

**Univerzita Pardubice**  
**Dopravní fakulta Jana Pernera**

**Modulární systém výkonových měničů**

**Petr Felgr**

**Bakalářská práce**  
**2012**



Univerzita Pardubice  
Dopravní fakulta Jana Pernera  
Akademický rok: 2010/2011

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Petr FELGR**  
Osobní číslo: **D08204**  
Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**  
Studijní obor: **Dopravní infrastruktura-Elektrotechnická zařízení v dopravě**  
Název tématu: **Modulární systém výkonových měničů**  
Zadávací 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 :

Popis základní funkce 3f diodového a tyristorového usměřovače, 3f střídače a reverzačního pulsního měniče. Návrh řešení výkonové části 3f diodového a tyristorového usměřovače, 3f střídače a reverzačního pulsního měniče s možností připojení univerzálního programovatelného řídicího systému. Realizace navrženého systému a ověření funkčnosti.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

**PAVELKA, Jirí; CEROVSKÝ, Zdenek; LETTL, Jirí. Výkonová elektronika. Vyd. 3., preprac. Praha : Česká technika - nakladatelství CVUT, c2007. 227 s. ISBN 978-80-01-03626-6(brož.).**

**CEROVSKÝ, Zdenek; GRIC, Rudolf; PAVELKA, Jirí. Výkonová elektronika I. 1. vyd. Praha : České vysoké učení technické, 1996. 196 s. ISBN 80-01-00723-5.**

Vedoucí bakalářské práce:

**prof. Ing. Jaroslav Novák, CSc.**

Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě

Datum zadání bakalářské práce: **25. listopadu 2010**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31. května 2011**



prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.

děkan

L.S.



doc. Ing. Radovan Doječek, Ph.D.

vedoucí katedry

V Pardubicích dne 11. března 2011

**Prohlášení autora:**

Prohlašuji, že jsem tuto práci 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 Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 30. 05. 2012

Petr Felgr

**Poděkování:**

Rád bych poděkoval svému vedoucímu panu Doc. Ing. Jaroslavovi Novákovi, CSc. za rady, které mi pomohly při zpracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Ondřeji Černému s pomocí při výrobě DPS. Nakonec bych rád poděkoval rodičům, kteří mě během studia velice podporovali.

**Anotace:**

Cílem bakalářská práce je seznámení se s třífázovými polovodičovými měniči a jejich způsobu změny parametrů elektrické energie. Práce se zaměřuje především na popis a návrh výkonové části třífázového můstkového usměrňovače a třífázového napěťového střídače. V případě usměrňovače se provedla i jeho realizace. Na závěr práce se zabývám návrhem a realizací zdrojové desky s použitím DC/DC snižujících měničů. Zdrojová deska je určena pro napájení výkonových třífázových střídačových modulů a dalšího příslušenství akumulátorového kolejového vozidla.

**Klíčová slova:**

Usměrňovač, střídač, IGBT modul, budič, DC/DC měnič

**Title:**

Modular system of power converters

**Annotation:**

The aim of this bachelor thesis is familiarization with the three-phase semiconductor converters and their ways of changing parameters electric power. The thesis is focused on the description and design of the power part of a three-phase bridge rectifier and a three-phase voltage inverter. In case of the rectifier was performed also its realization. At the conclusion of the thesis I deal with the design and construction of a source board using DC/DC reducing converters. The source board is intended for energy supply to power three-phase inverter modules and other accessories accumulator rail vehicle.

**Keywords:**

Rectifier, inverter, IGBT module, driver, DC/DC converter

# OBSAH

ÚVOD.....	- 10 -
<b>1. POPIS TŘÍFÁZOVÉHO MŮSTKOVÉHO USMĚRŇOVAČE.....</b>	<b>- 12 -</b>
1.1 Třífázový usměrňovač s odporovým charakterem zátěže .....	- 13 -
1.1.1 Komutace .....	- 15 -
1.2 Třífázový usměrňovač s induktivním charakterem zátěže .....	- 16 -
1.3 Třífázový usměrňovač s kapacitním charakterem zátěže .....	- 17 -
1.4 Vliv usměrňovačů na napájecí síť .....	- 18 -
1.5 Tyristorový usměrňovač .....	- 19 -
<b>2. STAVBA TŘÍFÁZOVÉHO DIODOVÉHO USMĚRŇOVAČE.....</b>	<b>- 20 -</b>
2.1 Měření na sestrojených usměrňovačích .....	- 21 -
2.1.1 Výsledky měření pro odporovou zátěž .....	- 22 -
2.1.2 Výsledky měření pro odporovou zátěž s tlumivkou.....	- 23 -
2.1.3 Výsledky měření pro odporovou zátěž s kondenzátorem .....	- 24 -
2.1.4 Zhodnocení naměřených výsledků .....	- 24 -
<b>3. POPIS A NÁVRH TŘÍFÁZOVÉHO STŘÍDAČE.....</b>	<b>- 25 -</b>
3.1 Popis funkce třífázového napěťového střídače .....	- 25 -
3.2 Účel navrhovaného střídače a specifikace jím napájeného motoru .....	- 27 -
3.3 Specifikace komponent výkonové části napěťového střídače.....	- 29 -
3.3.1 Výkonový modul IGBT .....	- 29 -
3.3.2 Budič pro IGBT modul .....	- 30 -
3.3.3 Řídící jednotka.....	- 31 -
3.3.4 Použité snímače .....	- 32 -
3.4 Návrh výkonové části napěťového střídače .....	- 33 -
3.5 Reverzační pulzní měnič.....	- 37 -



<b>4. ZDROJOVÁ JEDNOTKA VÝKONOVÝCH MĚNIČŮ</b> .....	<b>- 38 -</b>
4.1 Specifikace použitých DC/DC měničů .....	- 38 -
4.2 Návrh a realizace zdrojové jednotky .....	- 40 -
4.2.1 Popis obvodu .....	- 42 -
4.2.2 Osazení a sestavení zdrojové jednotky .....	- 43 -
4.3 Ověření funkčnosti .....	- 44 -
4.3.1 Měření na spodní desce zdrojové jednotky .....	- 45 -
4.3.2 Měření na vrchní desce zdrojové jednotky .....	- 46 -
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>- 49 -</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b> .....	<b>- 50 -</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>- 51 -</b>
<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	<b>- 53 -</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH</b> .....	<b>- 54 -</b>

## ÚVOD

Předmětem mé bakalářské práce jsou polovodičové měniče, které slouží k přeměně parametrů elektrické energie. V dnešní době se jedná o nejrozšířenější druh měničů. Ke své činnosti využívají spínacích vlastností nelineárních součástek vyrobených především na bázi křemíku. Velkou výhodou oproti dříve používaným měničům je jejich vysoká účinnost, životnost a minimální nároky na údržbu. Rozdělují se podle funkce na usměrňovače, střídače, stejnosměrné měniče a střídavé měniče. Má práce se zaměřuje pouze na část usměrňovačů a střídačů.

Usměrňovače mění vstupní střídavé napětí a proud na výstupní stejnosměrné napětí a proud. Jejich rozvoj začal v době, kdy se přecházelo ze stejnosměrného systému na systém střídavý, který má výhodu v jednoduché přeměně napětí na požadovanou velikost. V řadě aplikací však zůstala potřeba napájení zařízení stejnosměrným proudem, která trvá dodnes. Mezi první vzniklé usměrňovače patří mechanický kontaktní, dále vznikaly usměrňovače rtuťové, se selenovými deskami až po dnešní polovodičové usměrňovače.

S rozvojem polovodičové techniky a novějšími technologiemi výroby součástek se staly polovodičové usměrňovače pro své příznivé vlastnosti nejpoužívanějšími. Projevily se však i jejich negativní vlastnosti a to odběr nesinusového průběhu proudu z napájecí střídavé sítě. Rozdělují se podle různých hledisek. Dle použitých součástek na neřízené, polořízené a plně řízené. Podle způsobu napájení na jednofázové, třífázové a vícefázové. Dále pak dle počtu pulzů na periodu na jednopulzní, dvoupulzní, trojpulzní, šestipulzní a vícepulzní. Nakonec podle zapojení na můstkové a uzlové. Usměrňovače se využívají ve spoustě elektrických zařízení od běžné spotřební elektroniky, strojů v průmyslu pro pohon lokomotiv a městských drah.

Střídače mají opačnou funkci než usměrňovače tím, že mění vstupní stejnosměrné napětí a proud na výstupní střídavé napětí, proud, frekvenci a počet fází. Rozdělují se podle druhu napájecího obvodu na střídače napětíové a proudové a podle způsobu komutace na střídače s vlastní a vnější komutací. Nejvíce se uplatňují v elektrických střídavých pohonech.

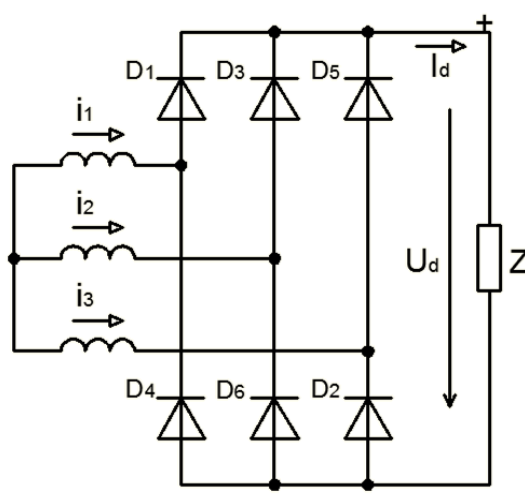
Úkolem mé bakalářské práce je zpracovat základní teorii třífázového můstkového usměrňovače a třífázového napěťového střídače. Zhotovit jednoduchý třífázový diodový usměrňovač. Dále navrhnout zapojení výkonových modulů napěťového střídače. Nakonec navrhnout a realizovat zdrojovou jednotku pro napájení výkonových třífázových střídačových modulů.

V zadání práce mám i realizaci tyristorového usměrňovače a reverzačního pulzního měniče. Vzhledem k odložení mé práce byla daná témata na KEEZ v potřebném rozsahu již zpracována. V návaznosti na aktuální potřeby KEEZ v oblasti výzkumu byly v této práci provedeny návrh a realizace zdrojové jednotky pro napěťové střídače. Napěťový střídač a zdrojová jednotka byly navrženy v souvislosti s projektem experimentálního kolejového vozidla na KEEZ.

# 1. POPIS TŘÍFÁZOVÉHO MŮSTKOVÉHO USMĚRŇOVAČE

Třífázový můstkový usměrňovač je statický měnič, který slouží k přeměně střídavého napětí a proudu na stejnosměrné napětí a proud. Následný popis funkce budu vysvětlovat pouze pro neřízený třífázový můstkový usměrňovač, kde se jako akčního členu využívá polovodičové diody.

Dioda je nejjednodušší polovodičová součástka tvořená jedním PN přechodem a dvěma vývody, které se nazývají anoda a katoda. Do vodivého stavu se dostane po připojení napětí, kde kladný pól se připojí k anodě a záporný pól ke katodě. Ve vodivém stavu zůstává po dobu takto připojeného napětí.



Obr. 1.1 Schéma třífázového můstkového usměrňovače

Schéma třífázového diodového usměrňovače je vyobrazeno na obrázku 1.1. Obvod je napájen ze zdroje třífázového střídavého napětí, kde se nejvíce využívá transformátoru, který galvanicky odděluje napájecí obvod od obvodu stejnosměrného a zároveň upravuje velikost sekundárního napětí. Obvod dále tvoří šestice diod a zátěž. Z obrázku je patrné, že se můstkový usměrňovač skládá ze sériového spojení dvou uzlových usměrňovačů. Vrchní trojice diod se označuje jako anodová skupina a spodní trojice jako katodová skupina. Ke své činnosti využívá obou polarit vstupního napětí. V sepnutém stavu jsou vždy dvě polovodičové součástky spojující obvod nejvyššího sruženého napětí se zátěží. Diody, které se nepodílí na vedení proudu, jsou polarizovány závěrně sruženým napětím mezi svou fází a fází vedoucí diody. Zapojení tohoto usměrňovače je nejlepší vzhledem k velikosti a pulzaci usměrněného napětí.

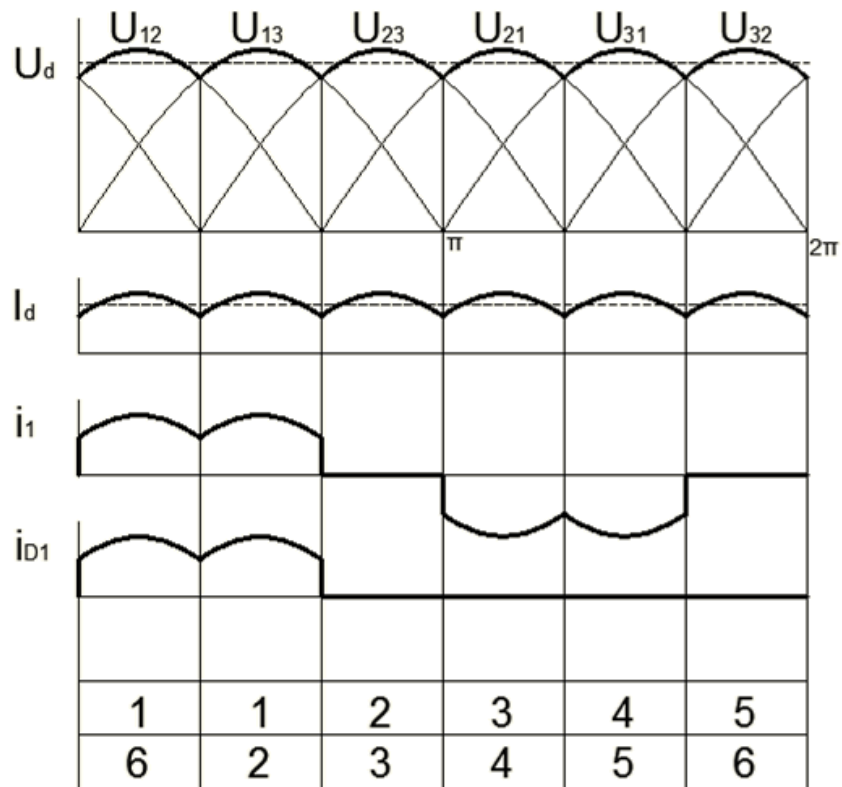
Pro usměrnění střídavého vstupního napětí vybírá usměrňovač jen část dané křivky, aby výstupní napětí co nejvíce připomínalo stejnosměrné. Z jednotlivých intervalů úhlů sinusovek jsou vybírány části v oblasti maxima. Usměrněné napětí je tvořeno šesti pulzy za dobu jedné periody vstupního napětí. Průběh usměrněného proudu je dán průběhem napětí a charakterem zátěže. Pro neřízený třífázový můstkový usměrňovač je proud vždy nepřerušovaný pro všechny druhy zatížení. Negativní vlastností usměrňovače je odběr nesinusového průběhu proudu z napájecí střídavé sítě.

## 1.1 Třífázový usměrňovač s odporovým charakterem zátěže

Usměrňovač je zatížen pouze odporem a zapojen podle předešlého obrázku 1.1. Průběhy napětí a proudů jsou vyobrazeny na obrázku 1.2. Vrchní dva průběhy představují usměrněné sdružené napětí a proud. Zbývající dva ukazují průběh proudu první vstupní fáze a diodou  $D_1$ . Ve spodní části obrázku jsou označeny diody, které se zrovna podílejí na vedení proudu.

Základní princip činnosti usměrňovače vyplývá z nelineárních vlastností polovodičových diod a jejich přechodu z vodivého do nevodivého stavu. Ve vedení je dvojice diod spojující obvod nejvyššího sdruženého napětí se zátěží. Vezmeme počáteční stav, kdy prochází proud diodami  $D_1$  a  $D_6$ . Na zátěži se objeví sdružené napětí  $U_{12}$ . Tento stav trvá do doby průsečíku sdružených napětí  $U_{12}$  a  $U_{13}$ . V daném bodě přechází vedení z diody  $D_6$  na diodu  $D_2$ . Tento děj se nazývá komutací. Obdobným způsobem dojde postupně ke komutaci diod  $D_1/D_3$ ,  $D_2/D_4$ ,  $D_3/D_5$ ,  $D_4/D_6$  a  $D_5/D_1$ . Během jedné periody síťového napětí nastává u třífázového můstkového usměrňovače šest komutací. Každá dioda setrvává v sepnutém stavu po třetinu periody. Zbývající dobu je v závěrném stavu.

Z průběhu je dále patrné, že výstupní napětí a proud je nepřerušovaný a tvořen šesti pulzy za dobu jedné periody. Proud je tvořen výřezy sinusovek podobně jako výstupní napětí. Z napájecí střídavé sítě je odebírán proud téměř obdélníkového tvaru.



Obr. 1.2 Průběhy napětí a proudů na 3f můstkovém usměrňovači s R zátěží

Střední hodnota výstupního usměrněného napětí třífázového můstkového usměrňovače je dána integrací vztahu 1.1.

(1.1)

$$U_{d(AV)} = \frac{6}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} \sqrt{2}U_S \sin\omega t d(\omega t)$$

$U_S$  je efektivní hodnota vstupního sdruženého napětí. Pro střední hodnotu usměrněného proudu můžeme psát vztah 1.2.

(1.2)

$$I_{d(AV)} = \frac{U_{d(AV)}}{R}$$

Za R se dosazuje hodnota odporu zátěže. Vztah 1.3 představuje efektivní hodnotu proudu diodou a vztah 1.4 určuje efektivní hodnotu proudu jedné vstupní fáze.

(1.3)

$$I_{De} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} 2 \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} \left(\frac{U_S \sqrt{2}}{R}\right)^2 \sin^2 \omega t d(\omega t)}$$

(1.4)

$$I_{1e} = \sqrt{\frac{2}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} I_{d(AV)}^2 d(\omega t)}$$

Maximální hodnota závěrného napětí je dána vztahem 1.5.

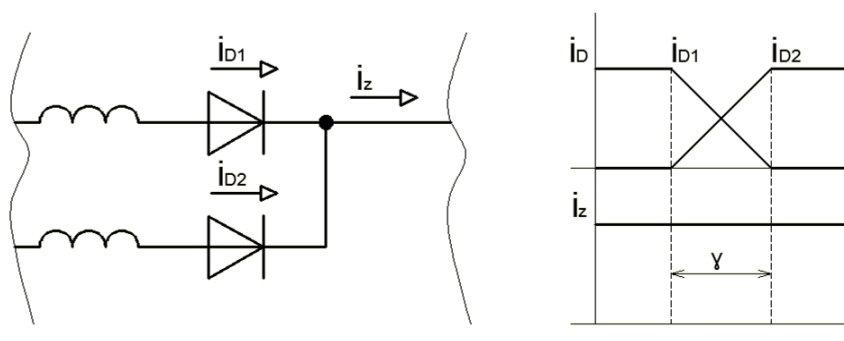
(1.5)

$$U_{RWM} = \sqrt{2} U_S$$

Veškeré vztahy uvedené výše jsou odvozeny pro neřízený třífázový můstkový usměrňovač s odporovou zátěží. Další informace týkající se daného tématu lze najít v literatuře [1].

### 1.1.1 Komutace

U usměrňovačů se mluví o komutaci v souvislosti s přechodem vedení proudu z jedné polovodičové součástky na jinou. Ukázka komutace mezi dvěma diodami je vyobrazena na obrázku 1.3. Přechod vedení proudu nastává, aniž by došlo k přerušování proudu do zátěže.

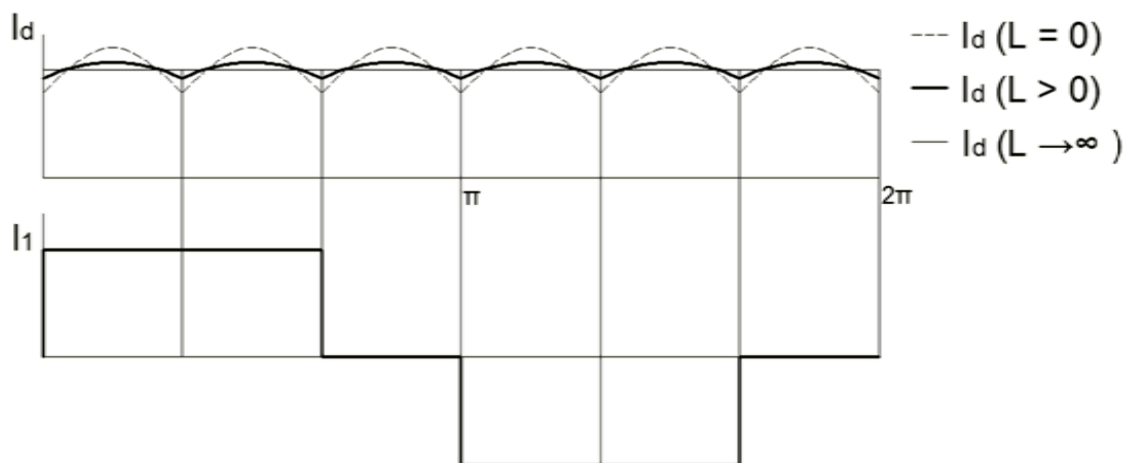


Obr. 1.3 Komutace diod

Rozeznáváme dva druhy komutace a to vnější a vlastní. Vnější komutace má zdroj komutačního napětí mimo měnič. Vlastní komutace má zdroj komutačního napětí vytvořenou obvodem přímo v měniči.

## 1.2 Třífázový usměrňovač s induktivním charakterem zátěže

Zátěž je tvořena sériovou kombinací odporu a cívky. Cívka pracuje jako filtrační prvek, který dále vyhlazuje průběh usměrněného pulzního proudu. Výstupní napětí má stejný průběh jako při odporové zátěži. Ukázka vlivu indukčnosti na výstupní proud je na obrázku 1.4.



Obr. 1.4 Průběhy proudů na 3f můstkovém usměrňovači s RL zátěží

Z obrázků vidíme, že proud se vlivem indukčnosti vyhladí. To je způsobeno schopností cívky v sobě akumulovat energii. V době, kdy proud obvodem roste, dochází k nabíjení cívky ze zdroje elektromagnetickou energií a následně její vybíjení do zátěže. Indukčnost nemá vliv na spínání jednotlivých diod. Z napájecí střídavé sítě je odebíraný proud obdélníkového tvaru. Vyhlazení výstupního proudu je tím větší, čím větší je časová konstanta zátěže  $\tau$ , která je dána vztahem 1.6.

(1.6)

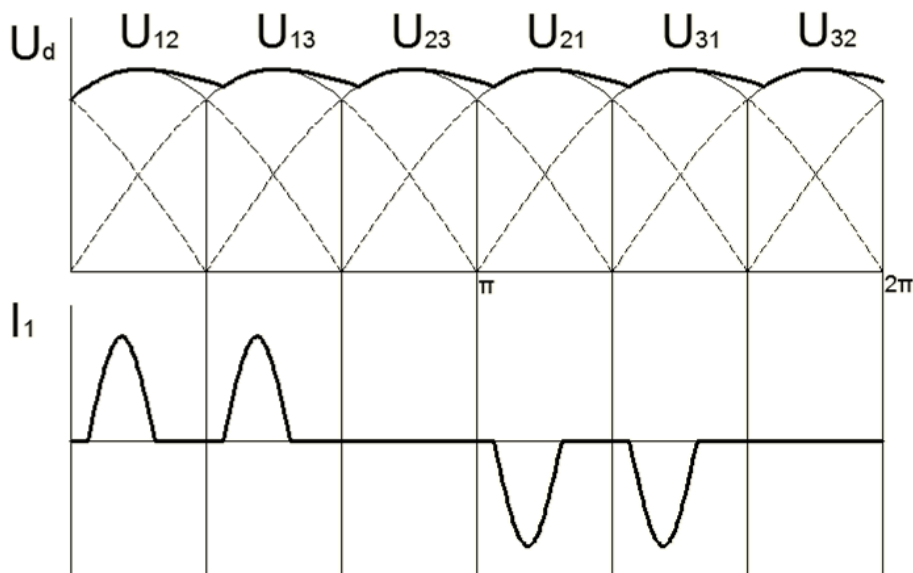
$$\tau = L/R$$

R je odpor zátěže a L představuje indukčnost cívky.



### 1.3 Třífázový usměrňovač s kapacitním charakterem zátěže

Zátěž tvoří paralelní kombinace odporu a kondenzátoru. Kondenzátor pracuje jako filtrační prvek, který dále vyhlazuje průběh usměrněného pulzního napětí. Průběh výstupního napětí a odebíraného proudu ze sítě ukazuje obrázek 1.5.



Obr. 1.5 Průběh napětí a proudu na 3f můstkovém usměrňovači s RC zátěží

Z obrázku vidíme vyhlazení usměrněného napětí. Vezmeme počáteční stav, kdy je ve vedení dioda  $D_1$  a  $D_6$ . Pokud okamžitá hodnota napětí zdroje je větší než napětí na zátěži, budou diody  $D_1$  a  $D_6$  sepnuty a povedou proud. Na zátěži se objeví napětí zdroje  $U_{12}$ . V době nárůstu tohoto napětí dochází také k nabíjení kondenzátoru. Poté nastane stav, kdy aktuální hodnota napětí zátěže je větší než napětí zdroje. To nastává za vrcholem kladné půlvlny napětí  $U_{12}$ . V ten okamžik se uzavře dioda  $D_1$  a kondenzátor se vybíjí do zátěže. Tento děj se neustále opakuje. Proud odebíraný z napájecí střídavé sítě má tvar impulzů, což je způsobeno nabíjením kondenzátoru. Vyhlazení průběhu usměrněného napětí bude lepší s větší časovou konstantou zátěže  $\tau$ , která je dána vztahem 1.7.

(1.7)

$$\tau = RC$$

R je odpor zátěže a C představuje kapacitu kondenzátoru.

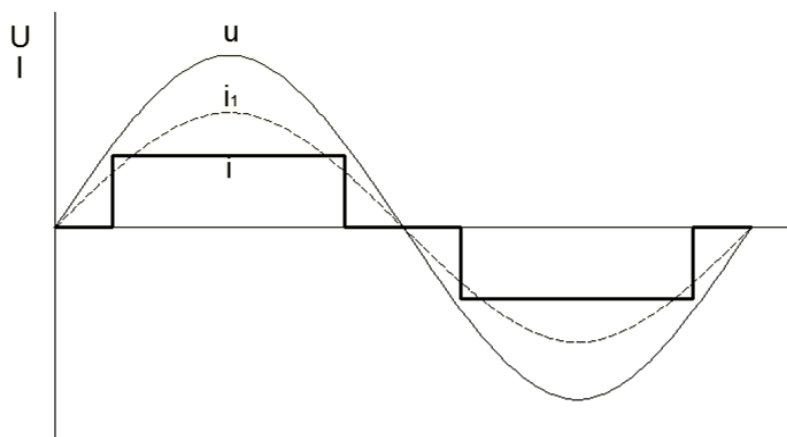
## 1.4 Vliv usměrňovačů na napájecí síť

Napájecí síť by měla dodávat usměrňovači napětí a proud sinusového průběhu. Skutečnost je ale jiná. Usměrňovač odebírá proud nesinusového průběhu a tím zatěžuje vstupní obvod vyššími harmonickými složkami proudu, které způsobují deformaci napětí na vstupu usměrňovače. Rozklad proudu a napětí na první a vyšší harmonické je dán vztahy 1.8 a 1.9.

$$I = \sqrt{I_1^2 + \sum_{v=2}^{\infty} I_v^2} \quad (1.8)$$

$$U = \sqrt{U_1^2 + \sum_{v=2}^{\infty} U_v^2} \quad (1.9)$$

$I_1$  respektive  $U_1$  představuje první harmonickou a  $I_v$  respektive  $U_v$  následné vyšší harmonické. Na obrázku 1.6 je vyobrazen časový průběh fázového napájecího napětí a proudu pro neřízený usměrňovač. Odebíraný proud lze většinou aproximovat obdélníkem o délce základny dvou třetin periody. První harmonická fázového proudu  $i_1$  prochází nulou současně s fázovým napětím  $u$ .



Obr. 1.6 Průběh napětí a proudu v síti

Třífázový můstkový usměrňovač je zdrojem páté a sedmé harmonické a jejich celistvými násobky. Největší negativní vliv má usměrňovač při kapacitním charakteru zátěže, kdy produkuje liché harmonické s vyšší amplitudou. Pro odstranění tohoto vlivu se zapojuje tlumivka do stejnosměrného obvodu, která má vliv na vyhlazení vstupního proudu. S rostoucí indukčností tlumivky je amplituda harmonických složek menší.

Vyšší harmonické složky způsobují větší ztráty v přenosové síti nebo větší ztráty vířivými proudy u transformátorů. Jejich vlivem může dojít k přehřátí kabelů a zničení izolace. Vznikají vyšší náklady kvůli většímu zatížení jalovým výkonem. Zároveň způsobují vyšší harmonické vstupního proudu usměrňovače deformaci síťového napětí a představují riziko vzniku rušení.

## **1.5 Tyristorový usměrňovač**

Vzhledem k tomu, že zpracování práce se o rok posunulo, byla tematika tyristorových usměrňovačů na KEEZ v potřebném rozsahu již zpracována. V návaznosti na aktuální aktivity KEEZ v oblasti výzkumu byly v této práci provedeny návrh a realizace zdrojové jednotky pro modulární třífázové střídače.

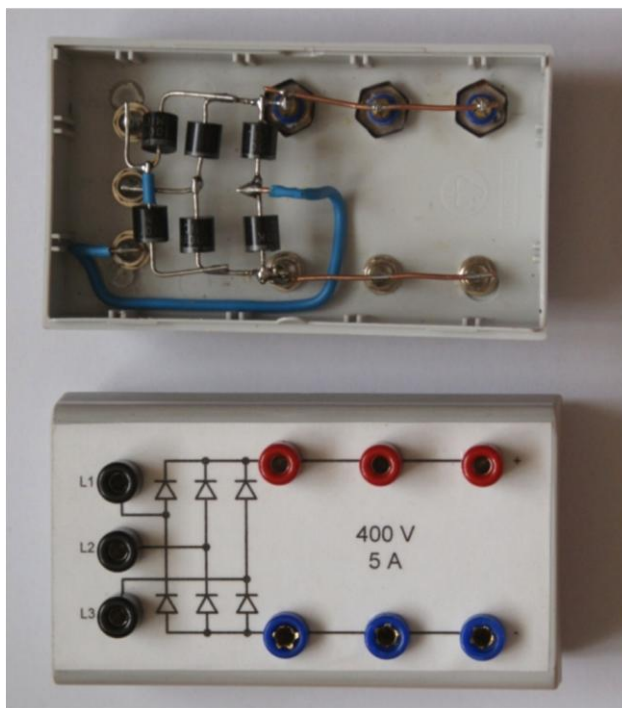
## 2. STAVBA TŘÍFÁZOVÉHO DIODOVÉHO USMĚRŇOVAČE

Usměrňovač je zapojen podle schématu na obrázku 1.1. Diody vybrané pro dané zapojení mají označení P1000K [5].

Hlavní parametry diody:

- |                                      |        |
|--------------------------------------|--------|
| - typ                                | P1000K |
| - maximální závěrné napětí $U_{rrm}$ | 800 V  |
| - jmenovitý proud $I_f$              | 10 A   |

Usměrňovač je tvořen krabičkou, na které se nacházejí zdířky určené pro kabely s banánkovými koncovkami o průměru 4 mm. Zdířky slouží k přívodu napájecího třífázového napětí a připojení zátěže a měřících přístrojů. Pro dané zapojení nebylo potřeba vytvářet desku plošných spojů, ale stačilo diody připájet přímo na zdířky. Vyrobil jsem dva třífázové diodové usměrňovače, jejichž ukázka je na obrázku 2.1.

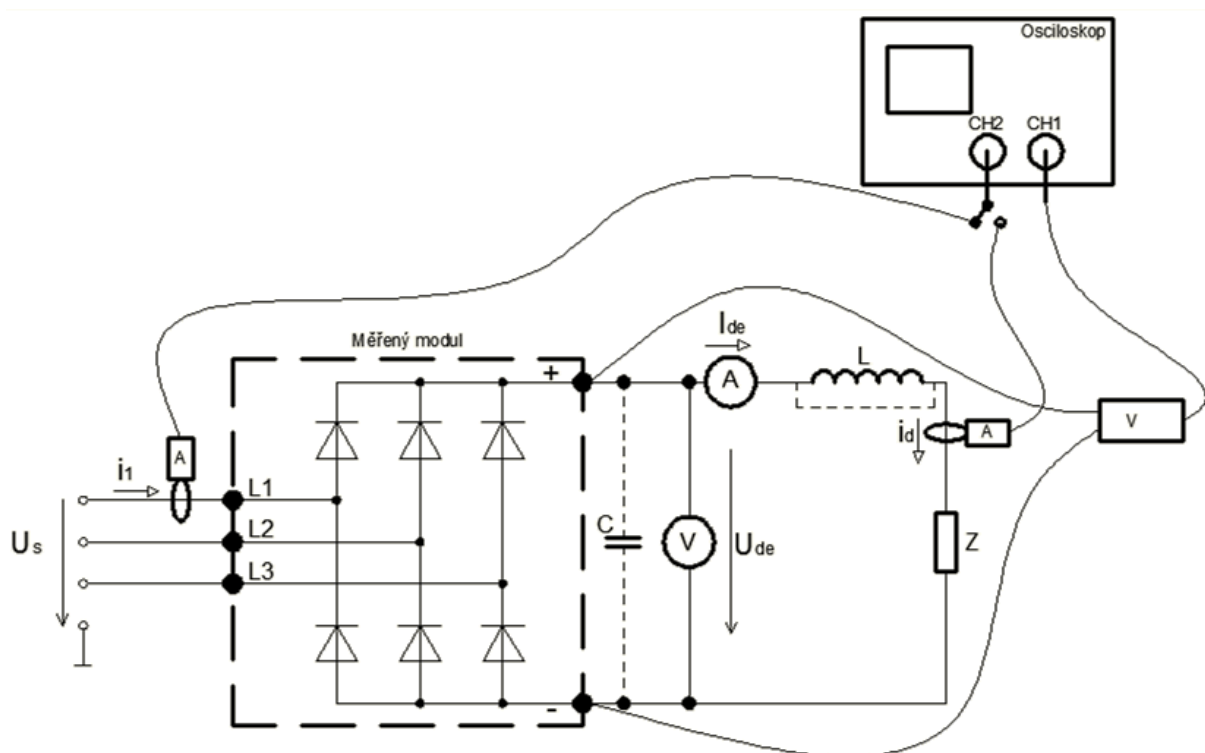


Obr. 2.1 Zkonstruované usměrňovače

Na vrchní straně modulu je zobrazeno schéma usměrňovače, popis svorek a doporučené provozní parametry. Usměrňovače byly zhotoveny pro účely výuky na DFJP katedry KEEZ.

## 2.1 Měření na sestrojených usměrňovačích

Po sestavení obou třífázových můstkových usměrňovačů, bylo zapotřebí ověřit jejich funkčnost. K měřenému usměrňovači byl na vstupní svorky připojen regulovatelný střídavý zdroj. Jako zátěž se použil reostat, na kterém se nastavil odpor  $70 \Omega$ . V případě potřeby se k zátěži připojila tlumivka nebo kondenzátor. Pro měření se na výstup zapojil ampérmetr a voltmetr, kde se měřily efektivní hodnoty proudu a napětí zátěže. Dále zde byl osciloskop, který zobrazoval průběhy napětí a proudu na zátěži a proud jednou vstupní fází. Ke snímání proudů byly použity proudové kleště s citlivostí  $10 \text{ mV/A}$  a k snímání napětí se využilo napěťové sondy s poměrem  $1 : 200$ . Na obrázku 2.2 je znázorněno zapojení pro měření třífázového můstkového usměrňovače.



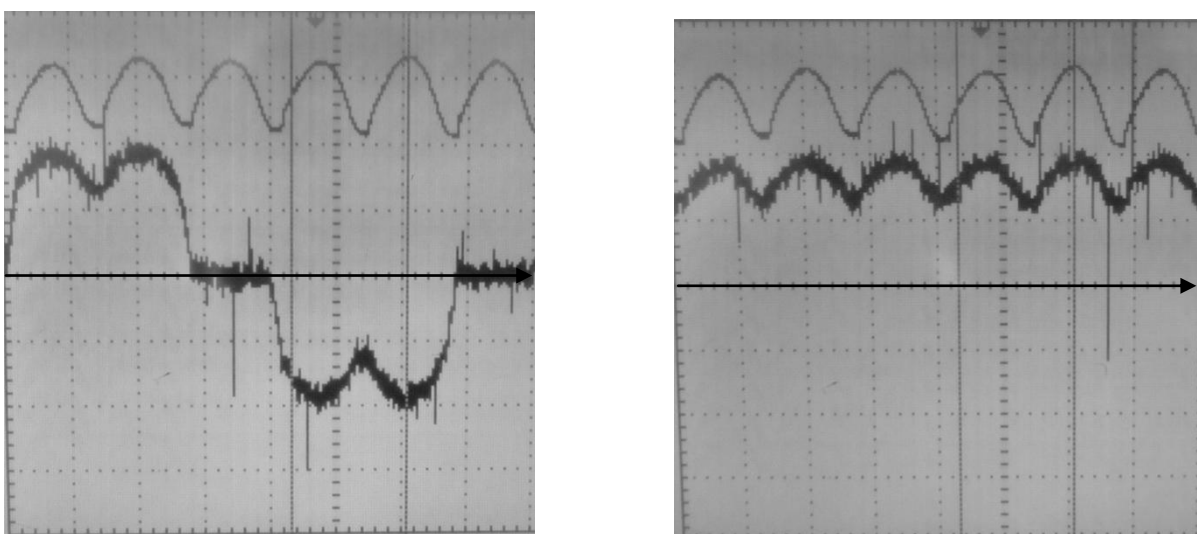
Obr. 2.2 Zapojení měřeného pracoviště

### 2.1.1 Výsledky měření pro odporovou zátěž

Pro první měření jsem na výstup připojil pouze reostat s odporem  $70 \Omega$ . V tabulce 2.1 jsou uvedeny střední hodnoty proudu a napětí změřené na zátěži. Oscilogramy s průběhy proudů a napětí jsou vyobrazeny na obrázku 2.3.

Parametr	Hodnota	Veličina
$U_{de}$	56	V
$I_{de}$	0,8	A

Tab. 2.1 Naměřené hodnoty pro R zátěž



Obr. 2.3 Oscilogramy pro R zátěž

Legenda:

časová základna – 2,5 ms/d

napětí – 20 V/d

proud – 0,5 A/d

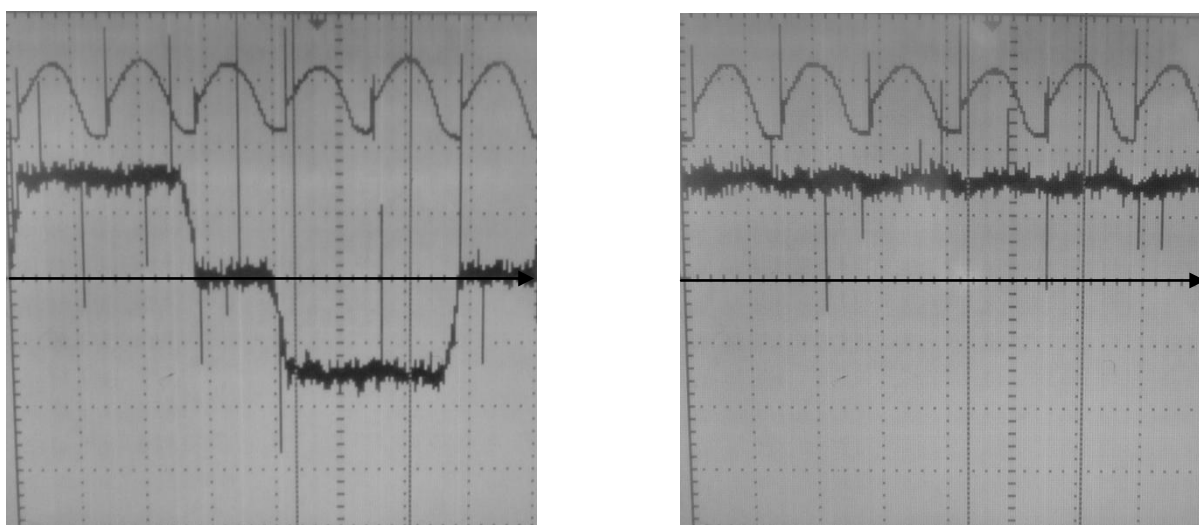
Na obou oscilogramech jsou vyobrazeny průběhy za jednu periodu vstupního napětí usměrňovače. Vrchní průběhy na obou oscilogramech představují napětí na zátěži. V levé části je dále zobrazen proud vstupní fáze přivedené na usměrňovač. V pravé se naopak nachází průběh proudu na zátěži.

## 2.1.2 Výsledky měření pro odporovou zátěž s tlumivkou

Pro druhé měření jsem k zátěži do série připojil tlumivku. V tabulce 2.2 jsou uvedeny střední hodnoty proudu a napětí změřené na zátěži. Oscilogramy s průběhy proudů a napětí jsou zachyceny na obrázku 2.4.

Parametr	Hodnota	Veličina
$U_{de}$	56	V
$I_{de}$	0,76	A

Tab. 2.2 Naměřené hodnoty pro RL zátěž



Obr. 2.4 Oscilogramy pro RL zátěž

Legenda:

časová základna – 2,5 ms/d

napětí – 20 V/d

proud – 0,5 A/d

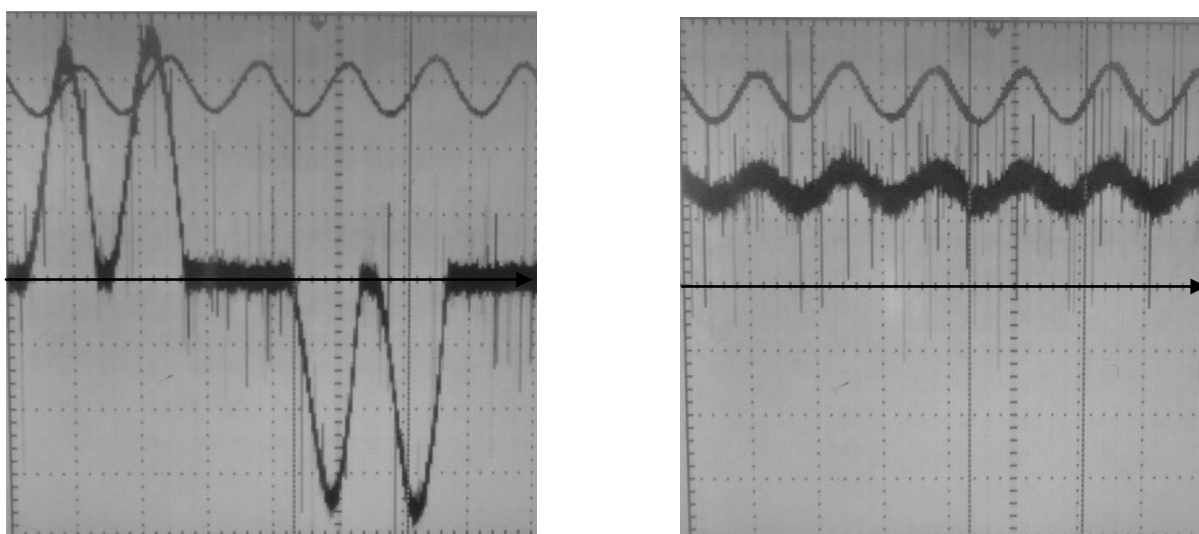
Na obou oscilogramech jsou vyobrazeny průběhy za jednu periodu vstupního napětí usměrňovače. Vrchní průběhy na obou oscilogramech představují napětí na zátěži. V levé části je dále zobrazen proud vstupní fáze přivedené na usměrňovač. V pravé se naopak nachází průběh proudu na zátěži.

### 2.1.3 Výsledky měření pro odporovou zátěž s kondenzátorem

Pro třetí měření se tlumivka odpojila a k zátěži jsem paralelně připojil kondenzátor. V tabulce 2.3 jsou uvedeny střední hodnoty proudu a napětí změřené na zátěži. Oscilogramy s průběhy proudů a napětí jsou zobrazeny na obrázku 2.5.

Parametr	Hodnota	Veličina
$U_{de}$	57	V
$I_{de}$	0,8	A

Tab. 2.3 Naměřené hodnoty pro RC zátěž



Obr. 2.5 Oscilogramy pro RC zátěž

Legenda:

časová základna – 2,5 ms/d

napětí – 20 V/d

proud – 0,5 A/d

Na obou oscilogramech jsou vyobrazeny průběhy za jednu periodu vstupního napětí usměrňovače. Vrchní průběhy na obou oscilogramech představují napětí na zátěži. V levé části je dále zobrazen proud vstupní fáze přivedené na usměrňovač. V pravé se naopak nachází průběh proudu na zátěži.

### 2.1.4 Zhodnocení naměřených výsledků

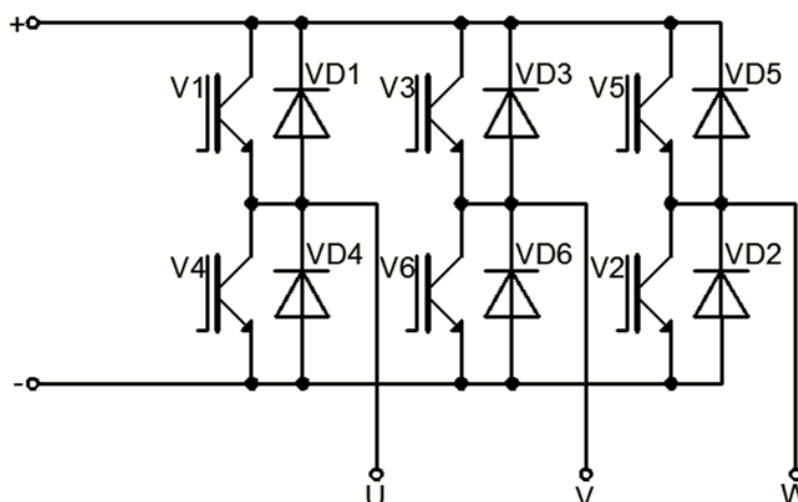
Průběhy měřených veličin zobrazených na jednotlivých oscilogramech se shodují s teoretickými průběhy, které jsou zobrazeny a popsány v kapitole věnované popisu třífázového můstkového usměrňovače.



### 3. POPIS A NÁVRH TŘÍFÁZOVÉHO STŘÍDAČE

#### 3.1 Popis funkce třífázového napěťového střídače

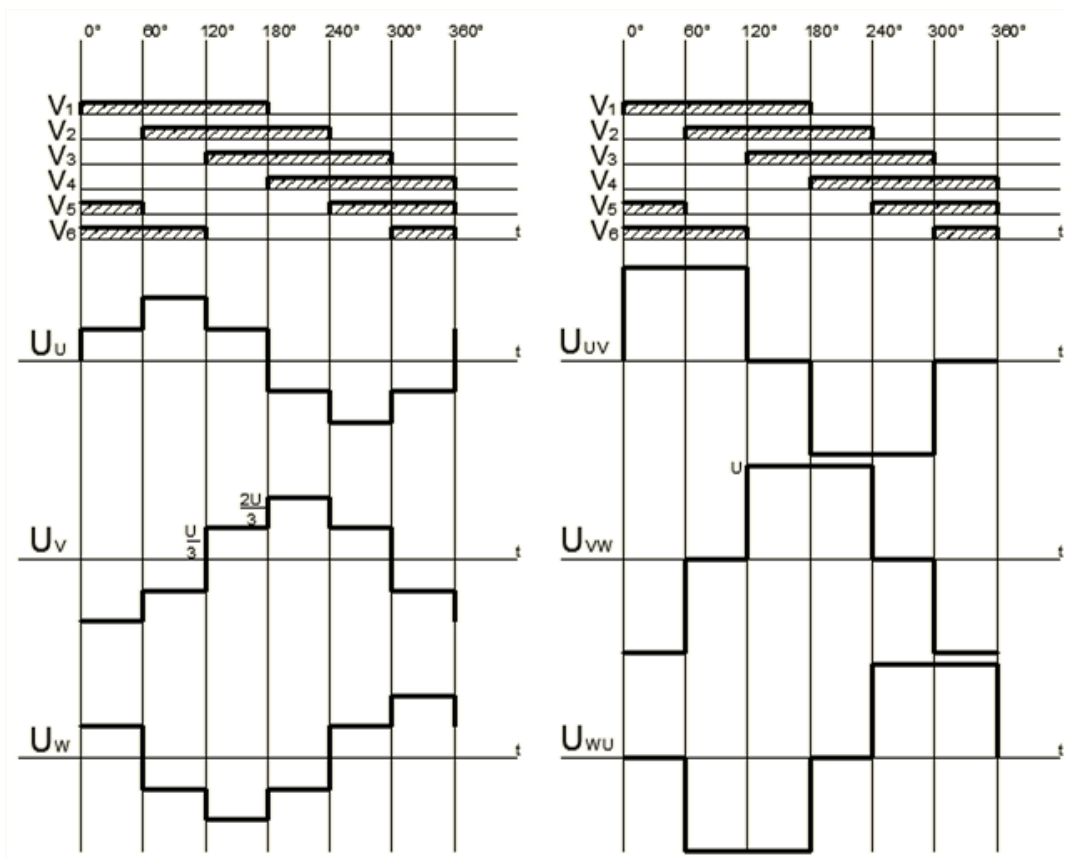
Střídač slouží k přeměně vstupního stejnosměrného napětí a proudu na výstupní střídavé napětí, proud, frekvenci a počet fází. Ke své činnosti využívají vypínatelných součástek, jako jsou GTO tyristory a výkonové tranzistory IGBT. Schéma napěťového třífázového střídače je vyobrazeno na obrázku 3.1.



Obr. 3.1 Schéma třífázového napěťového střídače s tranzistory

Obvod je složen ze třech větví, kde každá větev se skládá ze dvou vypínatelných součástek. Ke každé je zapojena antiparalelní dioda, která slouží pro vedení zpětných proudů. Vrchní trojice součástek se spíná se zpožděním  $120^\circ$ . U spodní trojice je stejné zpoždění. Nikdy nesmí dojít ke stavu, kde budou sepnuty obě součástky jedné fáze. V tomto případě dojde ke zkratu napájecího stejnosměrného obvodu. Doba vypnutí součástky je zpravidla delší než její sepnutí a proto se tyto obvody vybavují zpozdovacím časem tzv. „deadtime“, který opozdí sepnutí daného prvku.

Na obrázku 3.2 je princip vytvoření třífázové soustavy výstupních napětí. V horní části najdeme spínací program jednotlivých součástek. V levé části se nachází průběhy fázových napětí  $U_U$ ,  $U_V$  a  $U_W$ . V pravé části jsou průběhy sdružených napětí  $U_{UV}$ ,  $U_{VW}$  a  $U_{WU}$ .



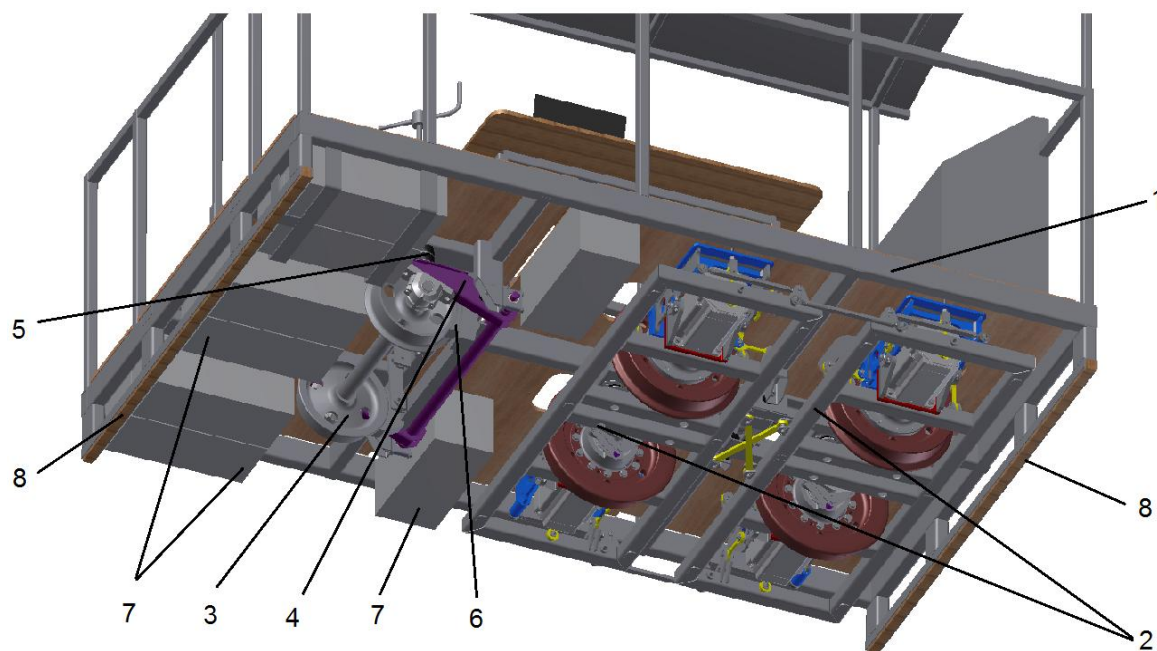
Obr. 3.2 Princip vytvoření třífázové soustavy napětí ve střídači

V intervalu od  $0^\circ$  do  $60^\circ$  je výstupní svorka U přes  $V_1$  připojena ke kladné svorce zdroje. Svorka V přes  $V_6$  na záporný pól zdroje. Mezi těmito svorkami se objeví sdružené napětí rovné napětí zdroje. Svorka W je přes  $V_5$  připojena na kladný pól zdroje, tím se mezi svorkami V a W objeví sdružené napětí rovné napětí zdroje, ale opačné polarity. Svorky U a W jsou připojeny na stejný pól zdroje a tím je mezi nimi nulové napětí. Stejným postupem lze určit velikost sdružených napětí, které mají obdélníkový tvar s velikostí napětí zdroje a šířkou obdélníku  $120^\circ$ . Jednotlivá fázová a sdružená napětí jsou vzájemně posunuta o  $120^\circ$  a tvoří třífázový systém napětí.

Řízení třífázového napěťového střídače se může provádět dvěma způsoby. První způsob je amplitudové řízení, kde změnou vstupního stejnosměrného napětí se přímo úměrně mění amplituda výstupního napětí. Jako druhý způsob se využívá šířkově pulzní řízení. To se provádí střídavým zapínáním a vypínáním napětí zdroje pomocí daného střídače na zátěž vícekrát za dobu jedné periody výstupního napětí. Pro řízení třífázového napěťového střídače se právě nejvíce využívá šířkově pulzní modulace, popsána například v literatuře [1].

## 3.2 Účel navrhovaného střídače a specifikace jím napájeného motoru

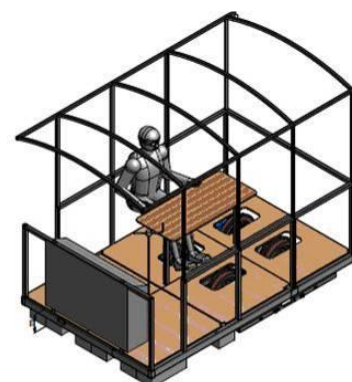
Návrh střídače je součástí projektu experimentálního kolejového vozidla, jehož stavba probíhá na KEEZ. Na následujících obrázcích 3.3 a 3.4 je vyobrazeno navrhované vozidlo s popisem částí podvozku. Nástavba vozidla je tvořena jednoduchým zábradlím a zastřešením. Ve vozidle je umístěn elektrický rozvaděč, pult pro řízení vozidla a prostory pro měřicí techniku a obsluhu.



Obr. 3.3 Podvozek vozidla

Popis podvozku:

- 1 - rám vozidla
- 2 - dvounápravový hnací otočný podvozek
- 3 - pevné dvojkolí
- 4 - kyvná ramena pro vedení dvojkolí
- 5 - vypružení pryžokovovými prvky
- 6 - špalíková ruční brzda se šroubovým převodem
- 7 - trakční baterie
- 8 - ochranné příčnický



Obr. 3.4 Nástavba vozidla

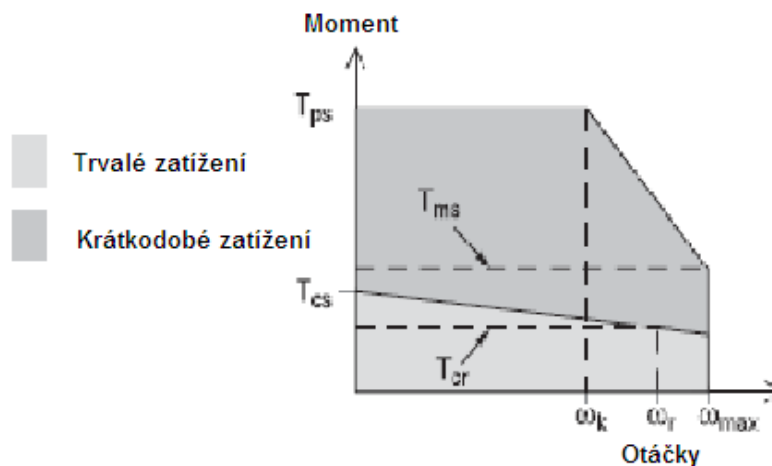
Na obrázku 3.5 je vyobrazen synchronní motor s permanentními magnety AKM 74P [9], který bude napájen z navrženého střídače. Experimentální vozidlo bude poháněno čtveřicí těchto motorů napájených individuálně ze čtyř trakčních střídačů. Daný motor je určen pro napájení ze střídače se vstupním napětím 560 V. Pro toto napětí platí i uvedené parametry motoru a jeho vymezení pracovní oblasti zobrazuje obrázek 3.6.



Obr. 3.5 Motor AKM 74P

Hlavní parametry motoru:

- typ	AKM 74P
- počet pólpárů $p_p$	5
- trvalý klidový moment $T_{CS}$	52,5 Nm
- trvalý moment při jmenovitých otáčkách $T_{cr}$	37,6 Nm
- maximální moment po dobu 5 s $T_{ps}$	106 Nm
- max. momentové přetížení do otáček $\omega_k$	1680 min <sup>-1</sup>
- jmenovité otáčky $\omega_r$	1800 min <sup>-1</sup>
- maximální otáčky $\omega_{max}$	2120 min <sup>-1</sup>
- trvalý proud $I$	18,5 A
- maximální proud po dobu 5 s $I_{max}$	40 A
- moment setrvačnosti $J$	120 kg cm <sup>2</sup>
- napěťová konstanta $k_E$	178,6 V/1000min <sup>-1</sup>
- výkon při rychlosti vozidla 20 km/h a momentu 52,5 Nm	1297 W
- stejnosměrné napětí na vstupu střídače	560 V



Obr. 3.6 Pracovní oblasti motoru – převzato z [9]

Při aplikaci na experimentálním vozidle bude napájení trakčních střídačů realizováno z akumulátorové baterie s napětím 96 V. Motory budou proto provozovány se sníženým výkonem pouze do otáček  $205 \text{ min}^{-1}$ .

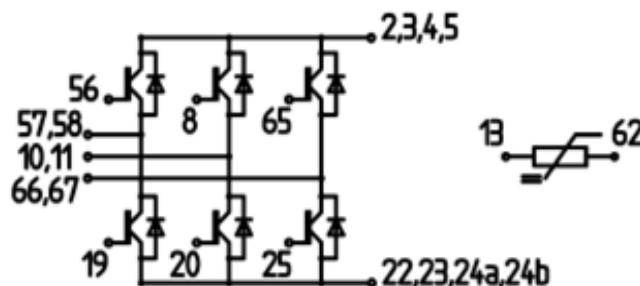
### 3.3 Specifikace komponent výkonové části napěťového střídače

#### 3.3.1 Výkonový modul IGBT

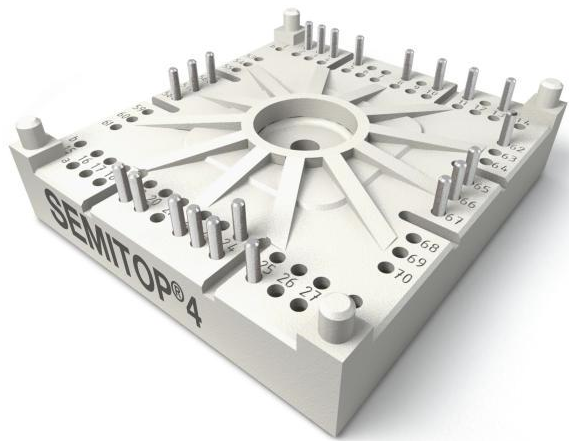
Jako výkonový modul pro trakční střídač byl vybrán IGBT modul SK75GD066T [6] od firmy Semikron. Modul v sobě integruje celý trojfázový můstek s IGBT tranzistory a zpětnými diodami.

Hlavní parametry IGBT modulu:

- typ SK75GD066T
- maximální závěrné napětí  $U_{CES}$  600 V
- jmenovitý proud  $I_C$  ( $T_S = 25/70 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 83/67 A
- maximální napětí řídicí elektrody  $U_{GES}$   $\pm 20$  V



Obr. 3.7 Schéma modulu IGBT SK75GD066T – převzato z [6]



Obr. 3.8 IGBT modul SK75GD066T – převzato z [6]

### 3.3.2 Budič pro IGBT modul

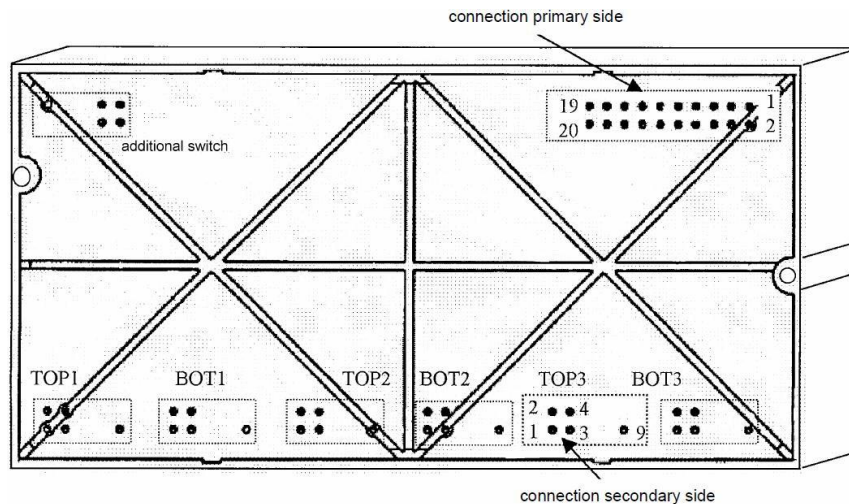
Signály z řídicí jednotky vysílané na řídicí elektrody jednotlivých tranzistorů měniče se musí tvarově a výkonově upravit. Zároveň je potřeba galvanicky oddělit řídicí a výkonovou část. Pro tyto účely se používá budící obvod. Navrhovaný modul budiče má označení SKHI 61 [7] a je od firmy Semikron.

Hlavní parametry budiče:

- typ	SKHI 61
- napájecí napětí $U_s$	15 V
- minimální úroveň zapínacího (HIGH) vstupního signálu $U_{IT+}$	4 V
- maximální úroveň vypínacího (LOW) vstupního signálu $U_{IT-}$	1,5 V
- výstupní zapínací budící signál $U_{G(on)}$	14,9 V
- výstupní vypínací budící signál $U_{G(off)}$	-6,5 V
- jmenovitý napájecí proud $I_s$	450 mA



Obr. 3.9 Budič SKHI 61 – převzato z [7]



Obr. 3.10 Spodní pohled na budič SKHI 61 – převzato z [7]

### 3.3.3 Řídicí jednotka

Jako regulátor střídače a pohonu je použit DSP řídicí systém firmy Škoda Electric. Interfejsový obvod řídicího systému pohonu A5523C1 slouží k úpravě vstupních a výstupních analogových i digitálních signálů pro výkonový modul. Budičový modul se připojuje ke konektoru X3 daného regulátoru. Vybrané údaje z technické dokumentace jsou uvedeny v příloze č. 1.



Obr. 3.11 Regulátor pohonu

### 3.3.4 Použité snímače

Pro měření proudů se použily snímače LEM [8] s označením LA 55-P, které umožňují měřit stejnosměrné a střídavé hodnoty. Dané snímače jsou průvlekové a měří galvanicky oddělené proudy. Jmenovitá okamžitá hodnota proudu je 50 A. Měřicí rozsah je  $\pm 70$  A. Tento typ snímače má proudový výstup odpovídající převodnímu poměru 1 : 1000, který je na výstupu převeden na napětí pomocí paralelně připojeného měřicího rezistoru. Snímač pracuje s napájením  $\pm 12$  V nebo  $\pm 15$  V.

Snímač napětí LV 25-P je rovněž od firmy LEM [8] a slouží ke snímání galvanicky odděleného napětí. Připojují se na straně měřeného napětí přes předřadný rezistor. Tyto snímače snímají proud úměrný měřenému napětí. Výstup je proudový a na napětí se převádí, jako v předchozím případě, pomocí paralelního měřicího odporu. Převod snímače je 2500 : 1000. Snímač pracuje s napájením  $\pm 12$  V nebo  $\pm 15$  V. Oba snímače pracují na principu Hallova jevu.

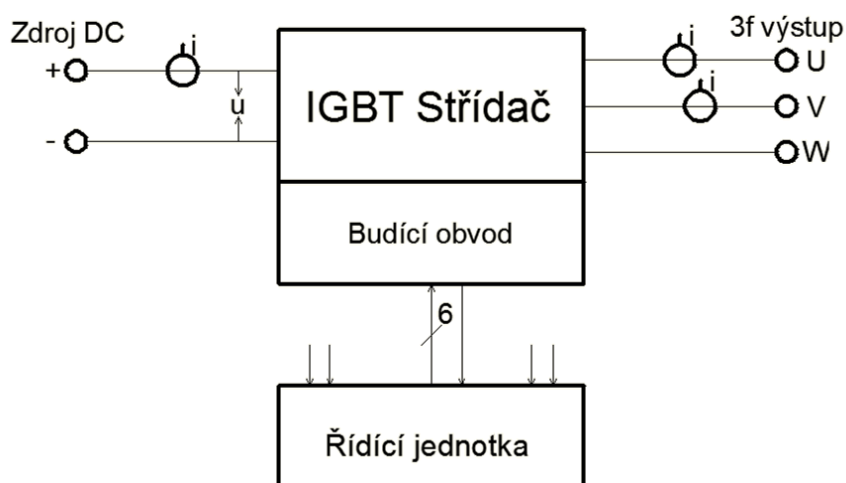


Obr. 3.12 Proudový snímač LA 55-P – převzato z [8]



### 3.4 Návrh výkonové části napěťového střídače

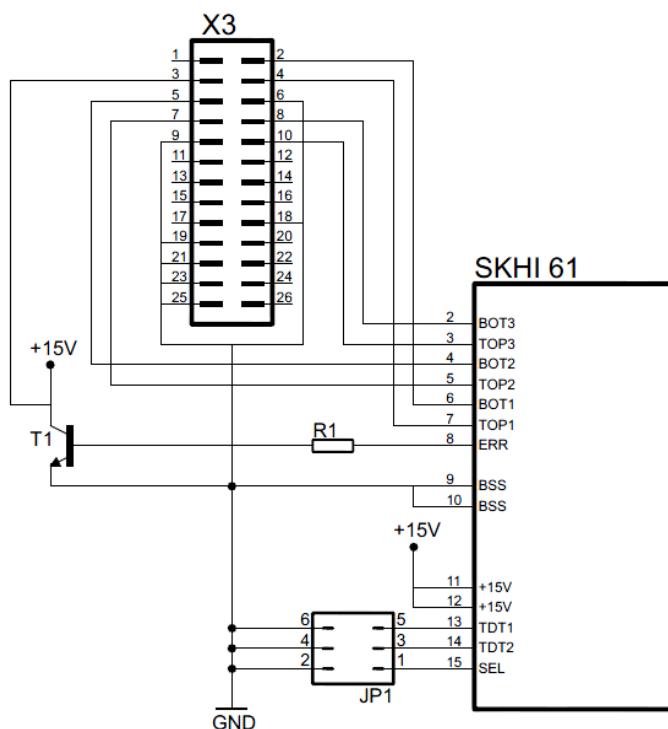
Návrh střídače vychází z blokového schématu zachyceného na obr 3.13 a vznikl v souvislosti s projektem experimentálního akumulátorového vozidla na KEEZ. Obvod se skládá z řídicí jednotky, která slouží pro řízení pohonu v reálném čase pomocí zpracovaných dat ze vstupu a ze snímačů. Budič vytváří spínací signály pro jednotlivé tranzistory IGBT modulu a zároveň galvanicky odděluje řídicí část od části výkonové. Návrh se týká propojení konektoru X3 karty regulátoru přes budičový modul střídače SKHI 61 [7] na výkonový modul SK75GD066T [6]. Pro propojení jednotlivých komponent jsem vycházel z doporučených zapojení uvedených v technické dokumentaci daných zařízení. Návrh celého zapojení s hodnotami součástek se nachází v příloze č. 2.



Obr. 3.13 Blokové schéma návrhu střídače

Řídicí signály z vývodů 2, 4, 5, 7, 8 a 10 konektoru X3 jsem zapojil přímo na příslušné vstupy 2 – 7 budiče, protože pracují se stejnou logickou úrovní napětí 15 V. Na konektoru X3 jsou tři digitální vstupy 3, 6 a 9 pro vyhodnocení chyb. Budič má ale pouze jeden výstup chybového hlášení, který náleží pin 8. Navíc oba pracují s rozdílnými úrovněmi napětí pro detekci chyby. Budič na chybovém výstupu vykazuje 5 V v rámci provozních podmínek a 0 V při detekci chyby. Do řídicí jednotky v rámci chyby musí přijít signál úrovně 15 V a v provozním stavu je nutné, aby na vstupech bylo 0 V. Vyřešil jsem to způsobem, kdy chybový výstup 8 se zapojil přes tranzistor  $T_1$ . V bezchybném stavu je tranzistor otevřen a na vstupu 3 bude 0 V.

Při detekci chyby dojde k uzavření tranzistoru a na chybový vstup 3 konektoru X3 se dostane napětí 15 V. Zbylé dva chybové vstupy 6 a 9 jsem spojil se zemí a na vyhodnocení chyby se nepodílejí. Napájecí napětí 15 V se zapojilo na vstupy 11 a 12 budiče. Podrobný popis pinů konektoru X3 je uveden v příloze č. 1 a u budiče v literatuře [7].



Obr. 3.14 Propojení konektoru X3 s budičem

Je-li jeden z tranzistorů IGBT sepnutý, tak nesmí dojít k sepnutí druhého z téže větve. K tomu slouží nastavení ochranné doby, která musí být delší než vypínací doba tranzistoru. Tím se vyhneme stavu, kdy dojde k sepnutí druhého tranzistoru dříve, než se uzavře první. Dané nastavení se provádí na vstupní straně budiče a slouží k tomu piny uvedené v tabulce 3.1. Jejich spojením se zemí nebo naopak ponecháním pinu nezapojeného, lze nastavit vhodný blokovací čas. K tomuto propojení slouží JP1 v obvodu. Vypínací doba tranzistorů je 541 ns a proto je vhodné nastavit ochranou dobu minimálně na 2  $\mu$ s.

PIN	4 $\mu$ s	3 $\mu$ s	2 $\mu$ s	1 $\mu$ s	no inter-lock
TDT1	open	open	GND	GND	X
TDT2	open	GND	open	GND	X
SEL	open	open	open	open	GND

Tab. 3.1 Konfigurace pinů pro nastavení blokovacího času – převzato z [7]

Na výstupní straně budiče se nachází pět vývodů pro každý tranzistor. Pin 1 slouží pro vysílání řídicích signálů na řídicí elektrodu tranzistoru. Je-li tranzistor zapnut, na výstupu budiče je 15 V. Ve vypnutém stavu je na výstupu -6,5 V. Signál se přivádí přes rezistor  $R_G$ , který má za úkol omezit amplitudu pulzních proudů během zapínání a vypínání. Pro dané zapojení jsem vybral rezistor  $R_G$  s hodnotou  $33 \Omega$ . Pin 3 se připojil přímo k emitoru příslušného tranzistoru. Piny 2 a 4 slouží k nastavení prahu napětí pro zkratovou ochranu na principu sledování úbytku napětí mezi kolektorem a emitorem na sepnutém tranzistoru. Nastavení se provádí zapojením rezistoru mezi dané piny. Pro navrhované zapojení jsem zvolil prahové napětí  $U_{CE}$  hodnoty 5 V. Podle vztahu 3.1 z literatury [7] se vypočítala hodnota daného odporu  $R_{UCE}$ .

(3.1)

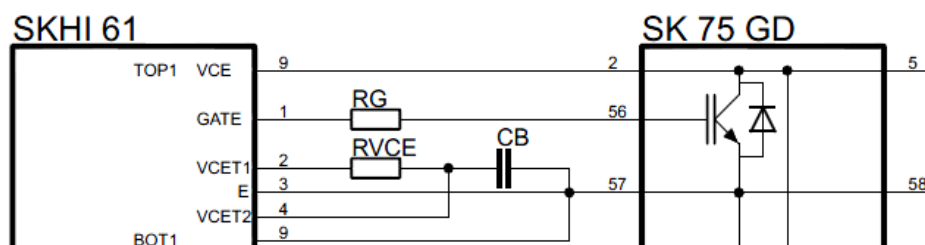
$$R_{UCE} [k\Omega] = \frac{11,86}{5,4 - 0,93 \cdot U_{CE}} - 4,75 = 11,06 k\Omega$$

Zvolil jsem odpor  $R_{UCE}$  hodnoty  $10 k\Omega$  z normalizované řady E6, která se nejvíce blížila vypočítané hodnotě. Zpětně vypočítaná hodnota  $U_{CE}$  je  $4,94 V$ . Následně musí dojít k přizpůsobení mazací doby  $t_B$  na hodnotu  $3,5 \mu s$ . To se provede připojením kondenzátoru  $C_B$  mezi piny 2 a 3. Výpočet kapacity daného kondenzátoru je podle vztahu 3.2 z literatury [7].

(3.2)

$$C_B [nF] = \frac{t_B [\mu s] \cdot (72,75 + R_{UCE} [k\Omega])}{(R_{UCE} [k\Omega] + 4,75) \cdot 36,08} - 0,1 = 444 pF$$

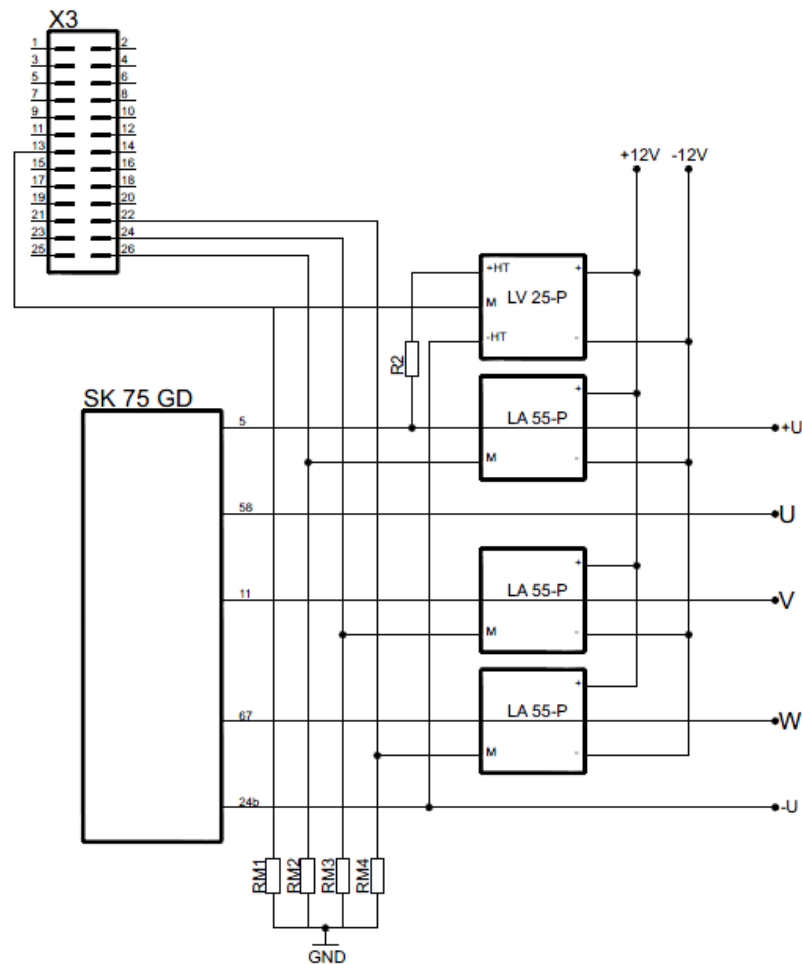
Zde jsem zvolil kondenzátor hodnoty  $470 \mu F$  z normalizované řady E6.



Obr. 3.15 Ukázka propojení budiče s IGBT střídačem pro jeden tranzistor

Zkratová ochrana budičem je monitorována pomocí pinu 9, který se připojuje ke kolektoru tranzistoru. Budič kontroluje úbytek napětí na spínacím prvku. V případě překročení mezní hodnoty, kterou jsem nastavil pomocí předešlých vztahů přibližně na 5 V, dojde k zablokování střídače a vyslání chybového hlášení od budiče k řídicí jednotce.

K snímání proudů a napětí na stejnosměrné straně měniče a k snímání dvou proudů ve fázích z výstupu střídače se použily snímače firmy LEM [8]. K snímání proudu se použil snímač typu LA 55-P a k snímání napětí snímač s označením LV 25-P.



Obr. 3.16 Připojení snímačů na výkonovou část

Napětový snímač LV 25-P se pomocí dvou kontaktů připojí k stejnosměrnému napětí, kde ke kladnému pólu se připojí přes předřadný rezistor  $R_2$ . Rozsah vstupního napětí je ve sledované aplikaci uvažován 0 – 150 V a rozsah výstupního

napětí jsem zvolil 0 – 9 V. Pomocí Ohmova zákona jsem vypočítal odpor předřadného rezistoru  $R_2$  na hodnotu 15 k $\Omega$  a měřicího rezistoru  $R_{M1}$ , jehož hodnota činí 330  $\Omega$ . Proudové snímače LA 55-P jsou průvlekové. Vstupní rozsah proudu je  $\pm 70$  A. Výstupní rozsah jsem zvolil  $\pm 4,5$  V. Jako v předchozím případě se pomocí Ohmova zákona vypočítal odpor měřících rezistorů  $R_{M2}$ ,  $R_{M3}$  a  $R_{M4}$ , jejichž hodnota je 56  $\Omega$ .

Na regulátoru pohonu se musí nakonfigurovat zvolené rozsahy analogových vstupů. Rozsah výstupních signálů čidel měřených proudů je  $\pm 4,5$  V a měřeného napětí 0 – 9 V. K nastavení složí konfigurační konektory s označením  $JP_1$  až  $JP_4$ . Umístění konektorů na regulátoru a způsob nastavení zvolených rozsahů je uveden v příloze č. 1.

### **3.5 Reverzační pulzní měnič**

Vzhledem k tomu, že zpracování práce se o rok posunulo, byla tematika reverzačního pulzního měniče na KEEZ v potřebném rozsahu již zpracována. V návaznosti na aktuální aktivity KEEZ v oblasti výzkumu byly v této práci provedeny návrh a realizace zdrojové jednotky pro modulární třífázové střídače.

## 4. ZDROJOVÁ JEDNOTKA VÝKONOVÝCH MĚNIČŮ

Zdrojovou desku jsem navrhl a zhotovil v souvislosti s projektem experimentálního kolejového vozidla na KEEZ. Deska slouží k napájení regulačních a měřících komponent třífázových střídačových modulů a osvětlení vozidla. Hlavní částí jsou DC/DC měniče, které přeměňují vstupní napětí z baterie o velikosti 96 V na potřebná výstupní napětí velikosti 24 V, 15 V, 12 V a - 12 V.

### 4.1 Specifikace použitých DC/DC měničů

K přeměně napětí se použily DC/DC měniče od firmy TDK-Lambda série CN-A100 [10]. Pro potřebná napájecí napětí se zakoupilo pět měničů dané série.

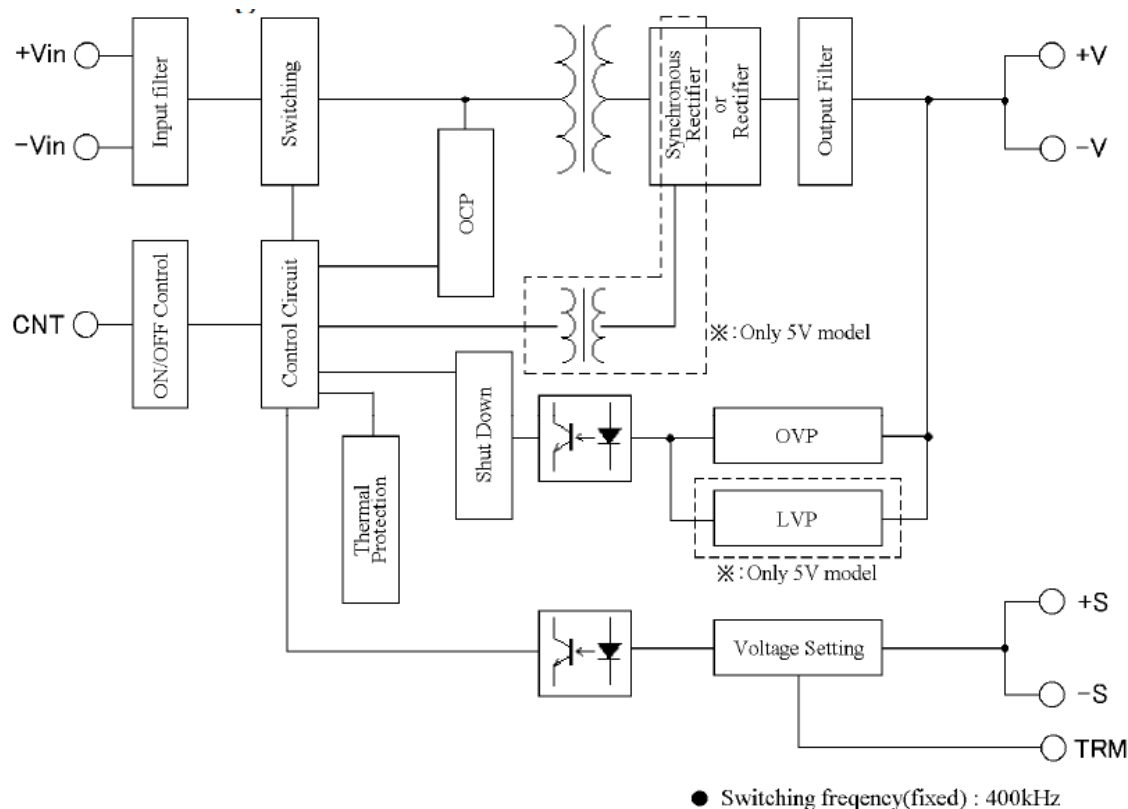
Označení DC/DC modulů a jejich základní parametry:

	max. výstupní napětí [V]	max. výstupní proud [A]	max. výkon [W]	max. vstupní proud [A]	účinnost [%]
- CN50A110-12 (2x)	12	4,2	50,4	0,55	86
- CN100A110-15	15	6,7	100,5	1,05	88
- CN100A110-24	24	4,2	100,8	1,05	88
- CN200A110-24	24	8,4	201,6	2,11	88

Účinnost měničů je vztažena k vstupnímu napětí 110 V a plnému zatížení.



Obr. 4.1 DC/DC měnič CN100A110

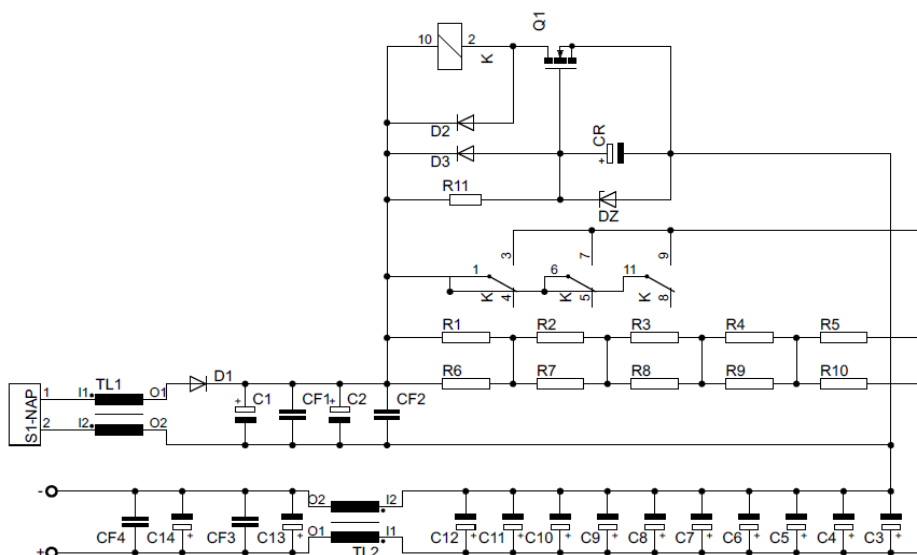


Obr. 4.2 Blokový diagram DC/DC měniče – převzato z [10]

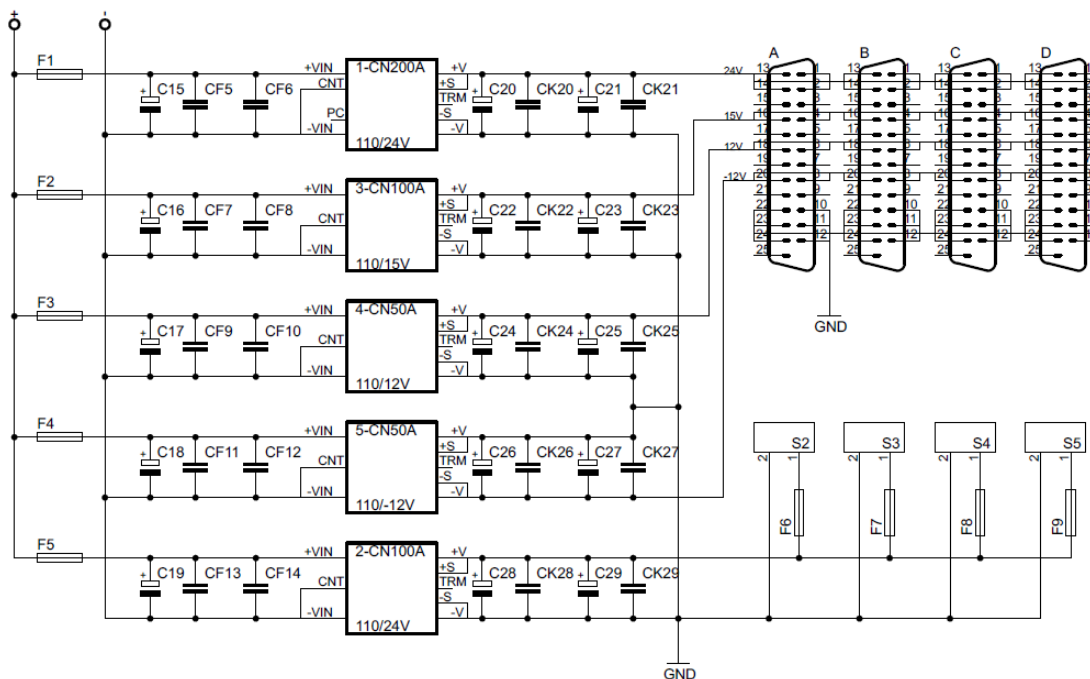
Vstupní stejnosměrné napětí měniče má rozsah 60 – 160 V. Přípustné zvlnění daného napětí je 10 V<sub>pp</sub>. Pokud zvlnění napětí překročí stanovenou mez, mohlo by docházet k přechodným změnám výstupního napětí. Modul je vybaven vestavěnou funkcí nadproudové ochrany OCP, která při přetížení snižuje výstupní napětí. Dále je vybaven přepětovou ochranou OVP a tepelnou ochranou OTP, kdy při překročení stanovených hodnot se modul vypne. Dané ochrany mají pevně nastavenou vyhodnocovací hodnotu a nelze ji měnit. Modul také galvanicky odděluje napájecí část od výstupního obvodu.

## 4.2 Návrh a realizace zdrojové jednotky

Pro návrh jsem vycházel z doporučeného zapojení měničů, které je uvedeno v technické dokumentaci. Dalším důležitým faktorem bylo zajištění stabilního provozu daného obvodu. Návrh schématu a desky plošného spoje byl proveden pomocí návrhového softwaru Eagle od firmy CadSoft Computer.



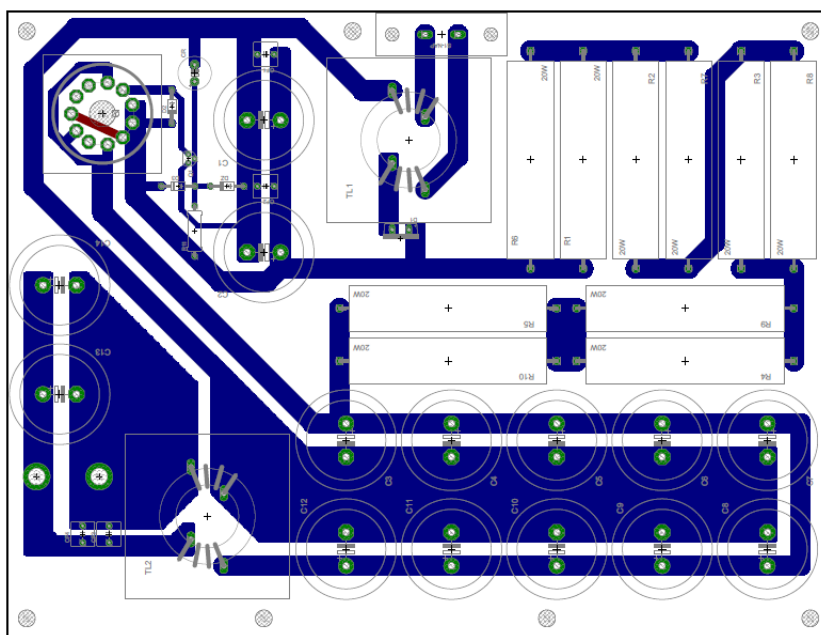
Obr. 4.3 Schéma napájecí části měničů - spodní deska



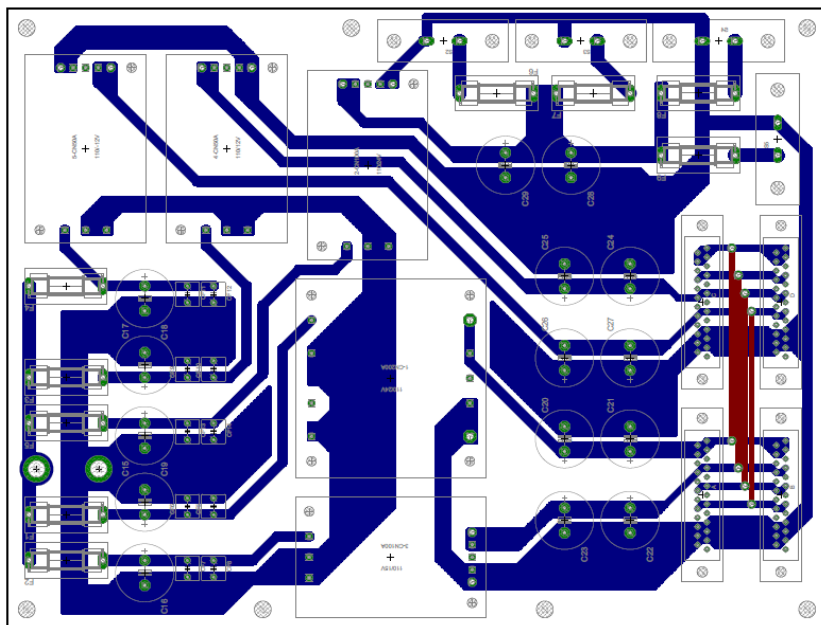
Obr. 4.4 Schéma výstupní části měničů - vrchní deska



Celé zapojení jsem koncipoval na dvě desky o rozměrech 200 x 250 mm. Všechny spoje se nacházejí na jedné straně desky. V případě, kde nebylo možné spoj realizovat, bylo využito drátové propojky. Kromě keramických kondenzátorů na výstupu měničových modulů, které jsou typu SMD, jsem použil součástky s drátovými vývody. U rozmístění měničových modulů se muselo počítat s umístěním chladičů, které se připevňují na jejich vrchní část. Seznam použitých součástek je uveden v příloze č. 1.



Obr. 4.5 Osazovací plán napájecí části měničů - spodní deska

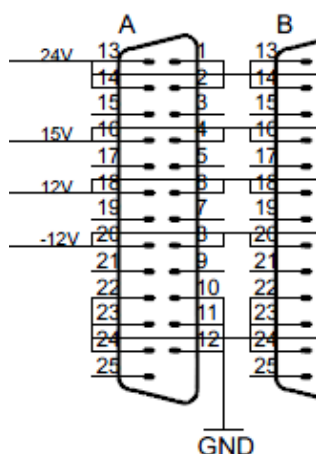


Obr. 4.6 Osazovací plán výstupní části měničů - vrchní deska

#### 4.2.1 Popis obvodu

Vstupní napětí měničů obstarává akumulátorová baterie s napětím 96 V, které se přivádí na svorkovnici  $S_1$ . Dioda  $D_1$  na vstupu slouží jako ochrana proti přepólování. Po připojení k napájecí baterii se obvod nejdříve uzavírá přes rezistory  $R_1 - R_5$ , které omezují nabíjecí proud kondenzátorů na 4 A. Rezistory  $R_6 - R_{10}$  jsem nezapojil, ale v případě potřeby se do obvodu mohou přidat. Po uplynutí určité doby dojde k sepnutí relé pomocí tranzistoru  $Q_1$  a tím přemostění větve s odpory. Paralelně k relé je připojena dioda  $D_2$ . Ta slouží k ochraně tranzistoru, který by mohl být zničen napěťovou špičkou vygenerovanou cívkou relé při rozepnutí kontaktů. Baterie kapacit tvořená kondenzátory  $C_1 - C_{14}$  o celkové kapacitě 14 mF má zajistit konstantní napětí na vstupech měničů. V napájecí části jsou umístěny dvě toroidní cívky, které společně s kondenzátory tvoří LC filtr pro potlačení rušení.

Měničové moduly nemají vestavěné pojistky, proto jsem do obvodu přidal externí pojistky zapojené na každý vstup  $+V_{in}$  měničů. Do napájecích vstupů měničů jsem také zapojil elektrolytické kondenzátory  $C_{15} - C_{19}$ , které mají zabránit vlivu indukčnosti na vstup měniče. Elektrolytické kondenzátory  $C_{20} - C_{29}$  na výstupech z modulů slouží pro stabilní provoz při změnách zatížení nebo změn vstupního napětí. Keramické kondenzátory za modulem snižují šum výstupního napětí. Napětí z měničového modulu CN100A110-24 s 24 V výstupem se přivádí na čtyři šroubovací svorkovnice. Výstupy ostatních modulů jsou spojeny se čtyřmi 25 pinovými konektory CANON.



Obr. 4.7 Napětí na konektorech CANON

#### 4.2.2 Osazení a sestavení zdrojové jednotky

Desky byly vyrobeny v laboratoři DFJP, kde jsem provedl i jejich osazení součástkami. Keramické kondenzátory SMD na výstupu z měničových modulů jsou umístěny na straně spojů desky. Ostatní součástky jsem umístil z vrchní strany. Po osazení součástkami a ověření funkčnosti se pomocí šroubů se závitem M5 upevnily desky nad sebe. Vzájemné elektrické spojení desek zajišťují dva mosazné šrouby rovněž se závitem M5.



Obr. 4.8 Zdrojová jednotka po zkompletování

### 4.3 Ověření funkčnosti

Před konečným smontováním desek k sobě se ještě provedlo ověření jejich funkčnosti. Napájení obstarala čtveřice stejnosměrných zdrojů o rozsahu napětí 0 – 30 V. Zdroje se spojily do série tak, aby se z nich získalo potřebné napětí 100 V. K snímání průběhů napětí jsem použil napěťové sondy s převodem 1 : 20 a 1 : 100. Na snímání proudů byly použity proudové kleště s citlivostí 100 mV/A. Pro zaznamenání průběhů sledovaných veličin jsem užil digitálního osciloskopu, jehož naměřená data se ukládala do počítače. Pomocí digitálních voltmetrů se měřila velikost napětí na vstupu a výstupu dané desky. Digitální ampérmetr zapojený mezi zdrojem a vstupem desky měří odebíraný proud.



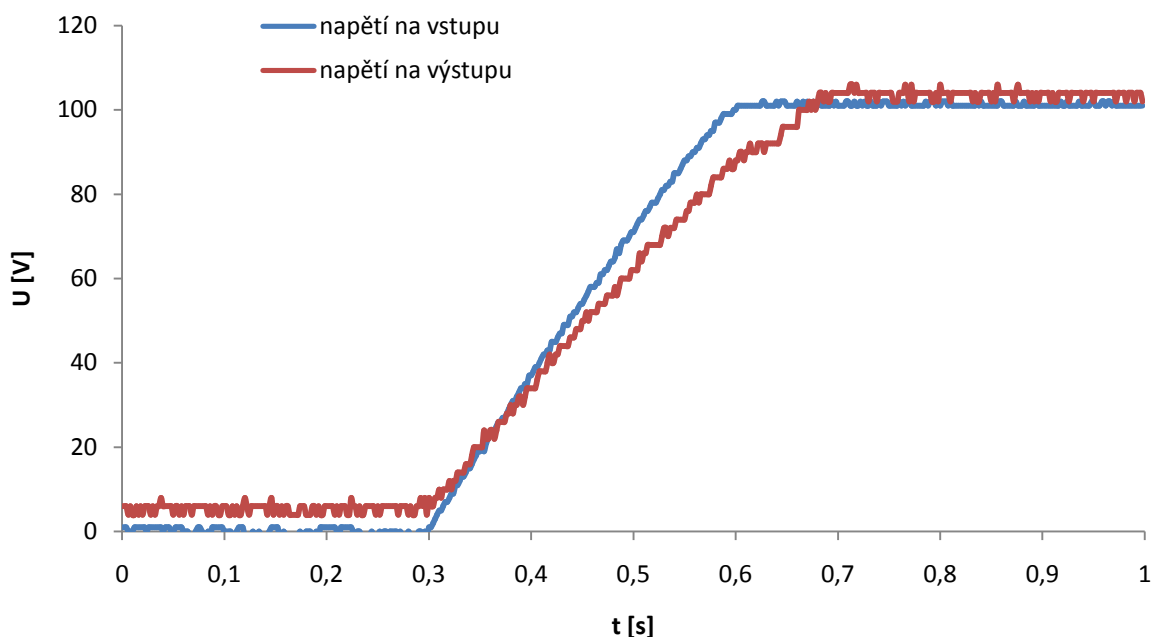
Obr. 4.9 Měřené pracoviště

Specifikace měřicích přístrojů:

- |                          |                         |
|--------------------------|-------------------------|
| - zdroj 2x               | DIAMETRAL GDS-806C      |
| - digitální multimetr 4x | MASTECH MY68            |
| - proudové kleště        | FLUKE i30s max. 20A RMS |
| - napěťová sonda         | HAMEG max. 600V         |
| - digitální osciloskop   | GWINSTEK GDS-806C       |

### 4.3.1 Měření na spodní desce zdrojové jednotky

Měřené pracoviště bylo zapojeno podle předešlého popisu. Jedna napěťová sonda se připojila na vstupní svorkovnici a druhá na výstup z desky. Na obrázku 4.10 je ukázán výsledek měření přechodného děje bez zátěže při zapnutí zdroje.

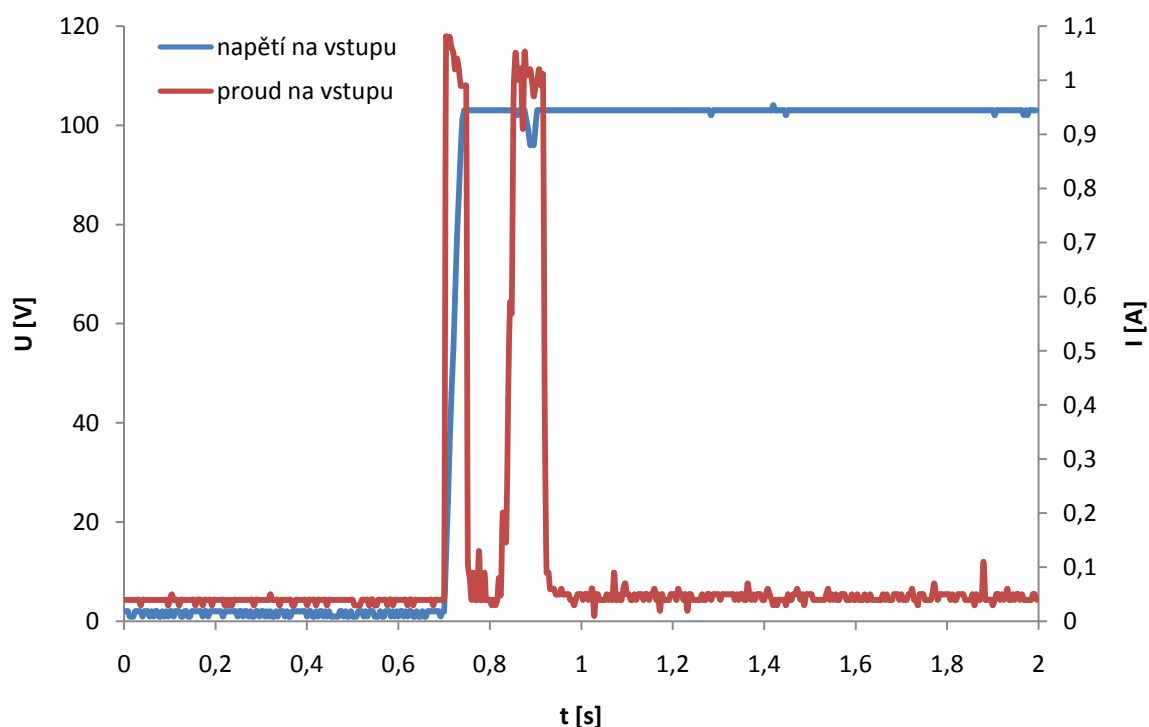


Obr. 4.10 Přechodný děj při zapnutí zdroje na spodní desce

Z průběhu lze odečíst dobu trvání přechodného děje, která činí 0,38 s. Za danou dobu dojde k nabití kondenzátorů. Skok vstupního napětí není okamžitý, protože je omezený napájecím zdrojem. Dalším měřením bylo zpoždění sepnutí relé po připojení na zdroj. Dané zpoždění trvalo 2,35 s. Minimální napětí zdroje pro překlopení relé je 43 V a maximální napětí zdroje pro odpadnutí činí 35 V.

### 4.3.2 Měření na vrchní desce zdrojové jednotky

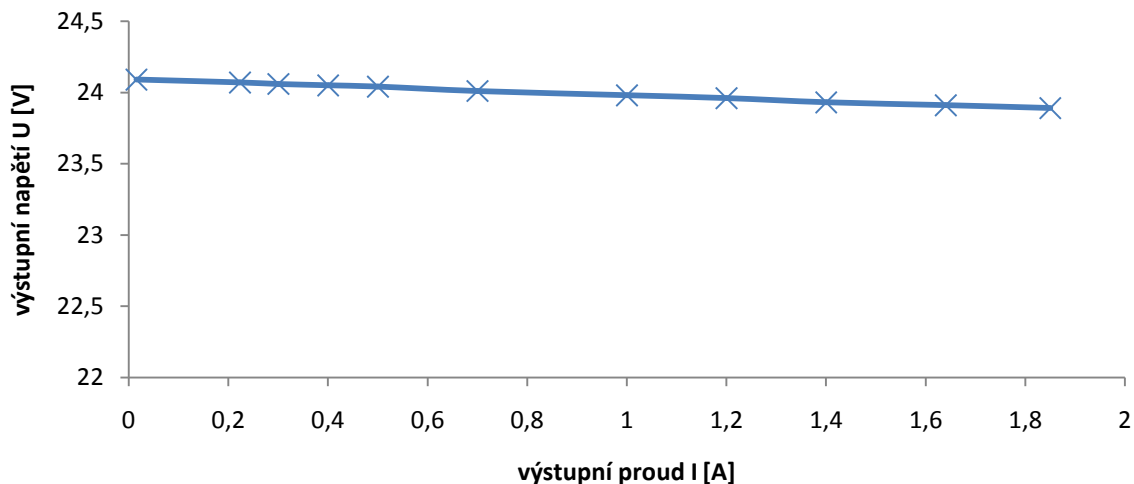
Prvním krokem bylo ověření velikosti výstupního napětí z měničů. Na vstup desky jsem připojil napětí velikosti 100 V a pomocí digitálního voltmetru jsem zkontroloval daná napětí. Výsledek měření byl v pořádku. Poté jsem zapojil napěťovou sondu a proudové kleště na vstup desky. Jako v předchozím případě jsem změřil průběh přechodného děje na vstupu měničů bez zátěže. Výsledek měření je vyobrazen na obrázku 4.11.



Obr. 4.11 Přechodný děj při zapnutí zdroje na vrchní desce

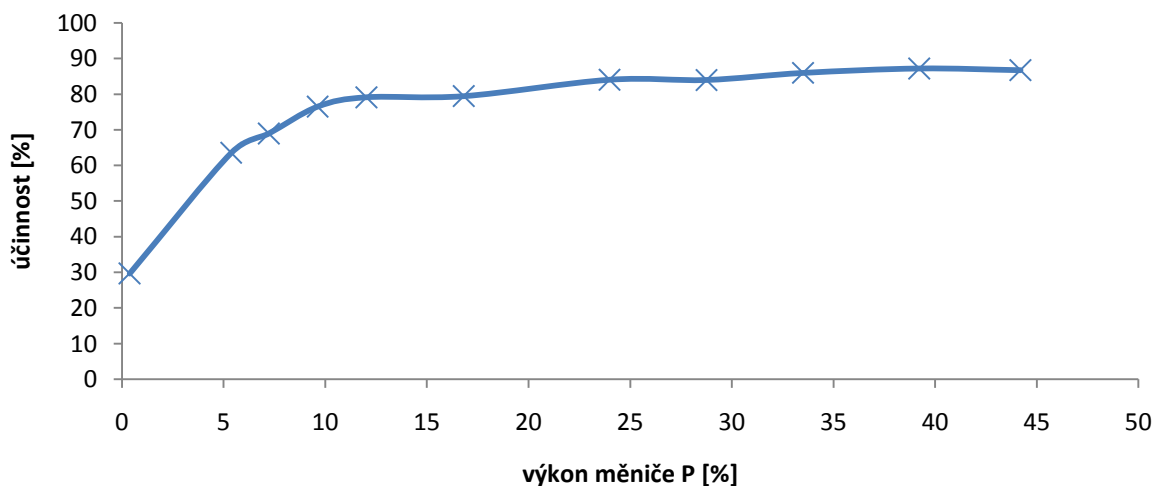
Z průběhu vidíme dva proudové rázy přibližně o velikosti 1 A. U druhé proudové špičky je vidět patrný pokles napětí, což je zapříčiněno reakcí zdroje na daný proudový ráz. Posledním měřením byla zatěžovací charakteristika jednoho z měničových modulů. Označení daného modelu je CN100A110-24 s 24 V výstupem. V době měření nebyl na modulu ještě upevněn chladič, a proto jsem měření prováděl přibližně do poloviny maximálního výkonu.

Na výstup měniče se připojila zátěž tvořená reostatem o maximálním odporu 250  $\Omega$  a ampérmetr, kterým se měřil proud zátěží. Na následujících obrázcích 4.12 a 4.13 jsou výsledky měření zatíženého modulu.



Obr. 4.12 Zatěžovací charakteristika modulu CN100A110-24

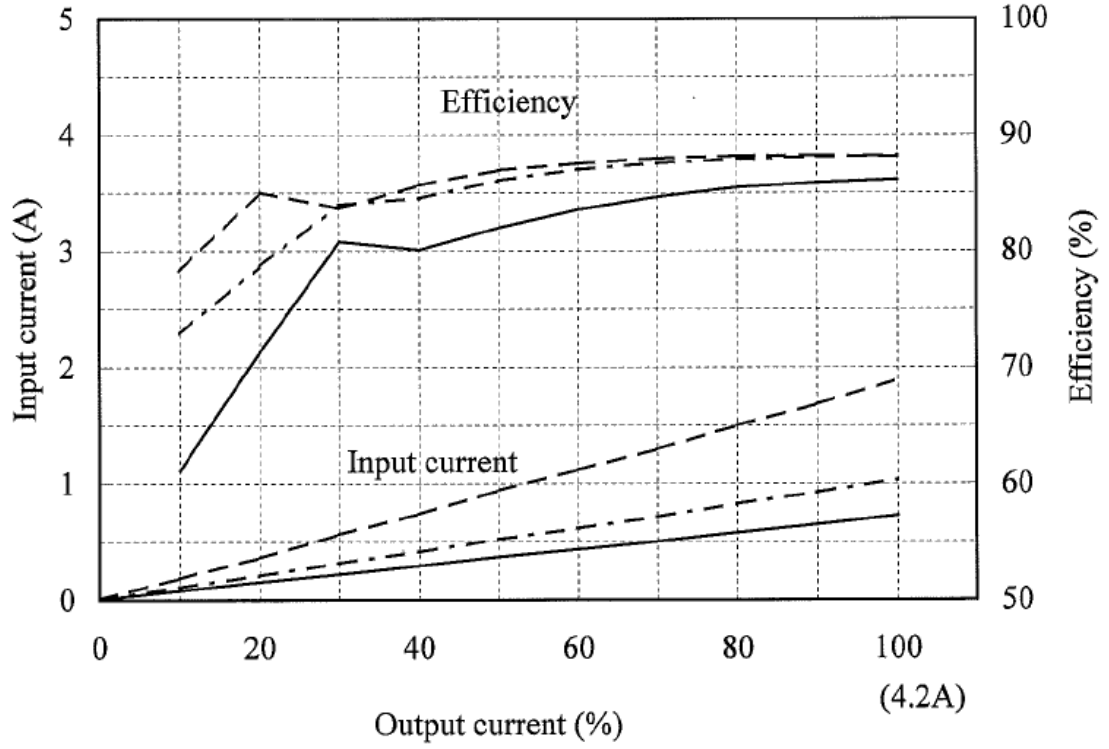
Maximální výstupní proud z měniče je 4,2 A, ale z důvodu nepřidělaného chladiče jsem měření prováděl do proudu 1,85 A. Pokles výstupního napětí modulu při 40 % zatížení oproti nezatíženému činil 0,18 V.



Obr. 4.13 Účinnost modulu CN100A110-24

Výrobce uvádí účinnost 88 % pro vstupní napětí měniče 110 V a maximálním výkonu. Moje měření probíhalo přibližně do 45 % maximálního výkonu a účinnost se pohybovala kolem 87 %. Na následujícím obrázku 4.14 je vyobrazena účinnost měničového modulu uváděna výrobcem.

Conditions Vin : 60 VDC -----  
 : 110 VDC -.-.-.-  
 : 160 VDC ————  
 Tbp : 25 °C



Obr. 4.14 Účinnost uváděná výrobcem pro CN100A110-24 – převzato z [10]



## ZÁVĚR

Prvotním cílem bakalářské práce byla realizace uceleného modulárního systému, který by obsahoval jednotlivé moduly měničů a měl sloužit jako výuková pomůcka na KEEZ. S ohledem na to, že zpracování mé práce se o rok posunulo, byly části tyristorového usměrňovače a reverzačního pulzního měniče na KEEZ v potřebném rozsahu již zpracovány. Z tohoto důvodu došlo k upravení cíle. V návaznosti na aktuální aktivity KEEZ v oblasti výzkumu byly v této práci na místo předešlých částí provedeny návrh a realizace zdrojové jednotky pro modulární třífázové střídače.

Celou práci lze rozdělit do tří částí. V první se zabývám třífázovým můstkovým usměrňovačem, kde hlavním úkolem byla konstrukce dvou takových to usměrňovačů. V popisu se věnuji hlavně chování usměrňovače vzhledem k charakteru zátěže. Na zkonstruovaných výrobcích byl daný popis ověřen pomocí měření. V druhé části je návrh zapojení jednotlivých modulů výkonové části napěťového střídače. Zde se jednalo zejména o prostudování technických dokumentací jednotlivých modulů, na jejichž základě jsem provedl daný návrh a vybral vhodné součástky. Výkonová část je tvořena IGBT tranzistory a budičovým stupněm od firmy Semikron řízeným regulátorem, na kterém je umístěn řídicí procesor. Třetí částí práce je návrh a konstrukce zdrojové jednotky. Nejdůležitějším prvkem jednotky jsou snižující DC/DC měniče od firmy TDK-Lambda. Zdrojová jednotka zajišťuje stálá výstupní napětí potřebných velikostí zejména pro napájení třífázových střídačových modulů a snímačů LEM.

Výsledkem mé práce jsou dva třífázové diodové usměrňovače, návrh zapojení třífázového trakčního střídače a zdrojová jednotka. Usměrňovače slouží jako výuková pomůcka na KEEZ, kde jejich konstrukce zajišťuje jednoduchou manipulaci a připojení měřicí techniky. Zdrojová jednotka je určena pro experimentální kolejové vozidlo, jehož stavba probíhá na KEEZ.

Na závěr bych rád ještě jednou poděkoval vedoucímu mé práce Doc. Ing. Jaroslavu Novákovi, CSc. za čas, který mi věnoval.

## Seznam použité literatury

- [1] PAVELKA, Jiří; ČEŘOVSKÝ, Zdeněk; LETTL, Jiří. *Výkonová elektronika*. Praha : Nakladatelství ČVUT, 2007. 227 s. ISBN 978-80-01-03626-6.
- [2] ČEŘOVSKÝ, Zdeněk; GRIC, Rudolf; PAVELKA, Jiří. *Výkonová elektronika I*. Praha : Nakladatelství ČVUT, 1996. 196 s. ISBN 80-01-00723-5.
- [3] NOVÁK, Jaroslav. *Elektromechanické systémy v dopravě a ve strojírenství*. Praha : Nakladatelství ČVUT, 2002. 86 s. ISBN 80-01-02457-1.
- [4] NOVOTNÝ, J. *Vliv nesinusového primárního napětí na trojfázový můstkový usměrňovač*. Diplomová práce. Univerzita Pardubice, DFJP, 2010.
- [5] *Diody P1000K*, [online]. [cit. 2012-05-20]. Dostupné z WWW:  
< <http://www.gme.cz/dokumentace/221/221-047/dsh.221-047.1.pdf> >.
- [6] *IGBT modul SK75GD066T*, [online]. [cit. 2012-05-20]. Dostupné z WWW:  
< <http://www.semikron.com/> >
- [7] *Budič SEMIDRIVER SKHI 61 (R)*, [online]. [cit. 2012-05-20]. Dostupné z WWW:  
< <http://www.semikron.com/> >
- [8] *Snímače LEM*, [online]. [cit. 2012-05-20]. Dostupný z WWW:  
< <http://www.lem.com/> >
- [9] *Motor AKM 74P*, [online]. [cit. 2012-05-24]. Dostupný z WWW:  
< <http://www.kollmorgen.com/> >
- [10] *DC/DC měniče CN-A110 Series*, [online]. [cit. 2012-05-24]. Dostupný z WWW:  
< <http://www.tdk-lambda.com/> >

## Seznam obrázků

Obr. 1.1 Schéma třífázového můstkového usměrňovače .....	- 12 -
Obr. 1.2 Průběhy napětí a proudů na 3f můstkovém usměrňovači s R zátěží.....	- 14 -
Obr. 1.3 Komutace diod .....	- 15 -
Obr. 1.4 Průběhy proudů na 3f můstkovém usměrňovači s RL zátěží.....	- 16 -
Obr. 1.5 Průběh napětí a proudu na 3f můstkovém usměrňovači s RC zátěží .....	- 17 -
Obr. 1.6 Průběh napětí a proudu v síti .....	- 18 -
Obr. 2.1 Zkonstruované usměrňovače .....	- 20 -
Obr. 2.2 Zapojení měřeného pracoviště .....	- 21 -
Obr. 2.3 Oscilogramy pro R zátěž .....	- 22 -
Obr. 2.4 Oscilogramy pro RL zátěž .....	- 23 -
Obr. 2.5 Oscilogramy pro RC zátěž.....	- 24 -
Obr. 3.1 Schéma třífázového napěťového střídače s tranzistorem.....	- 25 -
Obr. 3.2 Princip vytvoření třífázové soustavy napětí ve střídači .....	- 26 -
Obr. 3.3 Podvozek vozidla .....	- 27 -
Obr. 3.4 Nástavba vozidla .....	- 27 -
Obr. 3.5 Motor AKM 74P .....	- 28 -
Obr. 3.6 Pracovní oblasti motoru – převzato z [9] .....	- 29 -
Obr. 3.7 Schéma modulu IGBT SK75GD066T – převzato z [6].....	- 29 -
Obr. 3.8 IGBT modul SK75GD066T – převzato z [6].....	- 30 -
Obr. 3.9 Budič SKHI 61 – převzato z [7].....	- 30 -
Obr. 3.10 Spodní pohled na budič SKHI 61 – převzato z [7] .....	- 31 -
Obr. 3.11 Regulátor pohonu .....	- 31 -
Obr. 3.12 Proudový snímač LA 55-P – převzato z [8] .....	- 32 -
Obr. 3.13 Blokové schéma návrhu střídače .....	- 33 -
Obr. 3.14 Propojení konektoru X3 s budičem.....	- 34 -
Obr. 3.15 Ukázka propojení budiče s IGBT střídačem pro jeden tranzistor.....	- 35 -
Obr. 3.16 Připojení snímačů na výkonovou část .....	- 36 -
Obr. 4.1 DC/DC měnič CN100A110 .....	- 38 -
Obr. 4.2 Blokový diagram DC/DC měniče – převzato z [10].....	- 39 -
Obr. 4.3 Schéma napájecí části měničů - spodní deska .....	- 40 -
Obr. 4.4 Schéma výstupní části měničů - vrchní deska.....	- 40 -

Obr. 4.5 Osazovací plán napájecí části měničů - spodní deska .....	- 41 -
Obr. 4.6 Osazovací plán výstupní části měničů - vrchní deska .....	- 41 -
Obr. 4.7 Napětí na konektorech CANON .....	- 42 -
Obr. 4.8 Zdrojová jednotka po zkompletování .....	- 43 -
Obr. 4.9 Měřené pracoviště .....	- 44 -
Obr. 4.10 Přechodný děj při zapnutí zdroje na spodní desce .....	- 45 -
Obr. 4.11 Přechodný děj při zapnutí zdroje na vrchní desce .....	- 46 -
Obr. 4.12 Zatěžovací charakteristika modulu CN100A110-24.....	- 47 -
Obr. 4.13 Účinnost modulu CN100A110-24 .....	- 47 -
Obr. 4.14 Účinnost uváděná výrobcem pro CN100A110-24 – převzato z [10] .....	- 48 -

## Seznam tabulek

Tab. 2.1 Naměřené hodnoty pro R zátěž .....	- 22 -
Tab. 2.2 Naměřené hodnoty pro RL zátěž .....	- 23 -
Tab. 2.3 Naměřené hodnoty pro RC zátěž .....	- 24 -
Tab. 3.1 Konfigurace pinů pro nastavení blokovacího času – převzato z [7].....	- 34 -

## **Seznam příloh**

Příloha č. 1. – Vybrané části z technické dokumentace jednotky A5523C1

Příloha č. 2. – Návrh schématu a seznam použitých součástí pro výkonovou část  
napěťového střídače

Příloha č. 3. – Seznam použitých součástí pro zdrojovou desku



Příloha č. 1. – Vybrané části z technické dokumentace jednotky A5523C1



#### 4. Základní technické údaje

Napájení X2:1 – kladný pól X2:2 – záporný pól	$V_S$	24V +25/-30% tj. 16,8 – 30V (ve spojení s modulem řady SKiiP3) 24V +25/-15% tj. 20,4 – 30V (ve spojení s modulem řady SKiiP2)
Napájení logických obvodů	$V_{S3}$ $V_{S5}$	3,3V – z regulátoru D8213C1 přes konektor X9 5V – z regulátoru D8213C1 přes konektor X9
Ostatní napájecí napětí vyrobena v A5523C1 z $V_S$ (spínaný zdroj +/-15V, lineární stab. +/-12V)		
Relevantní předpis Teplota okolí Teplota v okolí sestavené desky Relativní vlhkost		ČSN EN 50155 TX (-40 až +50°C) TX (-40 až +85°C) do 95% (po 30 dní v roce)
Digitální vstupy - počet - galvanické oddělení	- -	8 x digitální vstup – logická úroveň 24 V ANO
Digitální výstupy - počet - galvanické oddělení - ext. napájecí napětí kanálu 1, 2 - ext. napájecí napětí kanálu 3, 4	- - $V_{oSH12}$ $V_{oSH34}$	4 x digitální výstup – logická úroveň 24 V ANO 24V +25/-30% 24V +25/-30%
Řízení 3f modulu SKiiP - digitální vstupy - digitální výstupy - analogové vstupy - napájecí výstup pro SKiiP		4 x digitální vstup – logická úroveň 15 V 6 x digitální výstup – logická úroveň 15 V 3 x analogový vstup (+/-) (1,5 / 3 / 4,5 / 7,5) V 2 x analogový vstup (0-3 / 0-6 / 0-9 / 0-15) V 24V (programově připínáno na $V_S$ )
Řízení brzdného odporu - digitální vstupy - digitální výstupy - napájecí výstup pro modul		1 x digitální vstup – logická úroveň 15 V 2 x digitální výstup – logická úroveň 15 V 24V (elektronicky připínáno na $V_S$ )
Vstup otáčkových čidel - vstupy - napájecí výstupy pro čidla		5 x diferenciální digitální vstup – logická úroveň 5-15 V + 5V ( $V_{S5}$ ) a +15 V
Ovládací panel - vstupy - výstupy - komunikace - napájecí výstup		4 x digitální vstup – logická úroveň 3,3 V 1 x analogový vstup – standardně 0-15V přepojitelné na (+/-) (1,5 / 3 / 4,5 / 7,5) V nebo (0-3 / 0-6 / 0-9 / 0-15) V 1 x digitální výstup – logická úroveň 15 V RS-232 + 5V
Převodník napětí - vstup - napájecí výstup		1 x analogový vstup +/- 25 mA +/- 15V
Rezervní analogový vstup		1 x analogový vstup – volitelný rozsah (+/-) (1,5 / 3 / 4,5 / 7,5) V nebo (0-3 / 0-6 / 0-9 / 0-15) V

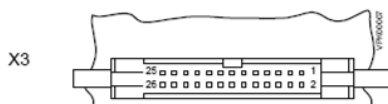


# Příloha č. 1. – Vybrané části z technické dokumentace jednotky A5523C1



## 6. Zapojení konektorů a parametry rozhraní

### 6.3. Modul SKiiP 3f (X3)



HARTING 09 18 526 904

PIN	Název	PIN	Název
1	Stínění	2	BOT HB 1 OUT
3	ERROR HB 1 IN	4	TOP HB 1 OUT
5	BOT HB 2 OUT	6	ERROR HB 2 OUT
7	TOP HB 2 OUT	8	BOT HB 3 OUT
9	ERROR HB 3 IN	10	TOP HB 3 OUT
11	Overtemp. IN	12	- nc -
13	U <sub>DC</sub> analog IN	14	+ 24 V <sub>DC</sub> OUT*
15	+ 24 V <sub>DC</sub> OUT*	16	- nc -
17	- nc -	18	GND
19	GND	20	Temp. analog IN
21	GND analog	22	I analog IN HB 1
23	GND analog	24	I analog IN HB 2
25	GND analog	26	I analog IN HB 3

\* - připínané programově, omezení počátečního proudového rázu na 1,5A až 2A. Po připojení zdroje dojde se zpožděním k přemostění omezovače proudu. Ten se opět aktivuje až po dostatečně dlouhém vypnutí polovodičového spínače. Tolerance výstupního napětí je dána tolerancí konkrétního připojeného zdroje napájecího napětí interfaceové desky, se kterým je v provozním stavu spojena přes polovodičový spínač.

Logické výstupy	
Minimální napětí log. úroveň „1“	U <sub>P24V<sub>DC</sub></sub> – 0,2V
Maximální napětí log. úroveň „0“	odpojeno – definováno zátěží v oblasti dovolených napětí
Maximální zatížení výstupu	I <sub>DCmax</sub> 2A

TEZ031a2006\_02\_14\_Technicky\_popis\_Ey7374Pa.doc  
tiskáno 22. února 2008

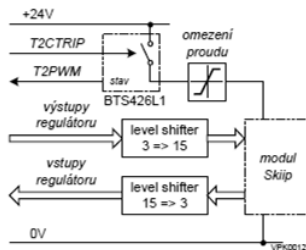
číslo dokumentu:  
Ey7374P

list 9 z 16

Logické vstupy	
Minimální napětí log. úroveň „1“	16,8
Maximální napětí log. úroveň „0“	4 V
Pull-Up odpor	R <sub>UP</sub> 10 kΩ +/-5%

Nastavení analogových vstupů je uvedeno ve zvláštní kapitole.

### Principiální propojení digitálních signálů mezi regulátorem a modulem SkiiP



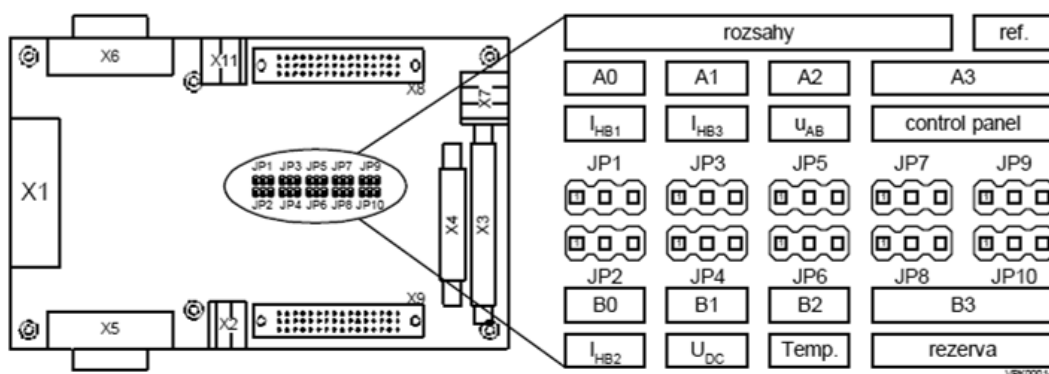
Nastavení stavu výstupu		Vyčtení stavového signálu	
Kanál	Signál regulátoru	Kanál	Signál regulátoru
TOP HB 1 OUT	PWM1	ERROR HB 1 IN	
BOT HB 1 OUT	PWM2	ERROR HB 2 IN	
TOP HB 2 OUT	PWM3	ERROR HB 3 IN	
BOT HB 2 OUT	PWM4	Overtemp. IN	
TOP HB 3 OUT	PWM5		
BOT HB 3 OUT	PWM6		

## Příloha č. 1. – Vybrané části z technické dokumentace jednotky A5523C1









### 7. Konfigurace analogových vstupů

Všechny analogové vstupy mají shodná zapojení vstupu. Rozdíl je v referenčním napětí. Některé vstupy mají referenční napětí nulové jiné 1,5V a u zbývajících je možné volit mezi těmito dvěma hodnotami. U napěťových vstupů jsou volitelné čtyři převodní poměry (1:1–1:2–1:3–1:5). Těm odpovídají vstupní odpory (3/5.R–2/3.R–3/2.R–5/3.R), resp. (0,6\*R–0,67\*R–1,5\*R–1,67\*R). To neplatí pro proudové vstupy, kde jsou osazeny různé hodnoty odporů.





#### 7.1. Umístění konfiguračních konektorů



#### 7.2. Způsob nastavení rozsahu

Analogové vstupy				
Konfigurace	1	2	3	4
Převod	1:1	1:2	1:3	1:5
Koeficient vstupního odporu	3/5	2/3	3/2	5/3
Provedení propojek ovinutím / umístění zkratovacího můstku				
Relevantní konektory				

#### 7.3. Způsob nastavení referenčního napětí

Analogové vstupy		
Konfigurace	1	2
Referenční napětí	0 V	1,5 V
Provedení propojek ovinutím / umístění zkratovacího můstku		
Relevantní konektory		

Příloha č. 1. – Vybrané části z technické dokumentace jednotky A5523C1

**7.4. Kanály s pevně nastavenou referencí**

Analogové vstupy s pevně danou referencí				Rozsahy			
Kan.	Kon.	Parametr					
A0 (JP1)	X3	Měřicí rozsah	$U_{IN}$ [V]	+/- 1,5	+/- 3	+/- 4,5	+/- 7,5
		Vstupní odpor	$R_{IN}$ [ $\Omega$ ]	2580	2867	6450	7167
		Primární rozsah**	$I_{HB1}$ [A]	$0,1875 I_{C@25}$	$0,375 I_{C@25}$	$0,5625 I_{C@25}$	$0,9375 I_{C@25}$
B0 (JP2)	X3	Měřicí rozsah	$U_{IN}$ [V]	+/- 1,5	+/- 3	+/- 4,5	+/- 7,5
		Vstupní odpor	$R_{IN}$ [ $\Omega$ ]	2580	2867	6450	7167
		Primární rozsah**	$I_{HB2}$ [A]	$0,1875 I_{C@25}$	$0,375 I_{C@25}$	$0,5625 I_{C@25}$	$0,9375 I_{C@25}$
A1 (JP3)	X3	Měřicí rozsah	$U_{IN}$ [V]	+/- 1,5	+/- 3	+/- 4,5	+/- 7,5
		Vstupní odpor	$R_{IN}$ [ $\Omega$ ]	2580	2867	6450	7167
		Primární rozsah**	$I_{HB3}$ [A]	$0,1875 I_{C@25}$	$0,375 I_{C@25}$	$0,5625 I_{C@25}$	$0,9375 I_{C@25}$
B1 (JP4)	X3	Měřicí rozsah	$U_{IN}$ [V]	0 – 3	0 – 6	0 – 9	0 – 15
		Vstupní odpor	$R_{IN}$ [ $\Omega$ ]	2580	2867	6450	7167
		Primární rozsah**	$U_{DC}$ [V]	$1/3 U_{DCmax}$	$2/3 U_{DCmax}$	$U_{DCmax}$	$5/3 U_{DCmax}$
A2 (JP5)	X7	Měřicí rozsah	$I_{IN}$ [mA]				+/- 25
		Vstupní odpor	$R_{IN}$ [ $\Omega$ ]				142
		Primární rozsah	$U_{AB}$ [V]				+/- 1000*
B2 (JP6)	X3	Měřicí rozsah	$U_{IN}$ [V]	0 – 3	0 – 6	0 – 9	0 – 15
		Vstupní odpor	$R_{IN}$ [ $\Omega$ ]	2580	2867	6450	7167
		Primární rozsah	Temp[ $^{\circ}$ C]	-	-	-	-

Terminologie: Měřicí rozsah – hodnoty měřené na konektorech interfaceové karty

Primární rozsah – hodnoty měřené v zařízení připojeném k interface (Skiip)

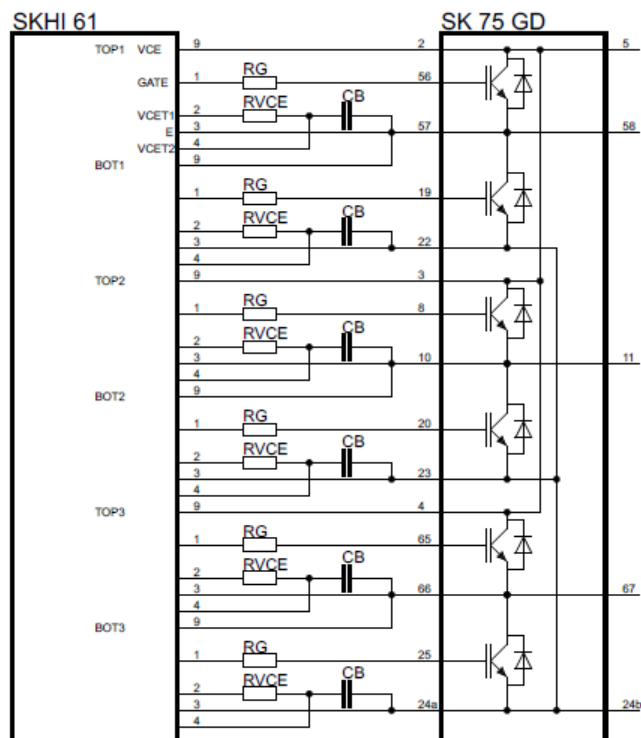
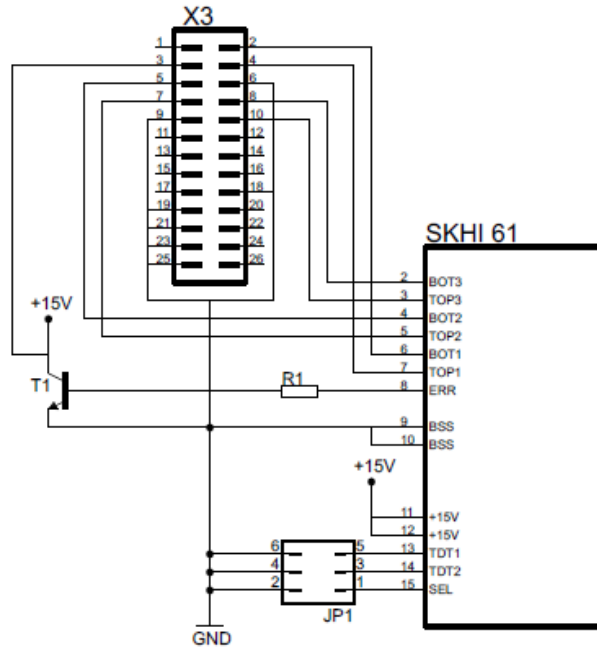
Vstupní odpor – hodnota odporu měřitelná mezi příslušnými svorkami interface

Poznámky: \* - napěťové čidlo LV25P má proudový výstup – pouze možná konfigurace: č. 4

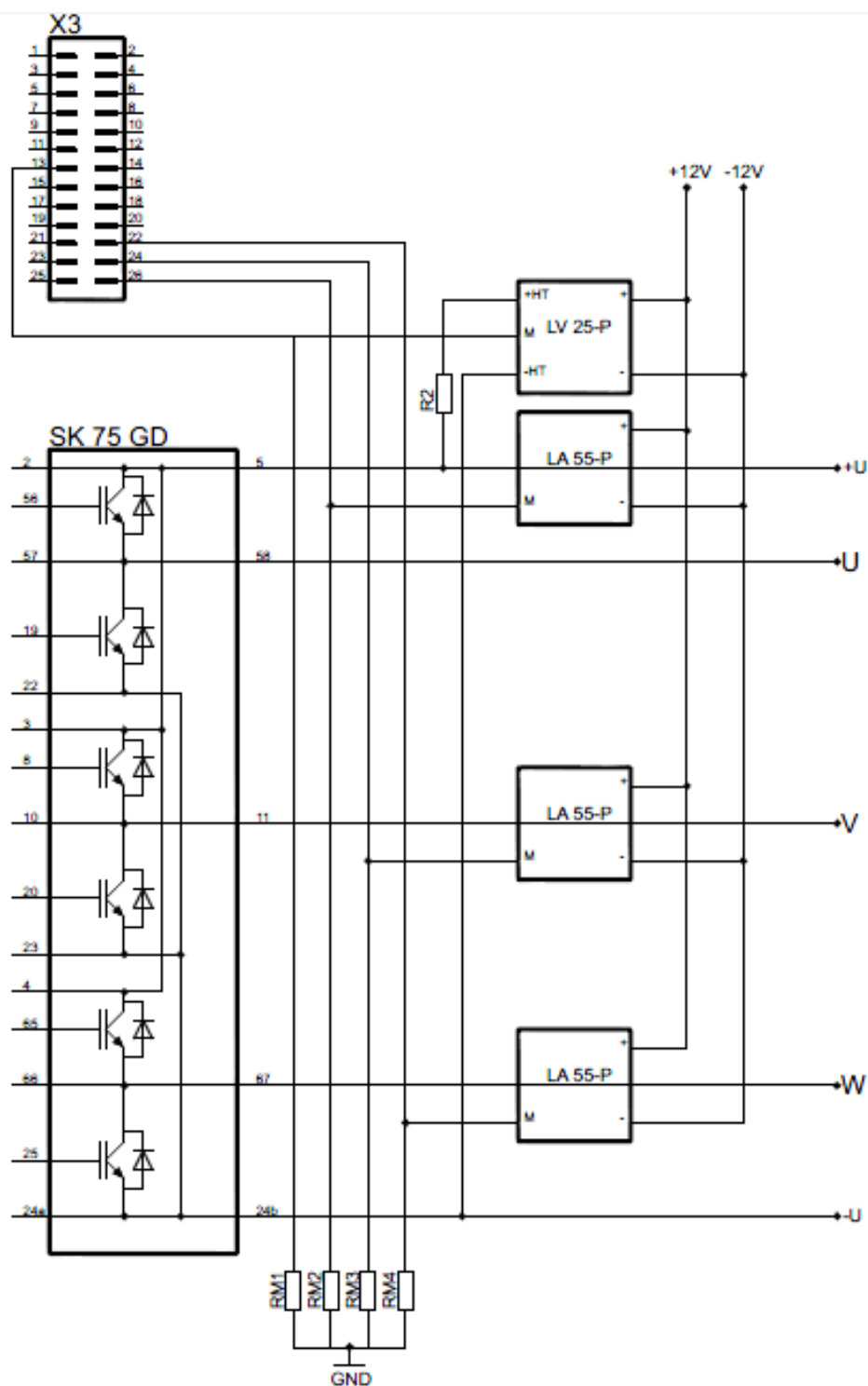
\*\* - hodnoty  $I_{C@25}$  a  $U_{DCmax}$  se mohou lišit dle konkrétního připojeného modulu

Skiip – podrobnosti viz. dokumentace firmy Semikron

Příloha č. 2. – Návrh schématu a seznam použitých součástek pro výkonovou část napěťového střídače



Příloha č. 2. – Návrh schématu a seznam použitých součástek pro výkonovou část napěťového střídače



Příloha č. 2. – Návrh schématu a seznam použitých součástek pro výkonovou část napěťového střídače

<b>Rezistor</b>	
<b>Označení</b>	<b>Hodnota</b>
R <sub>1</sub>	10Ω
R <sub>2</sub>	15kΩ
R <sub>G</sub>	33Ω
R <sub>VCE</sub>	10kΩ
R <sub>M1</sub>	330Ω
R <sub>M2</sub>	56Ω
R <sub>M3</sub>	56Ω
R <sub>M4</sub>	56Ω
<b>Kondenzátor</b>	
<b>Označení</b>	<b>Hodnota</b>
C <sub>B</sub>	470pF
<b>Tranzistor</b>	
<b>Označení</b>	<b>Hodnota</b>
T <sub>1</sub>	BC548

Příloha č. 3. – Seznam použitých součástek pro zdrojovou desku

<b>Rezistor</b>	
<b>Označení</b>	<b>Hodnota</b>
R <sub>1</sub> – R <sub>5</sub>	4,7Ω/20W
R <sub>6</sub> – R <sub>10</sub>	/
R <sub>11</sub>	100kΩ/5W
<b>Kondenzátor</b>	
<b>Označení</b>	<b>Hodnota</b>
C <sub>1</sub> – C <sub>14</sub>	1000μF/250V
C <sub>15</sub> – C <sub>19</sub>	100μF/250V
C <sub>20</sub> – C <sub>29</sub>	3,3mF/35V
C <sub>F1</sub> – C <sub>F14</sub>	220nF/250V
C <sub>K20</sub> – C <sub>K29</sub>	220nF/50V
C <sub>R</sub>	1000μF/35V
<b>Tranzistor</b>	
<b>Označení</b>	<b>Hodnota</b>
Q <sub>1</sub>	BS170
<b>Dioda</b>	
<b>Označení</b>	<b>Hodnota</b>
D <sub>1</sub>	FES16JT
D <sub>2</sub>	1N4007
D <sub>3</sub>	1N4007
D <sub>Z</sub>	BZY012
<b>Relé</b>	
<b>Označení</b>	<b>Hodnota</b>
K	RP700