

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

POMOCNÉ MĚNIČE V SYSTÉMECH ELEKTRICKÉ TRAKCE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

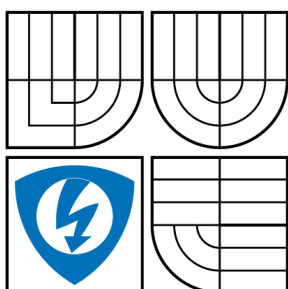
Bc. JAN KUZDAS

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A
ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

POMOČNÉ MĚNIČE V SYSTÉMECH ELEKTRICKÉ TRAKCE

AUXILIARY POWER SOURCES IN ELECTRIC TRACTION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

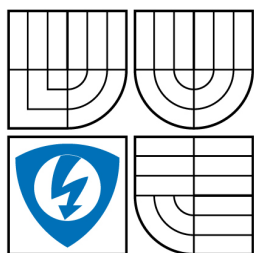
Bc. JAN KUZDAS

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. DALIBOR ČERVINKA, Ph.D.

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Bc. Jan Kuzdas

ID: 83674

Ročník: 2

Akademický rok: 2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

Pomocné měniče v systémech elektrické trakce

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Navrhněte a dimenzujte zapojení silové části měniče 50kW pro pohon kompresoru elektrické lokomotivy, měnič sestavte a vypočtěte ztráty.
2. Provedte systémový rozbor elektroinstalace malého elektromobilu.
3. Navrhněte spínaný zdroj pro napájení palubní sítě.
4. Spínaný zdroj vyrobte, oživte a proveďte na něm příslušná měření.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle doporučení vedoucího.

Termín zadání: 1.10.2008

Termín odevzdání: 22.5.2009

Vedoucí práce: Ing. Dalibor Červinka, Ph.D.

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Abstrakt

Účelem této práce je návrh pomocných měničů v systémech elektrické trakce. Konkrétně se zde zabýváme dvěma různými měniči (tyto měniče byly použity pro přímou aplikaci v trakčních vozidlech vyvíjených na UVEE FEKT VUT Brno). První měnič byl použit pro napájení pomocných pohonů elektrické lokomotivy. Druhý měnič byl použit k napájení palubních spotřebičů elektromobilu s palivovým článkem.

Abstract

The purpose of this thesis is proposal of auxiliary power sources in electric traction. Specifically we deal with two converters. Both of them were used in traction vehicle's applications, which are developed by the Department of Power Electrical and Electronic Engineering, Brno University of Technology. First converter was used as a power supply in secondary traction mechanism of electric locomotive. Second one to power supply of dash board in automobile with fuel cells.

Klíčová slova

Měnič; nulová dioda; palivový článěk; snižující synchronní měnič; střídač; synchronní snižující integrovaný řídicí obvod; výkonový IGBT tranzistor; výkonový MOSFET tranzistor.

Keywords

Converter; freewheel diode; fuel cell; Buck synchronous converter; chopper; synchronous buck controller; power IGBT transistor; power MOSFET transistor.

Bibliografická citace

KUZDAS, J. *Pomocné měniče v systémech elektrické trakce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 60 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Dalibor Červinka, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Pomocné měniče v systémech elektrické trakce jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

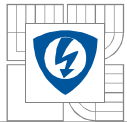
Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne Podpis autora

Poděkování

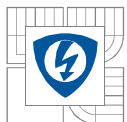
Děkuji vedoucímu své diplomové práce panu Ing. Daliboru Červinkovi, Ph.D. za odborné vedení, připomínky, rady a množství času, který mi věnoval. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za psychickou a finanční podporu.

V Brně dne Podpis autora



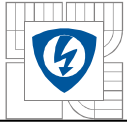
OBSAH

1 ÚVOD	13
2 NÁVRH MĚNIČE PRO POMOCNÉ POHONY ELEKTRICKÉ LOKOMOTIVY	14
2.1 POŽADOVANÉ PARAMETRY A NÁVRH ZAPOJENÍ SILOVÉ ČÁSTI MĚNIČE	14
2.2 DIMENZOVÁNÍ SOUČÁSTEK	14
2.2.1 ZADANÉ PARAMETRY	15
2.2.2 VÝPOČET	15
2.2.3 NAPĚŤOVÉ A PROUDOVÉ DIMENZOVÁNÍ TRANZISTORŮ A NULOVÝCH DIOD	17
2.3 TRANZISTOROVÝ MODUL S BUDICÍMI OBVODY	19
2.3.1 TRANZISTOROVÝ MODUL	19
2.3.2 BUDIČE PRO TRANZISTOROVÝ MODUL	22
2.4 VÝPOČET ZTRÁT NA MĚNIČI	23
2.4.1 ZTRÁTY VEDENÍM	23
2.4.2 PŘEPÍNACÍ ZTRÁTY	24
2.4.3 CELKOVÉ ZTRÁTY A ÚČINNOST MĚNIČE	25
2.5 NAPÁJECÍ DESKA BUDIČŮ	26
3 NÁVRH MĚNIČE PRO NAPÁJENÍ PALUBNÍ SÍŤE ELEKTROMOBILU	27
3.1 VOLBA VHODNÉHO VOZIDLA PRO PŘESTAVBU	27
3.2 CELKOVÁ KONCEPCE ELEKTROMOBILU S PALIVOVÝM ČLÁNKEM	28
3.2.1 PALIVOVÝ ČLÁNEK	29
3.2.2 DC/DC MĚNIČ NA VÝSTUPU S PALIVOVÉHO ČLÁNKU	31
3.2.3 TRAKČNÍ BATERIE	31
3.2.4 STŘÍDAČ	31
3.2.5 ELEKTRICKÝ MOTOR VOZIDLA	32
3.2.6 DC/DC MĚNIČ PRO NAPÁJENÍ PALUBNÍ SÍŤE	32
3.3 NÁVRH DC/DC MĚNIČE PRO PALUBNÍ SÍŤ	33
3.3.1 POŽADAVKY KLADENÉ NA MĚNIČ	33
3.3.2 KONCEPCE MĚNIČE	35
3.4 REALIZACE MĚNIČE	38
3.4.1 ŘÍDÍCÍ INTEGROVANÝ OBVOD	39
3.4.2 SILOVÁ ČÁST SYNCHRONNÍHO SNIŽUJÍCÍHO MĚNIČE	47
3.4.3 AKUMULÁTOR	52
3.4.4 NÁVRH DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ	52
3.5 OŽIVENÍ MĚNIČE	54
3.6 MĚŘENÍ NA MĚNIČI	55
3.6.1 MĚŘENÍ ZÁVĚRNÉHO NAPĚTÍ A ŘÍDÍCÍHO NAPĚTÍ NA HORNÍM TRANZISTORU	55
3.6.2 MĚŘENÍ PROUDU TLUMIVKOU A NAPĚTÍ NA DOLNÍM TRANZISTORU	56
4 ZÁVĚR	58
LITERATURA	59
PŘÍLOHY	60



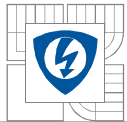
SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 2.1: Schéma zapojení silové části měniče.....</i>	<i>14</i>
<i>Obrázek 2.2: Zakoupený tranzistorový modul s budicími obvody.</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 2.3: Vnitřní struktura bezpotenciálového modulu od firmy EUPEC.</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 2.4: Vnitřní zapojení modulu.</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 2.5: Nárys modulu.....</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 2.6: Blokové schéma měniče.....</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 2.7 : Fotografie osazené napájecí desky.....</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 3.1: Ilustrační foto firmy JAWA-auto [7].</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 3.2: Blokové schéma trakčního pohonu s palivovým článkem.....</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 3.3: Ilustrační foto firmy Ballard [12].....</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 3.4: Schéma zapojení synchronního a klasického snižujícího měniče.....</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 3.5: Blokové schéma měniče.....</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 3.6: Typické zapojení integrovaného řídicího obvodu NCP1034 [7].....</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 3.7: Typické zapojení integrovaného řídicího obvodu LM5116 [8].....</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 3.8: Schéma zapojení měniče.....</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 3.9: Převodní charakteristika pro nastavení spínací frekvence NCP1034 [7]....</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 3.10: Schéma zapojení napájení řídicího obvodu.....</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 3.11: Schéma zapojení zpětnovazební kompenzace.</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 3.12: Spodní DPS měniče.</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 3.13: Horní DPS měniče.</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 3.14: Fotografie měniče.....</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 3.15: Snímek s osciloskopu při měření $u_{TH,DS}$.....</i>	<i>55</i>
<i>Obrázek 3.16: Snímek s osciloskopu při měření $u_{TH,GS}$.....</i>	<i>56</i>
<i>Obrázek 3.17: Snímek s osciloskopu při měření $i_{OUT,skut}$ a $u_{TD,DS}$.....</i>	<i>57</i>



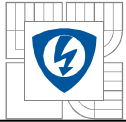
SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 2.1: Tabulka vypočtených požadovaných hodnot na tranzistory a nulové diody....</i>	<i>18</i>
<i>Tabulka 2.2: Parametry každého tranzistoru v modulu.....</i>	<i>20</i>
<i>Tabulka 2.3: Parametry každé nulové diody v modulu.....</i>	<i>20</i>
<i>Tabulka 3.1: Příkony jednotlivých spotřebičů.</i>	<i>34</i>
<i>Tabulka 3.2: Tabulka pro volbu vhodné zpětné vazby.</i>	<i>45</i>
<i>Tabulka 1: Seznam součástí pro měnič napájení palubní sítě elektromobilu.....</i>	<i>60</i>

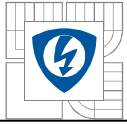


SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

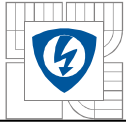
η	Účinnost	[-]
ΔI_{OUT}	Vypočtené zvlnění proudu na tlumivce	[A]
ΔU_{OUT}	Dovolené zvlnění napětí na výstupu z měniče	[V]
$\Delta I_{OUT,skut}$	Naměřené zvlnění proudu na tlumivce	[A]
$\cos\varphi$	Účinník motoru	[-]
f	Frekvence napětí	[Hz]
f_0	Nulový stavový dělicí kmitočet	[Hz]
f_{P0}	Rezonanční frekvence výstupního LC filtru	[Hz]
f_S	Frekvence spínání tranzistorů	[Hz]
f_{z0}	Horní mezní kmitočet výstupního kondenzátoru	[Hz]
n_{as}	Jmenovité otáčky	[-]
n_C	Počet paralelně řazených kondenzátorů	[-]
n_T	Počet paralelně řazených tranzistorů	[-]
n_V	Počet paralelních vodičů	[-]
r	Poloměr drátu	[m]
s	Střída měniče	[-]
$u_{TD,DS}$	Okamžitá hodnota závěrného napětí dolního tranzistoru	[V]
$u_{TH,DS}$	Okamžitá hodnota závěrného napětí horního tranzistoru	[V]
$u_{TD,GS}$	Okamžitá hodnota řídicího napětí dolního tranzistoru	[V]
$u_{TH,GS}$	Okamžitá hodnota řídicího napětí horního tranzistoru	[V]
A_L	Magnetická vodivost jádra tlumivky	[H/záv. ²]
B_{max}	Maximální magnetická indukce v jádře tlumivky	[T]
C	Kapacita výstupního filtru	[F]
C_I	Kapacita jednoho výstupního filtračního kondenzátoru	[F]
C_F	Kapacita vstupního filtračního kondenzátoru	[F]
C_{vyp}	Vypočtená kapacita výstupního filtračního kondenzátoru	[F]
ESR	Ekvivalentní sériový odpor celé kapacity	[Ω]
ESR_I	Ekvivalentní sériový odpor jednoho kondenzátoru	[Ω]
I_{Cmax}	Maximální proud tranzistoru	[A]
I_{Cef}	Efektivní proud tranzistoru střídače	[A]



$I_{Cstř}$	Střední proud tranzistoru střídače	[A]
I_{D0ef}	Efektivní proud diodou střídače	[A]
$I_{D0stř}$	Střední proud diodou střídače	[A]
I_{D0max}	Maximální proud nulovou diodou	[A]
I_{ms}	Maximální proud do spotřebičů	[A]
I_{OUT}	Maximální výstupní proud měniče	[A]
I_{Tmm}	Maximální proud tranzistoru	[A]
I_{U1}	Amplituda maximálního proudu tranzistoru střídače	[A]
I_{U1ef}	Je ef. hodnota 1. harm. fázového proudu	[A]
I_{ZD}	Proud zenerovou diodou	[A]
L	Indukčnost tlumivky	[H]
M	Modulační činitel	[-]
N	Počet závitů na tlumivce	[záv.]
P	Maximální výkon měniče	[W]
P_C	Ztráty vedením jedním tranzistorem	[W]
P_{D0}	Ztráty vedením jednou nulovou diodou	[W]
$P_{př}$	Přepínací ztráty tranzistorů	[W]
$P_{př1}$	Přepínací ztráty jednoho tranzistoru	[W]
P_{ved}	Celkové ztráty vedením na měniči	[W]
P_Z	Celkový ztrátový výkon měniče	[W]
R_{dD0}	Dynamický odpor nulové diody	[Ω]
R_{dT}	Dynamický odpor tranzistoru	[Ω]
$R_{DS(on)}$	Odpor přechodů D-S tranzistoru (MOS-FET) v sepnutém stavu	[Ω]
$R_{DS(on)celk}$	Celkový odpor přechodů D-S tranzistorů (skupiny spínacích tranzistoru MOS-FET) v sepnutém stavu	[Ω]
S_{Cu}	Průřez vodiče	[m ²]
S_{Fe}	Průřez jádra tlumivky	[m ²]
T_C	Teplota pouzdra tranzistoru	[°C]
T_{vj}	Teplota stykové plochy pouzdra	[°C]
U_{BE}	Úbytek napětí na bipolárním tranzistoru mezi B-E	[V]
U_{DSS}	Maximální závěrné napětí tranzistoru	[V]
U_{IN}	Stojnosměrné vstupní napětí do měniče	[V]



U_{OUT}	Stejnoseměrné výstupní napětí z měniče	[V]
U_{UV1ef}	Efektivní hodnota 1. harmonické sdruženého napětí	[V]
$U_{UVLO,falling}$	Hodnota při které klesající napětí vypne měnič	[V]
$U_{UVLO,rising}$	Hodnota při které je měnič uvede do provozu	[V]
U_{ref}	Referenční napětí	[V]
U_{ramp}	Amplituda rampy	[V]
U_{GS}	Řídicí napětí tranzistoru	[V]
U_{PDi}	Prahové napětí diody	[V]
U_{PT}	Prahové napětí tranzistoru	[V]
U_{ZD}	Úbytek napětí na zenerově diodě v závěrném směru	[V]
W_{OFF}	Energie potřebná pro vypnutí tranzistoru	[J]
W_{ON}	Energie potřebná pro sepnutí tranzistoru	[J]



1 ÚVOD

V dnešní době se setkáváme s problémem nedostatku ropy. Její spotřeba roste a těžba klesá. Proto je nutné hledat jiné alternativní zdroje energie pro dopravu, které by ropu nahradily.

Jako jedna z alternativ se jeví elektrické trakční dopravní prostředky, ať už se jedná o kolejová nebo automobilová trakční vozidla.

Jak známo u kolejových vozidel přívod elektrické energie k pohybujícímu se vozidlu není příliš technicky náročný.

U automobilových elektrických trakčních vozidel však nastává problém s akumulací elektrické energie. Jednou z možností, jak tento problém lze řešit, je pomocí vodíkového palivového článku. Palivový článek je elektrochemické zařízení, uskutečňující přímou přeměnu chemické energie vodíku a kyslíku na energii elektrickou, vodu a teplo. Vodík lze skladovat lépe než elektrickou energii.

Konkrétně se tato práce zabývá dvěma různými měniči (tyto měniče byly použity pro přímou aplikaci v trakčních vozidlech vyvíjených na ústavu UVEE při FEKT VUT v Brně).

První polovina se zabývá návrhem silové části měniče pro napájení pomocných pohonů elektrické lokomotivy. Měnič bude koncipován jako třífázový střídač, pracující v režimu pulsně-šířkové modulace (PWM). Bude klasické koncepce, složen ze tří větví představujících tři fáze. Návrh obsahuje schéma zapojení, dimenzování spínacích výkonových součástí (výkonových tranzistorů) a výpočet ztrát měniče.

Součástí práce dále bylo osazení a oživení napájecí desky pro budiče měniče. Tato deska zajišťuje galvanické oddělení napájení budičů (právě u kolejových vozidel musí galvanické oddělení splňovat přísné normy).

V poslední fázi byl měnič zrealizován a odzkoušen pomocí univerzální řídicí desky a zakoupených budících obvodů.

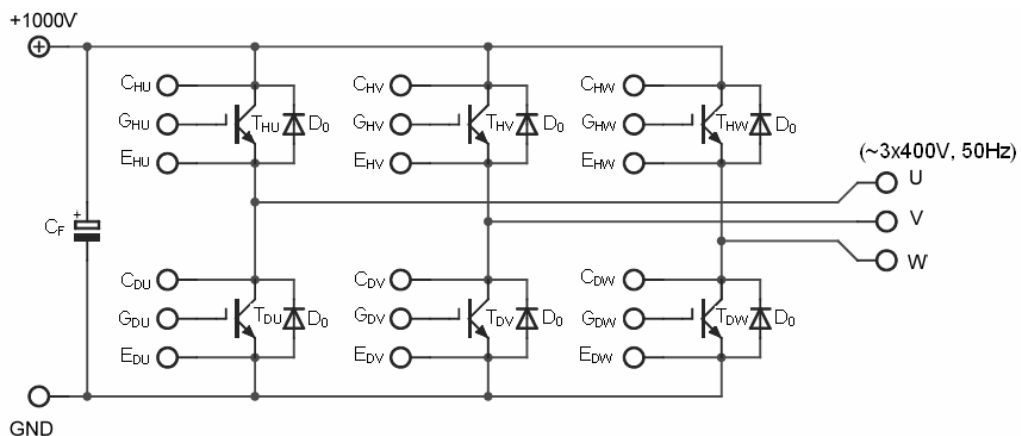
V druhé polovině práce se zabýváme napájením palubních spotřebičů elektromobilu na vodíkový palivový článek (v současné době právě probíhá na ústavu UVEE při FEKT VUT v Brně vývoj elektromobilu na vodíkový palivový článek.). Zprvu je pojednáno o celkové koncepci tohoto elektromobilu a poté se zaměřujeme na samotný návrh, konstrukci, oživení a měření na měniči.

2 NÁVRH MĚNIČE PRO POMOCNÉ POHONY ELEKTRICKÉ LOKOMOTIVY

Požadovaný měnič bude navrhován pro napájení pomocných pohonů lokomotivy. Měnič bude koncipován jako třífázový střídač, pracující v režimu pulsně-šířkové modulace (PWM). Na vstupní svorky měniče bude přiváděno trakční stejnosměrné napětí 1kV a na výstupních svorkách, kde budou přímo připojeny asynchronní motory, je požadováno napětí 3 x 400V, frekvence 50Hz a výkon 50kW.

2.1 Požadované parametry a návrh zapojení silové části měniče

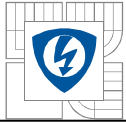
Měnič je navržen jako třífázový střídač. Vstup střídače je osazen kondenzátory C_F , které filtrují stejnosměrné vstupní napětí U_d ($U_d = 1000V$ DC). Samotný střídač je osazen šesti skupinami výkonových tranzistorů a nulových diod, jak je vidět na *obrázku 2.1*. Z důvodu, že se na tranzistorech bude objevovat závěrné napětí řádově 1000V (napětí vstupního meziobvodu) a pro zachování napěťové bezpečnosti musíme volit tranzistory se závěrným napětím alespoň 1700V. Proto jako spínací prvky budou použity výkonové IGBT tranzistory.



Obrázek 2.1: Schéma zapojení silové části měniče.

2.2 Dimenzování součástek

Celý návrh tohoto měniče spočívá v dimenzování tranzistorů a nulových diod tak, aby nebyly při kterémkoliv režimu měniče překročeny jmenovité hodnoty udávané výrobcem těchto tranzistorů a nulových diod. Dimenzování tranzistorů spočívá ve zvolení tak velkých tranzistorů, aby nebyl překročen jejich maximální dovolený proud a maximální závěrné napětí, neboť tranzistor má prakticky nulovou proudovou přetížitelnost. Samozřejmě tranzistor musí být dimenzován i výkonově. Výhodou měniče



je, že všech šest prvků měniče (tranzistorů a nulových diod) má identické provozní podmínky, a tudíž lze navrhovat pouze jeden z nich a ostatní pak budou identické.

2.2.1 Zadané parametry

Vstupní parametry měniče:

$U_{IN} = 1000\text{V DC}$ - napětí vstupního napětového meziobvodu

Výstupní parametry měniče:

$U_{UV1ef} = 400\text{V AC}$ - je efektivní hodnota 1. harmonické sruženého napětí (mezi větvemi U-V)

$f = 50\text{Hz}$ - frekvence výstupního střídavého napětí měniče

$\cos\varphi = 0,85$ - hodnota účinníku motoru (zátěž měniče)

$P = 50\text{kW}$ - maximální výkon měniče

Spínací kmitočet tranzistorů:

$f_s = 5\text{kHz}$ - frekvence spínání tranzistorů

2.2.2 Výpočet

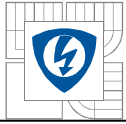
Protože nelze tranzistory krátkodobě přetěžovat, je nutné začít s výpočtem maximálního špičkového proudu tranzistoru.

Pro výpočet maximálního proudu tranzistoru měniče lze užít vztah:

$$P = \sqrt{3} \cdot U_{UV1ef} \cdot I_{U1ef} \cdot \cos\varphi \quad (1)$$

Kde U_{UV1ef} je efektivní hodnota 1. harmonické sruženého napětí (mezi větvemi U-V), I_{U1ef} je ef. hodnota 1. harm. fázového proudu (ve fázi U) a $\cos\varphi$ je typická hodnota účinníku motoru. Ze vztahu (1) vyjádříme proud I_{U1ef} :

$$I_{U1ef} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_{UV1ef} \cdot \cos\varphi} \quad (2)$$



Číselně pak:

$$I_{U1ef} = \frac{50000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,85}$$

$$I_{U1ef} = 84,9A$$

Výpočet amplitudy 1. harm. fázového proudu (ve fázi U).

$$I_{U1} = I_{U1ef} \cdot \sqrt{2} \quad (3)$$

Číselně pak:

$$I_{U1} = 84,9 \cdot \sqrt{2}$$

$$I_{U1} = 120A$$

Tato vypočtená hodnota amplitudy 1. harm. fázového proudu je hledaná hodnota amplitudy maximálního proudu, na kterou musí být dimenzovány tranzistory i nulové diody střídače. Proto můžeme napsat vztah:

$$I_{Cmax} = I_{D0max} = I_{U1} \quad (4)$$

Číselně pak:

$$I_{Cmax} = I_{D0max} = 120A$$

Dále vypočteme modulační činitel M , který budeme potřebovat pro další výpočty středních a efektivních proudů protékajících tranzistory a nulovými diodami. Pro výpočet modulačního činitele je nutný nejdříve výpočet amplitudy 1. harmonické sdruženého napětí U_{UV1} .

$$U_{UV1} = U_{UV1ef} \cdot \sqrt{2} \quad (5)$$

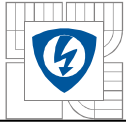
Modulační činitel M vypočteme podle následujícího vztahu:

$$M = \frac{U_{UV1}}{U_{IN}} = \frac{U_{UV1ef} \cdot \sqrt{2}}{U_{IN}} \quad (6)$$

Číselně pak:

$$M = \frac{400 \cdot \sqrt{2}}{1000}$$

$$M = 0,566$$



2.2.3 Napětové a proudové dimenzování tranzistorů a nulových diod

Maximální proud tranzistorem a nulovou diodou, když zanedbáme zvlnění proudu pak bude podle vztahu (4):

$$\begin{aligned}I_{C\max} &= I_{D0\max} = I_{U1} \\ I_{C\max} &= I_{D0\max} = 120A\end{aligned}$$

Pro vyjádření jednotlivých druhů ztrát, musíme vypočítat střední a efektivní proudy na tranzistoru a nulové diodě .

Pro výpočet efektivní hodnoty proudu tranzistoru z jeho amplitudy lze užít vztah:

$$I_{Cef} = I_{U1} \cdot \sqrt{\frac{1}{8} + \frac{2M}{3 \cdot \sqrt{3} \cdot \pi} \cdot \cos \varphi} \quad (7)$$

Číselně pak:

$$\begin{aligned}I_{Cef} &= 120 \cdot \sqrt{\frac{1}{8} + \frac{2 \cdot 0,566}{3 \cdot \sqrt{3} \cdot \pi} \cdot 0,85} \\ I_{Cef} &= 51,46A\end{aligned}$$

Obdobně lze určit střední hodnotu proudu tranzistorem:

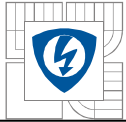
$$I_{Cstř} = I_{U1} \cdot \left(\frac{1}{2\pi} + \frac{M}{4 \cdot \sqrt{3}} \cdot \cos \varphi \right) \quad (8)$$

Číselně pak:

$$\begin{aligned}I_{Cstř} &= 120 \cdot \left(\frac{1}{2\pi} + \frac{0,566}{4 \cdot \sqrt{3}} \cdot 0,85 \right) \\ I_{Cstř} &= 27,43A\end{aligned}$$

Pro výpočet efektivní hodnoty proudu nulovou diodou z jeho amplitudové velikosti lze užít vztah:

$$I_{D0ef} = I_{U1} \cdot \sqrt{\frac{1}{8} - \frac{2M}{3 \cdot \sqrt{3} \cdot \pi} \cdot \cos \varphi} \quad (9)$$



Číselně pak:

$$I_{D0ef} = 120 \cdot \sqrt{\frac{1}{8} - \frac{2 \cdot 0,566}{3 \cdot \sqrt{3} \cdot \pi} \cdot 0,85}$$

$$I_{D0ef} = 30,84A$$

Obdobně lze určit střední hodnotu proudu nulovou diodou:

$$I_{D0stř} = I_{U1} \cdot \left(\frac{1}{2\pi} - \frac{M}{4 \cdot \sqrt{3}} \cdot \cos \varphi \right) \quad (10)$$

Číselně pak:

$$I_{D0stř} = 120 \cdot \left(\frac{1}{2\pi} - \frac{0,566}{4 \cdot \sqrt{3}} \cdot 0,85 \right)$$

$$I_{D0stř} = 10,76A$$

Tabulka 2.1: Tabulka vypočtených požadovaných hodnot na tranzistory a nulové diody.

Tranzistor			Nulová dioda		
U_{ce}	1700	V	U_{RRM}	1700	V
I_{cmax}	120	A	I_{D0max}	120	A
I_{cef}	51,46	A	I_{DOef}	30,84	A
$I_{cstř}$	27,43	A	$I_{D0stř}$	10,76	A

2.3 Tranzistorový modul s budicími obvody

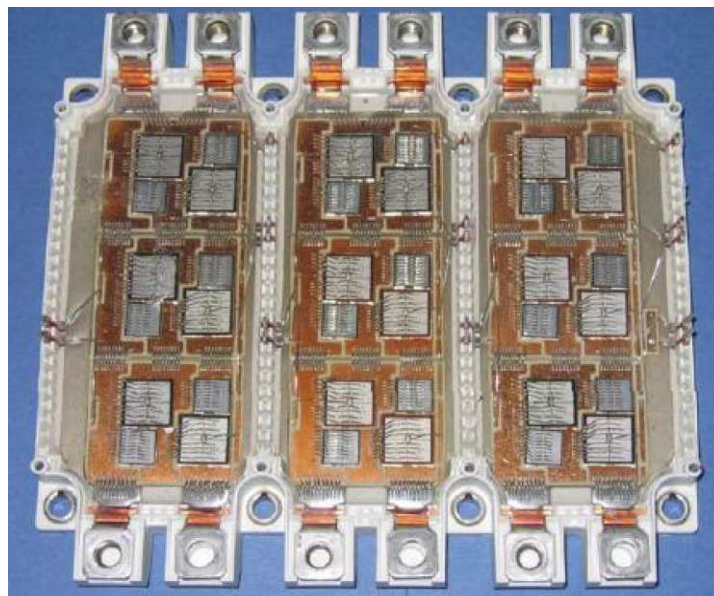
Pro naši aplikaci střídače bylo nejvhodnější zakoupit komerčně vyráběný tranzistorový IGBT modul s budicími obvody, který splňuje námi vypočtené hodnoty.



Obrázek 2.2: Zakoupený tranzistorový modul s budicími obvody.

2.3.1 Tranzistorový modul

Proto byl zakoupen šestikanálový IGBT tranzistorový modul, typ: FS225R17KE3 od firmy EUPEC.



Obrázek 2.3: Vnitřní struktura bezpotenciálového modulu od firmy EUPEC.

Jak je vidět na *obrázku 2.4*, tento bezpotenciálový modul obsahuje 6 paralelních dvojic: tranzistor-nulová dioda. Modul také obsahuje termistor, pomocí kterého můžeme monitorovat teplotu uvnitř modulu. Každý tranzistor a nulová dioda v modulu má tyto parametry:

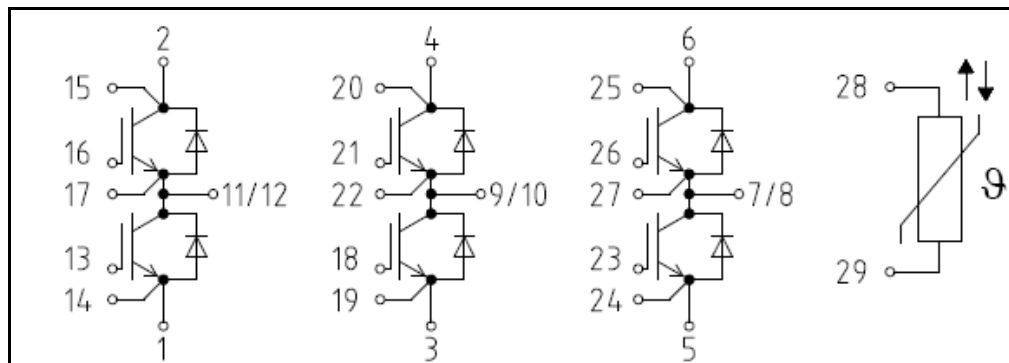
Tabulka 2.2: Parametry každého tranzistoru v modulu.

Tranzistor			
U_{CE}	$T_{vj}=25\text{C}$	1700	V
$I_{C\ nom}$	$T_c=80\text{C}, T_{vj}=150\text{C}$	225	A
I_C	$T_c=25\text{C}, T_{vj}=150\text{C}$	340	A
I_{CRM}	$t_p=1\text{ms}$	450	A
W_{ON}	$R_{GON}=6,2\Omega, T_{vj}=125\text{C}$	71,5	mJ
W_{OFF}	$R_{GOFF}=6,2\Omega, T_{vj}=125\text{C}$	70,5	mJ
V_{GES}		± 20	V

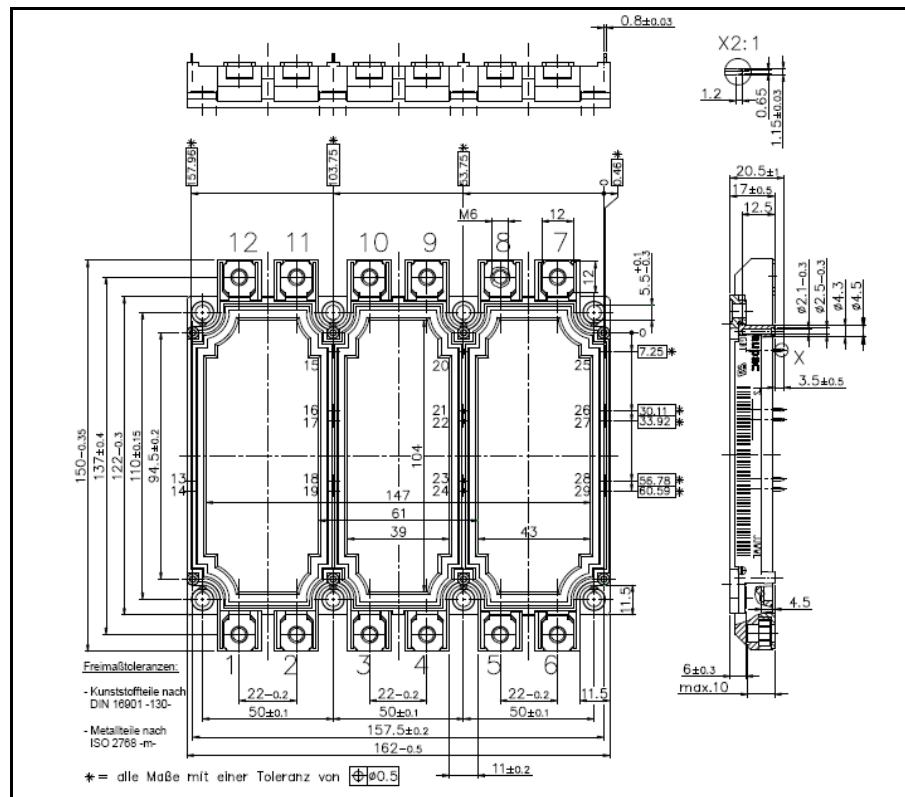
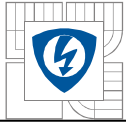
Tabulka 2.3: Parametry každé nulové diody v modulu.

Nulová dioda			
U_{RRM}	$T_{vj}=25\text{C}$	1700	V
I_{DO}		225	A
I_{DORM}	$t_p=1\text{ms}$	450	A
$\int I^2 t$	$V_R=0\text{V}, T_c=80\text{C}, T_{vj}=125\text{C}$	8300	A^2s

Vnitřní zapojení bezpotenciálového modulu je na následujícím obrázku:



Obrázek 2.4: Vnitřní zapojení modulu.

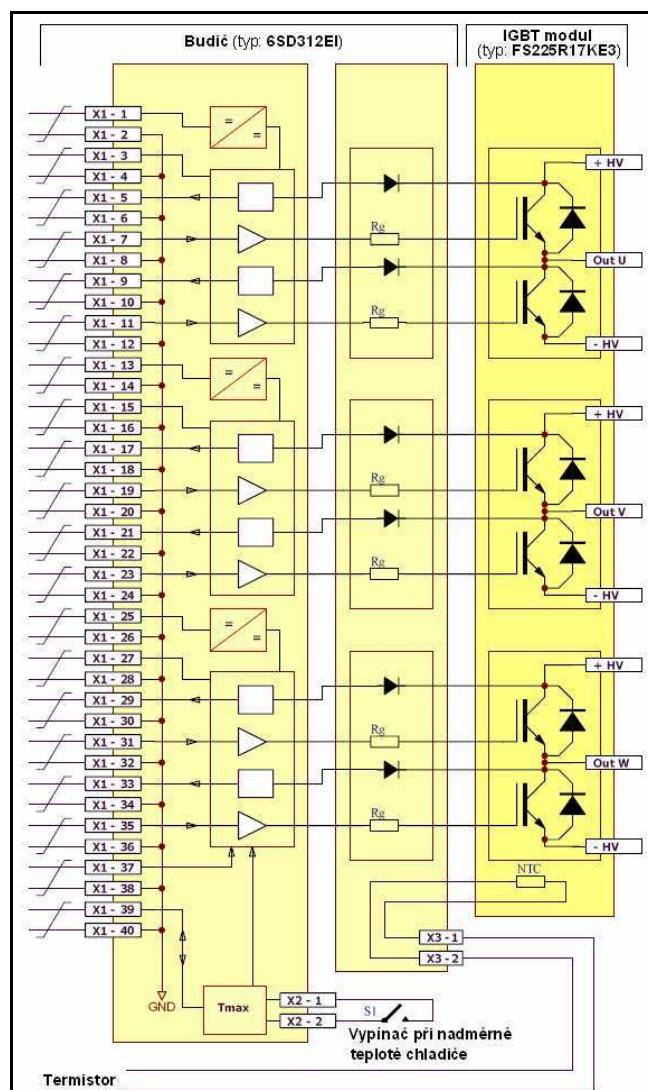


Obrázek 2.5: Nárys modulu.

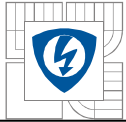
2.3.2 Budiče pro tranzistorový modul

Budicí obvody slouží k buzení výkonové části střídače, neboť výstup mikroprocesoru či logických obvodů řízení není dostatečně výkonný, aby dokázal ovládat výkonové tranzistory v požadované kvalitě. Se zlepšujícími se parametry tranzistorů, především s klesající dobou zapínání a vypínání, rostou nároky na budicí obvody. Tento fakt přináší značné komplikace při konstrukci budicích obvodů. Narůstají rovněž problémy v oblasti elektromagnetické kompatibility. Budiče tedy musí jednak generovat kvalitní řídicí signály pro řídicí elektrodu výkonového tranzistoru, dále pak musí zajistit galvanické oddělení řídicího signálu na rozhraní mezi řídicími a výkonovými prvky měniče.

Proto jsme zakoupili pro náš tranzistorový modul FS225R17KE3, komerčně nabízený budič od firmy CONCEPT s označením: 6SD312EI. Tento šestikanálový budič je vyroben přímo pro aplikaci s modulem FS225R17KE3.



Obrázek 2.6: Blokové schéma měniče.



2.4 Výpočet ztrát na měniči

Celkové ztráty na měniči se vypočítají jako součet přepínacích ztrát na tranzistorech a ztrát vedením na tranzistorech a nulových diodách. Přepínací ztráty na diodách jsou tak malé, že je lze zanedbat.

Vypočítané ztráty na měniči jsou pro teplotu stykové plochy pouzdra $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$.

2.4.1 Ztráty vedením

Pro výpočet ztrát vedením na jednom tranzistoru P_C lze užít vztah:

$$P_C = U_{PT} \cdot I_{Cstř} + R_{dT} \cdot I_{Cef}^2 \quad (11)$$

Kde I_{Cef} a $I_{Cstř}$ jsou střední a efektivní hodnota proudů tranzistoru, které jsme spočítali v předchozí kapitole pomocí vztahu (7) a (8). Dále pak U_{PT} je prahové napětí tranzistoru a R_{dT} je dynamický odpor tranzistoru, tyto hodnoty se odečtou z katalogového listu výrobce.

Odečtené hodnoty tranzistoru z katalogového listu výrobce:

$$U_{PT} = 0,85\text{V}$$

$$R_{dT} = 6,43\text{m}\Omega$$

Číselně pak když dosadíme do vztahu (11):

$$P_C = 0,85 \cdot 27,43 + 6,43 \cdot 10^{-3} \cdot 51,46^2$$

$$P_C = 40,35\text{W}$$

Ztráty vedením na nulové diodě spočítáme podle vztahu:

$$P_{D0} = U_{PD0} \cdot I_{D0stř} + R_{dD0} \cdot I_{D0ef}^2 \quad (12)$$

Kde I_{D0ef} a $I_{D0stř}$ jsou střední a efektivní hodnota nulové diody, které byli spočítány v předchozí kapitole pomocí vztahu (9) a (10). Dále pak U_{PD0} je prahové napětí nulové diody a R_{dD0} je dynamický odpor nulové diody, tyto hodnoty se odečtou z katalogového listu výrobce.



Odečtené hodnoty nulové diody z katalogového listu výrobce:

$$U_{PD0} = 1,1V$$

$$R_{dD0} = 4,3m\Omega$$

Číselně dosadíme do vztahu (12):

$$P_{D0} = 1,1 \cdot 10,76 + 4,3 \cdot 10^{-3} \cdot 30,84^2$$

$$P_{D0} = 15,95W$$

Ztráty vedením na celém modulu pak budou:

$$P_{ved} = 6 \cdot (P_C + P_{D0}) \quad (13)$$

Číselně pak:

$$P_{ved} = 6 \cdot (40,35 + 15,95)$$

$$P_{ved} = 338W$$

2.4.2 Přepínací ztráty

Přepínací ztráty jednoho tranzistoru vypočteme podle vztahu:

$$P_{př1} = \frac{1}{\pi} \cdot f_S \cdot K \cdot (W_{ON} + W_{OFF}) \quad (14)$$

Kde W_{ON} je katalogová hodnota ztrátové energie při spínání proudu I_C , W_{OFF} je katalogová hodnota ztrátové energie při vypínání proudu I_C , K je činitel proudového využití tranzistoru a f_S je kmitočet spínání tranzistoru.

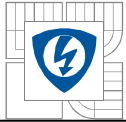
Musíme tedy znát proudové využití tranzistoru K , které spočítáme podle následujícího vztahu:

$$K = \frac{I_{U1}}{I_C} \quad (15)$$

Číselně pak:

$$K = \frac{120}{225}$$

$$K = 0,5\bar{3}$$



Poté dosadíme číselně do vztahu (15):

$$P_{př1} = \frac{1}{\pi} \cdot 5 \cdot 10^3 \cdot 0,5\bar{3} \cdot (71,5 \cdot 10^{-3} + 70,5 \cdot 10^{-3})$$

$$P_{př1} = 120,5W$$

Přepínací ztráty tranzistorů na celém modulu:

$$P_{př} = 6 \cdot P_{př1} \quad (16)$$

Číselně pak:

$$P_{př} = 6 \cdot 120,5$$

$$P_{př} = 723W$$

2.4.3 Celkové ztráty a účinnost měniče

Celkové ztráty na měniči určíme ze vztahu:

$$P_Z = P_{ved} + P_{př} \quad (17)$$

Číselně pak:

$$P_Z = 338 + 723$$

$$P_Z = 1061W$$

Celková účinnost měniče pak bude:

$$\eta = \frac{P - P_Z}{P} \quad (18)$$

Číselně pak:

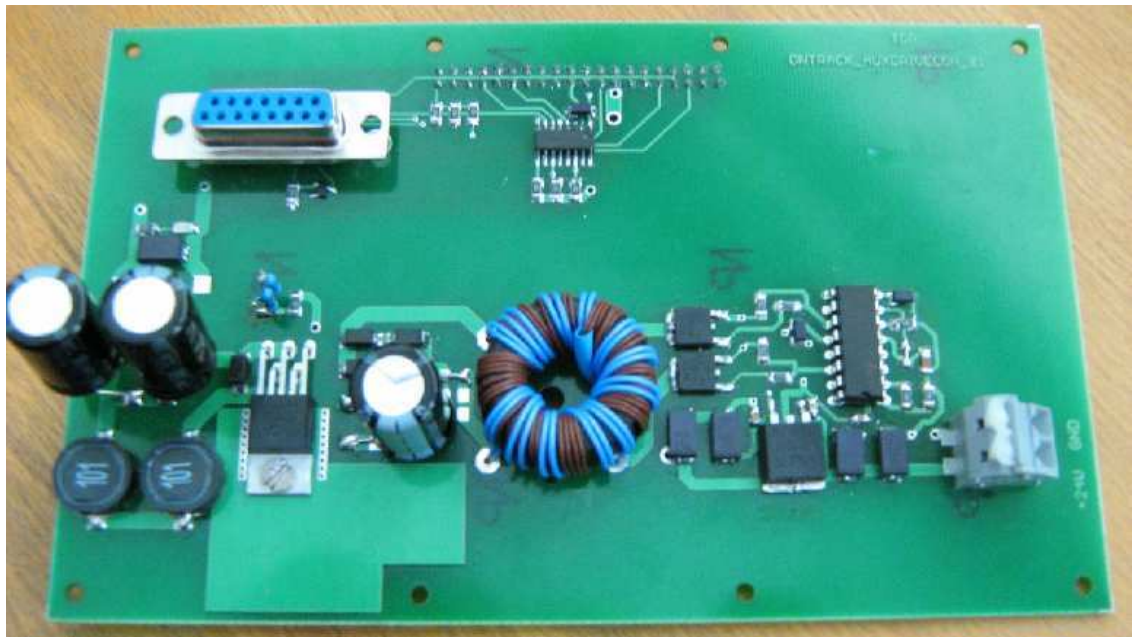
$$\eta = \frac{50 \cdot 10^3 - 1061}{50 \cdot 10^3}$$

$$\eta = 0,978$$

Střídač bude mít tedy maximální ztráty 1061W, což odpovídá při přenášení maximálního výkonu 50kW a účinnosti 97,8%. Při nižším přenášeném výkonu budou ztráty menší.

2.5 Napájecí deska budičů

Součástí této práce bylo také osazení a oživení napájecí desky pro budiče měniče. Tato deska zajišťuje galvanické oddělení napájení budičů (právě u kolejových vozidel musí galvanické oddělení splňovat přísné normy). Fotografie napájecí desky je na *obrázku 2.7*.



Obrázek 2.7: Fotografie osazené napájecí desky.

3 NÁVRH MĚNIČE PRO NAPÁJENÍ PALUBNÍ SÍTĚ ELEKTROMOBILU

3.1 Volba vhodného vozidla pro přestavbu

Jako nejjednodušší aplikace palivových článků do vozidla se jevílo zakoupení automobilu se spalovacím motorem a jeho následná přestavba na elektromobil.

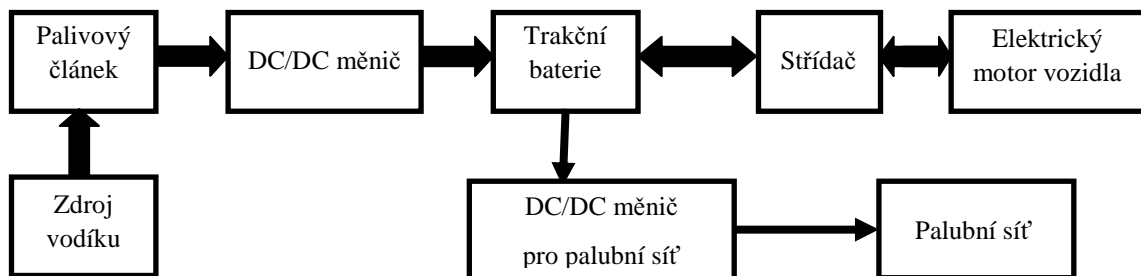
Z důvodu malého výkonu palivových článku bylo nutné najít nejmenší vozidlo nabízené na trhu. Vybráno bylo vozidlo JAWA Chic, které mělo původní hmotnost (včetně 4kW vznětového motoru) kolem 430kg.



Obrázek 3.1: Ilustrační foto firmy JAWA-auto [7].

3.2 Celková koncepce elektromobilu s palivovým článkem

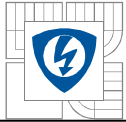
Elektromobil s palivovým článkem má na svém vstupu jako zdroj energie vodík. Vodík při chemické reakci s kyslíkem (získáváme ze vzduchu) uvolňuje elektrickou energii. Z palivového článku napájíme napěťový meziobvod (trakční baterie elektromobilu). Jelikož napětí meziobvodu je požadováno 42,9V a palivový článek má napětí naprázdno kolem 50V a při plném zatížení 22V, je nutné mezi baterie napěťového meziobvodu a palivový článek umístit měnič. Z meziobvodu jde energie přes střídač na elektromotor.



Obrázek 3.2: Blokové schéma trakčního pohonu s palivovým článkem.

Na hřídeli motoru je pak převod mechanické energie na hnací kola vozidla. Celé zařízení pracuje automaticky, pouze obsluha určuje požadovaný moment plynovým, případně brzdovým pedálem. Obvod řízení musí ovládat požadovaný chod motoru řízením střídače a musí udržovat konstantní napětí v meziobvodu pomocí akumulátorů energie.

Dále je také třeba napájet palubní síť elektromobilu. Z ní jsou napájeny obvody osvětlení vozu, přístroje palubní desky, stírač, ventilátor topení, atd. To bude řešeno pomocí stejnosměrného snižujícího měniče, který bude napájen z napěťového meziobvodu vozidla. Požadované výstupní napětí měniče je 14,2V, výstupní výkon měniče je požadován tak velký, aby s rezervou pokryl maximální příkon palubních spotřebičů vozu.



3.2.1 Palivový článek

Palivový článek je elektrochemický generátor elektrické energie, v němž probíhá opačná reakce než při elektrolýze. Je známo, že zavedení dvou elektrod se stejnosměrným proudem do vody způsobí uvolňování kyslíku u jedné a vodíku u druhé elektrody. Palivový článek je téměř totéž, ale obráceně. Jako palivo potřebuje vodík, ale pro reakci také kyslík. Z elektrod je naopak proud odebírán.

Elektrolytem mohou být místo vody pevné i kapalně látky. Pro laiky si lze palivový článek představit jako autobaterii, která se však nemusí nabíjet a do které je trvale přiváděn vodík a z elektrod je možno odebírat elektrický proud.

Palivové články mají oproti jiným konvenčním zdrojům elektrické energie mnoho předností. Nemají otáčivé části, mají extrémně nízké emise, neprobíhá v nich spalovací proces, a tedy se vyhýbají řadě emisních problémů. Jsou velmi tiché a provozně spolehlivé.

Elektrická energie v palivovém článku vzniká chemickým procesem. Vodík se v prostoru anody rozkládá na kladné ionty vodíku a záporné elektrony. Volné elektrony jsou zachycovány anodou a vnějším elektrickým obvodem přes spotřebič se dostávají na katodu. Kladné ionty vodíku přes elektrolyt prostupují ke katodě. V prostoru katody se přiváděný kyslík slučuje s těmito kladnými ionty a s volnými elektrony na vodu, která je z palivového článku odváděna.

Palivové články se dělí zejména podle provozní teploty a druhu elektrolytu. Platí skutečnost, že čím nižší teplota, při které článek pracuje, tím je požadována vyšší čistota vodíku jako paliva.

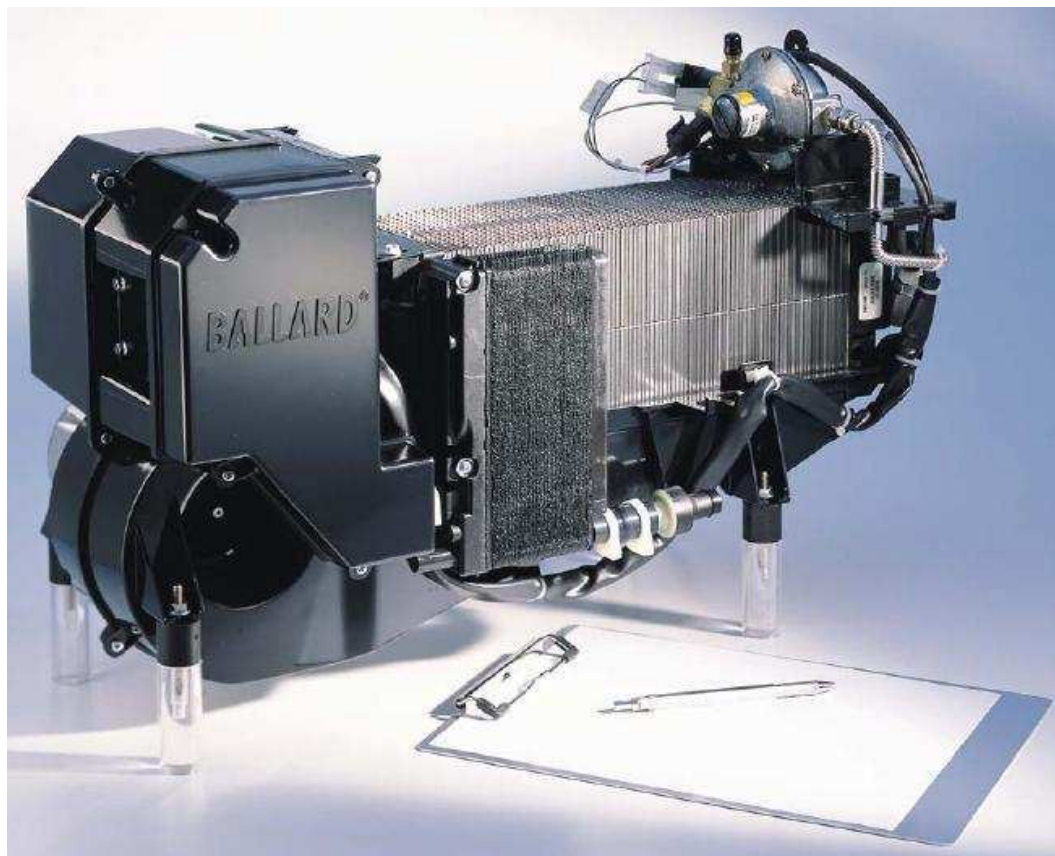
Palivové články vhodné pro trakční aplikace

Jako nejvhodnější druh palivových článků pro trakční aplikace se v dnešní době jeví membránové palivové články (PEM Fuel Cells). Vhodné jsou proto, že nepoužívají korozivní kapalně elektrolyty, ale pevně iontoměničové membrány, mají velkou energetickou kapacitu při menší váze a objemu, pracují při nízkých pracovních teplotách, což jim umožňuje okamžitý start reakce při běžné teplotě a snadný přechod na pracovní teplotu.

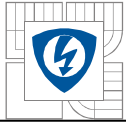
Články použité v elektromobilu

Jak již bylo řečeno jako nejvhodnější produkt pro malé trakční aplikace nabízený momentálně na trhu se jeví článek Nexa® PEMFC 1,2kW od firmy Ballard (distributor: Heliocentris, <http://www.heliocentris.com>). Tyto 2 články Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií (ústav ÚVEE) zakoupila v roce 2007 (leden).

- cena za 2 články: 13 800 EUR (včetně DPH)
- čas dodání: 3 týdny
- základní technické parametry Nexa® PEMFC 1,2 kW [12]:
 - typ palivového článku: PEM
 - jmenovitý výkon: 1,2kW elektrický
 - maximální proud: 46A
 - jmenovité napětí: 22 – 50V DC
 - životnost: 1500 hodin
 - palivo: 99,99% suchý plynný vodík
 - velikost: 560mm x 250mm x 330mm
 - hmotnost: 13kg
 - emise: kapalná voda 0,87 litrů/hodinu (maximum za hodinu)
 - hlučnost: ≤ 72 dBA ve vzdálenosti 1m
 - řídicí rozhraní: úplný duplex RS 485
 - pracovní prostředí:
 - teplota okolí 3°C až 30°C
 - relativní vlhkost vzduchu: 0% až 95%
 - umístění: vnitřní, venkovní



Obrázek 3.3: Ilustrační foto firmy Ballard [12].



3.2.2 DC/DC měnič na výstupu s palivového článku

Mezi akumulátory meziobvodu a výstupem z palivového článku je nutný DC/DC měnič. Tento měnič bude schopen převést energii s palivového článku (jehož napětí se vzrůstajícím zatížením klesá z 50V až na hodnotu 22V) do akumulátoru napěťového meziobvodu vozidla (napětí meziobvodu bude 42,9V). Tento měnič není v této práci dále popisován.

3.2.3 Trakční baterie

Akumulátory budou sloužit pro zvýšení výkonu pohonu (pokrytí špičkových výkonů) při akceleraci vozu. Bez nich by vozidlo mohlo mít pouze maximální rychlost odpovídající výkonu palivových článků. Akumulátorem lze zvýšit výkon a tedy i maximální rychlost. Tato zvýšená rychlost je samozřejmě časově omezená a doba využitelnosti závisí pouze na kapacitě akumulátorů.

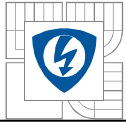
Jako nejvhodnější typ akumulátorů byly zvoleny Akumulátory Li-Fe-Po. Jedná se o nejmodernější typ akumulátorů na bázi Li-Ion. Oproti klasickému provedení mají 10krát nižší vnitřní odpor, čemuž také odpovídá vyšší maximální vybíjecí (30C) i nabíjecí (5C) proud. Toho je dosaženo použitím speciálního nanofosfátu. Životnost je ve srovnání s obvyklými bateriemi Li-Ion několikanásobná. Malou nevýhodou je vyšší hmotnost. Použití tohoto typu se jeví v současné době jako perspektivní řešení, což potvrzují četné kontrakty výrobce akumulátorů s předními světovými výrobci hybridních automobilů.

Tyto akumulátory se zatím vyrábějí pouze jako samostatné články typu 26650 o průměru 26mm a délce 65mm, jejich výrobcem je fa A123 Systems.

Trakční baterie byla realizována sérioparalelním řazením jednotlivých článků, vždy 9 článků paralelně, tyto pak 13krát v sérii, celkem 117 článků. Výsledná sestava má kapacitu 20,7Ah a jmenovité napětí 42,9V.

3.2.4 Střídač

Protože jako pohon vozidla bude použit asynchronní motor, je třeba mezi napěťový meziobvod a elektromotor umístit třífázový střídač. Střídač bude klasické koncepce a bude pracovat v režimu pulsně šířkové modulace (PWM). Měníč musí umožnit oba směry toku energie, jak do motoru při jízdě, tak při brzdění zpět do meziobvodu. Musí tedy být čtyřkvadrantový.



3.2.5 Elektrický motor vozidla

Je použit asynchronní motor především z důvodu jednoduchosti a ceny. Motor je běžný čtyřpólový stroj TM90-4X, který byl převinut s ohledem na použitou napěťovou hladinu.

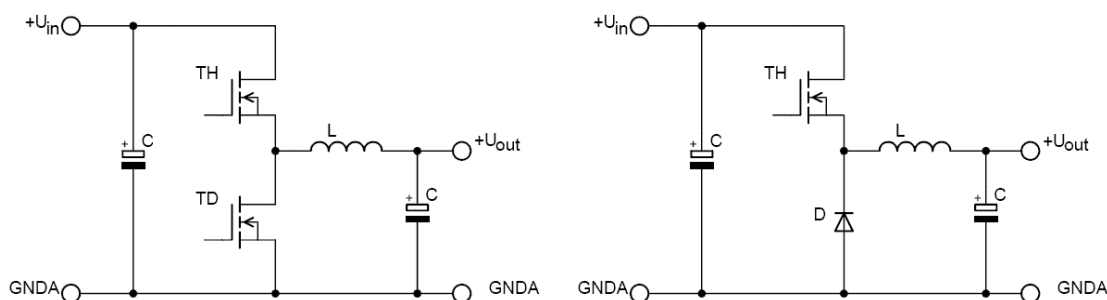
Jmenovitý moment motoru je $M = 15\text{Nm}$. Při činnosti se síťovým kmitočtem $f = 50\text{Hz}$ (při jmenovitých otáčkách $n_{as} = 1400\text{ot./min}$) tomuto momentu odpovídá typový výkon $2,2\text{kW}$.

3.2.6 DC/DC měnič pro napájení palubní sítě

Dále je také třeba napájet palubní síť elektromobilu. To bude řešeno pomocí stejnosměrného snižujícího měniče, který bude napájen z napěťového meziobvodu vozidla. Požadované výstupní napětí měniče je $14,2\text{V}$, výstupní výkon měniče je požadován tak velký, aby s rezervou pokryl maximální příkon palubních spotřebičů vozu.

3.3 Návrh DC/DC měniče pro palubní síť

Měnič bude brát energii z napěťového meziobvodu vozidla, jeho napěťová hladina je 42,9V a na výstupu z měniče je požadováno napětí 14,2V (palubní napětí elektromobilu). Měnič je proto navržen jako stejnosměrný snižující. U elektromobilu je snahou dosáhnout co nejlepší účinnosti, proto je nutné i tento měnič navrhnout s co nejlepší možnou účinností. Proto byl použit stejnosměrný synchronní snižující měnič, který ve spodní větvi namísto diody používá tranzistor, jak je vidět na *obrázku 3.4* (na levé polovině obrázku je nakresleno schéma synchronní snižující měnič a na pravé polovině obrázku je schéma klasického snižujícího měniče). To znamená, že při vypnutí horního tranzistoru se proud uzavírá přes dolní tranzistor a nikoli přes diodu jak tomu bývá u klasického snižujícího měniče. Úbytek na tranzistoru je menší než na diodě a tím i procházející proud přes tranzistor způsobuje menší ztráty, než na diodě.



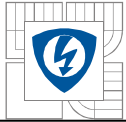
Obrázek 3.4: Schéma zapojení synchronního a klasického snižujícího měniče.

3.3.1 Požadavky kladené na měnič

Toto zařízení bude zajišťovat také napájení osvětlení vozu. Z tohoto důvodu při poškození nebo krátkodobém výpadku měniče je nutné zajistit nepřetržité napájení palubních spotřebičů alespoň na několik minut, aby bylo možno vozidlo bezpečně zastavit a odstavit. Proto bude za měničem umístěn ještě malý olověný akumulátor.

Jak už bylo řečeno, měnič bude brát energii z napěťového meziobvodu vozidla, jeho napěťová hladina je 42,9V a na výstupu z měniče je požadováno napětí 14,2V. Výstupní výkon měniče je požadován tak velký, aby z rezervou pokryl maximální příkon palubních spotřebičů vozu.

Požadovaný výkon měniče určíme z příkonu palubních spotřebičů. Příkony jednotlivých spotřebičů jsou v *tabulce 3.1*.



Tabulka 3.1: Příkony jednotlivých spotřebičů.

Spotřebič		Příkon
Osvětlení	přední	2 x 60W
	obrysové	2 x 5W
	zadní	2 x 5W
	brzdové	2 x 21W
	mlhové	21W
	pro zpětný chod vozu	21W
	SPZ	2 x 5W
	směrová světla	4 x 21W
	palubní desky	20W
	interiéru	5W
Stírač		100W
Ventilátor		120W
		$\Sigma = 563W$

Z celkového příkonu spotřebičů je potom maximální proud do spotřebičů I_{ms} :

$$I_{ms} = \frac{P_{sp}}{U_p} \quad (19)$$

Číselně pak:

$$I_{ms} = \frac{563}{14,2}$$
$$I_{ms} = 39,6A$$

Samozřejmě tento proud nebude odebírán při běžném provozu vozidla (je malá pravděpodobnost současné činnosti všech spotřebičů).

Z předchozího výpočtu tedy určíme maximální proud na výstupu měniče $I_{OUT} = 40A$, což by mělo být s rezervou dostačující.

Vstupní parametry měniče:

$$U_{IN} = 42,9V \text{ DC} \quad - \text{ napětí vstupního napěťového meziobvodu}$$

Výstupní parametry měniče:

$U_{OUT} = 14,2V$ DC - výstupní stejnosměrné napětí měniče

$I_{OUT} = 40A$ - maximální výstupní proud měniče

$P = 568W$ - maximální výkon měniče

$\Delta I_{OUT} = 1A$ (volíme) - dovolené zvlnění proudu na tlumivce měniče

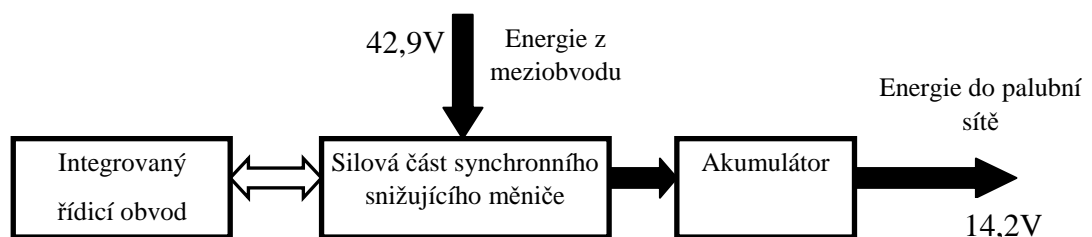
$\Delta U_{OUT} = 0,01V$ (volíme) - dovolené zvlnění výstupního napětí měniče

Spínací frekvence měniče:

$f_s = 50kHz$ - frekvence spínání tranzistorů

3.3.2 Koncepce měniče

Celý měnič se skládá ze třech základních bloků a to z řídicího obvodu, silové části synchronního snižujícího měniče a akumulátoru. Blokové schéma pohonu je uvedeno na obrázku 3.5.



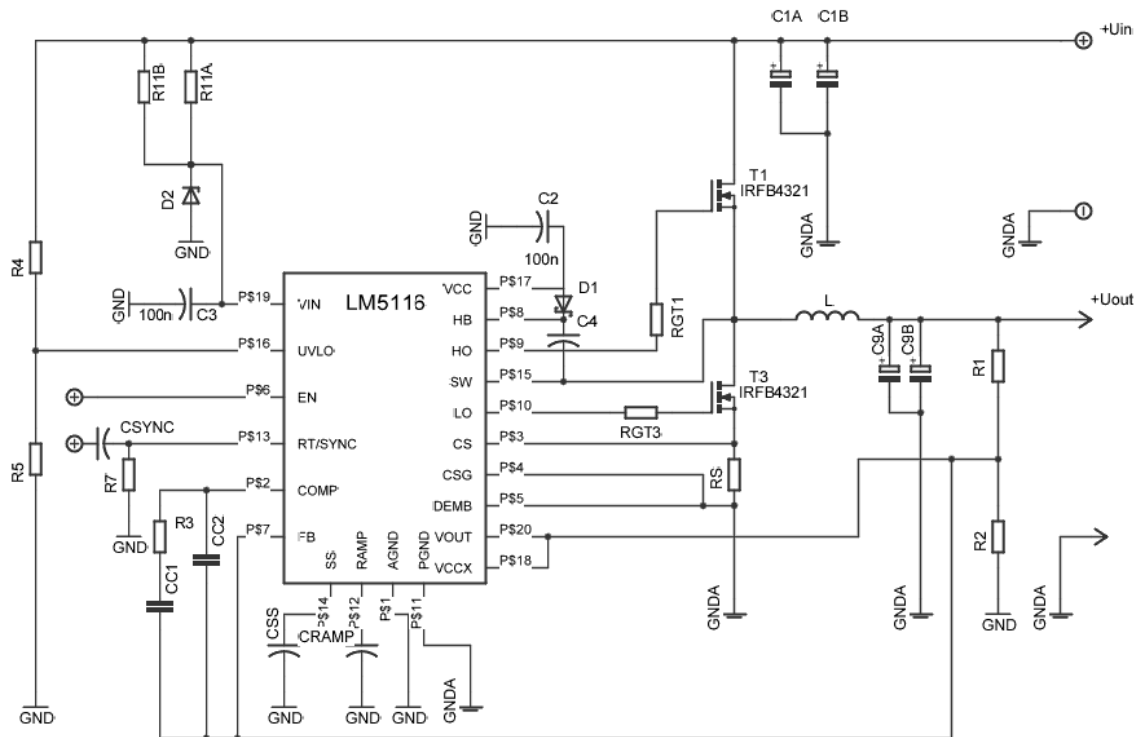
Obrázek 3.5: Blokové schéma měniče.

Řídicí integrovaný obvod

Na trhu jsou momentálně nabízeny dva integrované řídicí obvody (synchronous buck controller), které splňují námi požadované parametry. Tyto integrované obvody byly podrobně prostudovány. Poté byl výrobce kontaktován a požádán o zaslání několika zkušebních vzorků. Zde jsou uvedeny jejich základní vlastnosti:

Řídicí integrovaný obvod NCP1034 [7]

- výrobce: ON Semiconductor (<http://onsemi.com>)
- pouzdro: SOIC-16
 - vstupní napětí 12 až 100V
 - napájení do Gate spínacích tranzistorů až 2A
 - precizní reference napětí (1,25V)
 - nastavitelný Soft-Start



Obrázek 3.7: Typické zapojení integrovaného řídicího obvodu LM5116 [8].

Silová část synchronního snižujícího měniče

Jak již bylo řečeno synchronní snižující měnič má v horní i spodní větvi tranzistory. Samozřejmostí je u tohoto měniče na výstupu umístěná tlumivka a filtrační kondenzátory. Jelikož napěťový meziobvod vozidla, z kterého bude měnič brát energii, bude umístěn daleko (pro zajištění co nejmenší indukčnosti mezi tranzistory a napěťovým meziobvodem), je nutné umístit na vstup měniče kondenzátory.

Na výstupu měniče bude umístěn malý akumulátor z důvodu bezpečnosti (při havárii měniče je nutné dodávat energii minimálně po dobu než je vozidlo bezpečně odstaveno). Jako výkonové spínací prvky měniče budou použity výkonové tranzistory typu MOSFET. Tlumivka bude realizována na železoprachovém toroidním jádře. Pro výstupní filtraci použijeme elektrolytické kondenzátory s nízkým ekvivalentním sériovým odporem (Low ESR).

Akumulátor

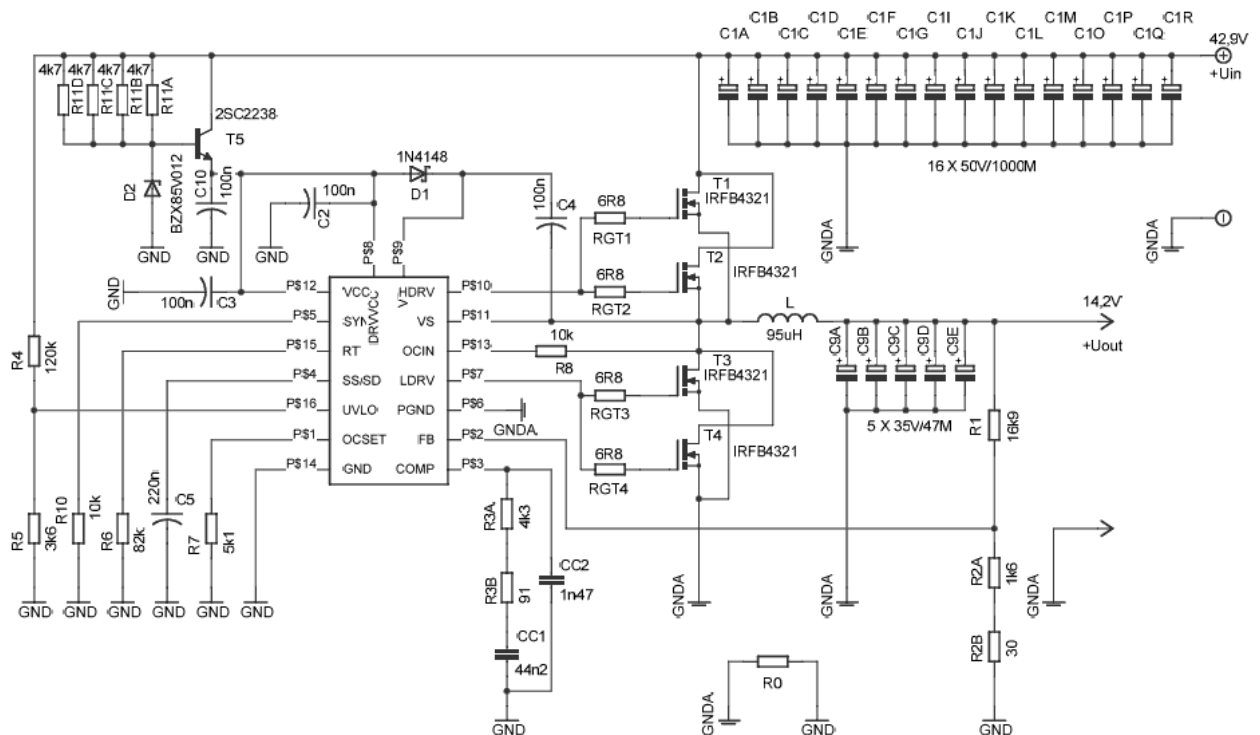
Použijeme malý olověný bezúdržbový 12V akumulátor o kapacitě 7Ah (tato kapacita bude dostačující). Výstupní napětí měniče bude z tohoto důvodu regulováno na přesnou hodnotu 14,2V, aby se baterie téměř plně nabíla a zároveň nemohla být přebíjena (plně nabitý olověný akumulátor je v případě, když jeho svorkového napětí dosahuje hodnoty 14,4V). Baterie má tak velký vnitřní odpor, že její nabíjecí proud při tomto zvoleném

napětí i při zcela vybitém stavu nikdy nedosáhne hodnoty maximálního výstupního proudu I_{OUT} měniče. Navíc zcela vybitý stav baterie je u tohoto vozidla velmi málo pravděpodobný.

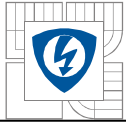
3.4 Realizace měniče

Realizace měniče obsahuje schéma zapojení, dimenzování a výběr vhodných součástek a návrh desky plošných spojů (DPS).

Na *obrázku 3.8* je schéma zapojení měniče. Řídicí obvod je zapojen k silové části obvodu dle doporučení výrobce. Některé součástky sloužící k individuálnímu nastavení integrovaného řídicího obvodu byly zvoleny nebo vypočteny za pomoci katalogového listu výrobce, jak bude uvedeno dále v této práci.



Obrázek 3.8: Schéma zapojení měniče.



3.4.1 Řídicí integrovaný obvod

Po porovnání výše uvedených řídicích obvodů, byl vybrán pro naši aplikaci NCP1034 (výrobce: ON Semiconductor). Byl vybrán z důvodu způsobu měření proudu procházejícího tranzistorem. Tento způsob měření proudu pomocí úbytku na $R_{DS(on)}$ spínacího tranzistoru je velmi výhodný a elegantní. Konkurenční řídicí obvod tento proud měří za pomoci vnějšího bočnicku. Dalším důvodem je velikost pouzdra (pro naši aplikaci je vhodnější větší pouzdro z důvodu osazování do DPS).

Nastavení integrovaného řídicího obvodu je popsáno v následujícím textu.

Nastavení proudového omezení pro maximální proud výstupu měniče I_{OUT}

Proudové omezení nastavujeme pomocí odporu R_7 a R_8 , kde R_8 má velikost $10\text{k}\Omega$ (doporučeno výrobcem) a R_7 vypočítáme pomocí následujícího vztahu:

$$R_7 = \frac{R_8}{3,56 \cdot R_{DS(on)celk} \cdot I_{OUT}} \quad (20)$$

Kde $R_{DS(on)celk}$ je výsledný odpor přechodů D-S horních spínacích tranzistorů (v našem případě dvou tranzistorů řazených paralelně) v sepnutém stavu. $R_{DS(on)celk}$ vypočítáme podle vztahu:

$$R_{DS(on)celk} = \frac{R_{DS(on)}}{n_T} \quad (21)$$

Kde n_T je počet paralelně řazených tranzistorů. Číselně pak:

$$R_{DS(on)} = 0,012\Omega \text{ (uvedeno v katalogovém listu výrobce tranzistoru [9])}$$

$$R_{DS(on)celk} = \frac{0,012}{2}$$

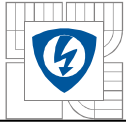
$$R_{DS(on)celk} = 0,006\Omega$$

Když známe $R_{DS(on)celk}$, pak můžeme číselně dosadit do vztahu (20):

$$R_7 = \frac{10 \cdot 10^3}{3,56 \cdot 0,006 \cdot 40}$$

$$R_7 = 11704\Omega$$

Tento výpočet je chybný jak se dozvíte v kapitole 3.5. Odpor je nutné zvolit experimentálně.



Volíme odpor z řady E48 :

$$R_7 = 5k1 \text{ (experimentálně zvolen při oživení měniče)}$$

Nastavení nejnižšího dovoleného vstupního napětí U_{UVLO}

Nejnižší dovolené vstupní napětí nastavíme pomocí odporu R_4 a R_5 , které vypočítáme pomocí následujících vztahu:

$$U_{UVLO,falling} = 1,15 \cdot \left(1 + \frac{R_4}{R_5} \right) \quad (22)$$

$$U_{UVLO,rising} = 1,25 \cdot \left(1 + \frac{R_4}{R_5} \right) \quad (23)$$

Kde vztah (22) udává hodnotu, při které klesající napětí měnič vypne a vztah (23) udává hodnotu, při kterém vzrůstající napětí měnič opět uvede do provozu. Výpočet se provádí tak, že stanovíme $U_{UVLO,falling}$ nebo $U_{UVLO,rising}$ a jeden z odporů (R_4 je řádově desítky $k\Omega$ a R_5 je řádově jednotky $k\Omega$) a druhý odpor vypočítáme pomocí jednoho z předchozích vztahů.

Pro náš případ výpočet pak bude následující:

$$R_4 = 120k\Omega \text{ (volíme z řady E12)}$$

$$U_{UVLO,falling} = 39,5V \text{ (volíme)}$$

$$U_{UVLO,falling} = 1,15 \cdot \left(1 + \frac{R_4}{R_5} \right)$$

Vyjádříme R_5 :

$$R_5 = \frac{1,15 \cdot R_4}{U_{UVLO,falling} - 1,15} \quad (24)$$

Číselně pak:

$$R_5 = \frac{1,15 \cdot 120 \cdot 10^3}{39,5 - 1,15}$$

$$R_5 = 3598\Omega$$

Volíme odpor z řady E24 :

$$R_5 = 3k6$$

Nastavení frekvence spínání f_s

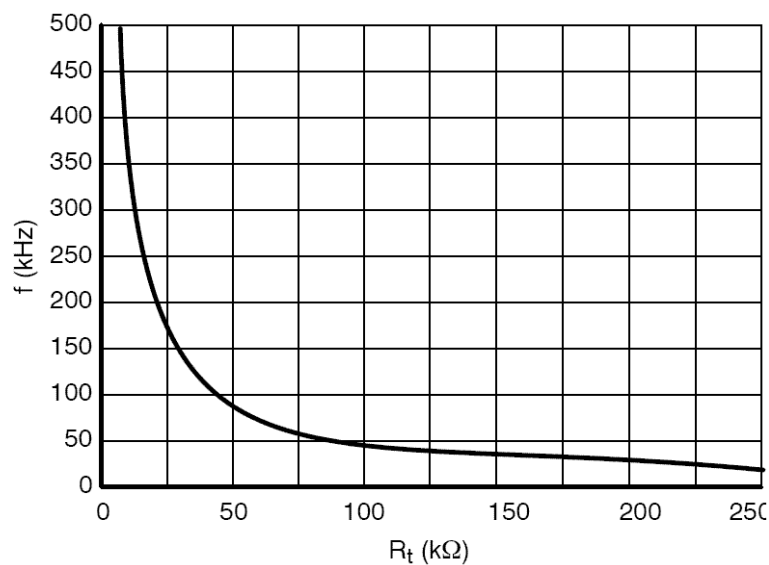
Frekvenci spínání nastavíme pomocí odporu R_6 . Odpovídající hodnotu odporu R_6 pro zvolenou frekvenci zjistíme pomocí grafu na *obrázku 3.9*.

$f_s = 50\text{kHz}$ (zvoleno při zadání)

Pro tuto frekvenci z grafu odpovídá odpor $82\text{ k}\Omega$

Volíme odpor z řady E12 :

$R_6 = 82\text{ k}$



Obrázek 3.9: Převodní charakteristika pro nastavení spínací frekvence NCP1034 [7].

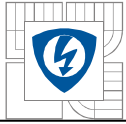
Nastavení výstupního napětí U_{OUT}

Výstupní napětí je nastaveno pomocí výstupního děliče (odpory R_1 a R_2). Kde na odporu R_2 musí být napětí U_{ref} ($U_{ref} = 1,25\text{V}$) při požadovaném výstupním napětí. Můžeme tedy sestavit následující rovnici:

$$U_{OUT} = 1,25 \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \quad (25)$$

Vyjádříme R_2 :

$$R_2 = \frac{R_1 \cdot 1,25}{(U_{OUT} - 1,25)} \quad (26)$$



Číselně pak:

$$R_I = 16,9\text{k}\Omega \text{ (volíme)}$$

$$U_{OUT} = 14,2\text{V} \text{ (zvoleno při zadání)}$$

$$R_2 = \frac{16900 \cdot 1,25}{(14,2 - 1,25)}$$

$$R_2 = 1631\Omega$$

Volíme odpory z řady E48 :

$$R_I = 16\text{k}9$$

$$R_{2A} = 1\text{k}6$$

$$R_{2B} = 30$$

$$R_2 \text{ je složen z dvou sériově zapojených odporů } R_{2A} \text{ a } R_{2B} \text{ (} R_2 = R_{2A} + R_{2B} = 1600\Omega + 30\Omega \text{)}$$

Synchronizace

Jelikož náš měnič není synchronizován z žádným jiným zařízením, tento vstup tedy vyloučíme odporem R_{I0} . Odpor R_{I0} volíme $10\text{k}\Omega$ dle doporučení výrobce.

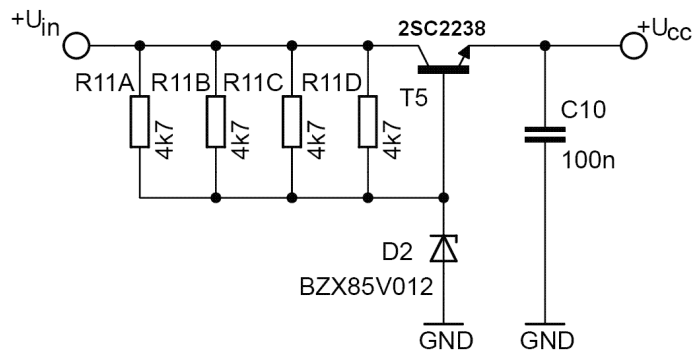
Odpor z řady E12 :

$$R_{I0} = 10\text{k}$$

Napájení integrovaného řídicího obvodu

Energie pro napájení řídicího obvodu bude brána ze vstupního napětového meziobvodu měniče, tedy z napětového meziobvodu vozu ($V_{IN} = 42,9\text{V}$). Na vstupu integrovaného řídicího obvodu je požadováno napětí 10V až 18V , pro naši aplikaci bylo zvoleno napájecí napětí 12V . Toto napětí bylo zvoleno z důvodu bezpečného a rychlého sepnutí výkonových tranzistorů.

Pro vytvoření tohoto napájecího napětí bylo zvoleno schéma zapojení uvedené na obrázku 3.10. Jedná se o zapojení bipolárního tranzistoru se společným kolektorem („emitorový sledovač“). Referenční napětí tohoto „emitorového sledovače“ zajišťuje 12V zenerova dioda. Výstupní napětí U_{CC} tohoto zdroje tedy bude přibližně $12,6\text{V}$ ($U_{ZD} + U_{BE} = 12 + 0,6 = 12,6\text{V}$). Odpory R_{I1} nám zajišťují aby zenerova dioda pracovala ve svém pracovním bodě (odpory jsou čtyři paralelně z důvodu lepšího chlazení tepelných ztrát). Na výstup je umístěn ještě blokovací kondenzátor C_{I0} .



Obrázek 3.10: Schéma zapojení napájení řídicího obvodu.

Odpor R_{11} vypočítáme pomocí následujícího vztahu:

$$R_{11} = \frac{U_{IN} - U_{ZD}}{I_{ZT}} \quad (27)$$

Číselně pak:

$U_{ZD} = 12\text{V}$ (uvedeno v katalogovém listu výrobce zenerovy diody)

$I_{ZT} = 26\text{mA}$ (uvedeno v katalogovém listu výrobce zenerovy diody)

$$R_{11} = \frac{42,9 - 12}{0,026}$$

$$R_{11} = 1180\Omega$$

Jak již bylo řečeno, odpor R_{11} je složen ze čtyř paralelně řazených odporů R_{11A} , R_{11B} , R_{11C} a R_{11D} . Ty vypočteme podle následujícího vztahu:

$$R_{11A} = R_{11B} = R_{11C} = R_{11D} = R_{11} \cdot 4 \quad (28)$$

Číselně pak:

$$R_{11A} = R_{11B} = R_{11C} = R_{11D} = 1180 \cdot 4$$

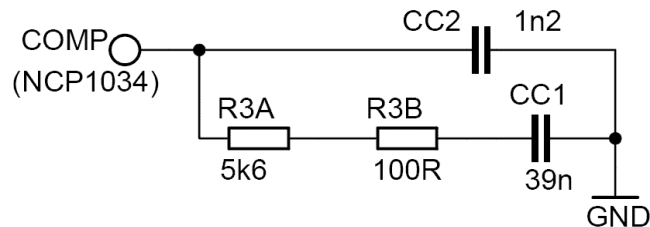
$$R_{11A} = R_{11B} = R_{11C} = R_{11D} = 4720\Omega$$

Volíme odpory z řady E12 :

$$R_{11A} = R_{11B} = R_{11C} = R_{11D} = 4\text{k}7$$

Zpětnovazební kompenzační obvod

Na výstupu měniče je umístěna zpětná vazba pro regulační smyčku integrovaného řídicího obvodu. Při výpočtu parametrů jednotlivých součástek zpětné vazby, bylo postupováno dle katalogového listu výrobce.



Obrázek 3.11: Schéma zapojení zpětnovazební kompenzace.

Pro výběr vhodného typu kompenzace je nutný výpočet rezonanční frekvence výstupního LC -filtru f_{P0} a horního mezního kmitočtu výstupního kondenzátoru f_{Z0} .

Rezonanční frekvenci výstupního LC -filtru f_{P0} vypočteme podle následujících vztahů:

$$f_{P0} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad (29)$$

Číselně pak:

$$f_{P0} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{95 \cdot 10^{-6} \cdot 235 \cdot 10^{-6}}}$$

$$f_{P0} = 1065 \text{ Hz}$$

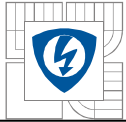
Horní mezní kmitočtet výstupního kondenzátoru f_{Z0} vypočteme podle následujících vztahů:

$$f_{Z0} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C \cdot ESR} \quad (30)$$

Číselně pak:

$$f_{Z0} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 235 \cdot 10^{-6} \cdot 0,16}$$

$$f_{Z0} = 4233 \text{ Hz}$$



Tabulka 3.2: Tabulka pro volbu vhodné zpětné vazby.

Metoda výpočtu	Nulový stavový dělicí kmitočet	Typ kompenzace	Typ kondenzátoru výstupního filtru
1	$f_{p0} < f_{z0} < f_0 < f_s/2$	PI	Elektrolytické, tantalové
2	$f_{p0} < f_0 < f_{z0} < f_s/2$	PID	Tantalové, keramické
3	$f_{p0} < f_0 < f_s/2 < f_{z0}$	PID	Keramické

Vzhledem k tomu, že byly na výstupním LC-filtru zvoleny elektrolytické kondenzátory, volíme podle tabulky 3.2 kompenzaci s PI regulátorem (integrováný řídicí obvod tento regulátor obsahuje). Součástky zpětné vazby tedy vypočteme podle metody 1, která je uvedena v katalogovém listu výrobce integrovaného řídicího obvodu (NCP1034). Nejdříve je nutné zvolit nulový stavový dělicí kmitočet f_0 , který musí splňovat nerovnici (31).

$$f_{p0} < f_{z0} < f_0 < f_s/2 \quad (31)$$

Kde f_s je frekvence spínání tranzistorů. Po dosazení:

$$1065 < 4233 < f_0 < 50000/2$$

Dále je ještě nutné f_0 volit tak aby byla 1/5 až 1/10 spínací frekvence tranzistorů f_s . Volíme tedy $f_0 = 7000\text{Hz}$

Nyní lze již přistoupit k výpočtu R_3 podle následujícího vztahu:

$$R_3 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot L \cdot U_{ramp} \cdot U_{OUT}}{3150 \cdot 10^{-6} \cdot ESR \cdot U_{IN} \cdot U_{ref}} \quad (32)$$

Číselně pak:

$$f_0 = 7000\text{Hz (volíme)}$$

$$U_{ramp} = 2\text{V (uvedeno v katalogovém listu výrobce integrovaného obvodu)}$$

$$U_{ref} = 1,25\text{V (uvedeno v katalogovém listu výrobce integrovaného obvodu)}$$

$$R_3 = \frac{2 \cdot \pi \cdot 7000 \cdot 95 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 14,2}{3150 \cdot 10^{-6} \cdot 0,16 \cdot 42,9 \cdot 1,25}$$

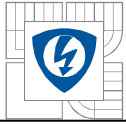
$$R_3 = 4391\Omega$$

Volíme odpory z řady E24:

$$R_{3A} = 4\text{k}3$$

$$R_{3B} = 91$$

R_3 je složen z dvou sériově zapojených odporů R_{3A} a R_{3B}



Dále byl vypočten kondenzátor C_{C1} podle následujícího vztahu:

$$C_{C1} = \frac{1}{0,75 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{p0} \cdot R_3} \quad (33)$$

Číselně pak:

$$C_{C1} = \frac{1}{0,75 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 1065 \cdot 4391}$$
$$C_{C1} = 45,4nF$$

Volíme kondenzátor z řady E48:

$$C_{C1} = 44n2$$

Na závěr kondenzátor C_{C2} výpočtem podle následujícího vztahu:

$$C_{C2} = \frac{1}{\pi \cdot f_s \cdot R_3} \quad (34)$$

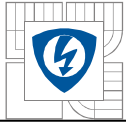
Číselně pak:

$f_s = 50kHz$ (frekvence spínání tranzistorů)

$$C_{C2} = \frac{1}{\pi \cdot 50 \cdot 10^3 \cdot 4391}$$
$$C_{C2} = 1,45nF$$

Volíme kondenzátor z řady E48:

$$C_{C2} = 1n47$$



3.4.2 Silová část synchronního snižujícího měniče

Vstupní kondenzátory

Na vstup měniče bylo nutné navrhnout dostatečnou kapacitu kondenzátorů. Tyto kondenzátory musí vydržet poměrně velkou efektivní hodnotu proudu, pokud bude měnič více vzdálen od stejnosměrného meziobvodu trakčního měniče. Bylo tedy zvoleno šestnáct elektrolytických radiálních kondenzátorů s těmito parametry.

Parametry jednoho kondenzátoru:

- výrobce: HITANO
- typ: elektrolytický radiální kondenzátor, Low ESR
- napětí: 50V
- efektivní hodnota proudu: 2,1A
- kapacita: $C_I = 1000\mu\text{F}$
- ekvivalentní sériový odpor: $ESR_I = 0,036\Omega$
- rozměry: 16x26mm

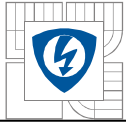
Tranzistory

Dimenzování tranzistorů spočívá ve zvolení tak velkých tranzistorů, aby nebyl překročen jejich maximální dovolený proud a maximální závěrné napětí, neboť tranzistor má prakticky nulovou proudovou přetížitelnost. Samozřejmě tranzistor musí být dimenzován i výkonově. Pro měnič byly vybrány tranzistory MOSFET IRFB4321. Základní parametry tranzistoru jsou uvedeny v následujícím textu, podrobné údaje lze nalézt v [9].

Parametry zakoupených tranzistorů:

- výrobce: International Rectifier (<http://www.irf.com>)
- pouzdro: TO220AB
- typ: Power MOSFET IRFB4321
- $U_{DSS} = 150\text{V}$
- $R_{DS(on)} = 12\text{m}\Omega$
- $I_D = 59\text{A}$ ($T_C = 100^\circ\text{C}$, $U_{GS} = 10\text{V}$)
- $U_{GS} = \pm 30\text{V}$

Závěrné napětí tranzistoru U_{DSS} jsme zvolili 150V ($U_{DSS} > 3 \cdot U_{IN} \Rightarrow$ což je zvoleno s velkou rezervou). Horními i dolními spínacími prvky (rozumí se tranzistory) měniče bude procházet $I_{OUT} = 40\text{A}$ (maximální výstupní proud měniče), proto bylo rozhodnuto dát do horní i dolní části větve po dvou tranzistorech paralelně. Každým tranzistorem poteče tedy 20A. Tato paralelní kombinace nám sníží $R_{DS(on)}$ a ztrátový výkon se jednak sníží a jednak rozloží do dvou tranzistorů.



Tlumivka

Nejprve byl vybrán vhodný tvar a materiál jádra tlumivky. A poté byl proveden výpočet tlumivky spolu s návrhem vinutí.

Bylo zvoleno železoprachové toroidní jádro, jehož parametry jsou uvedeny v následující části textu.

Parametry jádra tlumivky [10]:

- výrobce: Semic Trade, s.r.o. (<https://www.semic.cz>)
- označení: T200B
- typ: železoprachové
- materiál: 52 (barevné označení: zeleno/modrá)
- magnetická vodivost: $A_L = 155\text{nH/záv.}^2$
- tvar: toroid
- rozměry:
 - vnější průměr = 50,8mm
 - vnitřní průměr = 31,8mm
 - výška = 25,4mm

Nejdříve byla vypočtena střída s podle následujícího vztahu:

$$s = \frac{U_{OUT}}{U_{IN}} \quad (35)$$

Číselně pak:

$$s = \frac{14,2}{42,9}$$
$$s = 0,331$$

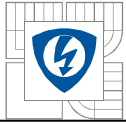
Výpočet indukčnosti tlumivky L podle vzorce [2]:

$$L = \frac{U_{IN}}{2 \cdot f_s \cdot \Delta I_{OUT}} \cdot (1 - s) \cdot s \quad (36)$$

Kde ΔI_{OUT} je zvlnění výstupního proudu. Číselně pak:

$$\Delta I_{OUT} = 1\text{A}$$

$$L = \frac{42,9}{2 \cdot 50000 \cdot 1} \cdot (1 - 0,331) \cdot 0,331$$
$$L = 95\mu\text{H}$$



Dále je nutné znát počet závitů tlumivky. Výpočet provedeme dle následujícího vztahu:

$$N = \sqrt{\frac{L}{A_L}} \quad (37)$$

Kde A_L je magnetická vodivost jádra tlumivky. Číselně pak:

$$A_L = 155 \text{ nH/záv.}^2 \text{ (uvedeno v katalogovém listu výrobce)}$$

$$N = \sqrt{\frac{95 \cdot 10^{-6}}{155 \cdot 10^{-9}}}$$
$$N = 25 \text{ záv.}$$

Průřez vinutí stanovíme ze zvolené proudové hustoty $\sigma = 8 \text{ A/mm}^2$. Tak velkou proudovou hustotu lze volit z důvodu dobrého chlazení vinutí a předpokladu, že měnič nebude dlouhodobě pracovat s maximálním výstupním proudem I_{OUT} . Průřez vodiče S_{CU} tedy vypočteme podle následujícího vztahu:

$$S_{CU} = \frac{I_{OUT}}{\sigma} \quad (38)$$

Číselně pak:

$$\sigma = 8 \text{ A/mm}^2 \text{ (volíme)}$$

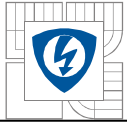
$$S_{CU} = \frac{40}{8}$$

$$S_{CU} = 5 \text{ mm}^2$$

Z průřezu vypočteme poloměr vodiče. Vinutí budeme navíjet ze čtyř paralelních smaltovaných měděných vodičů o průměru 1,3mm. K počtu paralelních vodičů a jejich průměru jsme dospěli experimentálním dosazováním do vztahu (39), přitom byl brán ohled na snadnou realizaci vinutí (je vhodné volit menší průměr na úkor více paralelních vodičů) a momentálně dostupné průměry smaltovaného vodiče.

$$S_{CU} \leq \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot n_V \quad (39)$$

Kde d je průměr a n_V je počet paralelních vodičů. Provedeme ještě kontrolu, zda byl zvolen správný průměr a počet paralelních vodičů:



$$5 \leq \pi \cdot \frac{1,3^2}{4} \cdot 4$$
$$5 \leq 5,31$$

Jak je vidět z výpočtu, tak byl průměr a počet paralelních vodičů zvolen dobře.

Vinutí tlumivky:

- materiál: Cu
- izolace: smalt
- poloměr drátu: $r = 1,3\text{mm}$
- průřez drátu: $S_{Cu} = 1,327\text{mm}^2$
- počet drátů vinutých paralelně: 4
- počet závitů: $N = 25\text{záv.}$

Na závěr je nutné ověřit výpočtem, zda jádro nebude přesycováno. Výpočet sycení jádra provedeme dle následujícího vztahu:

$$B_{\max} = \frac{N \cdot I_{OUT} \cdot A_L}{S_{Fe}} \quad (40)$$

Kde S_{Fe} je průřez jádra tlumivky. Číselně pak:

$$S_{Fe} = 2,32 \cdot 10^{-4} \text{m}^2 \text{ (uvedeno v katalogovém listu výrobce)}$$

$$B_{\max} = \frac{25 \cdot 40 \cdot 155 \cdot 10^{-9}}{2,32 \cdot 10^{-4}}$$

$$B_{\max} = 0,67\text{T}$$

Maximální sycení jádra bude 0,67T, což je v pořádku (maximální sycení u železoprachových jader je kolem 1T).

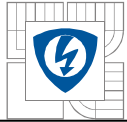
Výstupní filtrační kondenzátory

Jako filtrační kondenzátory byly zvoleny elektrolytické radiální kondenzátory na napětí 35V. Kapacita byla vypočítána podle následujícího vztahu [2]:

$$C_{\text{vyp}} = \frac{\Delta I_{OUT}}{8 \cdot f \cdot \Delta U_{OUT}} \quad (41)$$

Kde ΔU_{OUT} je dovolené zvlnění napětí na výstupu měniče. Číselně pak:

$$\Delta U_{OUT} = 0,01\text{V}$$



$$C_{\text{vyp}} = \frac{1}{8 \cdot 50000 \cdot 0,01}$$
$$C_{\text{vyp}} = 250 \mu\text{F}$$

Volíme tedy pět elektrolytických radiálních kondenzátorů s nízkým ekvivalentním sériovým odporem (Low ESR), každý má tyto parametry:

Parametry jednoho kondenzátoru:

- výrobce: HITANO
- typ: elektrolytický radiální kondenzátor, Low ESR
- napětí: 35V
- kapacita: $C_1 = 47 \mu\text{F}$
- ekvivalentní sériový odpor: $ESR_1 = 0,8 \Omega$
- rozměry: 6,3x11mm

Vypočítáme tedy skutečnou kapacitu C výstupního LC-filtru podle vztahu:

$$C = n_C \cdot C_1 \tag{42}$$

Kde n_C je počet paralelně řazených kondenzátorů. Číselně pak:

$$C = 5 \cdot 47 \cdot 10^{-6}$$
$$C = 235 \mu\text{F}$$

Dále je ještě nutné znát pro další výpočty celkový ekvivalentní sériový odpor, který vypočítáme podle následujícího vztahu:

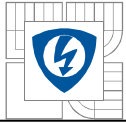
$$ESR = \frac{ESR_1}{n_C} \tag{43}$$

Číselně pak:

$$ESR = \frac{0,8}{5}$$
$$ESR = 0,16 \Omega$$

Parametry celkové výstupní kapacity:

- počet kondenzátorů řazených paralelně: 5
- celková kapacita: $C = 235 \mu\text{F}$
- celkový ekvivalentní sériový odpor: $ESR = 0,16 \Omega$



Poté je třeba podle Thomsonova vztahu zkontrolovat, aby vlastní rezonanční kmitočet filtru ležel dostatečně níže než pracovní kmitočet f_S měniče (abychom se náhodou nenaladili do rezonance). Proto musí platit [2]:

$$C \gg \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot L} \quad (44)$$

číselně pak:

$$235 \cdot 10^{-6} \gg \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot (50 \cdot 10^3)^2 \cdot 95 \cdot 10^{-6}}$$
$$235 \cdot 10^{-6} \gg 107 \cdot 10^{-9}$$

Podmínka je splněna, LC-filtr nebude v rezonanci.

3.4.3 Akumulátor

Byl zvolen klasický olověný akumulátor, který bude udržován téměř v plně nabitém stavu (plně nabitý olověný akumulátor je v případě jeho svorkového napětí 14,4V). Jak již bylo řečeno na začátku této práce, právě proto bylo zvoleno výstupní napětí měniče 14,2V.

Parametry akumulátoru:

- výrobce: ALARMGUARD
- typ: olověný bezúdržbový akumulátor
- napětí: 12V
- kapacita: 7Ah
- rozměry: 151x65x101mm
- hmotnost: 2,6kg

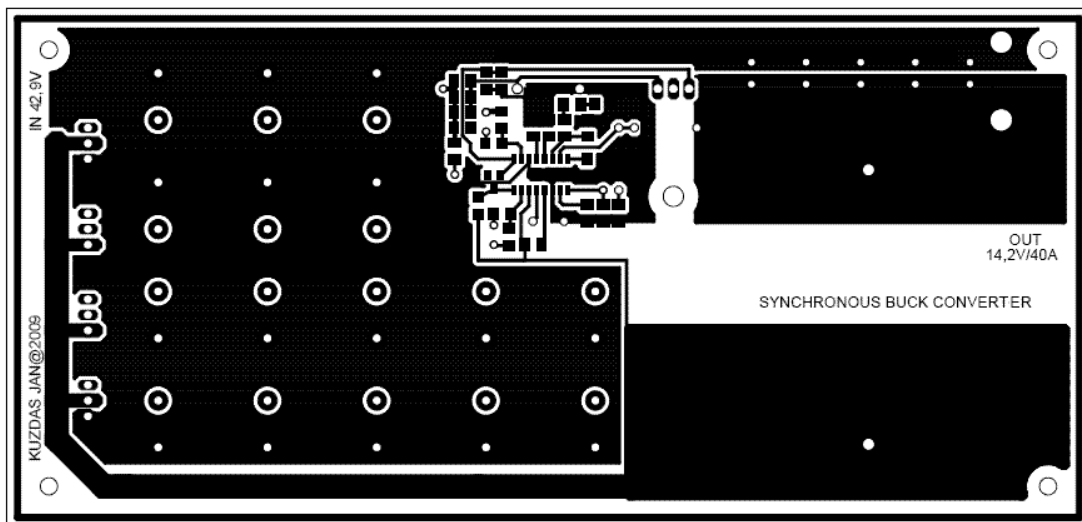
3.4.4 Návrh desky plošných spojů

Při návrhu desky plošných spojů (DPS) bylo především nutné dbát na dosažení co nejmenší indukčnosti mezi spínacími (výkonovými) tranzistory a vstupním napěťovým meziobvodem měniče (velká indukčnost by způsobovala na tranzistorech při jejich vypínání velké přepěťové pulsy). Toho bylo docíleno speciální „sendvičovou“ konstrukcí dvou DPS (tyto DPS jsou jednostranné a jednovrstvé), kde na spodní DPS byla v prostoru kondenzátoru (vstupního napěťového meziobvodu měniče) a spínacích tranzistorů „rozlita“ plocha mědi (jak je vidět na *obrázku 3.12*), na kterou bude přivedena

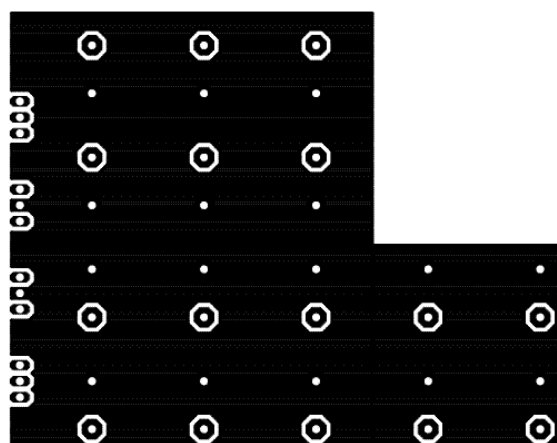
zem měniče. Na horní DPS byla na tom samém místě „rozlita“ měď (jak je vidět na *obrázku 3.13*) na kterou bude přiveden kladný pól měniče.

Dále bylo nutné umístit spínací tranzistory k okraji DPS tak, aby bylo možné je všechny připevnit na jeden pasivní chladič, který bude tvořit jednu stěnu krytu měniče.

Také bylo nutné oddělit výkonovou část od signálové (řídící) části obvodu. Blokovací kondenzátory napájení integrovaného řídicího obvodu byly umístěny co nejbližší k pinům integrovaného obvodu.



Obrázek 3.12: Spodní DPS měniče.



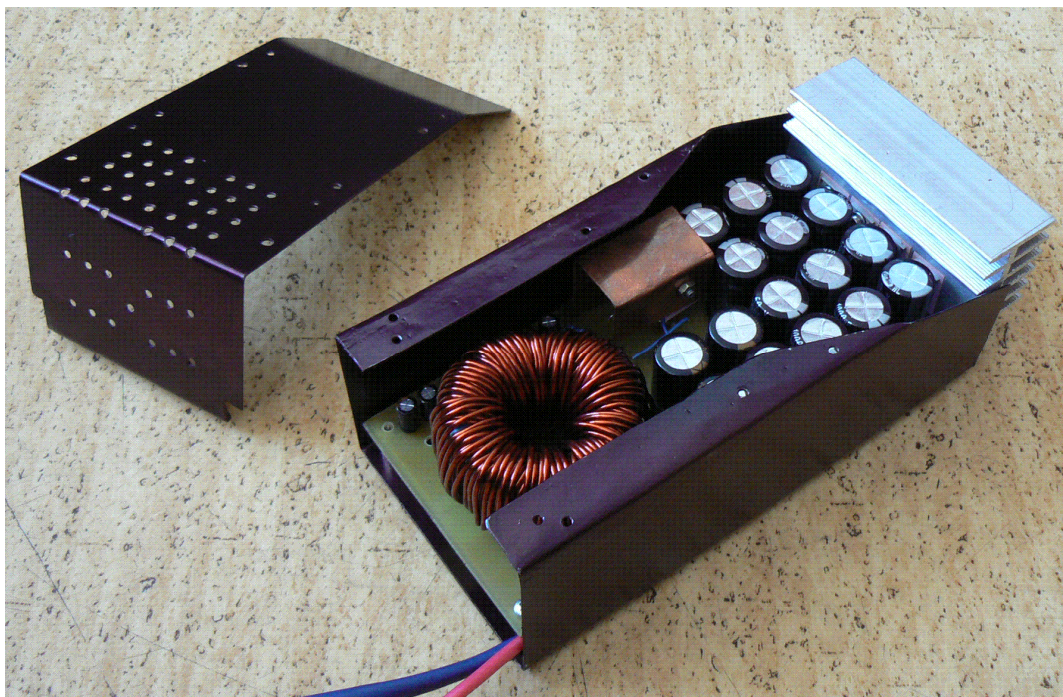
Obrázek 3.13: Horní DPS měniče.

3.5 Oživení měniče

Po uvedení měniče do provozu a následném zatěžování bylo zjištěno, že proudové omezení vybavilo ochranu při hodnotě 15A výstupního proudu I_{OUT} . Při návrhu však bylo počítáno z proudovým omezením pro $I_{OUT} = 40A$. Toto proudové omezení zajišťuje odpor R_7 , který byl vypočten podle vztahu (20). Předčasné vybavení proudové ochrany si lze vysvětlit dvěma způsoby.

První variantou předčasného vybavení ochrany se jeví neodpovídající R_{DSon} u použitých výkonových tranzistorů udávaný výrobcem. Měnič pomocí úbytku napětí na R_{DSon} (způsobeným průchodem proudu přes tranzistor) měří proud procházející měničem.

Další možná příčina předčasného vybavení ochrany může být zapříčiněná špatně uvedeným vztahem (20) v katalogovém listu výrobce, pomocí kterého je nastaveno omezení.



Obrázek 3.14: Fotografie měniče.

Pro správnou činnost proudového omezení bylo nutné experimentálně zvolit odpor R_7 , kterým se nastavuje proudové omezení. Po odstranění tohoto nedostatku byl měnič zatěžován na plný výkon ($I_{OUT} = 40A$).

Při plném zatížení byla zkontrolována teplota všech součástek, chladičů a výkonových cest na DPS. Při této kontrole bylo zjištěno, že některá místa na DPS se přehřívají. Tyto místa byla posílena připájením odizolovaného měděného drátu o průměru 1mm^2 .

Poté bylo na měniči provedeno měření. Na závěr byl vyroben kryt, na který byl měnič připevněn.

3.6 Měření na měniči

Na měniči bylo nezbytné provést měření, abychom ověřili jeho správnou funkci. Měření bylo prováděno při plném zatížení měniče, tedy při $I_{OUT} = 40\text{A}$.

3.6.1 Měření závěrného napětí a řídicího napětí na horním tranzistoru

Při měření průběhu napětí $u_{TH,DS}$ (nepatrné zvlnění průběhů je způsobeno rušením při měření) průběhu mezi elektrodami D-S na horním tranzistoru, dosahoval napěťový překmit (při vypínání tranzistoru) hodnoty 60V. Tím je ověřeno, že DPS byly navržena z minimální indukčnosti mezi tranzistory (spínacími prvky) a napěťovým meziobvodem měniče. U zavřených tranzistoru by nemělo dojít k průrazu, jelikož jejich maximální závěrné napětí 150V leží daleko od naměřené hodnoty.



Obrázek 3.15: Snímek s osciloskopu při měření $u_{TH,DS}$.

Zelený průběh: Závěrné napětí $u_{TH,DS}$ mezi elektrodou D-S na horním spínacím tranzistoru.

Na obrázku 3.16 je znázorněn průběh napětí $u_{TH,GS}$ na řídicí elektrodě (napětí mezi elektrodami G-S) horního tranzistoru. Z průběhu je patrné že na řídicí elektrodě v době sepnutí tranzistoru dosahuje napětí přibližně hodnoty 10,5V, což je pro bezpečné sepnutí tranzistoru dostačující. V době vypnutí tranzistoru, napětí na řídicí elektrodě je téměř nulové (po vypnutí je dokonce nepatrně záporné), což je také v pořádku.



Obrázek 3.16: Snímek s osciloskopu při měření $u_{TH,GS}$.

Žlutý průběh: Řídicí napětí $u_{TH,GS}$ mezi elektrodou G-S na horním spínacím tranzistoru.

3.6.2 Měření proudu tlumivkou a napětí na dolním tranzistoru

Při měření proudu tlumivkou bylo ověřováno, zda nedochází k přesycování jádra tlumivky. Dále bylo také ověřeno, zda naměřené zvlnění proudu $\Delta I_{OUT,skut}$ odpovídá požadovanému ΔI_{OUT} (pro které byla vypočtena indukčnost tlumivky).

Z Obrázku 3.17 bylo odečteno $\Delta I_{OUT,skut}$:

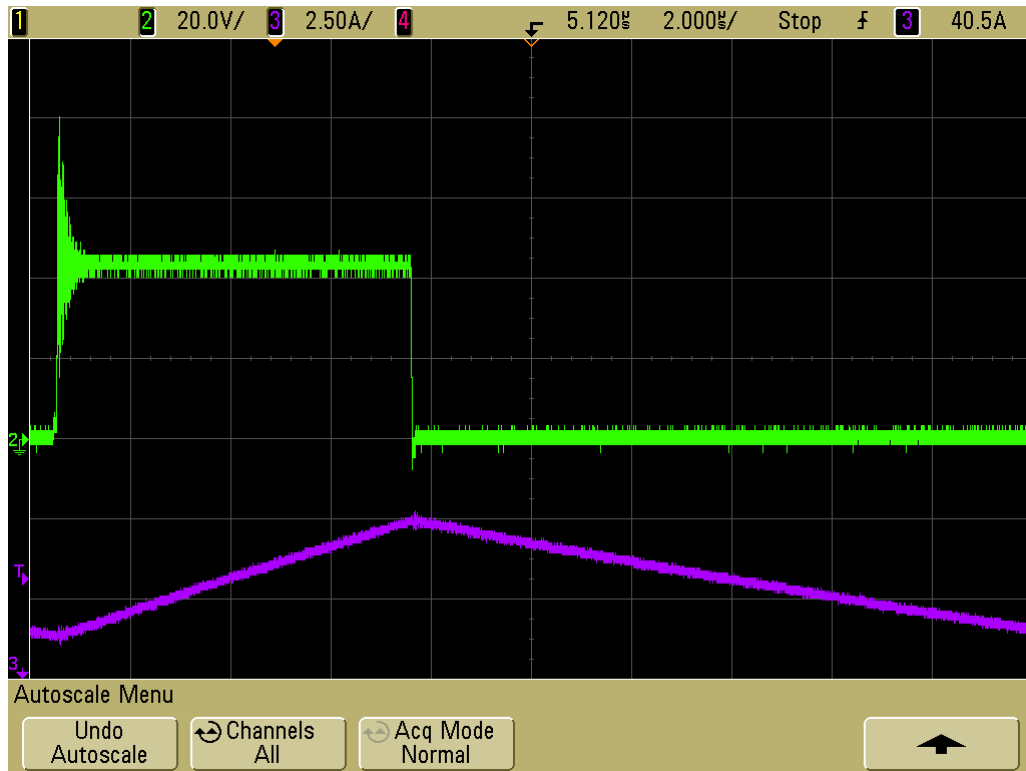
$$\Delta I_{OUT,skut} = 1,75\text{A}$$

Vypočtené ΔI_{OUT} při návrhu tlumivky:

$$\Delta I_{OUT} = 1\text{A}$$

Skutečné zvlnění proudu je větší než požadované, to si lze vysvětlit tím, že vyrobená tlumivka má menší indukčnost, než bylo počítáno při návrhu. Když bereme v potaz to, že

tlumivka byla po realizaci změřena a její indukčnost s malou odchylkou odpovídala požadované hodnotě, nezbyvá než konstatovat, že tlumivce při průchodu proudem I_{OUT} klesne indukčnost.



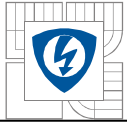
Obrázek 3.17: Snímek s osciloskopu při měření $i_{OUT,skut}$ a $u_{TD,DS}$.

Zelený průběh: Závěrné napětí $u_{TD,DS}$ mezi elektrodami D-S na dolním spínacím tranzistoru.

Fialový průběh: Proud tlumivkou $i_{OUT,skut}$.

Na obrázku 3.17 je také průběh napětí $u_{TD,DS}$ mezi elektrodami D-S na dolním tranzistoru. Z tohoto průběhu je patrné, že napěťový překmit při vypínání dolního tranzistoru dosahuje hodnoty 80V (připomínám, že bylo měření prováděno při maximálním výstupním proudu měniče). Větší napěťový překmit u dolních tranzistorů (porovnáváme s horním tranzistorem) je z důvodu větší nežádoucí indukčnosti na DPS než tomu bylo u horního tranzistoru. U zavřených tranzistorů by nemělo dojít k průrazu, jelikož jejich maximální závěrné napětí 150V leží daleko od naměřené hodnoty.

Z tohoto obrázku také byla ověřena správná spínací frekvence tranzistorů, která byla nastavena na 50kHz (to odpovídá periodě $T = 20\mu s$). Na obrázku 3.17 je zobrazena přesně jedna perioda, která je $20\mu s$ (je to patrné z průběhu proudu).



4 ZÁVĚR

Tato diplomová práce pojednává o dvou různých pomocných měničích použitých v trakčních vozidlech. To vyplynulo z nutnosti aktuální potřeby zrealizovat tyto pomocné měniče (v čase kdy byla psána tato práce) pro použití v trakčních vozidlech právě vyvíjených na ústavu UVEE při FEKT VUT v Brně. Oba tyto měniče byly navrženy, vyrobeny a skutečně v těchto vozidlech použity.

První měnič je určen pro napájení pomocných pohonů elektrické lokomotivy, které jsou řešeny pomocí asynchronních motorů. Proto je měnič koncipován jako třífázový střídač, který pracuje v režimu pulsně-šířkové modulace (PWM).

U měniče byl proveden návrh silové části, který obsahuje schéma zapojení a dimenzování spínacích prvků (tranzistorů a nulových diod). Poté byl proveden výpočet ztrát na měniči pro zvolené součástky.

Dále bylo součástí této práce osazení a oživení napájecí desky pro budiče. Tato deska zajišťuje galvanické oddělení napájení budičů.

V poslední fázi byl měnič zrealizován.

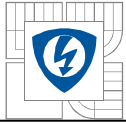
Druhý měnič je určen pro napájení palubních spotřebičů elektromobilu s vodíkovým palivovým článkem. Elektromobil je realizován na ústavu UVEE při FEKT VUT v Brně.

V první části je uvedena celková koncepce tohoto elektromobilu pomocí blokového schématu. Činnost těchto jednotlivých funkčních bloků je dále popsána.

Druhá část je již zaměřena na měnič pro palubní síť. Nejdříve bylo nutné zjistit maximální výkon a požadavky na měnič z hlediska bezpečnosti provozu vozidla na pozemních komunikacích.

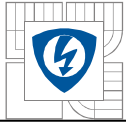
V další části práce je uvedeno schéma zapojení a dimenzování jednotlivých součástí měniče.

Na závěr byl měnič zkonstruován, oživen a byla na něm provedena měření za účelem ověření funkce zařízení.



LITERATURA

- [1] Patočka, M.: Vybrané statě z výkonové elektroniky, svazek I. Brno, 2004. Skripta na Vysokém učení technickém v Brně.
- [2] Patočka, M.: Vybrané statě z výkonové elektroniky, svazek II. Brno, 2004. Skripta na Vysokém učení technickém v Brně.
- [3] Patočka, M.: Matematický nástroj pro analýzu PWM signálů, jeho užití ve střídavých pohonech. Brno, 1999. Teze habilitační práce na Vysokém učení technickém v Brně.
- [4] Vorel, P.: Výkonové elektromechanické systémy v silničních vozidlech. Brno, 2005. Teze habilitační práce na Vysokém učení technickém v Brně.
- [5] CONCEPT, Dostupný z www.igbt-driver.com
- [6] EUPEC, Dostupný z www.eupec.com
- [7] ON Semiconductor. Dostupný z [www: http://onsemi.com](http://www.onsemi.com)
- [8] National semiconductor . Dostupný z [www: http://www.national.com](http://www.national.com)
- [9] International Rectifier. Dostupný z [www: http://www.irf.com](http://www.irf.com)
- [10] Semic Trade, s.r.o.. Dostupný z [www: https://www.semic.cz](https://www.semic.cz)
- [11] JAWA-auto, 2004. Dostupný z [www: http://www.jawa-auto.com/fotogalerie.html](http://www.jawa-auto.com/fotogalerie.html)
- [12] Nexa™ (310-0027), 6/2003. Power Module User's Manual, firemní uživatelská příručka k Nexa® PEMFC jednotce, USA.



PŘÍLOHY

Tabulka 1: Seznam součástek pro měnič napájení palubní sítě elektromobilu.

Součástka	Hodnota	Pouzdro
C1	16 X 50V/1000M	E7,5-16
C2	100n	C1206
C3	100n	C050-035X075
C4	100n	C1206
C5	220n	C1206
C9A	5 X 35V/47M	E3,5-8
C10	100n	C1206
CC1	44n2	C1206
CC2	1n47	C1206
D1	1N4148	SOT23
D2	BZX85V012	DO41Z10
L	95uH	TJ8-U2
R0	0R	M1206
R1	16k9	0309/10
R2A	1k6	0309/10
R2B	30	M1206
R3A	4k3	M1206
R3B	91	M1206
R4	120k	M1206
R5	3k6	M1206
R6	82k	M1206
R7	5k1	M1206
R8	10k	M1206
R10	10k	M1206
R11A	4k7	M1206
R11B	4k7	M1206
R11C	4k7	M1206
R11D	4k7	M1206
RGT1	6R8	R1206
RGT2	6R8	R1206
RGT3	6R8	R1206
RGT4	6R8	R1206
T1	IRFB4321	TO220BV
T2	IRFB4321	TO220BV
T3	IRFB4321	TO220BV
T4	IRFB4321	TO220BV
T5	2SC2238	TO220
IO	NCP1034	SOIC-16