozsahu. Funkčně se obě varianty shodují.

7.3.3 Analogové vyhodnocení napětí článků

Snahou analogové úpravy jednotlivých napětí článků je úprava jejich velikosti do měřitelného rozsahu AD převodníku MCU. AD převodník mění přivedenou hodnotu napětí na číselné vyjádření, pokud je napětí přivedeno na svorku GND a příslušný vstup převodníku. Hodnota měřeného napětí nesmí přesáhnout 5V a nesmí být menší než 0V. Z principu sériového zapojení článků v acu-packu je zřejmé, že bez úpravy by bylo možno měřit pouze napětí prvního článku, tedy článku, jehož mínusový pól je spojen s GND mikrokontroléru. Pokud by byl na vstup převodníku přiveden kladný pól druhého článku, převodník by byl mimo měřicí rozsah (napětí proti GND by dosahovalo hodnoty součtu napětí prvního a druhého článku) a došlo by k jeho poškození. Je tedy nutné upravit napětí tak, aby převodník dostával informaci o napětí daného článku vztažené vždy ke GND.

Pro úpravu napětí je využito operačních zesilovačů v zapojení rozdílovém. Výstupem každého OZ je rozdíl napětí měřeného článku minus napětí článku předcházejícího, vztažený vždy ke GND. Takto upravený signál se již nachází v rozsahu AD převodníku. Napájecí napětí jednotlivých OZ je 5V, použitá koncepce OZ byla zvolena jako rail to rail. Na níže uvedeném schématu je vyobrazeno schéma jednoho vyhodnocovacího OZ.



Obrázek 43 - Vyhodnocovací článek napětí třetího článku

Svorka s označením AKU3 slouží pro připojení kladného pólu článku s označením 3. Svorka s označením AKU2 pak slouží k připojení kladného pólu článku 2. Operační zesilovač odečte rozdíl potenciálů mezi kladným pólem článku 2 proti GND a kladným pólem článku 3 proti GND, výsledkem je žádané napětí článku 3 vztažené ke GND. Pro úpravu všech napětí je využito osmi operačních zesilovačů.

7.3.4 Blok MCU

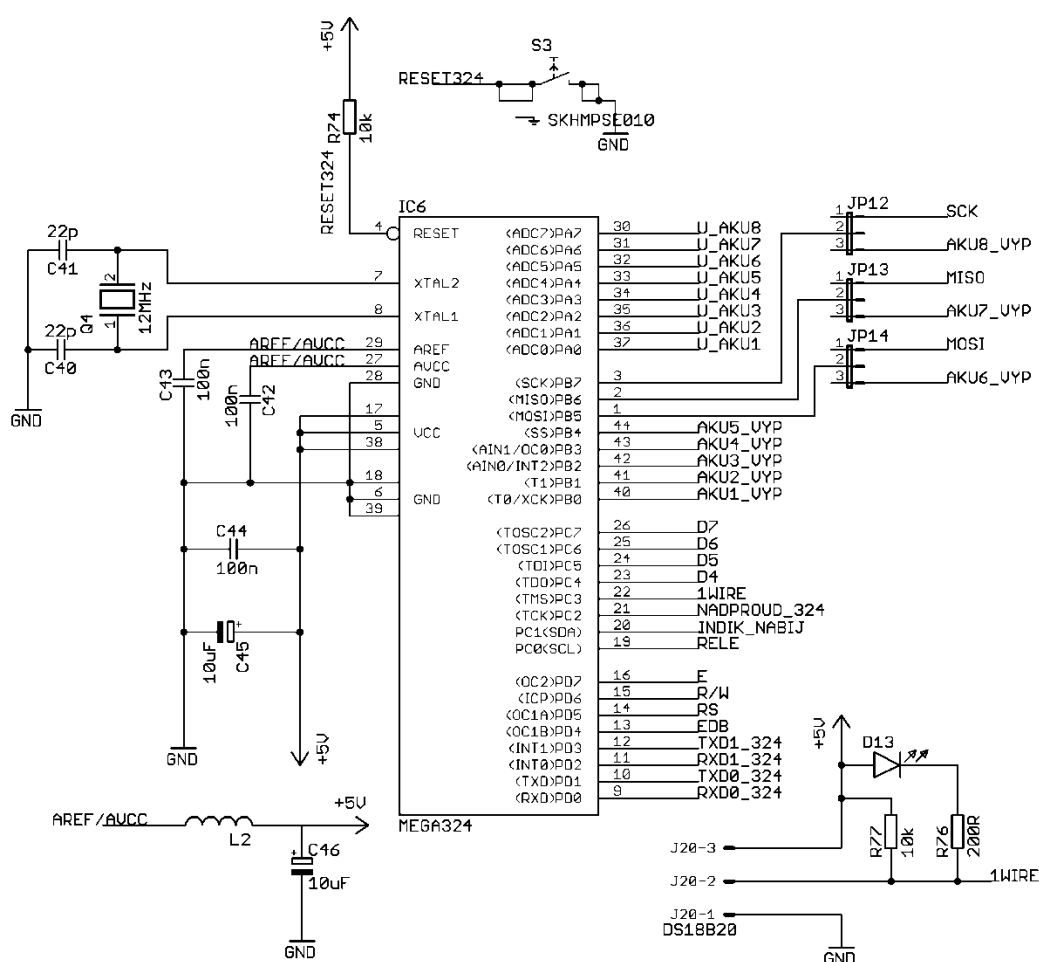
Hlavní částí jednotky BMS je blok MCU. Blok se skládá ze dvou osmibitových mikrokontrolérů od firmy ATMEL, rodiny AVR. Výběr této koncepce MCU byl učiněn z důvodu jejich výborné dostupnosti a faktu, že obsahují veškeré potřebné periferie. Výpočetní funkce jsou do obou MCU implementovány tak, aby byla zajištěna co možná nejvyšší pohotovost systému. Hlavní MCU s označením ATMEGA324PA zpracovává teplotní signály a jednotlivá napětí článků. V případě nepředloženého stavu činí akční zásah odpojením nabíječe či přerušením trakčního obvodu. Dále se stará o komunikaci s centrální jednotkou a LCD displayem. Vedlejší MCU s označením ATMEGA16 zpracovává signál z proudového čidla a informace o napětí ve stejnosměrném meziobvodu. V případě nadproudu předá informaci hlavnímu MCU, který učiní akční zásah přerušením trakčního obvodu.

Stěžejní vlastnosti MCU ATMEL ATMEGA324PA:

- 32kB programovatelné flash paměti
- 4 vstupně výstupní 8 kanálové porty
- 2 8 bitové čítače/časovače
- 1 16 bitový čítač/časovač
- 6 PWM výstupů
- 8 kanálů AD převodníku
- 2 výstupy USART

Stěžejní vlastnosti MCU ATMEL ATMEGA16

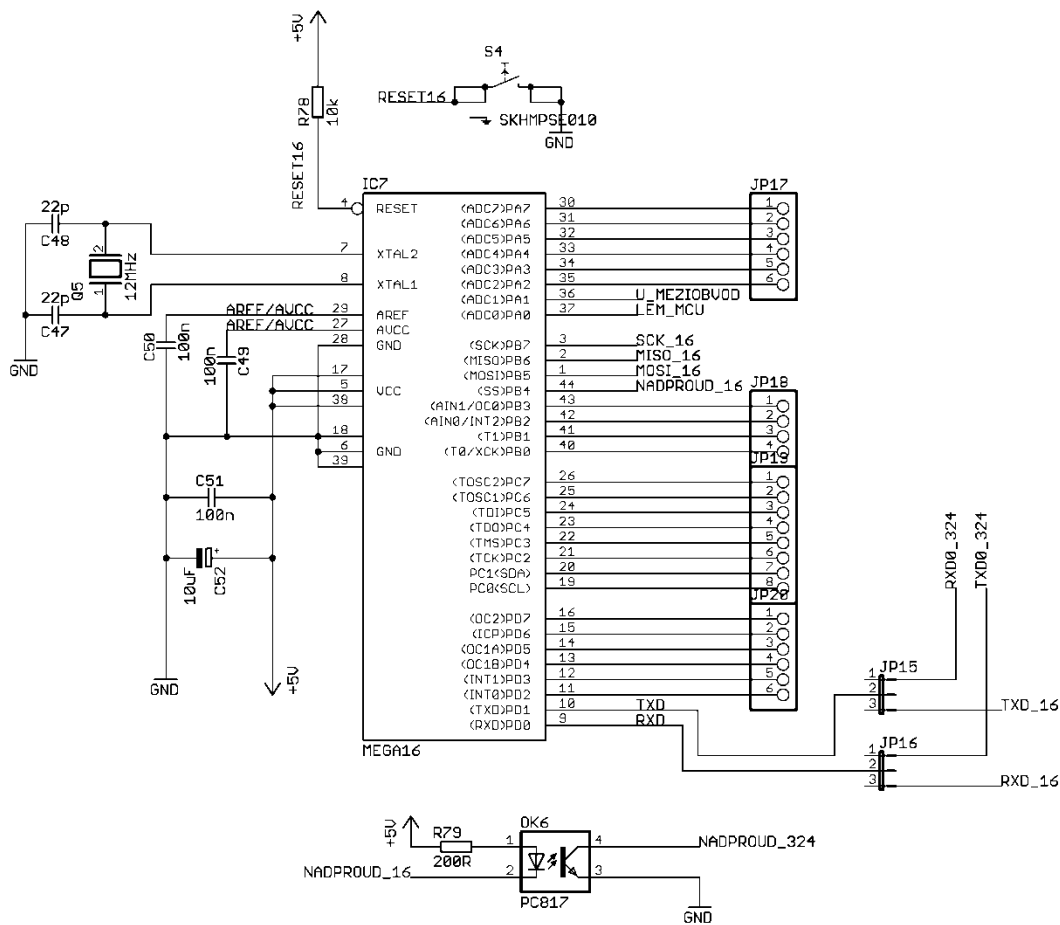
- 16kB programovatelné flash paměti
- 4 vstupně výstupní 8 kanálové porty
- 2 8 bitové čítače/časovače
- 1 16 bitový čítač/časovač
- 4 PWM výstupy
- 8 kanálů AD převodníku
- 1 výstup USART



Obrázek 44 - Zapojení MCU ATMEGA324PA

Zapojení hlavního MCU je znázorněno na výše uvedeném obrázku. Mezi stěžejní části zapojení patří zdroj taktovacího kmitočtu 12MHz, tvořený krystalem a keramickými

kondenzátory. Dále dodatečná filtrace napájecího a referenčního napětí pro AD převodník 5V tvořená kondenzátory C45, C44, C43, C42, C46 a cívkou L2. Port s označením A slouží pro měření napětí jednotlivých článků. Port s označením B je využit pro ovládání jednotlivých nabíječů. V případě překročení teploty článku či vymezeného napětíového rozsahu je příslušný nabíječ článku vyřazen z provozu. Toto je provedeno změnou stavu příslušného pinu portu z logické 0 do logické 1. Piny PB5-PB7 slouží po přepojení jumperů JP12-JP14 k programování přes rozhraní ISP. Na port C jsou připojeny datové vodiče pro komunikaci se znakovým LCD displayem, dále je zde vyhrazen jeden pin pro sběrnici ONE-WIRE a připojení čidel teploty DS18B20. Nechybí indikace nadproudu od vedlejšího MCU, indikace nabíjení a ovládání hlavního trakčního relé. K portu D jsou připojeny řídicí vodiče znakového LCD, signál pro případné ovládání elektrodynamické brzdy EDB a vodiče pro komunikaci s centrální jednotkou a vedlejším MCU.



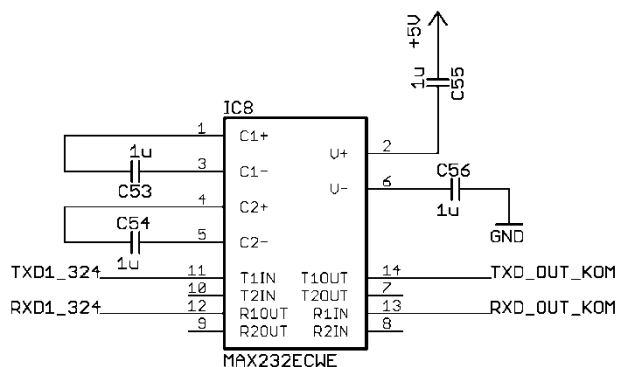
Obrázek 45 - Zapojení MCU ATMEGA16

Na výše uvedeném obrázku je uvedeno zapojení vedlejšího MCU ATMEGA16. Hlavním úkolem vedlejšího MCU je měření napětí ve stejnosměrném meziobvodu a měření trakčního proudu. Informace o trakčním proudu je vedena na pin s označením PA0, napětí meziobvodu pak na pin PA1. Je-li překročena hodnota maximálního dovoleného trakčního proudu $\pm 20\text{A}$, je vybuzen optočlen OK6. Tímto uzemní příslušný pin hlavního MCU a předá mu tak informaci. Pro případnou budoucí modernizaci softwaru je provedena hardwarová příprava pro komunikaci i mezi hlavním a vedlejším MCU. Nevyužité piny jsou vyvedeny na lámací lišty, kde jsou připraveny k případnému budoucímu rozšíření funkcí jednotky BMS.

7.3.5 Komunikace RS232

Mezi jednotkou BMS a centrální jednotkou je provedena hardwarová příprava pro budoucí sériovou komunikaci RS232. Předávanými informacemi by mohla být informace o velikosti napětí ve stejnosměrném meziobvodu, o velikosti trakčního proudu, popřípadě dalších měřených datech. Na základě vědomosti těchto informací by mohla centrální jednotka v případě mírného překročení provozních parametrů článků acu-packu upravit konstanty regulátoru pohonu tak, aby se překročené provozní parametry plynule vrátily do stanoveného rozsahu.

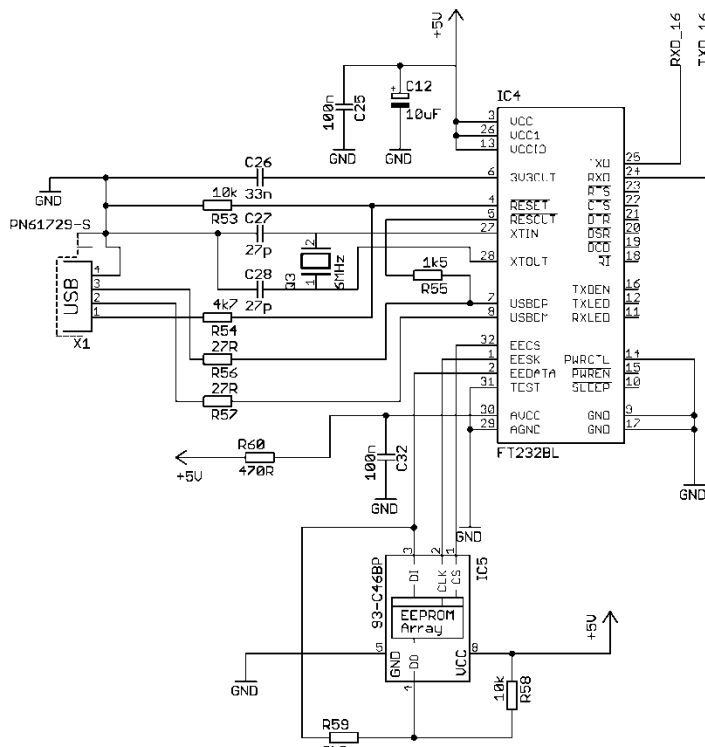
Důvodem pro zavedení komunikace po sběrnici RS232 bylo zvýšení odolnosti proti rušení. Použil-li by se pro komunikaci prostý TTL signál o napětí logických úrovní 0 a 5V, nasuperponované rušení by mohlo komunikaci zatížit vysokou chybovostí. Proto je pro komunikaci použit oboustranný převodník RS232 > TTL, TTL > RS232 s označením MAX232. Převodník převádí TTL signál o úrovních 0 a 5V na signál o úrovních -12V a +12V, přičemž logická 1 je reprezentována napětím -12V a logická 0 napětím +12V. Tímto je docíleno větších rozdílů mezi logickými úrovněmi, potažmo snížení možnosti ovlivnění zprávy rušením. Na níže uvedeném obrázku je zobrazeno schéma zapojení převodníku MAX 232. TTL signál je napojen na svorky s označením TXD1_324 a RXD1_324, výstupní svorky nesou označení TXD_OUT_KOM a RXD_OUT_KOM. Keramické kondenzátory C53 a C54 tvoří část zdroje $\pm 12\text{V}$, nábojové pumpy.



Obrázek 46 - Zapojení obvodu MAX232

7.3.6 Rozhraní USB

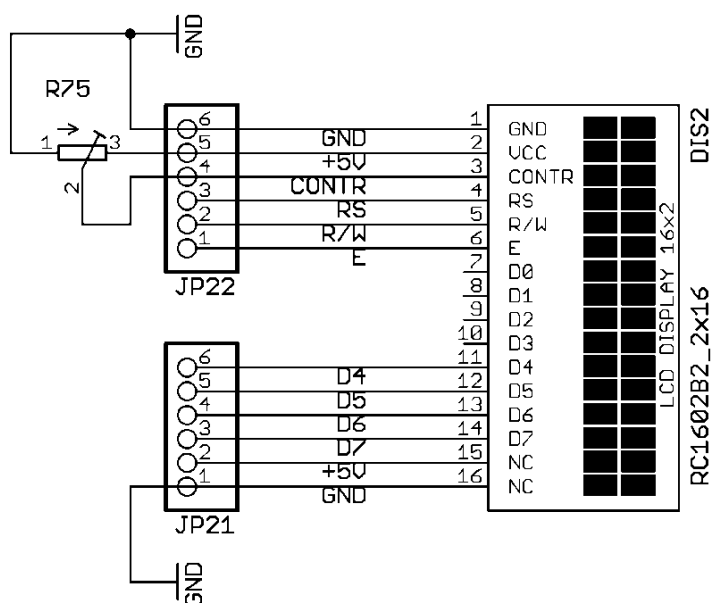
Pro ladění programu hlavního MCU se jako grafického prvku využívá LDC displaye. Na display je při ladění možno zobrazovat hodnoty stěžejních proměnných a tím tak činnost programu kontrolovat. Vedlejší MCU bohužel grafickým displayem vybaveno není. Pro zvýšení komfortu ladění je možno ke komunikačním pinům UART připojit převodník TTL > USB s označením FT232. Tímto lze kýžená data zobrazovat či logovat do osobního počítače prostřednictvím terminálu. Zapojení budiče USB je zobrazeno na níže uvedeném obrázku.



Obrázek 47 - Zapojení budiče USB

7.3.7 LCD display

Grafickým prostředníkem mezi firmwarem v MCU a uživatelem je grafický LCD display. Účelem použití displaye je bezesporu pomoc při ladění programu a ověřování funkčnosti. Hlavním účelem jeho využití je možnost kontroly parametrů článků acu-packu přímo uživatelem vozidla. Na display jsou cyklicky zobrazována měřená data, čímž je míněna teplota a napětí jednotlivých článků acu-packu. V případě akčního zásahu je zobrazena hláška informující uživatele o důvodu zásahu. Tímto je rozšířena informační funkce displaye i o funkci diagnostickou. Schéma zapojení LCD displaye je vyobrazeno na níže uvedeném schématu. Pro aplikaci byl vybrán display s rozlišením 2 x 16 znaků.



Obrázek 48 - Schéma zapojení grafického LCD

7.4 Funkce jednotky BMS

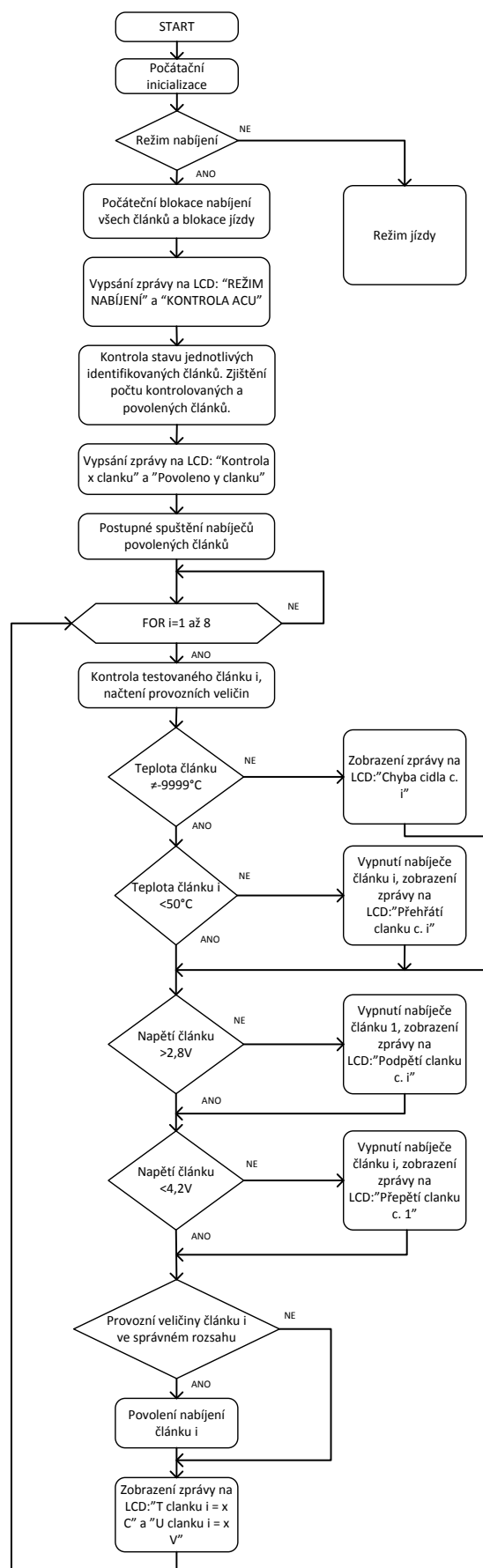
7.4.1 Algoritmus režimu nabíjení a režimu jízdy

V předchozích kapitolách práce byly popsány hardwarové komponenty včetně jejich principu činnosti a konstrukce. Jedinou částí zdrojového systému vozidla obsahující programovatelné prvky je právě jednotka BMS. Výhodou implementace funkce systému pomocí softwaru obecně, je možnost jeho neomezených editací. V případě analogových systémů je funkcionality daná při návrhu zařízení a pozdější editace funkcí systému již není možná vůbec, či pouze s velkými obtížemi. V případě softwarové implementace se pouze změní požadovaná partie v programu a tímto je systém upraven. Pro principiální popis algoritmů programu se využívá tzv. vývojových diagramů, přičemž každý blok představuje stěžejní úkon, který je programem realizován. Čtení vývojových diagramů je, oproti orientaci v kódu programu samotném, pro pochopení činnosti méně náročné a názornější.

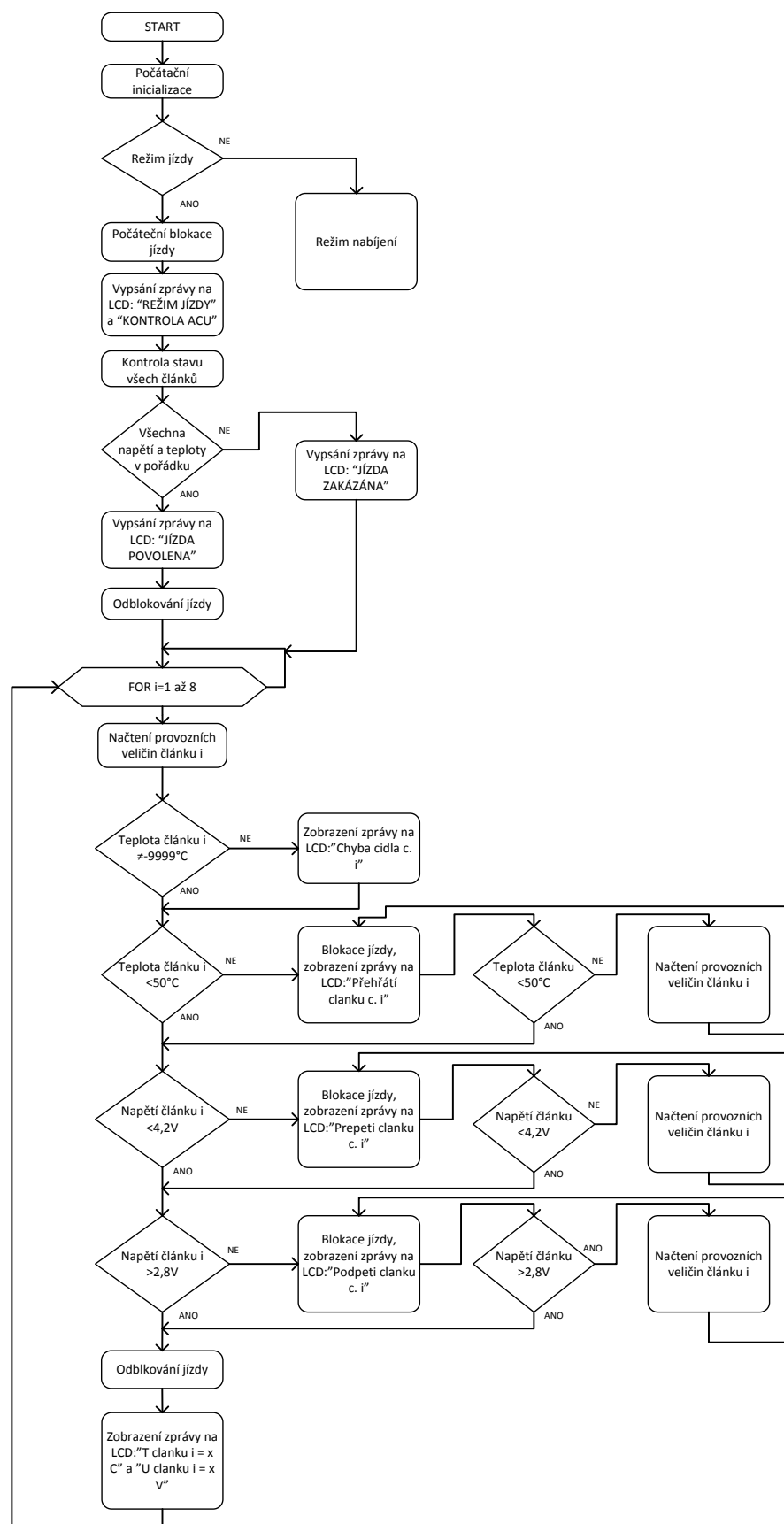
Po spuštění programu nejprve proběhne počáteční inicializace v podobě aktivování všech periférií. Dále je vyhodnoceno, zda se vozidlo nachází v režimu jízdy či v režimu nabíjení. Režim nabíjení je vyhodnocen, pokud je zapnut síťový spínaný zdroj a blok napájení logiky je napájen z jedné jeho větve. V případě vyhodnocení režimu nabíjení proběhne dočasné zablokování všech dílčích nabíječů trakčního nabíječe. Před aktivací jednotlivých nabíječů je nutno zkontrolovat provozní parametry jednotlivých článků. Těmito parametry jsou teplota a napětí. Na display jsou zobrazeny údaje, informující uživatele o počtu kontrolovaných článků a o počtu článků, které kontrolou prošly. Jestliže se parametry nacházejí ve stanovených intervalech, nabíjení povolených článků je postupně odblokováno. Tímto program přejde do hlavní smyčky, kde jsou provozní parametry článků kontrolovány cyklicky. Nejprve jsou načteny všechny provozní parametry testovaného článku. Následuje kontrola korektnosti signálu z čidla teploty. V případě závady čidla (špatný kontakt napájení či špatný kontakt na digitální sběrnici) vyhodnotí program teplotu -9999°C. Tato chyba nevede k zastavení režimu nabíjení daného článku, obsluha je pouze upozorněna zobrazením varovné zprávy na LCD display. Jestliže je identifikována teplota článku větší než 50°C, je článek označen jako přehřátý, přičemž je nabíjení článku zastaveno. Dále se kontroluje velikost svorkového napětí článku. Jestliže je menší než 2,8V či větší než 4,2V, nabíjení je opět zastaveno. Z vývojového diagramu vyplývá, že již první identifikace odchylky provozní hodnoty vede k zastavení nabíjení. Na konci cyklu probíhá rekapitulace provozních veličin. Jsou-li vyhodnoceny jako

vyhovující, lze nabíjení článku opět povolit. Na závěr jsou zobrazena změřená data (i v případě blokace nabíjení) a probíhá přechod na měření dalšího článku acu-packu.

Pro režim jízdy je využito ideologicky podobného algoritmu, avšak s přísnějším akčním zásahem. Jestliže je identifikována provozní veličina o hodnotě mimo dovolený rozsah, režim jízdy je striktně blokován tak dlouho, dokud se hodnota veličiny nevrátí zpět do požadovaného rozsahu. Po zapnutí jednotky BMS proběhne počáteční inicializace obdobným způsobem, jako v režimu nabíjení. Dále proběhne vyhodnocení režimu jízdy. Pokud není identifikováno napájení ze síťového zdroje, předpokládá se právě režim jízdy. Následujícím úkolem programu je provést počáteční blokaci jízdy a kontrolu stavu všech článků. Jestliže jsou všechny parametry v daných mezích, je následně jízda povolena. Pokud ne, přejde se přímo do hlavního cyklu programu, kde se parametry všech článků periodicky měří. V cyklu jsou nejprve načteny všechny provozní parametry. Při vyhodnocení hodnoty mimo daný rozsah, nastane blokace jízdy. Blokace jízdy trvá tak dlouho, dokud hodnota měřené veličiny není v dovoleném rozsahu. V koncové části cyklu proběhne povolení jízdy a zobrazení naměřených hodnot. Ilustrační vývojové diagramy jsou uvedeny na obrázcích níže. Popsané algoritmy byly realizovány pomocí programovacího jazyku C. K tvorbě firmwaru posloužilo vývojové prostředí CodeVision 2.05.



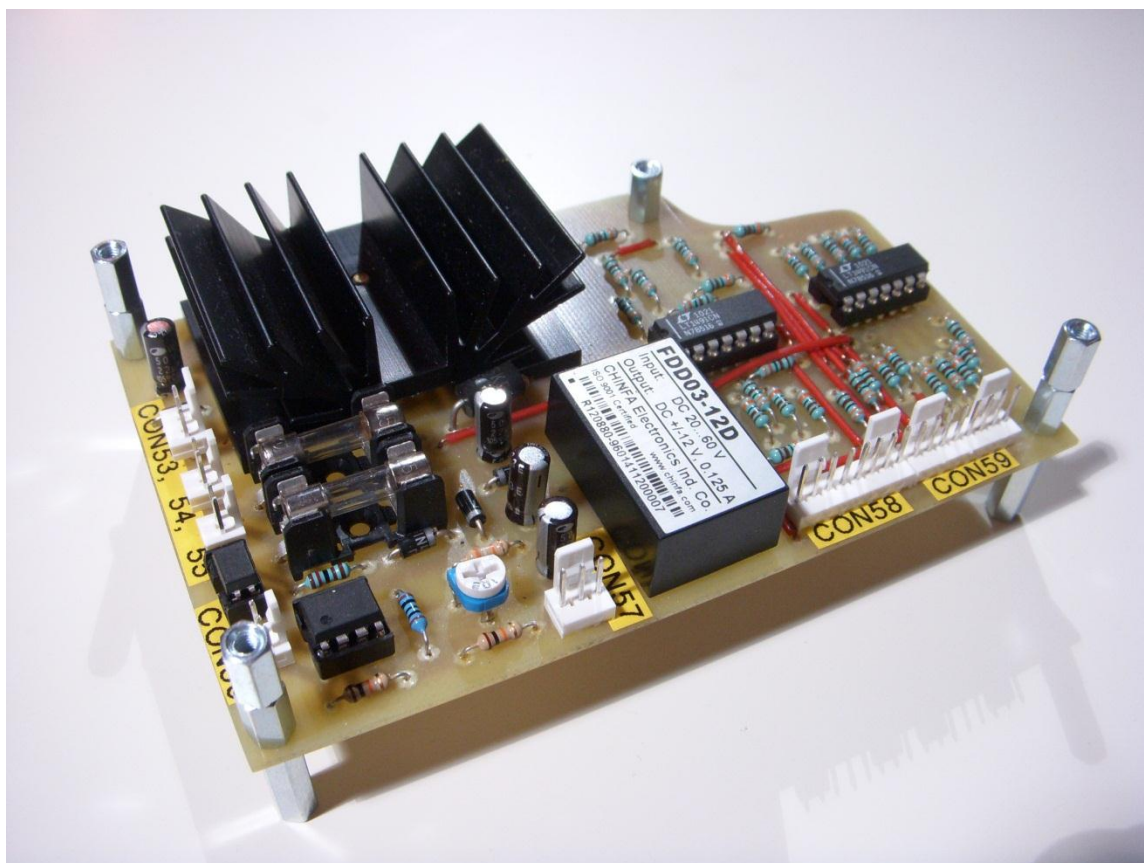
Obrázek 49 - Vývojový diagram režimu nabíjení



Obrázek 50 – Vývojový diagram režimu jízdy

7.5 Realizace jednotky BMS

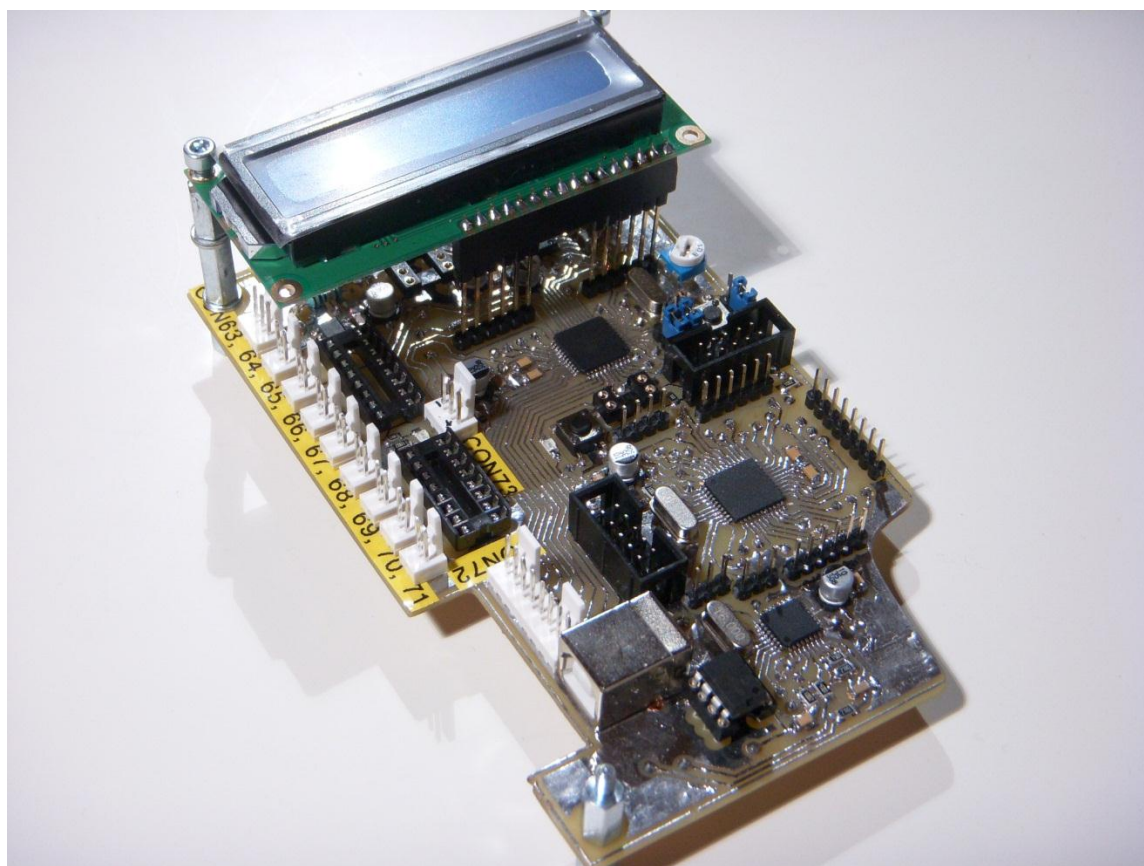
Realizace jednotky díky koncepčnímu rozvržení na dvě nezávislé desky probíhalo ve dvou fázích. Nejprve byl proveden návrh zdrojové desky, označen v blokovém schématu jako blok napájení. V tomto bloku se nacházejí jak napájecí, tak vyhodnocovací komponenty. Při návrhu desky plošných spojů byl na tuto skutečnost brán zřetel a napájecí část byla umístěna co nejdále od vyhodnocovací. Na plošném spoji se nachází i pevně namontovaný chladič lineárního stabilizátoru. Měnič DC/DC se dle testu takřka nezahřívá.



Obrázek 51 - Fotografie sestaveného napájecího bloku

Předmětem druhé realizační fáze jednotky BMS byl samotný blok logiky. Konstrukčním záměrem byla možnost montáže obou desek přímo na sebe tak, aby obě desky tvořily jednotný kompaktní blok. Důvodem záměru je zkrácení délek propojovacích vodičů a absence

přebytečného místa v instalačním boxu. Při porovnání množství komponent v bloku zdroje a v bloku logiky je zřejmé, že umístění všech komponent včetně potřebných cest bude poměrně problematické. Z uvedeného důvodu byl zvolen konstrukční experiment, výroba oboustranného plošného spoje. Návrh a samotná výroba zabrala takřka trojnásobek času výroby jednostranného plošného spoje, avšak nebylo jiné varianty. Obě strany plošného spoje byly pečlivě slícovány, jako prokovy mezi vrstvami posloužily upravené přívodní vodiče od pasivních součástek. Tímto bylo možno zkombinovat montáž součástek THT a SMD včetně kýžené úspory místa.



Obrázek 52 – Fotografie sestaveného bloku logiky

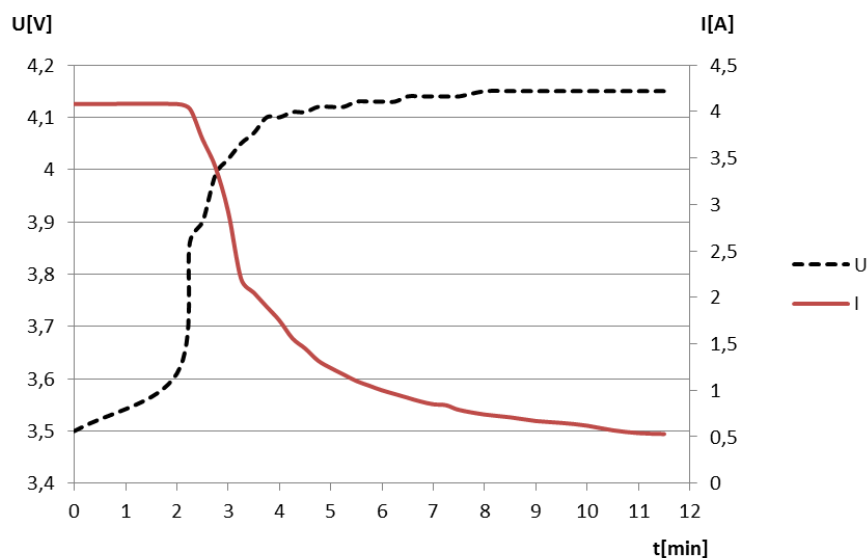
8 VALIDACE NAMĚŘENÝCH HODNOT

8.1 Měření nabíjecí charakteristiky

Mezi stěžejní výstup validace je měření výsledné nabíjecí charakteristiky acu-packu. V ideálním případě by měření mělo probíhat od stavu úplného vybití všech článků až po úplné nabití. Tedy, sledovat ve vhodných časových okamžicích hodnoty všech nabíjecích proudů a hodnoty všech napětí článků. Výstupem by poté bylo osm velice podobných charakteristik, jejichž vypovídací schopnost by byla absolutní.

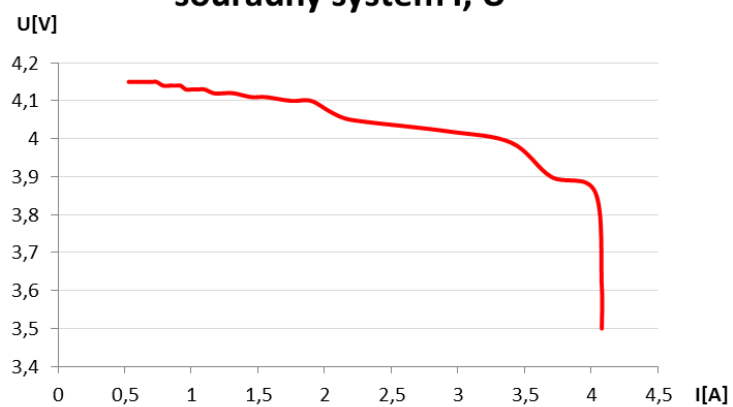
Především z časových důvodů se předmětem validace nabíjecí charakteristiky stal pouze úsek v nabíjecí charakteristice nejstěžejnější. Tímto úsekem se rozumí přechod nabíjecí charakteristiky I na charakteristiku U jednoho nabíjeného článku, označovaný jako „koleno charakteristiky“. Ostatní části charakteristiky jsou méně zajímavé a jejich měření neúměrně časově náročné.

Nabíjení baterie - koleno charakteristiky



Obrázek 53 - Koleno nabíjecí charakteristiky

Nabíjení baterie - koleno charakteristiky, souřadný systém I, U



Obrázek 54 - Koleno nabíjecí charakteristiky - souřadný systém I, U

Tabulka 9 - Koleno charakteristiky - měřená data

t [min:s]	U _{článku} [V]	I _{nabíjecí} [A]
0:00	3,5	4,08
2:00	3,61	4,08
2:15	3,86	4,03
2:30	3,9	3,7
2:45	3,99	3,4
3:00	4,02	2,92
3:15	4,05	2,2
3:30	4,07	2,05
3:45	4,1	1,9
4:00	4,1	1,75
4:15	4,11	1,56
4:30	4,11	1,45
4:45	4,12	1,32
5:00	4,12	1,24
5:15	4,12	1,17
5:30	4,13	1,1
5:45	4,13	1,05
6:00	4,13	1
6:15	4,13	0,96
6:30	4,14	0,92
6:45	4,14	0,88
7:00	4,14	0,85
7:15	4,14	0,84
7:30	4,14	0,79
8:00	4,15	0,74
8:30	4,15	0,71
9:00	4,15	0,67
9:30	4,15	0,65
10:00	4,15	0,62
10:30	4,15	0,57
11:00	4,15	0,54
11:30	4,15	0,53

Na grafu č. 53 je vyobrazena nabíjecí charakteristika jednoho z článků acu-packu (konkrétně s označením 1). Na proudovém průběhu je v počátku měření patrný režim nabíjení I. Nabíjecí proud má konstantní hodnotu 4,08A. Napětový průběh znázorňuje velice rychlý vzestup napětí článku. Z teoretického popisu v kapitolách týkajících se Li-pol baterií je zřejmé, že rychlým vzestupem napětí článku je indikován přechod z nabíjecí charakteristiky I na charakteristiku U. Z hodnot v tabulce č. 9 lze odečíst, že zlomovou napětovou úrovní pro přechod je hodnota 3,86V, od této hodnoty nabíjecí proud strmě klesá. Fázi, kde strmota proudu poklesla a napětí se limitně blíží hodnotě 4,2V, označujeme jako charakteristiku U. Měření kolena charakteristiky probíhalo přes 11 minut a 30 vteřin, toto bylo dáno vysokým stupněm nabití měřeného článku.

Nabíječ tímto svou funkci plní dle požadovaných kritérií. Přesnost nastaveného nabíjecího proudu je dána toleranční kategorií snímacích rezistorů (presnost použitých rezistorů činí $\pm 5\%$). Odchylku 80mA lze brát za zanedbatelnou, neboť tvoří pouhých 2% z nastaveného maximálního proudu.

8.2 Měření celkové účinnosti nabíjení

Zdrojová soustava je brána jako celek tvořený hlavními výkonovými komponentami. Mezi tyto komponenty patří síťový napájecí zdroj, nabíječ trakčních baterií a trakční baterie. Sledovanou vlastností nabíjecího systému je celková účinnost nabíjení. Síťové napětí je nejprve měněno na požadovanou hodnotu v síťovém zdroji, dále je upraveno v nabíječi trakčních baterií. Každá úprava elektrické energie je doprovázena výkonovými ztrátami. Poměr mezi výkonem a příkonem zařízení určuje kvalitativní veličinu, účinnost. Samozřejmou snahou všech konstruktérů elektrických měničů je zařízení navrhnout tak, aby v jeho pracovním bodě byla účinnost co nejvyšší.

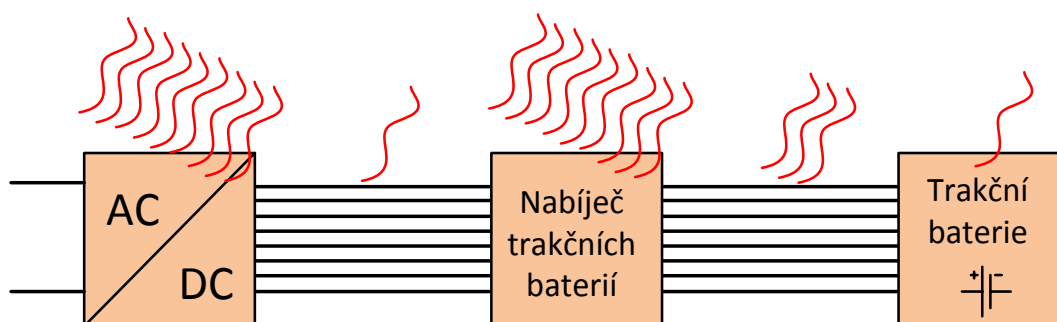
I v případě experimentálního vozidla je nutno ověřit, jak úspěšný návrh zařízení byl a jak se výsledné hodnoty účinností shodují s účinnostmi předpokládanými.

Při návrzích jednotlivých komponent byla uvažována tato data:

- Předpokládaná účinnost nabíječe 70%
- Předpokládaná účinnost síťového zdroje 80%
- Předpokládaný příkon síťového zdroje 240W
- Účinník síťového zdroje $\cos\varphi=0,65$

Pro ověření výše uvedených údajů byl acu-pack vybit tak, aby hodnoty napětí všech článků dosahovaly přibližně hodnoty jmenovité, tedy 3,3V. Z nabíjecí charakteristiky Li-pol článku vyplývá, že v oblasti jmenovité hodnoty napětí se bude pracovní bod nabíječe nacházet nejdéle (řádově 70% doby nabíjení). Naměřené výsledky tímto budou charakterizovat nejdelší a nejtěžejnější fázi nabíjení.

Nejprve je třeba znázornit, na kterých komponentech dochází k výkonovým ztrátám.

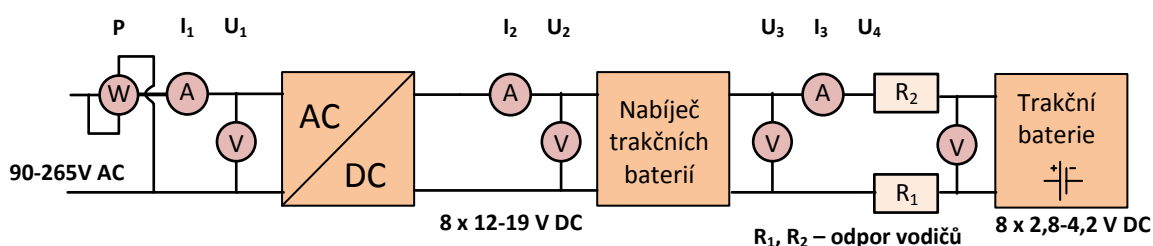


Obrázek 55 - Znázornění výkonových ztrát

Z obrázku je patrné, že k největším předpokládaným ztrátám dochází na síťovém zdroji a na trakčním nabíječi. Jedná se o měniče, které ke změně napětí a proudu využívají polovodičových součástek. Mezi majoritní ztráty na polovodičích patří ztráty Joulovy a ztráty spínací. Výkonová ztráta je patrna i na propojovacích vodičích mezi síťovým zdrojem a nabíječem. Jelikož je hodnota maximálního proudu těmito vodiči 2A na vzdálenosti desítek cm, lze tyto ztráty při výpočtech zanedbat, stejně tak i tepelné ztráty na baterii (nabíjení probíhá malým proudem, účinnost nabíjení samotného článku je vysoká). Nezanedbatelné výkonové ztráty tvoří vodiče, propojující nabíječ a jednotlivé články. Vzdálenost mezi těmito komponentami dosahuje hodnoty kolem 1m, procházející proud potom velikosti 4A.

Cílem validace je tedy změření či výpočet:

- Činného příkonu síťového zdroje
- Zdánlivého výkonu síťového zdroje
- Účinníku síťového zdroje
- Účinnosti síťového zdroje
- Účinnosti nabíječe
- Výkonové ztráty na vodičích mezi nabíječem a acu-packem



Obrázek 56 - Vhodné zapojení měřicího pracoviště

8.2.1 Vlastnosti síťového zdroje

Schéma zapojení měřicího pracoviště bylo provedeno dle přiloženého schématu. Za předem daných podmínek bylo provedeno měření s následujícími výsledky.

$$P = 220W$$

$$S = I_1 \cdot U_1 = 1,42 \cdot 225 = 319,5VA \quad (66)$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{220}{319,5} = 0,69 \quad (67)$$

$$\eta_{\text{zdroje}} = 74\% \quad (68)$$

Měřením a výpočtem se došlo k činnému příkonu 220W, zdánlivému příkonu 319,5W, k účinníku 0,69 a účinnosti 74% (účinnost bude vypočtena v následující kapitole 8.2.2).

8.2.2 Vlastnosti nabíječe

V níže uvedené tabulce jsou zaznamenána měřená data v místech udaných schématem 55.

Tabulka 10 - Měřená data - nabíječ

Označení článku	U_3 [V]	I_3 [A]	$P_{\text{nabíječ v\,ýstupn\,í}}$ [W]
1	3,34	4,08	15,38
2	3,31	4,05	15,11
3	3,28	4,07	15,10
4	3,3	3,99	14,88
5	3,33	4,05	15,27
6	3,31	4,1	15,38
7	3,33	4,06	15,27
8	3,35	3,98	15,00
Σ			121,38

V posledním sloupci zleva jsou vypočítány výstupní výkony jednotlivých nabíječů (bez výkonové ztráty na vodičích). Součet výstupních výkonů dává hodnotu 121,38W.

Napětí U_2 a proud I_2 nebyly měřeny kvůli složitějšímu konstrukčnímu uspořádání vodičů uvnitř instalačního boxu a zhoršenému přístupu. Účinnost jednoho dílčího nabíječe je však známa z dob jeho realizace, kdy byl ke všem vodičům ještě dostatečný přístup.

$$\eta_{\text{nabíječe}} = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{U_{\text{out}} \cdot I_{\text{out}}}{U_{\text{in}} \cdot I_{\text{in}}} = \frac{3,93 \cdot 4,08}{12 \cdot 1,79} = 0,746 = 74,6\% \quad (69)$$

Při znalosti účinnosti nabíječe a výstupního výkonu, lze vypočítat výkon síťového zdroje. Úbytky na propojovacích vodičích mezi nabíječem a síťovým zdrojem jsou zanedbány.

$$P_{\text{zdroj v\,ýstupn\,í}} = \frac{P_{\text{nabíječ v\,ýstupn\,í}}}{\eta_{\text{nabíječe}}} = \frac{121,38}{0,746} = 162,7\text{W} \quad (70)$$

Potom účinnost síťového zdroje je daná vztahem:

$$\eta_{\text{zdroje}} = \frac{P_{\text{zdroj v\,ýstupn\,í}}}{P} = \frac{162,7}{220} = 0,74 = 74\% \quad (71)$$

8.2.3 Ztráta na vodičích

V níže uvedené tabulce jsou tabelovány naměřené údaje na přívodních vodičích k baterii.

Tabulka 11 - Měření na vodičích

Označení článku	U_4 [V]	U_3 [V]	I_3 [A]	$U_3 - U_4$ [V]	$P_{\text{vodič}}$ [W]
1	3,77	3,34	4,08	0,43	1,75
2	3,73	3,31	4,05	0,42	1,70
3	3,71	3,28	4,07	0,43	1,75
4	3,73	3,3	3,99	0,43	1,72
5	3,77	3,33	4,05	0,44	1,78
6	3,75	3,31	4,1	0,44	1,80
7	3,76	3,33	4,06	0,43	1,75
8	3,77	3,35	3,98	0,42	1,67
Σ					13,92

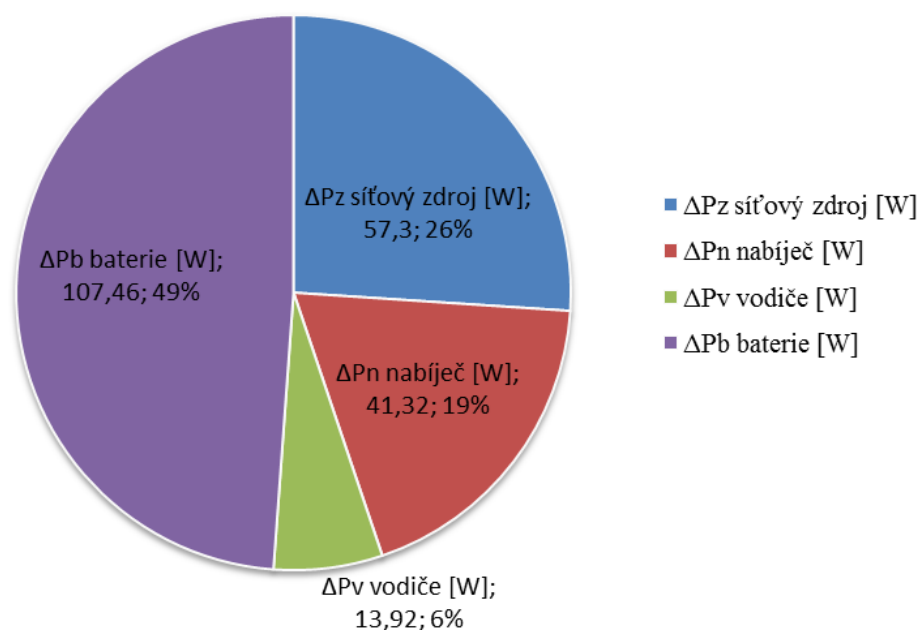
Z výsledků v tabulce vyplývá, že napěťový úbytek na propojovacích vodičích mezi nabíječem a články dosahuje průměrné hodnoty okolo 0,44V. Při průchodu proudu řádově 4A na každém vzniká výkonová ztráta okolo hodnoty 1,7W. Celkový výkonový úbytek na všech vodičích dosahuje velikosti 13,92W.

8.2.4 Shrnutí výsledků

Z výše uvedených výpočtů a měření vyplývá, že nejvíce výkonových ztrát je mařeno na síťovém zdroji a na nabíječi trakčních baterií. Grafické znázornění výkonového toku je vyobrazeno na koláčovém grafu č. 57 níže. Z grafu je patrné, že největší ztráty představuje síťový zdroj, na kterém je promařen výkon 57,3W. Dále nabíječ se ztrátovým výkonem 41,32W. Nejmenší ztráty, ale nezanedbatelné, vykazují propojovací vodiče mezi nabíječem a samotnými bateriemi o hodnotě 13,92W. Do baterie je dodáván výkon o velikosti 107,46W.

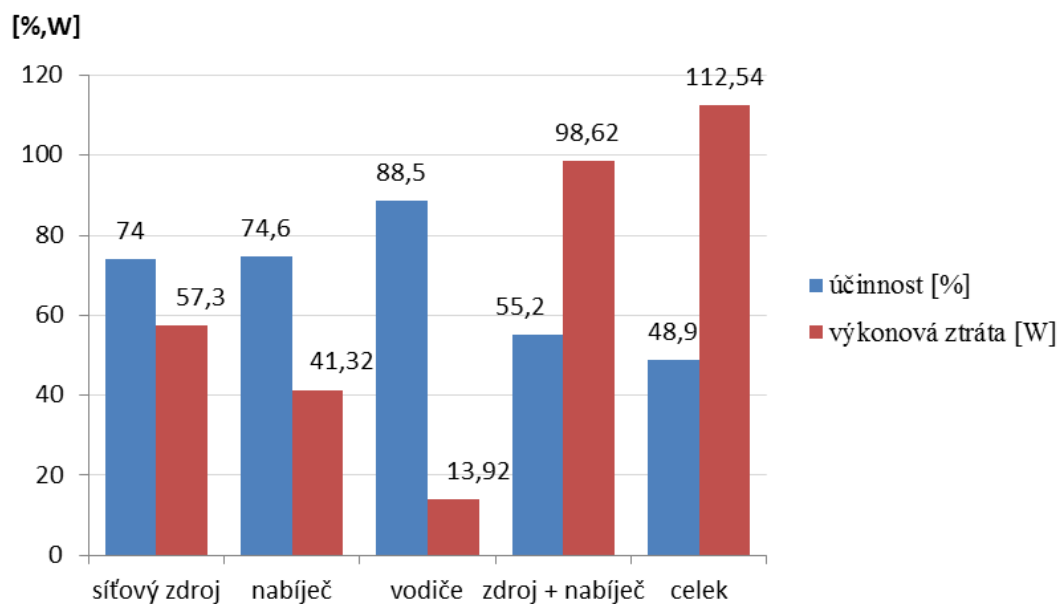
Na následujícím sloupcovém grafu je poté znázorněna účinnost jednotlivých komponent včetně uvedení výkonových ztrát. Dle grafu vychází celková účinnost při nabíjení 48,9%. Na první pohled je tato hodnota účinnosti poměrně špatná. Uvážíme-li ale, kolika měniči elektrická energie prochází, můžeme konstatovat, že výsledná účinnost koresponduje se složitostí systému.

Spotřebiče výkonu při nabíjení



Obrázek 57 - Spotřebiče výkonu - režim nabíjení

Výkonové ztráty na komponentech



Obrázek 58 - Výkonové ztráty na jednotlivých komponentech

Tabulka 12 - Sumarizace naměřených a vypočtených hodnot

Měřená komponenta	Činný příkon [W]	Zdánlivý příkon [VA]	Účinník	Výkon [W]	Účinnost [%]	Výkonová ztráta [W]
Síťový spínaný zdroj	220	319,5	0,69	162,7	74	57,3
Nabíječ trakčních baterií	162,7	x	x	121,38	74,6	41,32
Vodiče („distribuce“)	121,38	x	x	107,46	88,5	13,92
Zdroj + nabíječ („přeměna“)	220	319,5	0,69	121,38	55,2	98,62
Celkový systém	220	319,5	0,69	107,46	48,9	112,54

Ve výše uvedené tabulce jsou tabelovány celkové naměřené a vypočítané výsledky. Nyní je možno přistoupit k samotné validaci naměřených hodnot a porovnat s hodnotami předpokládanými.

Při porovnání příkonu síťového zdroje si je nutno uvědomit podmínky měření. Při výpočtech byl uvažován maximální výkon nabíjení 8 x 16,8W (134,4W), při měření bylo dosaženo výkonu nabíjení 107,46W. Při znalosti změřené účinnosti celého systému (jak přeměny, tak distribuce) 48,9% je možno vypočítat příkon síťového zdroje při maximálním zatížení.

$$P_{in_zdroje_max} = \frac{P_{nabíjení_max}}{\eta_{zdroje}} = \frac{134,4}{0,489} = 274,8W \quad (72)$$

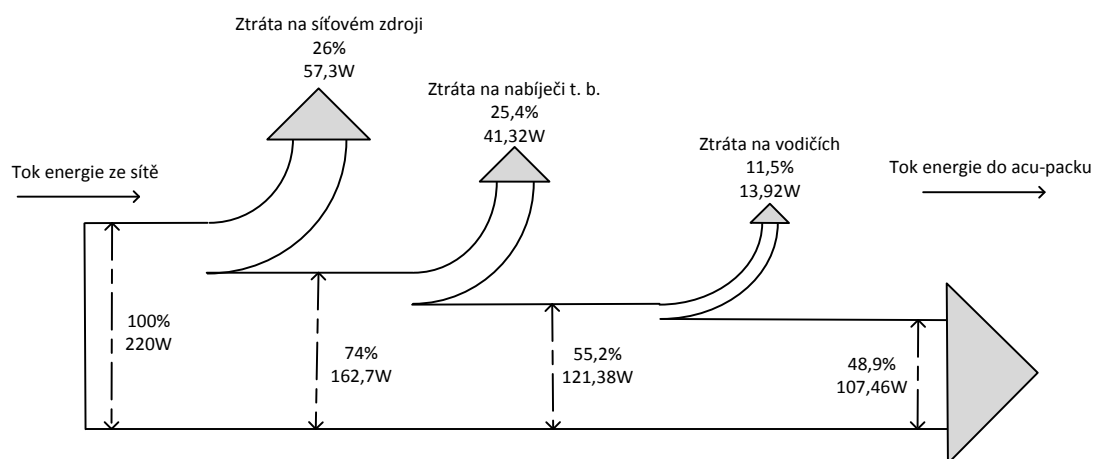
Potom zdánlivý příkon při maximálním nabíjecím výkonu lze získat ze vzorce:

$$S_{in_zdroje_max} = \frac{P_{in_zdroje_max}}{\cos \varphi} = \frac{274,8}{0,69} = 398,3VA \quad (73)$$

Při návrhu zařízení byl uvažován činný příkon zdroje 240W, po návrhu a realizaci měla změřená veličina hodnotu 274,8W. Tímto vychází rozdíl mezi návrhem a realizací 34,8W. Další předpokládanou veličinou byl účinník síťového zdroje a zdánlivý příkon. Účinník $\cos \varphi$ byl uvažován o hodnotě 0,65, po změření dosahoval velikosti 0,69. V tomto ohledu zařízení vykazuje lepší kvalitu odběru elektrické energie ze sítě, než bylo předpokládáno. S účinníkem souvisí i hodnota zdánlivého příkonu, ta se liší od uvažované hodnoty 369VA o 29,3VA. Jeho velikost činí 398,3VA. Dalšími zkoumanými vlastnostmi byly účinnosti. Předpokládaná účinnost síťového zdroje 80% je po změření bohužel nižší, dosahuje hodnoty 74%. U nabíječe je výsledná situace opačná, jeho výsledná účinnost je vyšší než uvažovaná. Místo uvažovaných 70% dosahuje hodnoty 74,6%. Celková účinnost samotné přeměny energie

dosahuje hodnoty 55,2%. Neuvažovanou komponentou zdrojového systému při návrhu zařízení byly vodiče mezi nabíječem a články acu-packu. Na těchto vodičích byla změřena výkonová distribuční ztráta 13,92W, což udává účinnost 88,5%.

Celkový tok energie přehledně znázorňuje Sankeyův diagram:



Obrázek 59 - Sankeyův digram toku energie

9 IMPLEMENTACE SYSTÉMU NA VOZIDLO

Důležitou částí konstrukce zdrojové soustavy bylo její umístění na experimentální vozidlo. Při instalaci se vycházelo ze základních bezpečnostních zásad. Umístění jednotlivých komponent bylo nutno umístit do uzavřeného boxu, který slouží jako mechanická ochrana proti vniknutí cizích částí a částečně i proti vniknutí vody a jiných nečistot. Pro zvýšení názornosti konstrukce byl systém zabudován do boxu s transparentním vrchním víkem. Koncepce chlazení je zvolena s nuceným oběhem vzduchu dvěma okruhy. V jednom okruhu je umístěn síťový spínaný zdroj, jednotka BMS a částečně nabíječ trakčních baterií. V druhém okruhu je umístěna většina chladičů plochy nabíječů. Tímto je zajištěno rovnoměrné chlazení všech komponent. Na níže uvedeném obrázku se nachází fotografie kompletně osazeného vozidla.



Obrázek 60 - Kompletně osazené vozidlo - box zdrojového systému umístěn níže

10 VÝHLED NAVAŽUJÍCÍCH ČINNOSTÍ

Diplomová práce jako celek vykazuje souhrnný přehled o problematice jednotlivých komponent zdrojového systému experimentálního elektromobilu. Předmětem činnosti autora byl návrh kompletního systému, výroba a ověření funkčnosti stěžejních komponent, kterými jsou spínaný síťový zdroj, nabíječ trakčních baterií a jednotka BMS. Ověřením funkčnosti se rozumí měření jak požadovaných parametrů, tak ověření kompatibility jednotlivých dílčích komponent. V době kompletace diplomové práce zdrojový systém splňuje vytyčené zadání a tímto je experimentální vozidlo připraveno dalším studentům DFJP z katedry KEEZ k případným vylepšením a úpravám, které při konstrukci zařízení vyvstaly jako vhodné. V práci nebyla řešena komunikace bloku logiky systému BMS s centrální jednotkou pomocí sběrnice RS232. Touto formou by bylo možno hodnoty naměřené BMS systémem posílat centrální jednotce, která by na jejich základě prováděla on-line úpravy jízdního režimu pro dosažení daného dojezdu. Dalšími přenášenými informacemi by dále mohla být blokace jízdy a diagnostické zprávy. V současnosti jsou zprávy zobrazovány pouze na LCD display, umístěném v zadní části vozidla. Dále nebylo řešeno vyhodnocení velikosti trakčního proudu a napětí ve stejnosměrném meziobvodu. Velice přínosným rozšířením funkce BMS je shledán výpočet a měření množství dodaného náboje při nabíjení a množství odebraného náboje. Uvedená rozšíření by dodala obsluze větší míru jízdního komfortu.

11 ZÁVĚR

Diplomová práce s názvem „Energetická zdrojová soustava pro studentský experimentální elektromobil“ se zabývá koncepčním návrhem i reálnou konstrukcí energetické zdrojové soustavy pro studentský experimentální elektromobil. V práci byl nejprve analyzován původní stav vozidla z hlediska instalovaných komponent, mechanických a geometrických parametrů. Dále byla navržena trasa, na kterou by měla být zdrojová soustava dimenzována. Výstupy z energetických výpočtů dané trasy byly vyhodnoceny a na jejich základě poté vybrán vhodný typ trakční baterie jak z hlediska kapacity, tak elektrických parametrů. Ze znalosti typu a kapacity baterie byl učiněn teoretický návrh nabíječe trakční baterie a poté provedena jeho realizace. Dalším krokem byl návrh napájecího zdroje nabíječe a návrh systému kontroly stavu baterií BMS, též včetně jejich realizace.

Pro účel akumulace energie ve vozidle byly vybrány Lithium-polymerové články se jmenovitým napětím 3,2V. Pro dosažení jmenovitého napětí motorů 24 byly jednotlivé články zapojeny do série, přičemž jmenovité napětí acu-packu tímto dosahuje hodnoty 25,6V. Na základě výběru Li-pol článků bylo nutno navrhnout nabíječ, který by řešil i funkci balancéru (tedy kontrolu přebití některého ze článku). Ideální nabíjecí charakteristiky IU a výborné kontroly nad nabíjením bylo dosaženo realizací osmi nezávislými nabíječi, přičemž každý nabíječ nabíjí pouze jeden článek. Tímto je zamezeno možnosti přebíjení některého článku ze sériové kombinace. Ze znalosti koncepce nabíječe trakčních baterií bylo nutno navrhnout zdroj, který by nabíječ vhodně napájel. Při návrhu padla volba na síťový spínaný zdroj topologie flyback, který splňoval jak kritéria vysoké účinnosti a nízké hmotnosti, tak možnosti galvanického oddělení osmi sekundárních vinutí. Při nabíjení a vybíjení acu-packu dochází ke stavům, kdy jsou jednotlivé články vystaveny riziku poškození. Těmito stavy se rozumí zvýšení teploty článku, nadměrné vybití či přebití. Bylo tedy nutno navrhnout systém kontroly stavu nabití BMS. Systém BMS sleduje napětí a teploty na jednotlivých článcích acu-packu. Pokud identifikuje hodnotu měřené veličiny mimo pracovní rozsah, učiní akční zásah v podobě přerušení trakčního obvodu či přerušení nabíjení daného článku. Systém BMS je založen na mikrokontrolérech firmy ATMEL, přičemž rozhraní mezi programem a uživatelem tvoří grafický LCD display.

Výstupem diplomové práce je zařízení splňující zadání, přičemž všechny uvedené komponenty byly jak navrženy, tak realizovány, měřeny a validovány. Celkově zařízení pracuje v tolerancích, daných návrhem a technickými možnostmi při návrhu a realizaci. Tímto je vozidlo připraveno studentům DFJP jako výchozí bod pro další rozšiřující doplňkové činnosti a vylepšení.

12 POUŽITÁ LITERATURA

- [1].SADÍLEK, Ondřej. Návrh koncepce bateriového systému experimentálního elektromobilu. Pardubice, 2012, 28 s.
- [2].SADÍLEK, Ondřej. Elektronický diferenciál pro studentský experimentální elektromobil, návrh nabíječe trakčních baterií. Pardubice, 2013, 20 s.
- [3].Datasheet. LTC4002 Standalone Li-Ion Switch Mode Battery Charger. USA: Linear Technology Corporation, 2003. Dostupné z: <http://cds.linear.com/docs/Datasheet/4002f.pdf>
- [4].THUNDER SKY. Thunder Sky LiFePO4 power battery specifications. 2007, 2 s. Dostupné z: www.thunder-sky.com
- [5].ON SEMICONDUCTOR. NCP 1337 PWM Current mode controller for free runing quasi-resonant operation: Datasheet. USA, 2011, 15 s. 5. Dostupné z: www.onsemi.com
- [6].ON SEMICONDUCTOR. TDN318/D 60W adapter documentation package: Aplication notes. USA, 2006, 18 s. 1. Dostupné z: www.onsemi.com
- [7].CYR, Nicolas. ON SEMICONDUCTOR. A 160W CRT TV power supply using NCP1337: Aplication notes. USA, 2005, 10 s. 1. Dostupné z: www.onsemi.com
- [8].KREJČÍK, CSC., Ing. Alexndr. Spínané zdroje: Konstrukční elektronika A Radio. 2000, 3, 4, s. 39.
- [9].RIDLEY, Dr. Ray. Flyback converter snubber design: Designers series 12. Switching power magazine. 2005, s. 10
- [10]. ATMEL CORPORATION. ATMEGA 16: Datasheet. USA, 2010, 349 s. Dostupné z: <http://www.atmel.com/Images/doc2466.pdf>
- [11]. ATMEL CORPORATION. ATMEGA 324PA: Datasheet. USA, 2009, 460 s. Dostupné z: <http://www.atmel.com/Images/doc8152.pdf>
- [12]. TOMÁŠ, Lelek. Experimentální elektromobil - návrh elektroniky pohonu. 2013, 42 s.
- [13]. TOMÁŠ, Lelek. Elektrický pohon bateriového studentského experimentálního elektromobilu: Diplomová práce. 2013

- [14]. CF139 Material properties: Datasheet. Cosmoferrites. Dostupné z:
<http://www.cosmoferrites.com/Downloads/Alnh/CF139.pdf>
- [15]. Current Transducer LA 55-P/SP1: Datasheet. LEM, 3 s. Dostupné z:
<http://www.lem.com/docs/products/la%2055-p%20sp1%20e.pdf>
- [16]. SPP17N80C3: Datasheet. Infineon, 2011, 13 s. Dostupné z: <http://www.infineon.com>
- [17]. FDD03-12D: Datasheet. CHINFA, 2007, 4 s. Dostupné z:
<http://www.gme.cz/dokumentace/332/332-065/dsh.332-065.1.pdf>
- [18]. PC817: Datasheet. LITEON, 5 s. Dostupné z:
<http://www.gme.cz/dokumentace/523/523-060/dsh.523-060.1.pdf>
- [19]. FT232BL: Datasheet. FTDI, 34 s. Dostupné z:
http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232BL_BQ.pdf
- [20]. MAX232: Datasheet. TEXAS INSTRUMENTS, 2004, 19 s. Dostupné z:
<http://www.ti.com/lit/ds/symmlink/max232.pdf>

13 SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Původní stav invalidní tříkolky	12
Obrázek 2 - Znázornění výškového profilu trasy	14
Obrázek 3 - Vyznačení trasy na mapě.....	15
Obrázek 4 – Dílčí spotřebiče energie pro cestu Hronov-Adršpach, [Wh, %]	24
Obrázek 5 - Dílčí spotřebiče energie pro cestu Adršpach-Hronov, [Wh, %].....	25
Obrázek 6 - Závislost potřebné energie na ujeté vzdálenosti, znázornění výškového profilu	26
Obrázek 7 - Blokové schéma elektrické výzbroje vozidla	27
Obrázek 8 - Vnitřní uspořádání standartního Li-pol článku	30
Obrázek 9 - Ilustrační nabíjecí charakteristika Li-pol baterie	31
Obrázek 10 - Vnitřní uspořádání LiFePO4 Li-pol článku.....	31
Obrázek 11 - Vybíjecí charakteristika typického Li-pol LiFePO4 článku.....	33
Obrázek 12 - Závislost odebírané energie z trakční baterie na ujeté vzdálenosti	35
Obrázek 13 - Použitý typ článku	36
Obrázek 14 - Principiální schéma nabíječe s balancéry	39
Obrázek 15 - Principiální schéma nabíječe s individuálním nabíjením	40
Obrázek 16 - Popis vývodů SMD pouzdra obvodu.....	42
Obrázek 17 - Blokové schéma nabíjecího obvodu LTC4002	44
Obrázek 18 - Doporučené zapojení nabíjecího obvodu	45
Obrázek 19 - Krajní parametry tranzistoru	48
Obrázek 20 - Výstupní charakteristika tranzistoru.....	48
Obrázek 21 - Nabíječ trakčních baterií - pohled na dílčí nabíječe šesti článků	51
Obrázek 22 - Nabíječ trakčních baterií - pohled ze strany žebrovaného chladiče	51
Obrázek 23 - Blokové schéma spínaného Flyback zdroje	55
Obrázek 24 - Vstupní blok zdroje	56
Obrázek 25 –Popis vývodů obvodu NCP1337.....	59
Obrázek 26 - Schéma zapojení řídicího obvodu NCP1337.....	61
Obrázek 27 - Princip detekce odmagnetovaného transformátoru	62
Obrázek 28 - Rozměrové dispozice jádra (přesné rozměry viz www.semic-shop.cz)	66
Obrázek 29 - Spínaný zdroj bez ochranného obvodu	69
Obrázek 30 - Průběh napětí na spínacím prvku - bez ochranného obvodu.....	69
Obrázek 31 - Spínaný zdroj s ochranným obvodem	70
Obrázek 32 - Průběh napětí na tranzistoru - zapojen RC snubber	71
Obrázek 33 - Schéma výstupního obvodu	72
Obrázek 34 - Zpětnovazební obvod	73
Obrázek 35- Omezovací článek	76
Obrázek 36 - Blokové schéma zpětné vazby s omezovacími články.....	76
Obrázek 37 - Spínaný zdroj, pohled na primární část.....	77
Obrázek 38 - Spínaný zdroj, pohled na sekundární část	78
Obrázek 39 - Blokové schéma BMS.....	81
Obrázek 40 - Napájecí zdroj jednotky BMS	83
Obrázek 41 - Vyhodnocovací obvod proudového snímače	84
Obrázek 42 - Ilustrační obrázek proudového snímače	85
Obrázek 43 - Vyhodnocovací článek napětí třetího článku	86

Obrázek 44 - Zapojení MCU ATMEGA324PA	88
Obrázek 45 - Zapojení MCU ATMEGA16	89
Obrázek 46 - Zapojení obvodu MAX232	91
Obrázek 47 - Zapojení budiče USB	91
Obrázek 48 - Schéma zapojení grafického LCD.....	92
Obrázek 49 - Vývojový diagram režimu nabíjení	95
Obrázek 50 - Vývojový diagram režimu jízdy	96
Obrázek 51 - Fotografie sestaveného napájecího bloku.....	97
Obrázek 52 - Fotografie sestaveného bloku logiky	98
Obrázek 53 - Koleno nabíjecí charakteristiky	99
Obrázek 54 - Koleno nabíjecí charakteristiky - souřadný systém I, U.....	100
Obrázek 55 - Znázornění výkonových ztrát.....	102
Obrázek 56 - Vhodné zapojení měřicího pracoviště.....	103
Obrázek 57 - Spotřebiče výkonu - režim nabíjení.....	106
Obrázek 58 - Výkonové ztráty na jednotlivých komponentech.....	106
Obrázek 59 - Sankeyův digram toku energie.....	108
Obrázek 60 - Kompletně osazené vozidlo - box zdrojového systému umístěn níže	109

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Parametry vozidla, zdroj[13]	13
Tabulka 2 - Parametry pohonu a vozidlové odpory, zdroj [13]	13
Tabulka 3 - Parametry jednotlivých traťových úseků.....	16
Tabulka 4 - Spotřeba energie, trasa Hronov-Adršpach	24
Tabulka 5 - Spotřeba energie, trasa Adršpach-Hronov	25
Tabulka 6- Parametry jednoho článku TS-LFP40AHA.....	37
Tabulka 7 - Nabíjecí proces	46
Tabulka 8 - Logika spínání zpětných vazeb (log 1 - napětí výstupní větve je $\geq 12V$, log 0 – napětí výstupní větve je $< 12V$).....	75
Tabulka 9 - Koleno charakteristiky - měřená data	100
Tabulka 10 - Měřená data - nabíječ.....	104
Tabulka 11 - Měření na vodičích	105
Tabulka 12 - Sumarizace naměřených a vypočtených hodnot.....	107

14 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A – návrhy plošných spojů

Příloha A. 1 - Plošný spoj nabíječe jednoho článku, strana BOTTOM, rozměry v mm.....	117
Příloha A. 2 - Plošný spoj zp. vazby a omezovacích článků síť. zdroje, strana BOTTOM, rozměry v mm	117
Příloha A. 3 - Plošný spoj spínaného zdroje, strana BOTTOM, rozměry v mm	118
Příloha A. 4 - Plošný spoj zp. vazby sp. zdroje, strana TOP, rozměry v mm	118
Příloha A. 5 - Plošný spoj spínaného zdroje, strana TOP, rozměry v mm.....	119
Příloha A. 6 - Plošný spoj bloku napájení BMS, strana BOTTOM, rozměry v mm.....	120
Příloha A. 7 - Plošný spoj bloku logiky BMS, strana BOTTOM, rozměry v mm.....	120
Příloha A. 8 - Plošný spoj bloku napájení BMS, strana TOP, rozměry v mm.....	121
Příloha A. 9 - Plošný spoj bloku logiky, strana TOP, rozměry v mm.....	121

Příloha B – kompletní schéma

Příloha B. 1 - Nabíječ jednoho článku z ACU-PACKU	122
Příloha B. 2 – Spínaný síťový zdroj.....	123
Příloha B. 3 – Blok logiky BMS, část 1	124
Příloha B. 4 - Blok logiky BMS, část 2.....	125
Příloha B. 5 - Blok napájení BMS	126

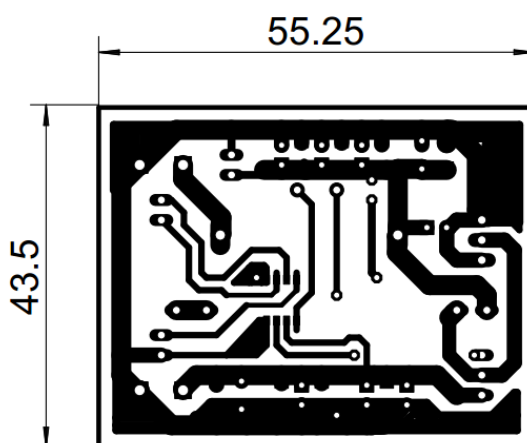
Příloha C – umístěna na CD

Obsah CD:

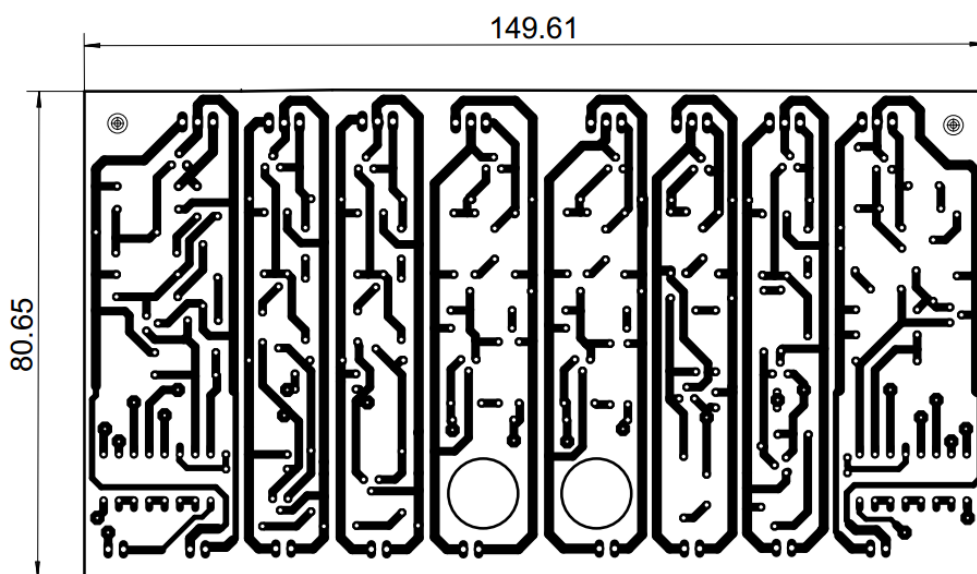
- Návrhy schémat a plošných spojů v programu EAGLE
- Kompletní program pro MCU ATMEGA 324PA

Příloha A – návrhy plošných spojů

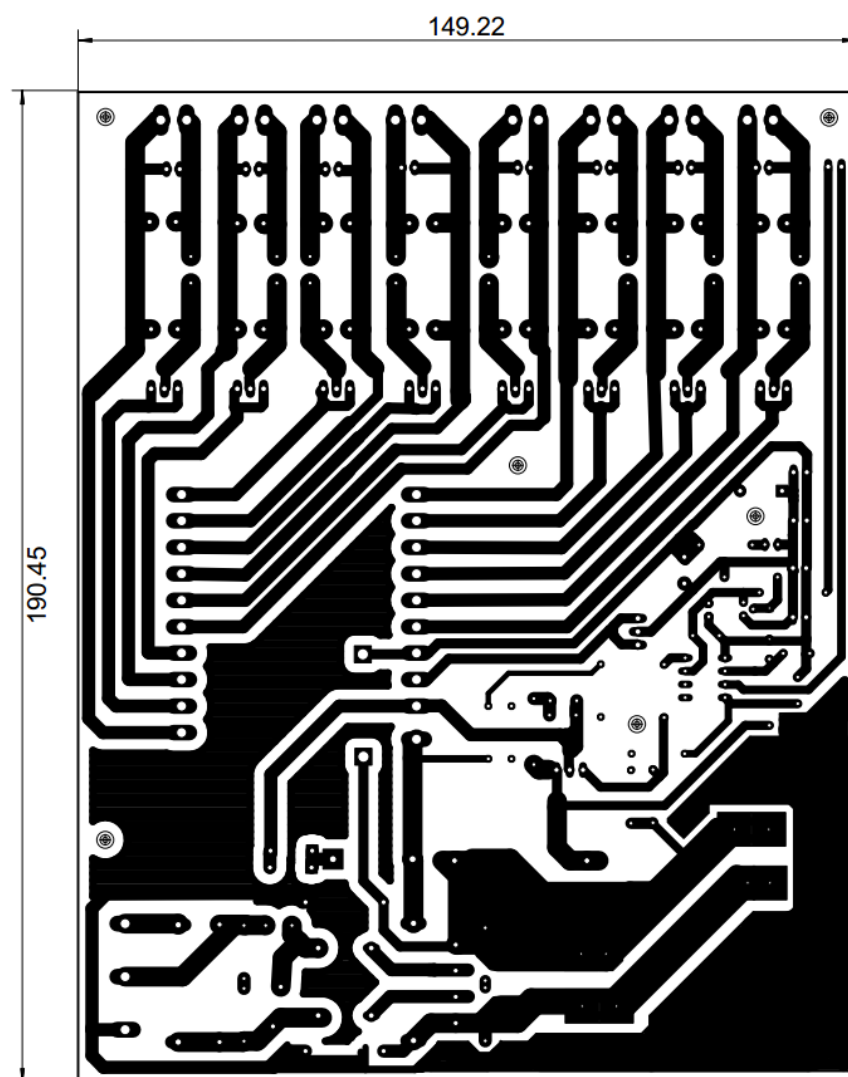
Příloha A. 1 - Plošný spoj nabíječe jednoho článku, strana BOTTOM, rozměry v mm



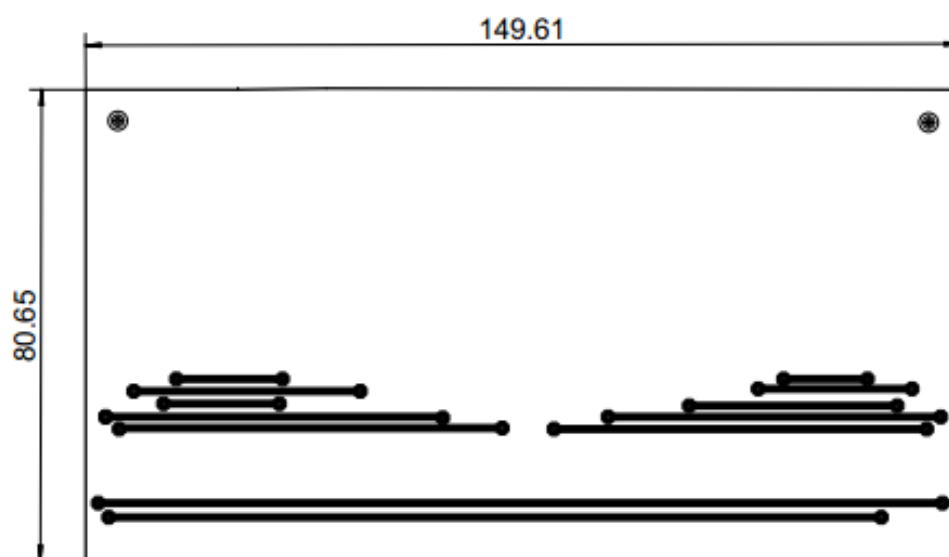
Příloha A. 2 - Plošný spoj zp. vazby a omezovacích článků síť. zdroje, strana BOTTOM, rozměry v mm



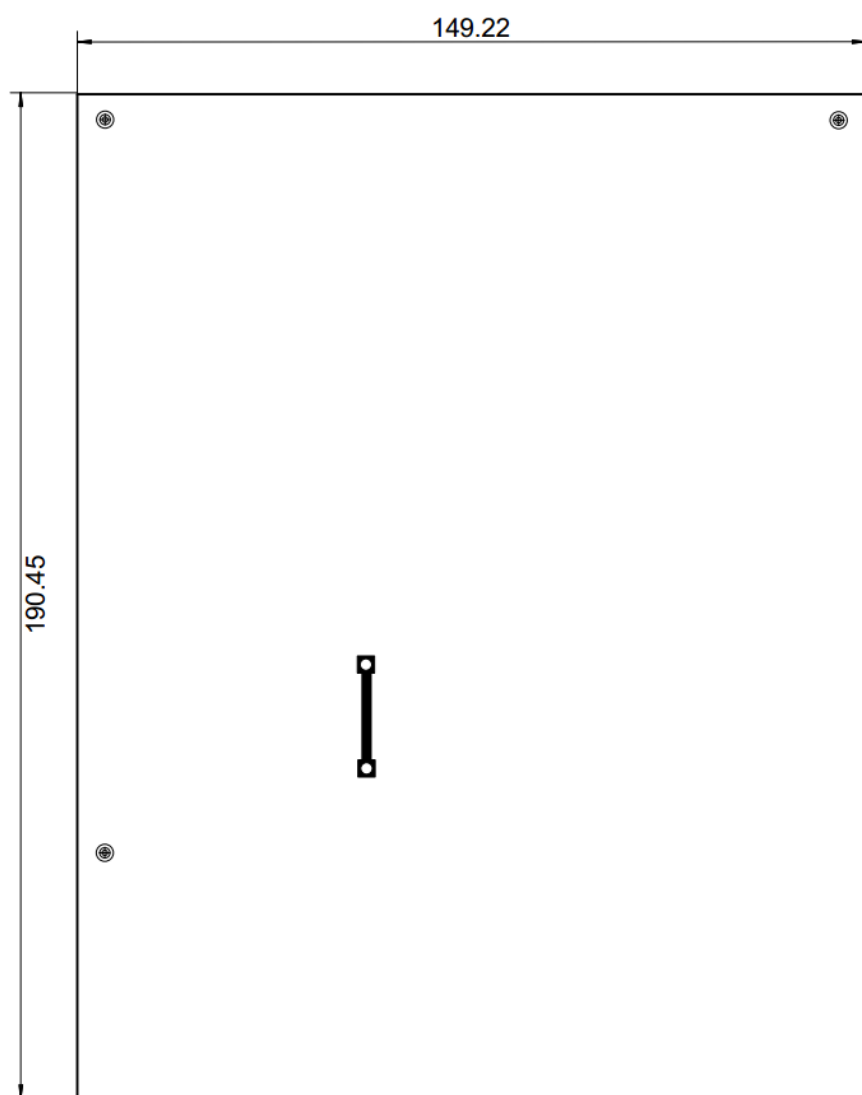
Příloha A. 3 - Plošný spoj spínaného zdroje, strana BOTTOM, rozměry v mm



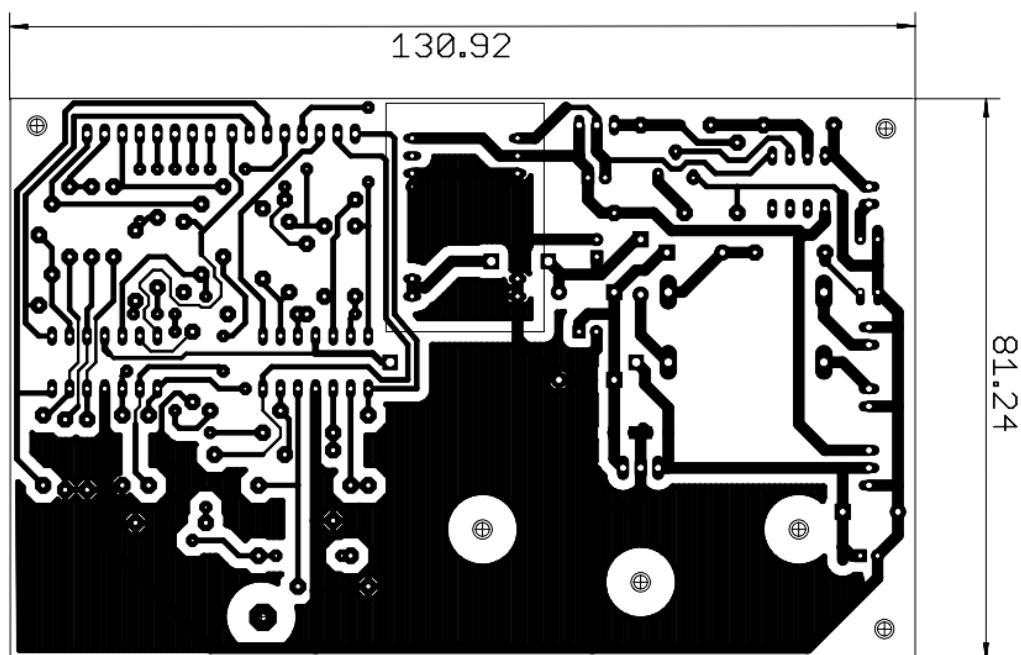
Příloha A. 4 - Plošný spoj zp. vazby sp. zdroje, strana TOP, rozměry v mm



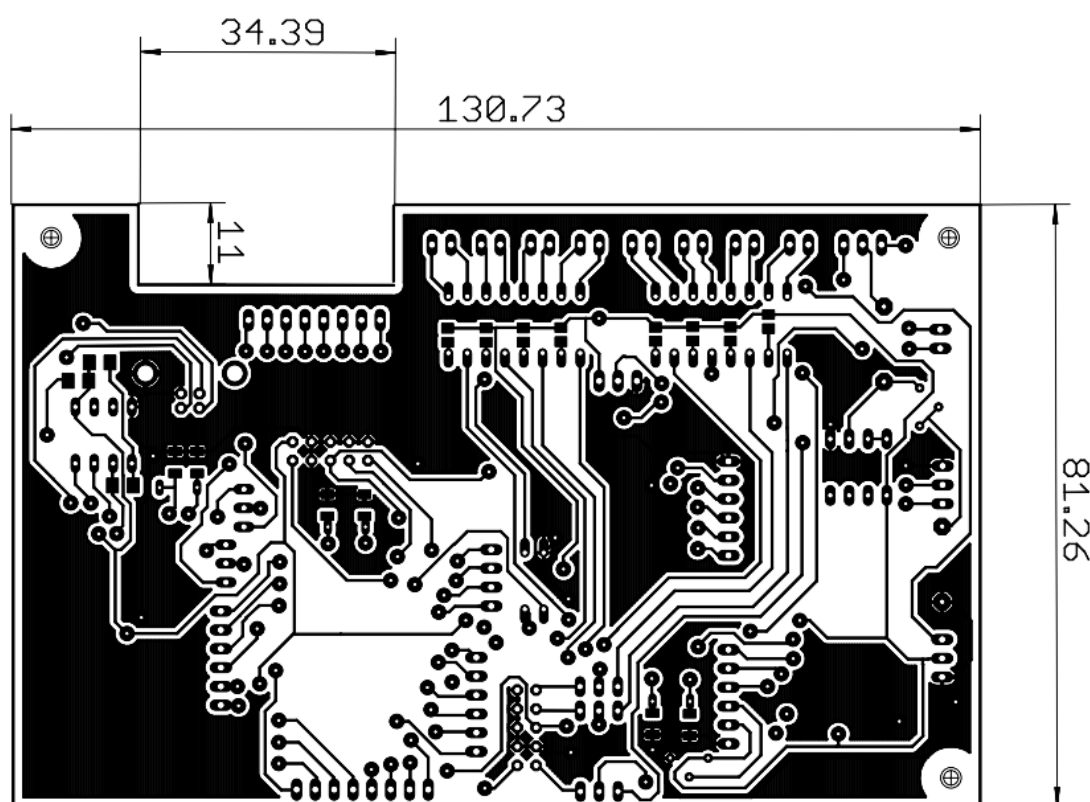
Příloha A. 5 - Plošný spoj spínaného zdroje, strana TOP, rozměry v mm



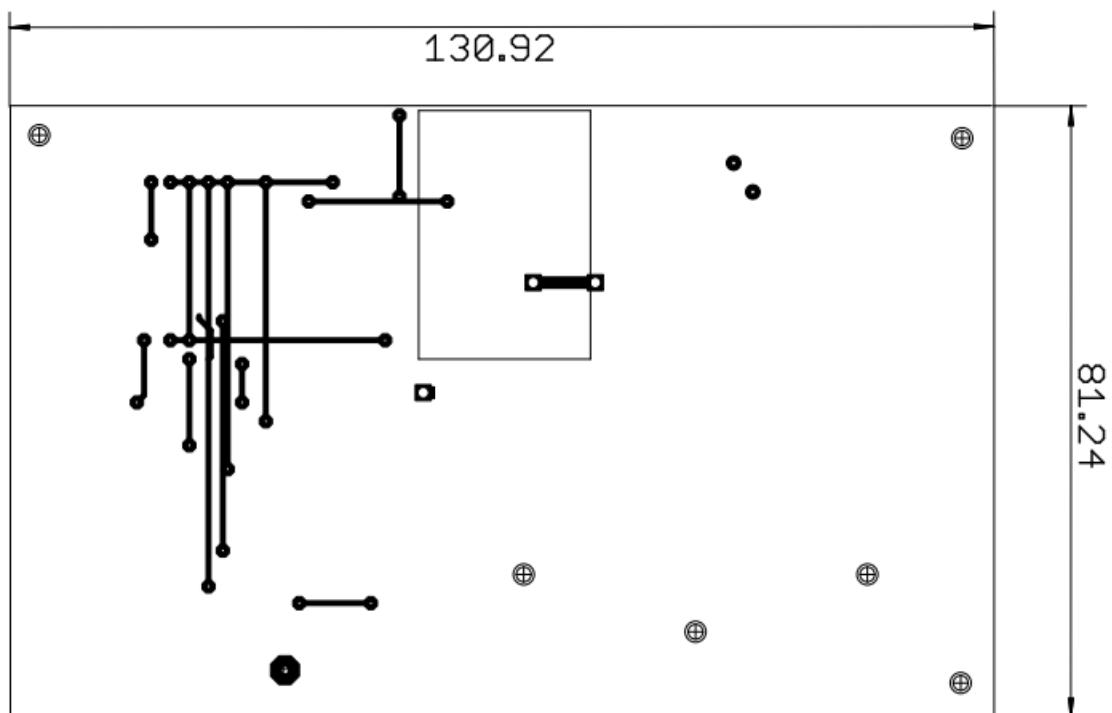
Příloha A. 6 - Plošný spoj bloku napájení BMS, strana BOTTOM, rozměry v mm



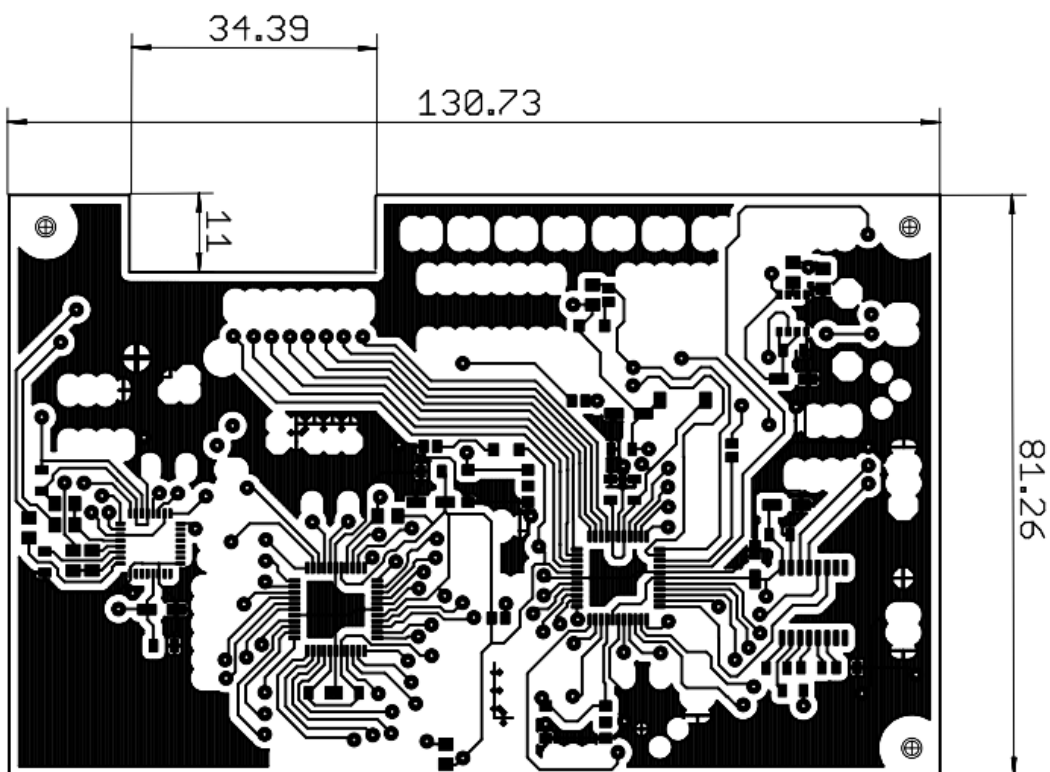
Příloha A. 7 - Plošný spoj bloku logiky BMS, strana BOTTOM, rozměry v mm



Příloha A. 8 - Plošný spoj bloku napájení BMS, strana TOP, rozměry v mm

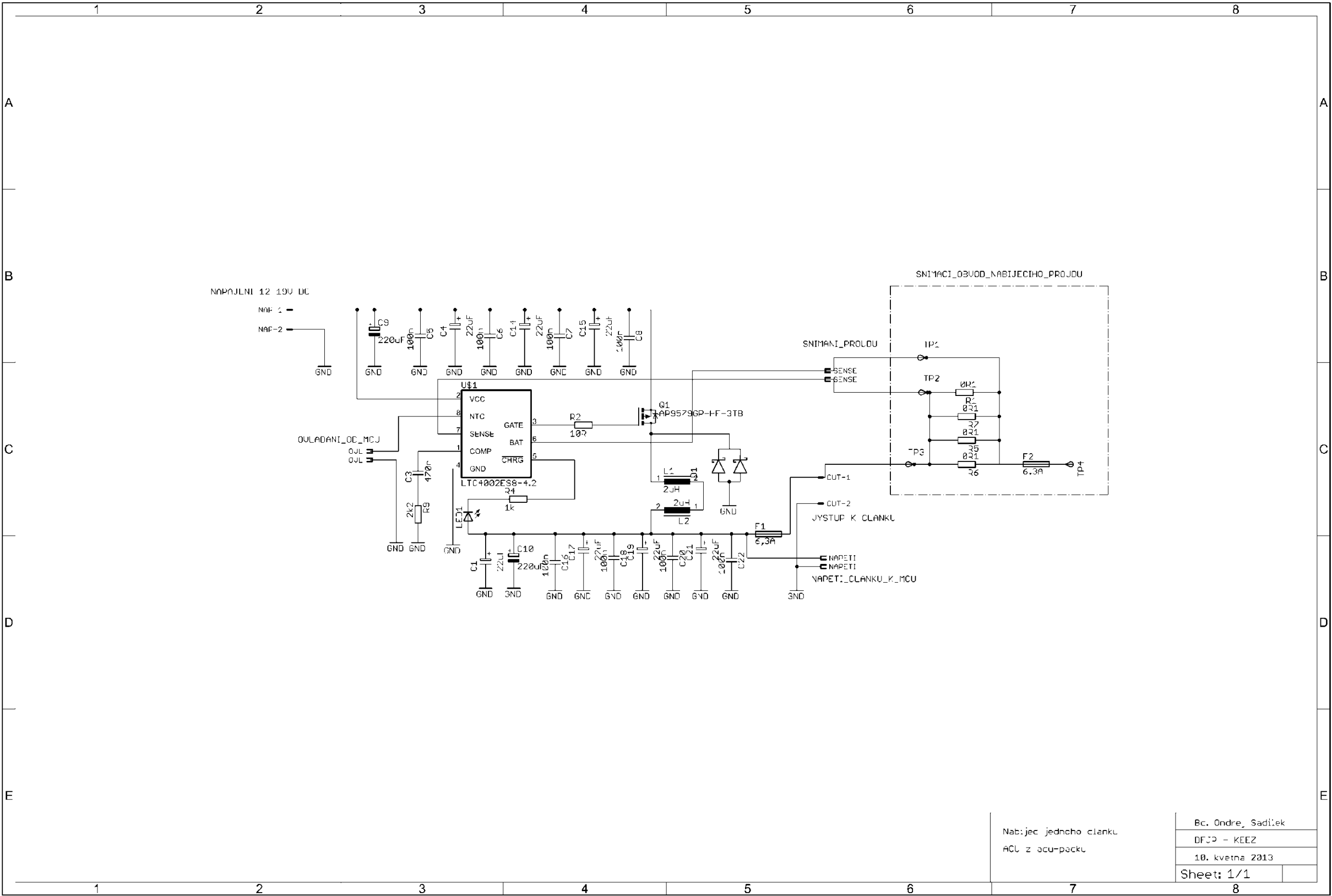


Příloha A. 9 - Plošný spoj bloku logiky, strana TOP, rozměry v mm

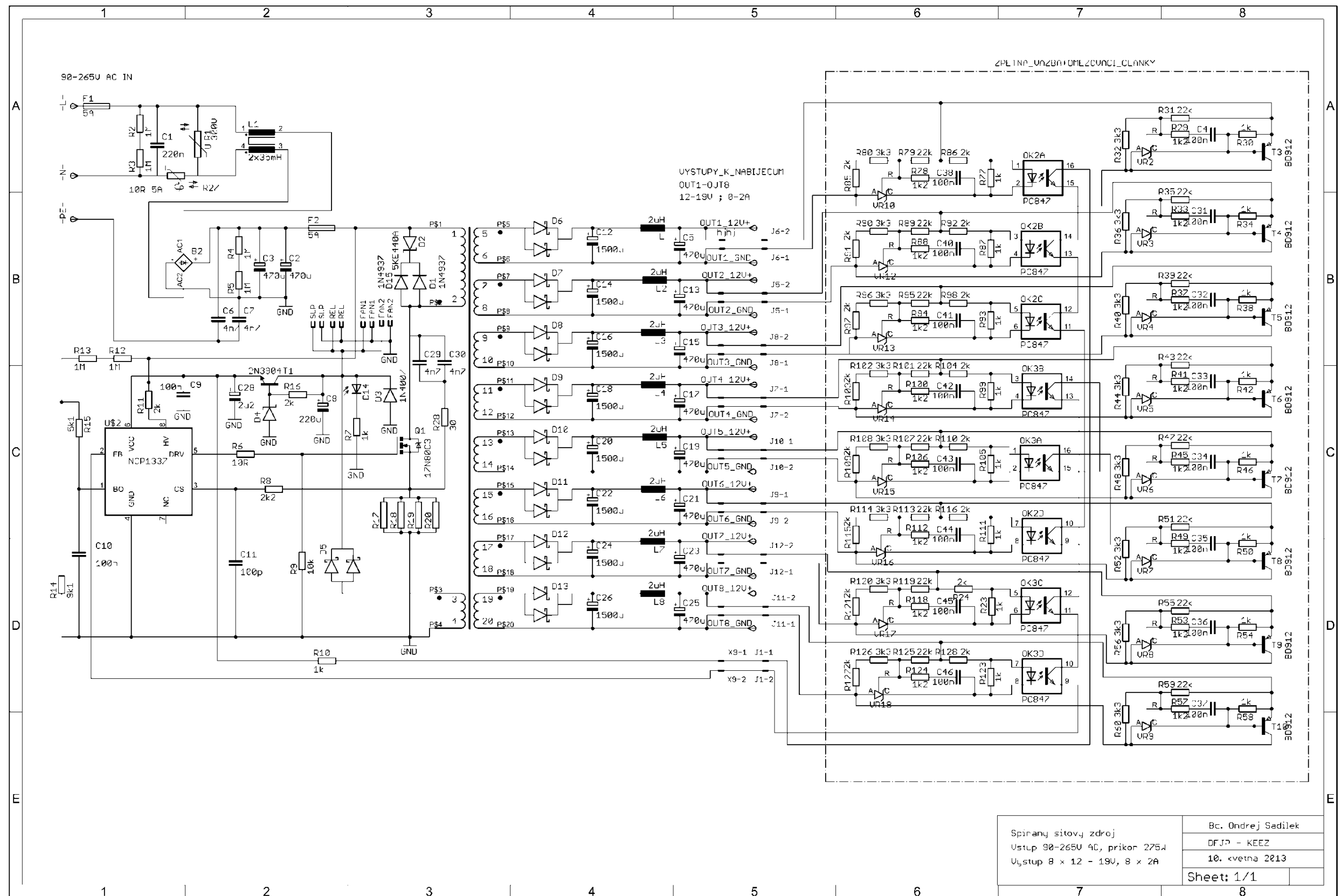


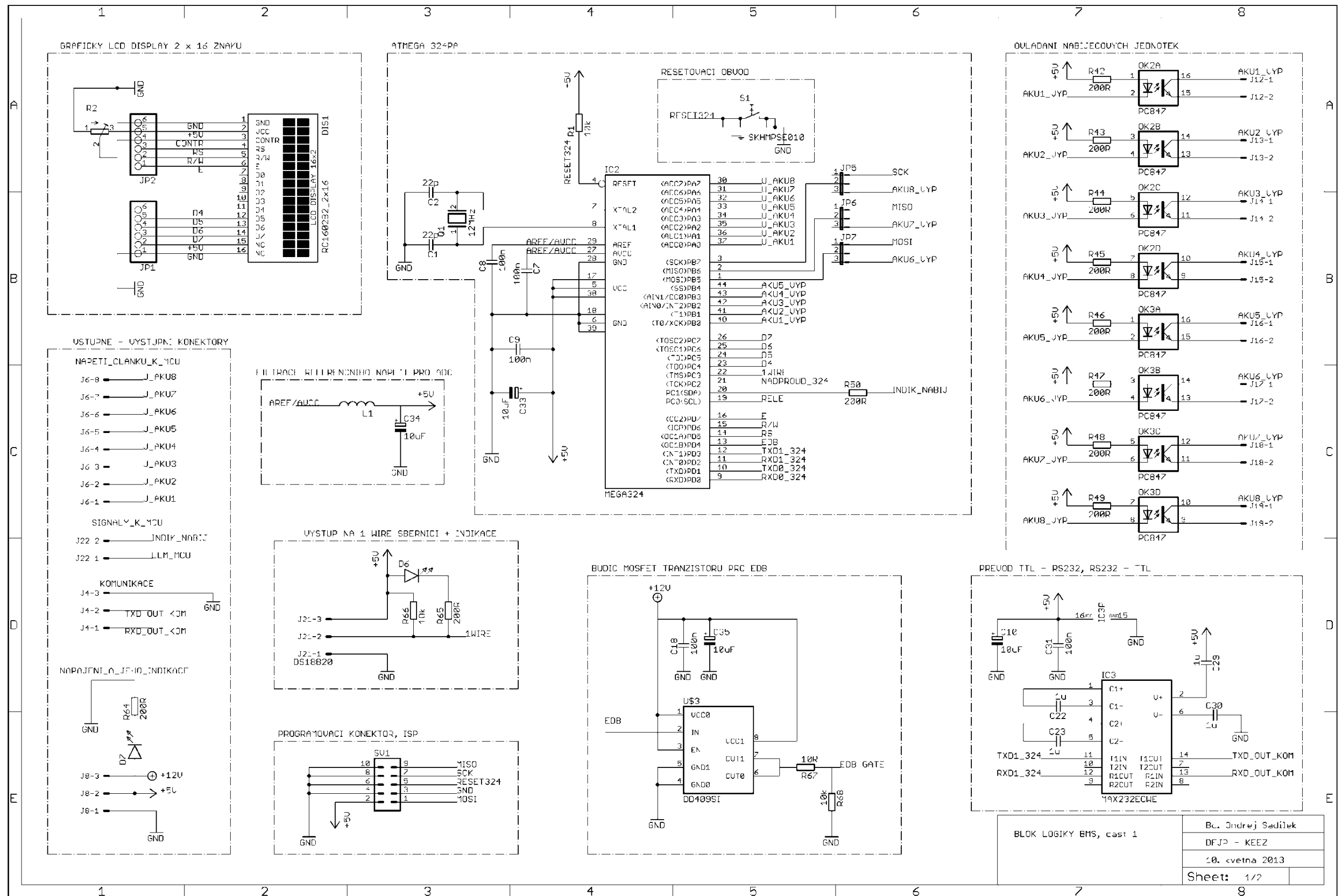
Příloha B – kompletní schéma

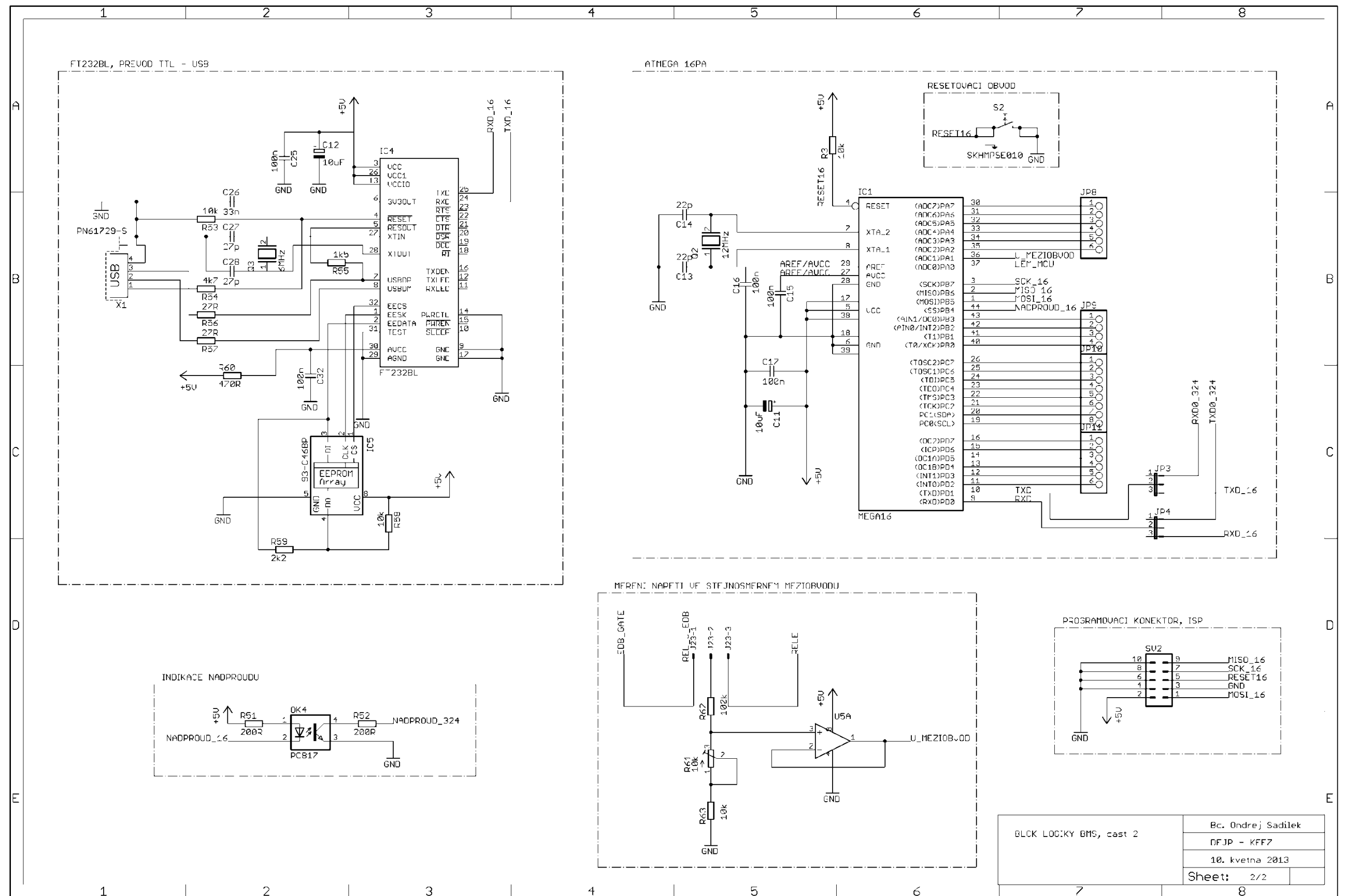
Příloha B. 1 - Nabíječ jednoho článku z ACU-PACKU



Příloha B. 2 – Spínaný síťový zdroj







BLOK LOGIKY BMS, cast 2	Bc. Ondrej Sadilek	
	DFJP - KFF7	
	10. kvetna 2013	
	Sheet:	2/2

Příloha B. 5 - Blok napájení BMS

