

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

ASYNCHRONNÍ DYNAMOMETR – VÝKONOVÝ MĚNIČ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

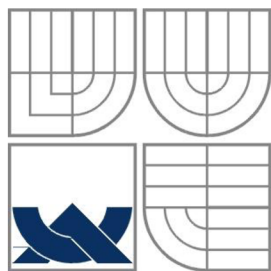
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

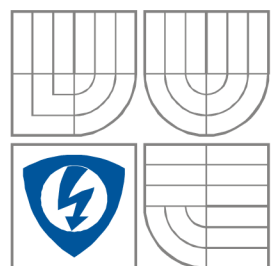
Vojtěch Vetiška

AUTHOR

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLÓGIÍ**
**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY**
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

ASYNCHRONNÍ DYNAMOMETR – VÝKONOVÝ MĚNIČ

ASYNCHRONOUS DYNAMOMETER – POWER INVERTER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

VOJTĚCH VETIŠKA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

ING. BOHUMIL KLÍMA, Ph.D

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Vojtěch Vetiška

Bytem: Lůčka 729, 68724, Uherský Ostroh – Ostrožské předměstí

Narozen/a (datum a místo): 11.6.1985, Uherský Hradiště

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

se sídlem Údolní 244/53, 602 00, Brno

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
- diplomová práce
- bakalářská práce
- jiná práce, jejíž druh je specifikován jako

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Asynchronní dynamometr – výkonový měnič

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Bohumil Klíma, Ph.D.

Ústav: Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v*:

- tištěné formě – počet exemplářů 1
- elektronické formě – počet exemplářů 1

* hodící se zaškrtněte

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ihned po uzavření této smlouvy
 - 1 rok po uzavření této smlouvy
 - 3 roky po uzavření této smlouvy
 - 5 let po uzavření této smlouvy
 - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne:

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Abstrakt

Tato práce se zabývá výkonovým měničem pro asynchronní dynamometr. Seznámíme se v ní s nároky kladenými na spínací tranzistory a budiče. Poté probereme princip a zapojení trojfázových frekvenčních měničů a aktivních usměrňovačů. Specifikujeme konkrétní podmínky parametrů pro výkonový měnič. Pro tyto podmínky budeme dimenzovat jednotlivé prvky výkonového měniče. Navrheme schéma zapojení a vytvoříme desky plošných spojů a rozpisku součástek. Na závěr navrheme mechanické uspořádání měniče a vytvoříme výkresovou dokumentaci.

Abstract

This project deals with the power converter for the asynchronous dynamometer. Inside of the document we shall acquaint with claims towards switching transistors and actuators. Furthermore we shall go through the principle and the wiring of three-phase converters and active rectifiers . We specify particular conditions of parameters for the power converter. For these conditions we shall dimension particular elements of the power converter. On the end we shall design the mechanical arrangement of the power circuit and create the design documentation..

Klíčová slova

výkonový měnič, asynchronní dynamometr, aktivní usměrňovačem

Keywords

power convertor, asynchronous dynamometer, active rectifier

Bibliografická citace

VETIŠKA, V. *Asynchronní dynamometr - výkonový měnič*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 45 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Bohumil Klíma, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma *Asynchronní dynamometr – výkonový měnič* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské 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

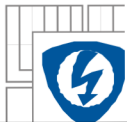
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Bohumil Klíma, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

Podpis autora

**OBSAH**

1 ÚVOD	14
2 PRINCIP A STRUKTURA VÝKONOVÝCH TROJFÁZOVÝCH MĚNIČŮ A AKTIVNÍCH USMĚRŇOVAČŮ	15
2.1 ZÁKLADNÍ POŽADAVKY NA JEDNOTLIVÉ ČÁSTI VÝKONOVÝCH MĚNIČŮ A AKTIVNÍCH USMĚRŇOVAČŮ	15
2.2 AKTIVNÍ USMĚRŇOVAČ	16
TROJFÁZOVÝ VÝKONOVÝ MĚNIČ	17
2.2.1 PRINCIP ČINNOSTI TROJFÁZOVÉHO VÝKONOVÉHO MĚNIČE.....	18
3 SPECIFIKACE KONKRÉTNÍCH POŽADAVKŮ ZADÁNÍ	20
4 DIMENZOVÁNÍ JEDNOTLIVÝCH PRVKŮ	21
4.1 VSTUPNÍ CÍVKA	21
4.2 KONDENZÁTOR V MEZIIOBVODU	21
4.3 VSTUPNÍ ODPOR	22
4.4 DIMENZOVÁNÍ POLOVODIČŮ PRO AKTIVNÍ USMĚRŇOVAČ	24
4.5 DIMENZOVÁNÍ POLOVODIČŮ PRO VÝKONOVÝ MĚNIČ	25
4.6 MĚŘENÍ PROUDU	25
5 SCHÉMA ZAPOJENÍ A POPIS FUNKCE	26
5.1 AKTIVNÍ USMĚRŇOVAČ	26
5.1.1 VSTUPNĚ VÝSTUPNÍ KOMUNIKAČNÍ ČÁST AKTIVNÍHO USMĚRŇOVAČE.....	26
5.1.2 NAPÁJENÍ SOUČÁSTEK AKTIVNÍHO USMĚRŇOVAČE	27
5.1.3 VSTUPNÍ VÝKONOVÝ OBVOD AKTIVNÍHO USMĚRŇOVAČE	27
5.1.4 VÝKONOVÝ OBVOD AKTIVNÍHO USMĚRŇOVAČE.....	28
5.1.5 STEJNOSMĚRNÝ MEZIIOBVOD	28
5.1.6 POMOCNÉ OBVODY	29
5.1.7 ZDROJ REFERENČNÍHO NAPĚTÍ.....	29
5.1.8 OBVOD MĚŘENÍ PROUDU.....	30
5.2 VÝKONOVÝ MĚNIČ	30
5.2.1 VSTUPNĚ VÝSTUPNÍ KOMUNIKAČNÍ ČÁST VÝKONOVÉHO MĚNIČE	30
5.2.2 NAPÁJENÍ SOUČÁSTEK VÝKONOVÉHO MĚNIČE.....	31
5.2.3 VÝKONOVÝ OBVOD VÝKONOVÉHO MĚNIČE	31
5.2.4 STEJNOSMĚRNÝ MEZIIOBVOD	32
5.2.5 POMOCNÉ OBVODY	32
5.2.6 ZDROJ REFERENČNÍHO NAPĚTÍ.....	32
5.2.7 OBVOD MĚŘENÍ PROUDU.....	33



6 DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ	34
6.1 DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ AKTIVNÍHO USMĚRŇOVAČE	34
6.1.1 TOP.....	34
6.1.2 .BOTTON	35
6.2 DESKA PLOŠNÝCH SPOJŮ VÝKONOVÉHO MĚNIČE.....	36
6.2.1 TOP.....	36
6.2.2 BOTTON	37
7 ROZPISKA SOUČÁSTEK	38
7.1 VÝKONOVÝ FREKVENČNÍ MĚNIČ	38
7.2 AKTIVNÍ USMĚRŇOVAČ	39
8 MECHANICKÉ USPOŘÁDÁNÍ	41
9 ZÁVĚR.....	43
LITERATURA	44
PŘÍLOHY	45

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

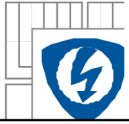
<i>Obrázek 1 Schéma jednofázového aktivního usměrňovače</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 2 Schéma trojfázového výkonového měniče se stejnosměrným meziobvodem.....</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 3 Napětí na kondenzátoru</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 4 Průběh výkonu na odporu.....</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 5 Průběh práce na odporu</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 6 Vstupně výstupní komunikační část výkonového měniče</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 7 Napájení součástek aktivního usměrňovače</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 8 Vstupní výkonový obvod aktivního usměrňovače.....</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 9 Výkonová obvod aktivního usměrňovače</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 10 Stejnosměrný meziobvod.....</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 11 Pomocné obvody.....</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 12 Zdroj referenčního napětí</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 13 Obvod měření proudu</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 14 Vstupně výstupní komunikační část výkonového měnič.....</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 15 Napájení součástek výkonového měniče.</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 16 Výkonová obvod výkonového frekvenčního měniče</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 17 Stejnosměrný meziobvod.....</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 18 Pomocné obvody.....</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 19 Zdroj referenčního napětí</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 20 Měření proudu</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 21 Deska plošných spojů aktivního usměrňovače - top</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 22 Deska plošných spojů aktivního usměrňovače - botton</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 23 Deska plošných spojů výkonového měniče - top.....</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 24 Deska plošných spojů výkonového měniče - botton.....</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 25 Model mechanického uspořádání – pohled 1.</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 26 Model mechanického uspořádání – pohled 2.</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 27 Model mechanického uspořádání – pohled 3.</i>	<i>42</i>



SEZNAM TABULEK

Tabulka 1. Rozpiska součástek pro výkonový frekvenční měnič39

Tabulka 2. Rozpiska součástek pro výkonový měnič40



SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Ud	napětí v meziobvodu
s	střída
f	frekvence
Δl	zvlnění proudu
I	proud
Uf	fázové napětí
Umax	špičková hodnota napětí
L	indukčnost
I _{max}	maximální proud



1 ÚVOD

Trojfázové frekvenční výkonové měniče (dále jen výkonové měniče), jsou nedílnou součástí elektrických zařízení, u kterých je potřeba vhodným způsobem řídit jejich frekvenci, napětí či proud, jako například řízení elektrických pohonů, úpravu výstupního napětí solárních elektráren a mnoho jiných aplikací. Výkonové měniče také v poslední době nacházejí uplatnění v automobilovém průmyslu a to zejména mluvíme-li o automobilech s hybridním pohonem a elektromobilech.

Aktivní usměrňovače se využívají ze tří důvodů. Odstraňují nežádoucí vlivy fázově řízených usměrňovačů, jsou součástí aktivních filtrů a umí převádět střídavé napětí na stejnosměrné, ale také stejnosměrné napětí na střídavé aniž by se muselo zapojení jakkoli měnit. Využívají se u frekvenčních měničů, záložních zdrojů atd.

V této práci se postupně seznámíme s nároky kladenými na jednotlivé části výkonového měniče a aktivního usměrňovače. Dále se budeme zabývat problematikou návrhu a dimenzování výkonového měniče a aktivního usměrňovače. Sestavíme schéma zapojení, navrhne desku plošných spojů (dále jen DPS) a nastíníme mechanické uspořádání.



2 PRINCIP A STRUKTURA VÝKONOVÝCH TROJFÁZOVÝCH MĚNIČŮ A AKTIVNÍCH USMĚRŇOVAČŮ

2.1 Základní požadavky na jednotliví části výkonových měničů a aktivních usměrňovačů

Základními součástmi výkonových měničů a aktivních usměrňovačů jsou výkonové polovodiče. V minulosti to byly zejména tyristory a diody. V posledním desetiletí mají dominantní postavení vysokonapěťové spínací tranzistory a diody a to především tranzistory IGBT (Insulated-gate bipolar transistor), MOS-FET (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor) a BJT (Bipolar Junction Transistor). Tyto prvky umožňují zpracovávat stejnosměrné napětí odpovídající usměrněnému střídavému síťovému napětí (bez snižujícího síťového transformátoru). S ohledem na distribuční síť v ČR připadají v úvahu dvě hladiny o přibližných stejnosměrných napětích, $\approx 300\text{V}$ (usměrnění $1 \times \sim 230\text{V}$) a $\approx 540\text{V}$ (usměrnění $3 \times \sim 400\text{V}$). Přihlédneme-li na uvedené hodnoty a vezmeme-li v potaz dimenzování polovodičových prvků, zjistíme, že jsou preferovány výkonové prvky se závěrným napětím 600V pro jednofázově usměrněné a 1200V pro trojfázově usměrněné. Vysoká závěrná napětí jsou však v rozporu s dalším požadavkem na vysokou rychlost spínání tranzistorů.

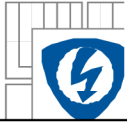
Ovšem i zde vývoj výkonových spínacích tranzistorů a diod jde kupředu. Zvyšuje se jednak závěrné napětí a jednak zkracování vypínací a zapínací doby a to při zachování standardních závěrných napětí 600V resp. 1200V . Dále se začínají objevovat výkonové prvky, které využívají odlišných materiálů než je křemík, například SiC (karbid křemíku). Tyto polovodiče se vyznačují velmi malou zotavovací dobou (řádově jednotky až jednotky stovek ns).

Při pohledu do dnešních katalogů výrobců výkonových polovodičových prvků je zde patrná snaha o zvětšování závěrného napětí tak zmenšování zotavovací doby. Tak například před 20 lety byly parametry IGBT tranzistorů $50\text{A}/600\text{V}/3\mu\text{s}$, dnes je stejný tranzistor o 1-2 řády rychlejší. A ty nejlepší dosahují parametrů $600\text{A}/6500\text{V}/0,7-5,5\mu\text{s}$.

Zmenšování zotavovací doby má za následek snižování ztrátového výkonu na tranzistoru, ale také narůstá strmost kolektorového napětí u_c . Strmost du/dt se řádově pohybuje od desítek až do stovek $\text{kV}/\mu\text{s}$, což má za následek jak problémy s EMC (Electromagnetic Compatibility) tak komplikace při konstrukci budičů tranzistorů.

Další neméně důležitou součástí výkonových měničů a aktivních usměrňovačů je budičí obvod tranzistoru. Úkolem budičího obvodu je generovat vhodný signál na svém výstupu pro řídicí elektrodu výkonového tranzistoru. To je ovšem jen část funkce budiče. Budič musí zajistit také galvanické oddělení řídicího signálu na rozhraní výkonové části a řídicí části. Na galvanické oddělení jsou kladeny vysoké nároky. Nabízí se dvě řešení jak galvanicky oddělit výkonovou část od řídicí a to optickou nebo magnetickou cestou.

Optické oddělení – pro optická oddělení se využívají optočleny se stínící mřížkou, která se nachází mezi vysílačem a přijímačem. Stínící mřížka zajišťuje odolnost proti rušení vlivem du/dt ale pouze do $5-10\text{kV}/\mu\text{s}$ což je ale na samé dolní hranici použitelnosti v porovnání s tím co



zvládají výkonové tranzistory. Lze také využít pro oddělení optického vlákna, Toto řešení je velmi elegantní, avšak také značně finančně náročné.

Magnetické oddělení – galvanické oddělení je realizováno pomocí vysokofrekvenčního transformátoru. Jelikož je budič poměrně složitý aktivní obvod, je ho potřeba napájet a toto napájení musí být také galvanicky odděleno. Při využití v transformátoru přenášíme nejen informace, ale i zároveň napájíme obvod samotného budiče.

„Velmi důležitou součástí budiče jsou rychlé elektrické ochrany, jejichž úkolem, je zajistit „nezničitelnost“ řízeného tranzistoru. Informace o nestandardním stavu kterékoli ochrany je nutno hlásit zpět do řídicího systému a to opět galvanicky odděleným způsobem.

Možnosti galvanického oddělení řídicího signálu lze shrnout do následujících bodů:

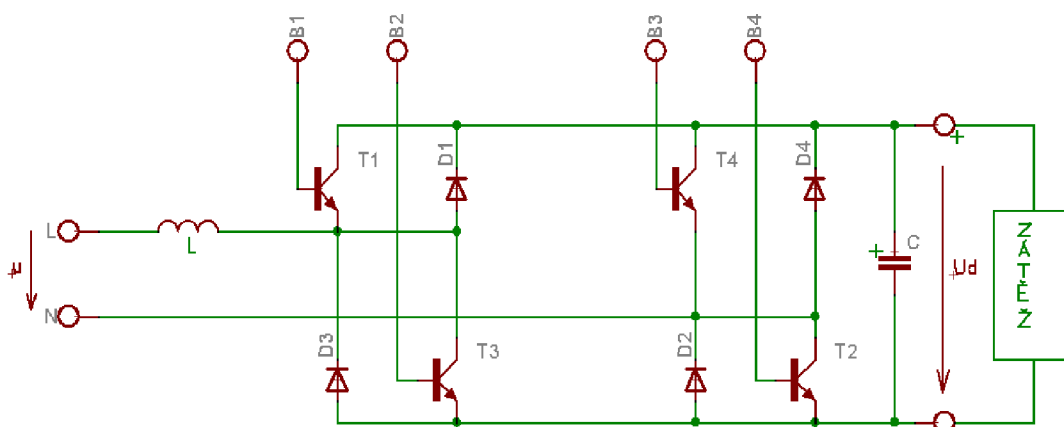
- Optočleny: vždy se stínící mřížkou, optickým přijímačem musí být fotodioda – nikoli fototranzistor (viz odolnost du/dt a navíc požadavek na rychlost přenosu).
- Optické vlákno: u měničů velkých výkonů (asi nad 1MW) a u vysokonapěťových aplikací. Jedná se o vynikající řešení, bohužel z cenových a objemových důvodů nepoužitelné u měničů malých výkonů.
- Přenos informace magnetickou cestou.
- Součástí „kombinovaný“ přenos i napájecí energie magnetickou cestou.
- Zvýšení odolnosti proti du/dt redundantním přenosem informace.“

2.2 Aktivní usměrňovač

Aktivní usměrňovače nebo také pulzně řízené usměrňovače, umožňují dodávat stejnosměrné napětí a proud jak do zátěže tak také měnit stejnosměrné napětí a proud na střídavé napětí a proud a dodávat energii zpět do rozvodné sítě, změní-li se zátěž na generátor a to bez změny zapojení.

Aktivní usměrňovače pracují s pulzně šířkovou modulací a tím minimalizuje negativní vlastnosti fázově řízených usměrňovačů, z čehož plyne, že aktivní usměrňovače nepotřebují provádět kompenzaci, filtraci a odrušení.

Dělíme je podle několika kritérií. Počet fází střídavého napájecího napětí: jednofázové a třífázové. „Podle typu na napěťové a proudové. Výstupem napěťových měničů je stejnosměrné napětí a proudových měničů stejnosměrný proud.“ V současnosti se více preferují napěťové měniče.



Obrázek 1 Schéma jednofázového aktivního usměrňovače

Schéma jednofázového aktivního usměrňovače (Obrázek 1) je stejné jako zapojení čtyřkvadrantového stejnosměrného měniče a také jednofázového napětového střídače. Liší se použitím a způsobem řízení. Zátěž ve schématu je čistě obecná pro názornost.

„Je tvořen plně říditelnými prvky T1,T2,T3,T4(tranzistory) a diodami D1, D2, D3, D4. Funkční dvojici tvoří vždy tranzistor s diodou zapojené v obrázku pod sebou. Vstupní napětí u , má nejčastěji normalizované hodnoty napětí a kmitočtu.

Vazbu mezi napájecím napětím u a vlastním měničem tvoří indukčnost L . Ta je pro činnost měniče nezbytná a důležitá. Podílí se na funkci měniče a ovlivňuje spektrum vyšších harmonických ve vstupním proudu.

Výstup měniče je tvořen kondenzátorem C , který na výstupu musí být připojen. Nabitý kondenzátor je dobrým zdrojem stejnosměrné energie. Jeho napětí je vyhlazené, činitel tvaru $k_t=1$. Pokud zařídíme, aby odebraná energie kondenzátoru zátěží byla ve stejné hodnotě dodána měničem, bude nabitý kondenzátor dobrým zdrojem i při zatíženém měniči.“

Svorky B1,B2,B3,B4 slouží pro připojení budičů pro jednotlivé tranzistory.

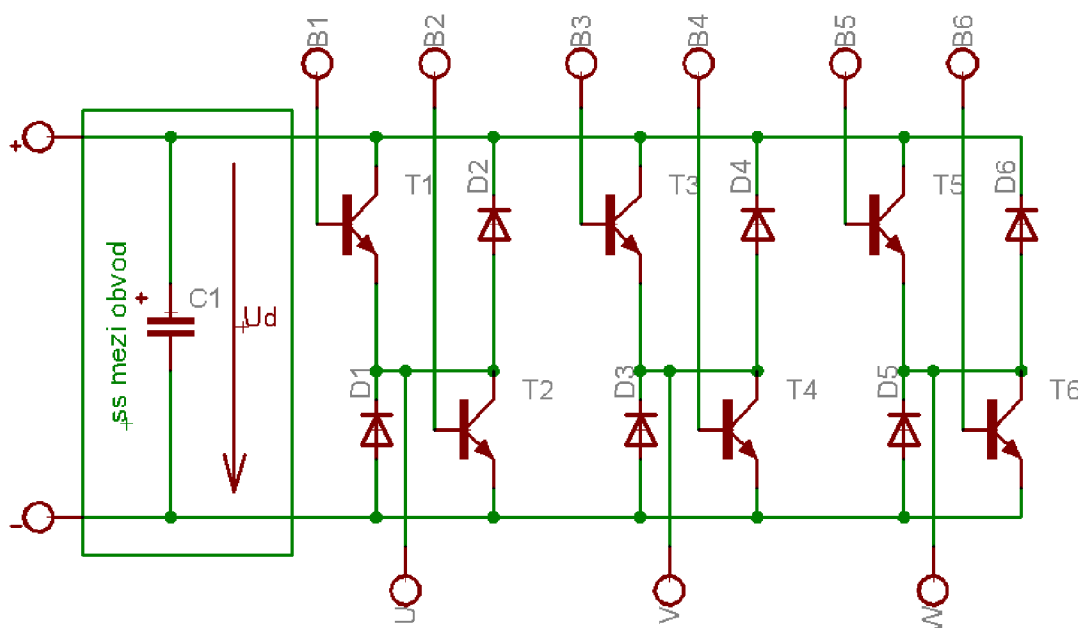
Zapojíme-li na vstup aktivního usměrňovače střídavé napájecí napětí u , nastane přechodový děj, kdy se nabije kondenzátor C přes neřízený usměrňovač tvořený diodami D1, D2, D3, D4. Trvání přechodového děje a hodnota napětí U_d na kondenzátoru jsou závislé jen na parametrech kondenzátoru C a indukčnosti L . Aby měnič správně pracoval, musí splňovat nutnou podmínku $U_d \geq U$, U je efektivní hodnota střídavého napětí. Měnič není schopen mít na svém výstupu menší napětí než je amplituda napájecího napětí. Vyšší hodnoty napětí jak amplituda napájecího napětí generovat dovede. Z toho vyplývá, že aktivní usměrňovač dovede přenášet energii oběma směry.

Trojfázový výkonový měnič

Trojfázový výkonový měnič slouží ke konverzi stejnosměrného napětí na trojfázové střídavé napětí. Toto napětí může mít proměnu frekvenci i velikost amplitudy. To umožňuje například u asynchronního motoru plynule řídit otáčky a také udržovat jmenovitý zatěžovací momentem při nízkých otáčkách.

Trojfázový výkonový měnič odebírá přes usměrňovač a stejnosměrný meziobvod (kondenzátor) z rozvodné sítě takřka jen činný výkon. „Jalový výkon potřebný pro provoz motoru dodává meziobvod stejnosměrného napětí.“ Vzhledem k tomuto faktu se nemusí kompenzovat jalový výkon.

Trojfázový výkonový měnič může také pracovat v usměrňovačovém chodu. Což znamená, že se zátěž změní na zdroj a bude dodávat energii ze střídavého obvodu do stejnosměrného meziobvodu a odtud přes aktivní usměrňovač zpět do střídavé napájecí sítě. Toho se využívá například u asynchronního dynamometru, moderních elektrických pohonech dopravních prostředků, atd.



Obrázek 2 Schéma trojfázového výkonového měniče se stejnosměrným meziobvodem

Jak je patrné z obrázku, trojfázový výkonový měnič se skládá z 6 spínacích tranzistorů T1, T2, T3, T4, T5, T6. K jednotlivým tranzistorům je přiřazena antiparalelně nulová (zpětná) dioda. Jako celek tvoří zpětné diody tzv. zpětný usměrňovač, který umožňuje usměrňovačový chod a odběr jalového výkonu zátěží.

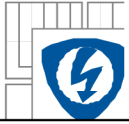
„Stejnoseměrná strana napěťového střídače je připojena na zdroj napětí U_d . V reálném zapojení je jako zdroj napětí U_d obvykle kondenzátor, který udržuje hladinu napětí stejnosměrného meziobvodu na požadované úrovni.“

Svorky U, V, W jsou výstup trojfázového výkonového měniče, pracuje-li v režimu napěťového střídače (na svorkách U, V, W je připojen spotřebič). A vstupní, je-li v usměrňovačovém režimu (na svorkách U, V, W je připojen zdroj).

Svorky B1-B6 jsou určeny pro připojení budičů.

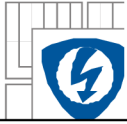
2.2.1 Princip činnosti trojfázového výkonového měniče

Trojfázovým výkonovým měničem teče proud, je-li současně sepnuta alespoň jeden z dolních tranzistorů a alespoň jeden z horních tranzistorů. Je nepřipustné sepnout současně



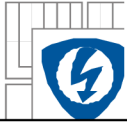
tranzistory jedné fáze (T1, T2 nebo T3, T4 nebo T5, T6). Nastalo by spojení nakrátko a to by následným zničením měniče. Vhodným spínáním jednotlivých tranzistorů, nejčastěji pomocí pulzně- šířkové modulace, získáme na výstupu trojfázového výkonového měniče požadované hodnoty napětí a proudu.

Usměřovačového režimu se dosáhne změnou řízení, která je založena na tom, že budeme kratší dobu spínat tranzistory oproti době vedení antiparalelních diod. „Při nezměněné polaritě napětí na stejnosměrné straně se změní smysl střední hodnoty proudu a s tím i smysl přenášeného výkonu. Šířkově-pulzním řízením se u tohoto měniče může odebírat ze střídavé sítě „prakticky“ sinusový proud s požadovaným účíníkem.“ Toho se využívá například pro řízené kompenzátory, aktivní filtry atd.



3 SPECIFIKACE KONKRÉTNÍCH POŽADAVKŮ ZADÁNÍ

Asynchronní motor 3kW/10Nm/6000min⁻¹. Asynchronní dynamometr bude napájen ze sítě nízkého napětí 230V/50Hz a při rekuperaci bude vracet energii se stejným napětím a frekvencí. Na výstupu výkonového měniče bude připojen trojfázový asynchronní motor zadaných parametrů zapojený do trojúhelníku. Spínací frekvence trojfázového výkonového měniče a aktivního usměrňovače je $f = 9000\text{Hz}$. Zvlnění proudu $\Delta I = 10\%$.



4 DIMENZOVÁNÍ JEDNOTLIVÝCH PRVKŮ

4.1 Vstupní cívka

Napětí stejnosměrného meziobvodu $U_d = 350V$, střída $s = 0.5$, spínací frekvence $f = 9000Hz$ používato unipolární řízení => frekvence proudu na cívce bude $f = 18000Hz$, zvlnění proudu ΔI je 10%, výkon dodávaný z motoru (generátorový režim) $P = 3000W$

$$I = \frac{P}{U} = \frac{3000W}{230V} = 13.0425A$$

$$\Delta I = \frac{I}{100} * 10 = \frac{13.04}{100} * 10 = 1,3A$$

$$L = \frac{U_d * (1 - s) * s}{2 * f * \Delta I} = \frac{350V * (1 - 0.5) * 0.5}{2 * 18000Hz * 1,3A} = 1,87mH$$

V zapojení bude indukčnost reprezentována tlumovkou firmy ELFIS ITS016/00.

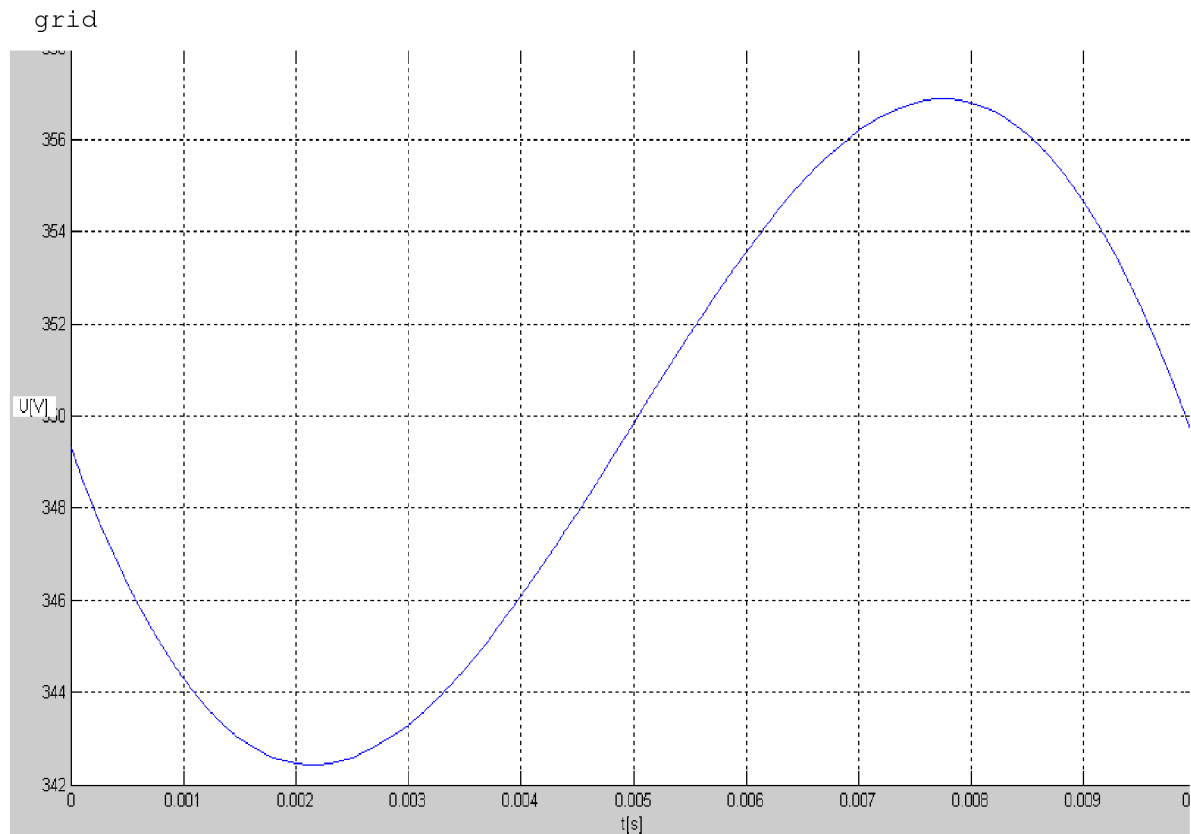
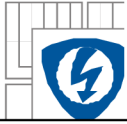
4.2 Kondenzátor v meziobvodu

Průběh napětí na kondenzátoru meziobvodu byl simulován pomocí Matlabu. Volena byla velikost kapacity a sledována byla velikost zvlnění napětí na kondenzátoru. Maximální dovolené zvlnění $\Delta U = 10V$. Proud do zátěže $I = 13,04A$,

napětí stejnosměrného meziobvodu $U_d = 350V$.

```
I1m = 13.04*pi/2;           %maximalni hodnota proudu
I2 = 13.04;                 %proud do zateze
Ustr = 350;                 %napeti meziobvodu
C = 0.0019;                 %kapacita kondenzatoru v meziobvodu
t=0;                        %cas
Ut=0;                       %napeti na kondenzatoru v case

t = 0:0.0001: pi/(2*pi*50);
Ut(1) = (-I2*0.0001/C + I1m*sin(t(1)*2*pi*50)*0.0001/C) + Ustr;
for i = 2:101
    Ut(i) = (Ut(i-1) -I2*0.0001/C + I1m*sin(t(i)*2*pi*50)*0.0001/C);
end;
figure(1);
plot(t,Ut)
```



Obrázek 3 Napětí na kondenzátoru

Je patrné, že zvolená kapacita vyhovuje požadavku na velikost zvlnění. Velikost kapacity je $C=0,0019\text{F}$. Tato kapacita bude v reálném zapojení reprezentována 4 elektrolytickými kondenzátory $470\mu\text{F}/400\text{V}$.

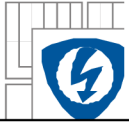
4.3 Vstupní odpor

Vstupní odpor R_1 , byl také řešen pomocí Matlabu

```
U = 230; %efektivni hodnota napeti na vstupu
R = 100; %zvoleny odpor
C = 0.0019; %kapacita kondenzatoru v meziobvodu
e = 2.71828; %Eulerova konstanta

tau = R*C; %casova konstanta
I0 = U/R; %proud v case 0

t = 0:0.01:10;
Ut = U*(1 - e.^(-t./tau)); %prubeh napeti na kondenzatoru
It = I0*e.^(-t./tau); %prubeh proudu na kondenzatoru
Pt = R*It.^2; %ztratovy vykon na odporu
At(1) = Pt(1)*0.01; %prace na odporu
for i = 2:1001
```



```
At(i) = At(i-1) + Pt(i)*0.01;
```

```
end
```

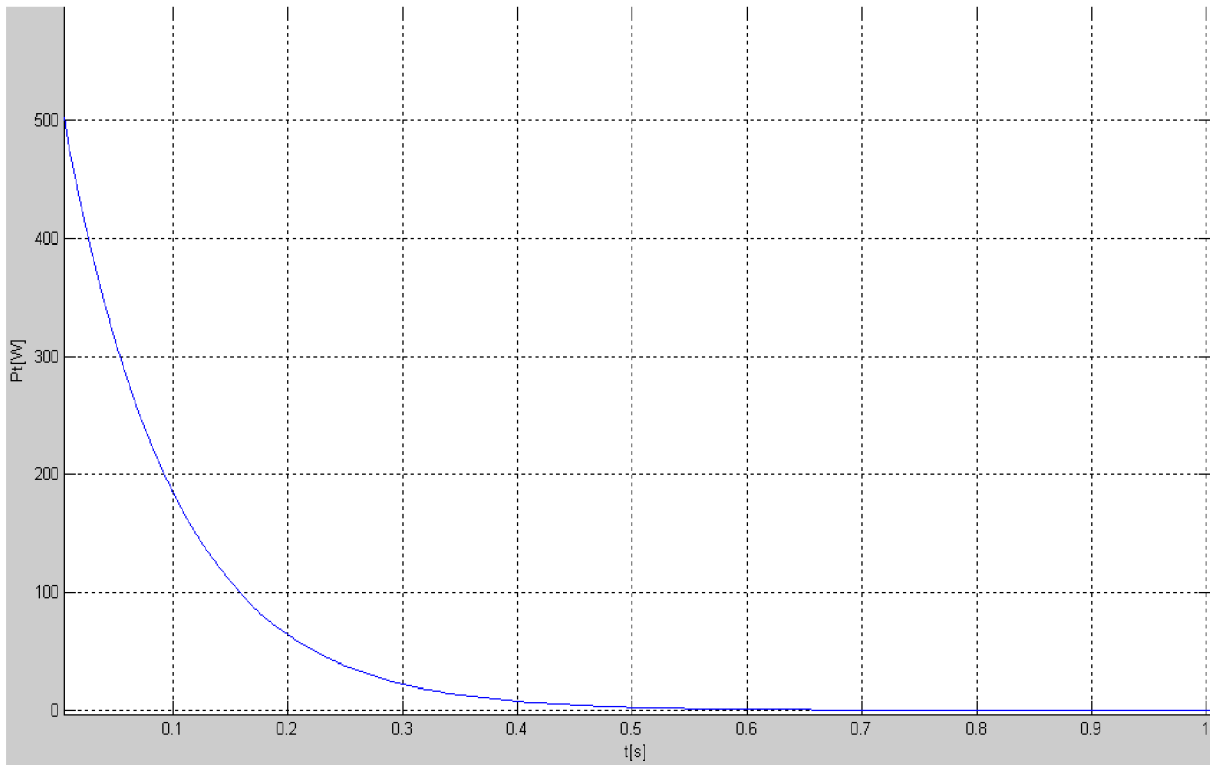
```
figure(1)
```

```
subplot(2,1,1)
```

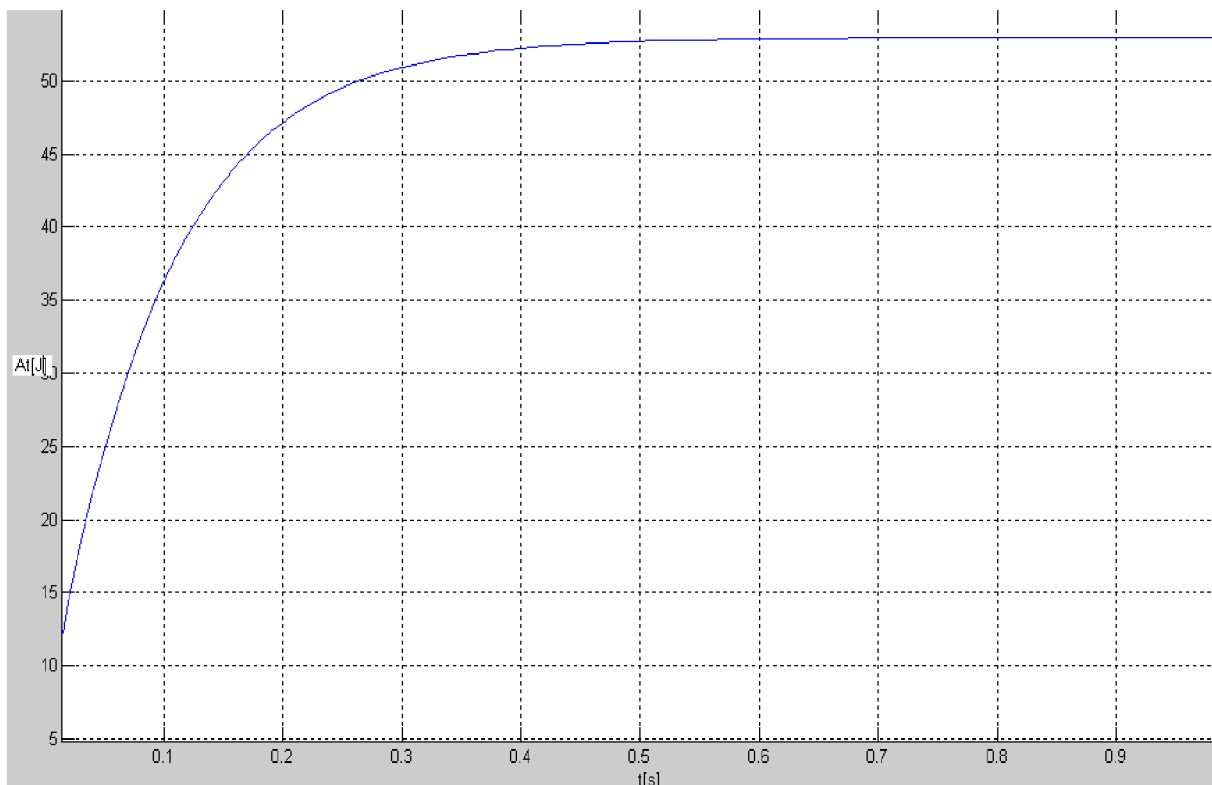
```
plot(t,Pt)
```

```
subplot(2,1,2)
```

```
plot(t,At)
```



Obrázek 4 Průběh výkonu na odporu



Obrázek 5 Průběh práce na odporu

Z poslední grafu je patrné, že maximální energie je 55J. Vzhledem k této hodnotě a k uvážení jak dlouho poteče přes odpor R1 proud byla zvolena jeho hodnota 100Ω/10W.

V zapojení je také možno využít vhodného negastoru.

4.4 Dimenzování polovodičů pro aktivní usměrňovač

Vstup: $U_f = 230V \sim, U_{max} = 325.3V$

Výstup: 350V=

Koeficient bezpečnosti: 1.5

Ze zadaných parametrů plyne, že polovodiče musí mít nejmenší závěrné napětí 388V, prvky byly dimenzovány na závěrné napětí 600V.

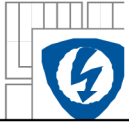
Maximální příkon aktivního usměrňovače byl plánován na 3500W

$$I = \frac{P}{U} = \frac{3500W}{230V} = 15.17A$$

$$I_{max} = 21.45A$$

Minimální proud, na který musí být polovodiče dimenzovány je 21.45 A. S přihlédnutím na větší bezpečnost zařízení byly prvky dimenzovány na 30A.

Byl zvolen integrovaný obvod, který má kromě silové části, také v integrované budiče. Jedná se o obvod FSBB30CH60B firmy Fairchild semiconductor. Podrobnější informace v příloze.



4.5 Dimenzování polovodičů pro výkonový měnič

Závěrné napětí je totožné se závěrným napětím aktivního usměrňovače (napětí meziobvodu).

Střídač byl dimenzován na maximální výkon 3000W.

$$I = \frac{P}{U} = \frac{3000W}{230V} = 13.0425A$$

Odtud plyne, že propustný proud musí být minimálně 13.0425A.

Byl zvolen stejný integrovaný obvod jako u aktivního usměrňovače. A to FSBB30CH60B firmy Fairchild semiconductor. Podrobnější informace v příloze.

4.6 Měření proudu

Pro měření proudu byl zvolen bezkontaktní snímač proudu pracující na principu Hall efektu.

Jedná se o integrovaný obvod FSH 40-P/SP600 od firmy LEM. Podrobnější informace v příloze.

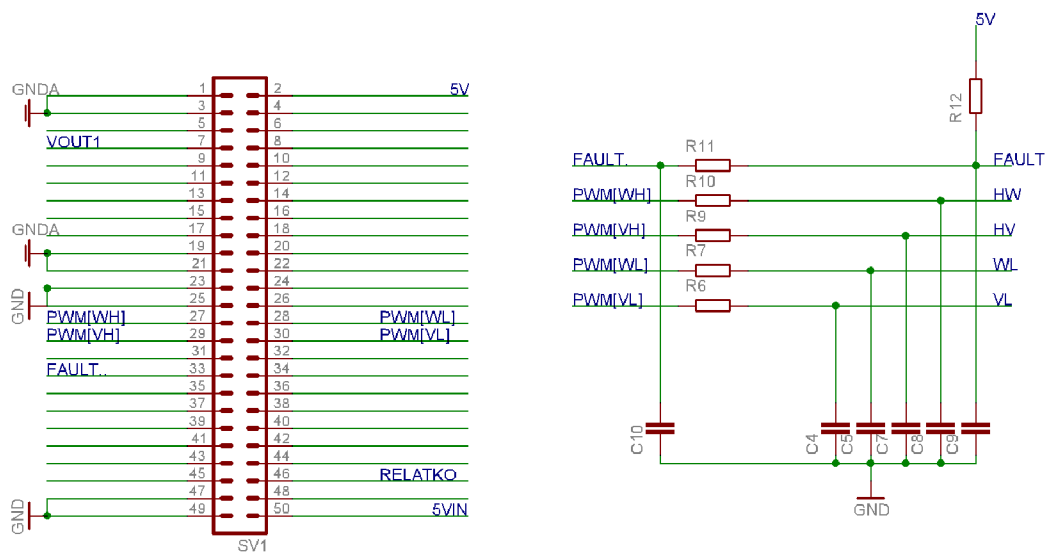
5 SCHÉMA ZAPOJENÍ A POPIS FUNKCE

Výkonová část je řešena jako dva samostatné obvody. A to aktivní usměrňovač a výkonový měnič. K tomuto řešení bylo přistoupeno, aby bylo možno využít obou zapojení i v jiných aplikacích nezávisle na sobě.

Celkové schéma výkonového měniče a aktivního usměrňovače bude součástí přílohy. V této části budou popsána jednotlivé části zapojení.

5.1 Aktivní usměrňovač

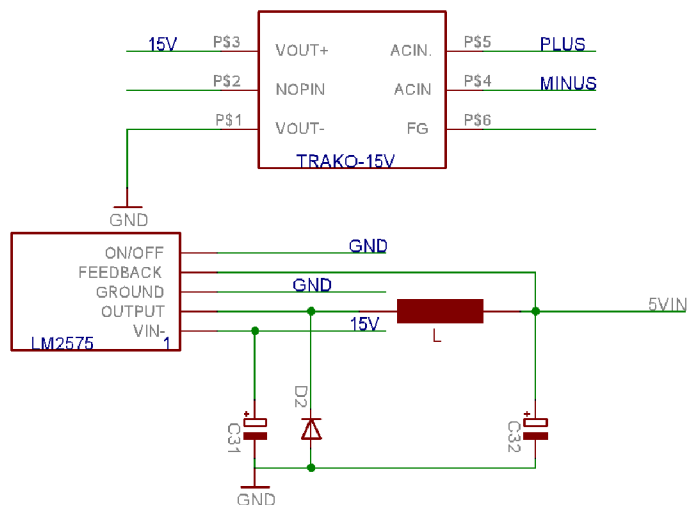
5.1.1 Vstupně výstupní komunikační část aktivního usměrňovače



Obrázek 6 Vstupně výstupní komunikační část výkonového měniče

Je určena ke komunikaci mezi řídicí jednotkou a výkonovým obvodem. Na konektor SV1 je připojeno napětí 5V pro napájení řídicí jednotky. Součástí řídicí jednotky je oddělený zdroj napětí s analogovou zemí. Podrobnější informace viz příloha. Z tohoto napětí jsou napájeni komparátory, zdroj referenčního napětí pro komparátory a snímač výstupního proudu. Dále řídicí jednotkou ovládáno relé na vstupu.

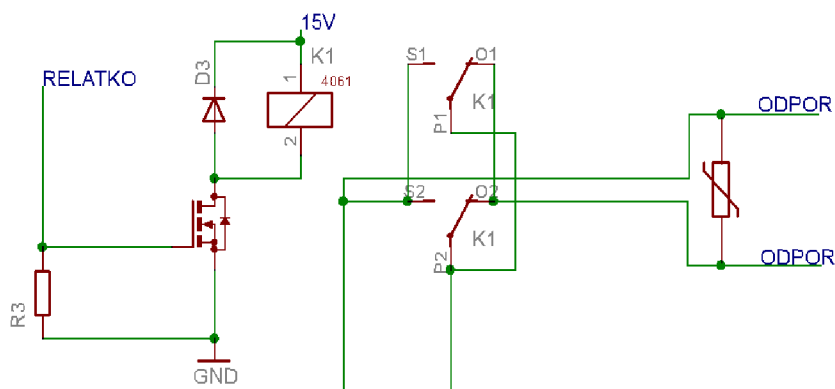
5.1.2 Napájení součástek aktivního usměrňovače



Obrázek 7 Napájení součástek aktivního usměrňovače

Napájecí část aktivního usměrňovače slouží pro napájení výkonového obvodu a řídicí jednotky. Napětí 15V je získáno za pomoci spínaného zdroje. Vstup spínaného zdroje je připojen na meziobvodu. Napěťová úroveň 5V je realizována také spínaným zdrojem. Vstupní část zdroje je připojena na výstup ze spínaného zdroje o úrovni |15V.

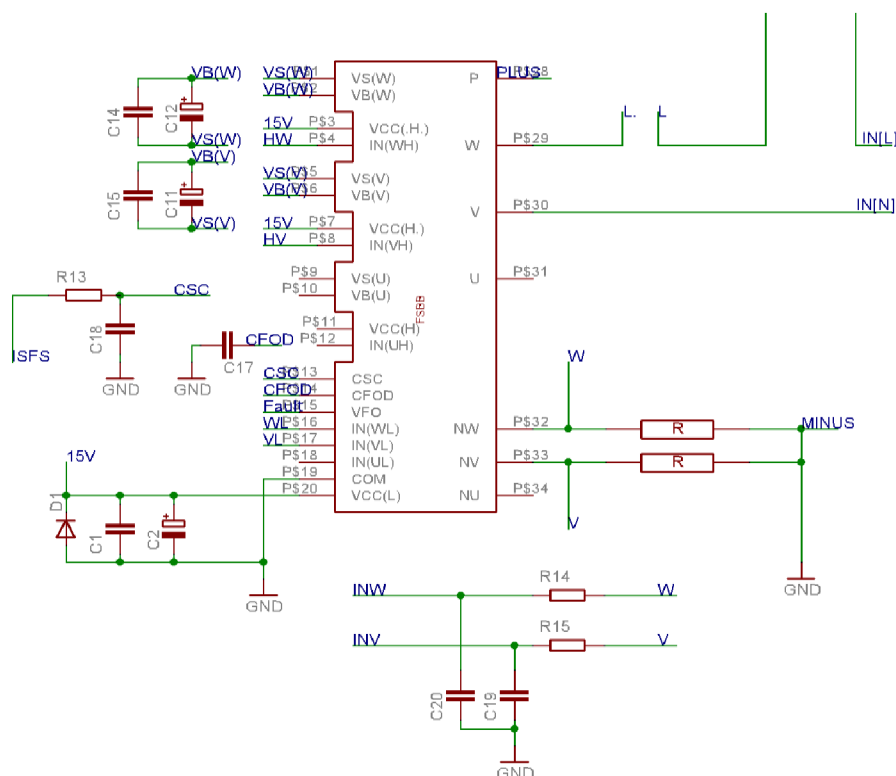
5.1.3 Vstupní výkonový obvod aktivního usměrňovače



Obrázek 8 Vstupní výkonový obvod aktivního usměrňovače

Úkolem vstupního obvodu aktivního usměrňovače je omezit proudovou špičku při sepnutí obvodu. V tomto zapojení je možno využít buď omezujícího odporu nebo negastoru. Relé po spuštění řídicí jednotky a přivedení signálu na tranzistor přemostí odpor (negastor) a proud protéká přímo do obvodu.

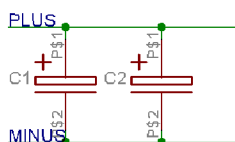
5.1.4 Výkonový obvod aktivního usměrňovače



Obrázek 9 Výkonová obvod aktivního usměrňovače

Výkonový obvod aktivního usměrňovače je realizován výkonovým integrovaným obvodem. Integrovaný obvod obsahuje jak výkonovou tak i řídicí část. Na svorku W je připojena tlumivka, která je nezbytná pro správnou funkci výkonového měniče. Více informací o tlumivce bude uvedeno v příloze. Na svorkách NW a NV jsou připojeny bočníky pro měření výstupního proudu z důvodu realizace ochrany proudového přetížení. Obvod je zapojen dle doporučeného zapojení výrobce.

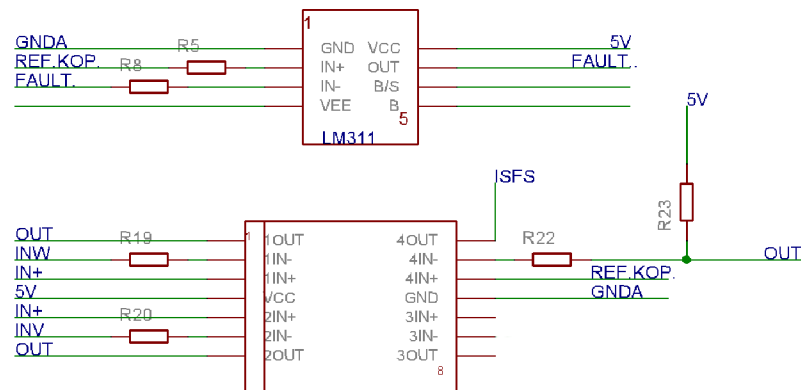
5.1.5 Stejnoseměrný meziobvod



Obrázek 10 Stejnoseměrný meziobvod

Stejnoseměrný meziobvod slouží pro akumulaci energie pro případ vykrytí proudových nárázů.

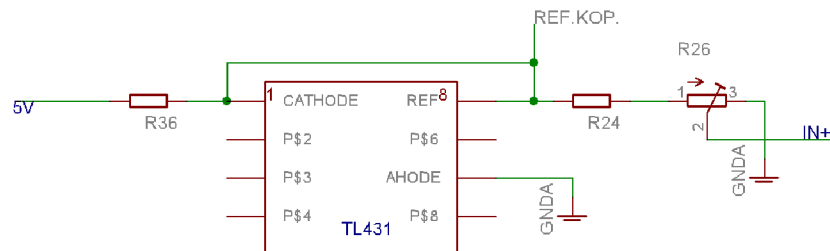
5.1.6 Pomocné obvody



Obrázek 11 Pomocné obvody

Jedná se o operační zesilovače zapojené jako komparátory. Dolní integrovaný obvod slouží pro úpravu signálů z bočníků pro hlídání proudového přetížení výkonového integrovaného obvodu. Horní integrovaný obvod slouží pro úpravu signálu chybového hlášení z výkonového integrovaného obvodu do řídicí jednotky.

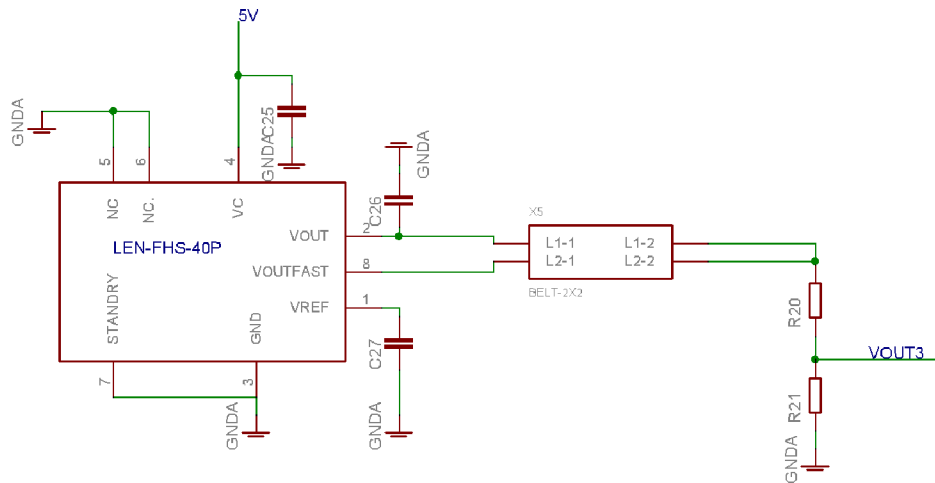
5.1.7 Zdroj referenčního napětí



Obrázek 12 Zdroj referenčního napětí

Zdroj referenčního napětí pro komparátory.

5.1.8 Obvod měření proudu

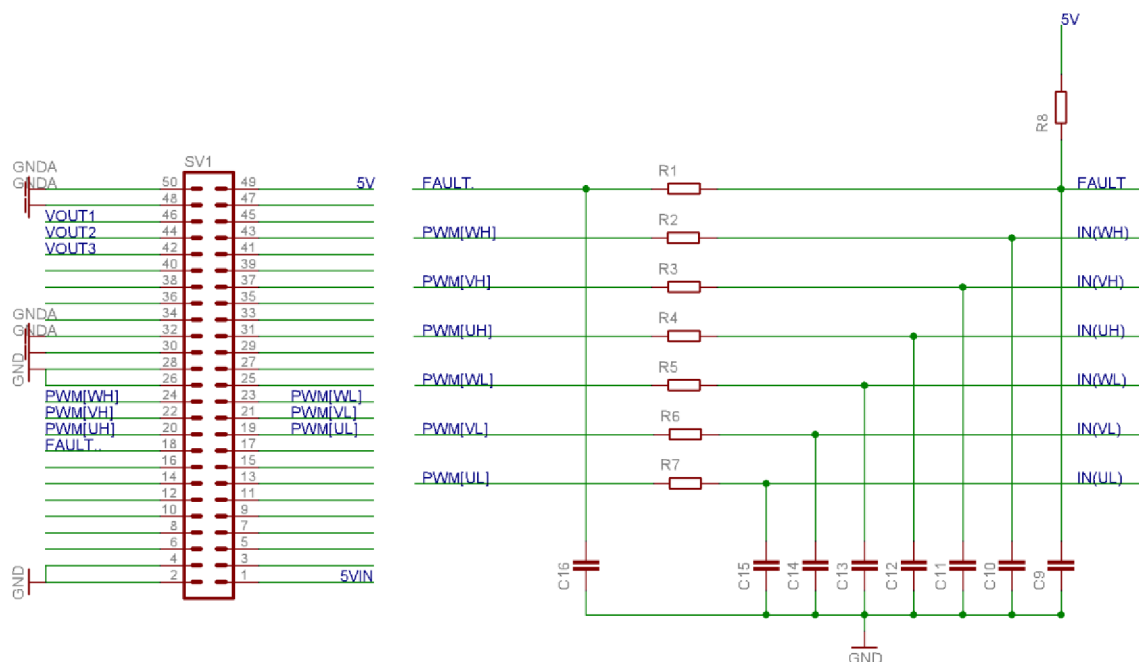


Obrázek 13 Obvod měření proudu

Obvod měření proudu je realizován pomocí bezkontaktního měření využívající hallova efektu. Integrovaný obvod nabízí dva možné výstupy, proto je zapojen switch konektor pro nastavení požadovaného výstupu. Na výstupu je zapojen dělič z důvodu napěťového přizpůsobení k řídicí jednotce.

5.2 Výkonový měnič

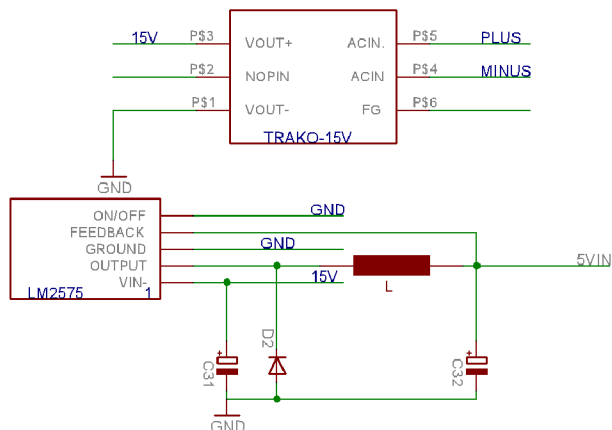
5.2.1 Vstupně výstupní komunikační část výkonového měniče



Obrázek 14 Vstupně výstupní komunikační část výkonového měniče

Vstupně výstupní komunikační část výkonového měnič má totožnou funkci jako u aktivního usměrňovače jen s tím rozdílem že u výkonového měniče je využito více komunikačních kanálů. Více kapitola 4.1.1.

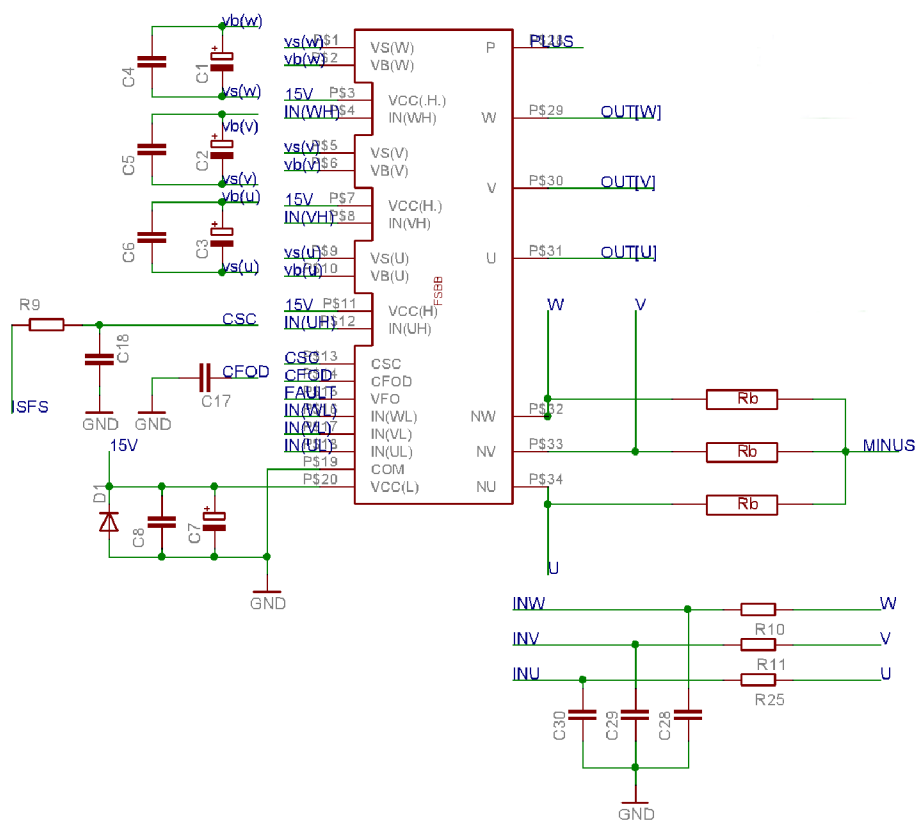
5.2.2 Napájení součástek výkonového měniče



Obrázek 15 Napájení součástek výkonového měniče.

Je realizován totožně jako u aktivního usměrňovače a plní tutěž funkci.

5.2.3 Výkonový obvod výkonového měniče

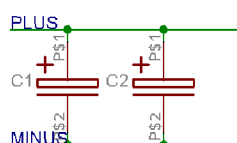


Obrázek 16 Výkonová obvod výkonového frekvenčního měniče

Výkonový obvod výkonového frekvenčního měniče je realizován stejným integrovaným obvodem jako v případě aktivního usměrňovače. Také zde je realizováno měření proudu pomocí bočníků za účelem ochrany před proudovým přetížením.

Na svorky P je připojen kladný pól meziobvodu a na svorky NW, NV, NU je přiveden záporný pól meziobvodu. Svorky W, V, U jsou výstupy jednotlivých fází. Zapojení je dle doporučení výrobce.

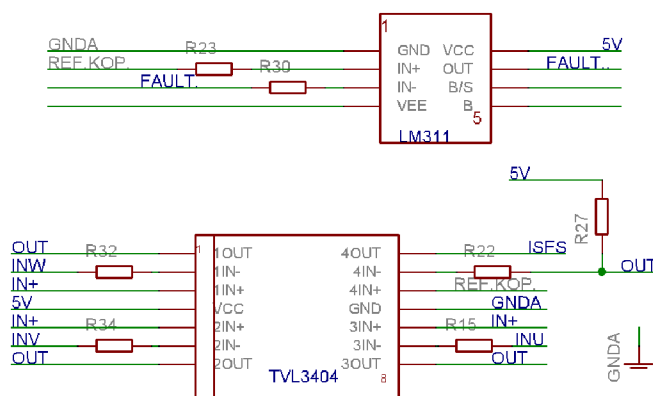
5.2.4 Stejnsměrný meziobvod



Obrázek 17 Stejnsměrný meziobvod

V zapojení plní stejnou funkci jako u aktivního usměrňovače. Více kapitola 4.1.5.

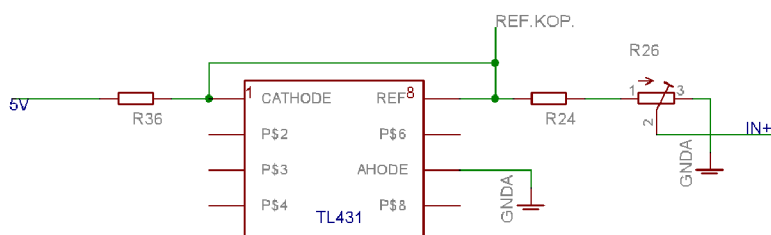
5.2.5 Pomocné obvody



Obrázek 18 Pomocné obvody

V zapojení plní stejnou funkci jako u aktivního usměrňovače. Více kapitola 4.1.6.

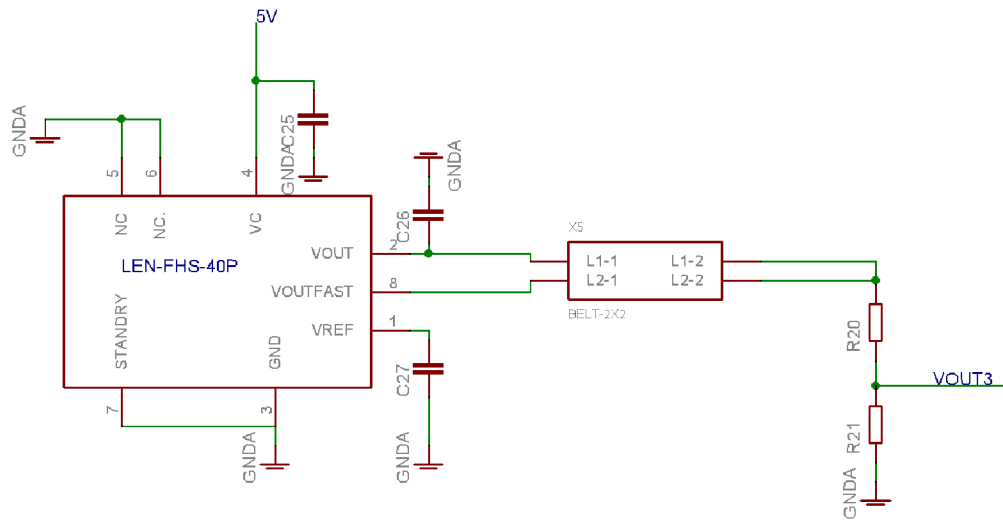
5.2.6 Zdroj referenčního napětí



Obrázek 19 Zdroj referenčního napětí

Realizován stejně jako u aktivního usměrňovače.

5.2.7 Obvod měření proudu



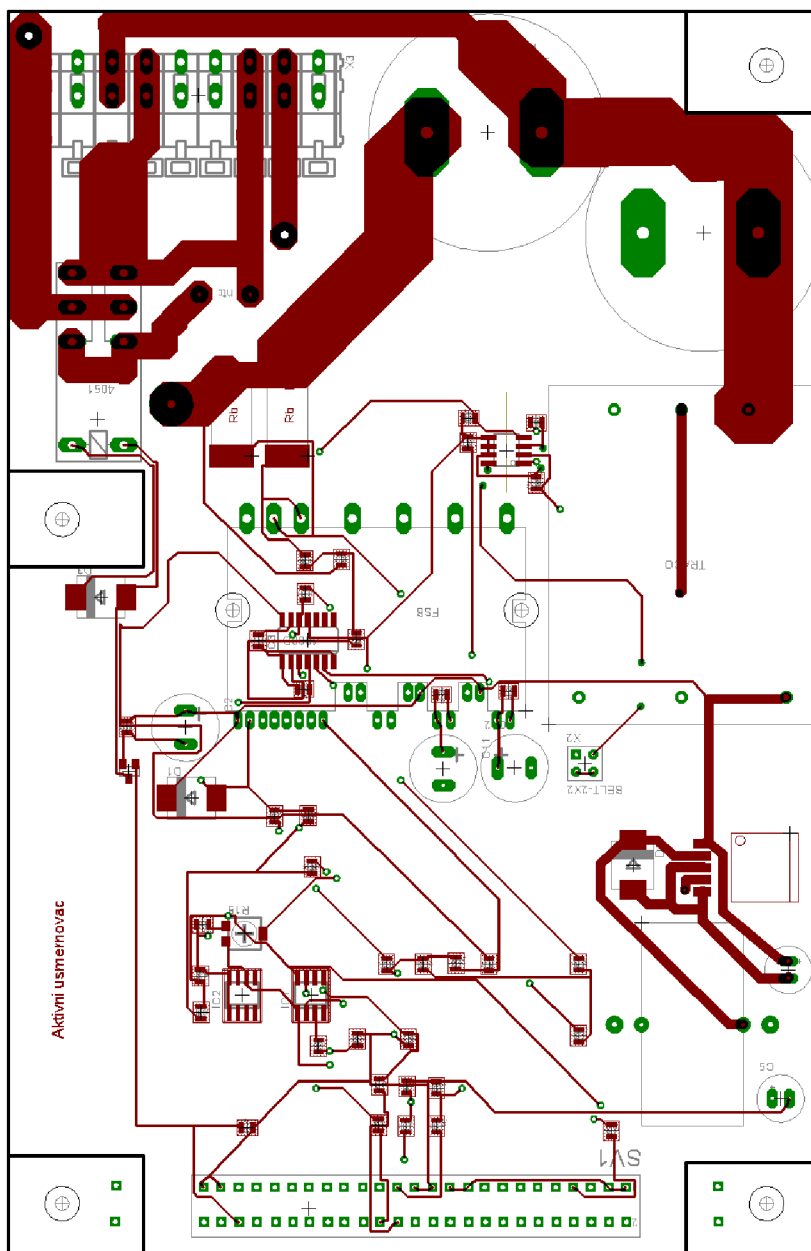
Obrázek 20 Měření proudu

Je realizován totožně jako u aktivního usměřovače. Více kapitola 4.1.8. V zapojení výkonového měniče je realizován pro každou ze tří fází.

6 DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ

6.1 Desky plošných spojů aktivního usměrňovače

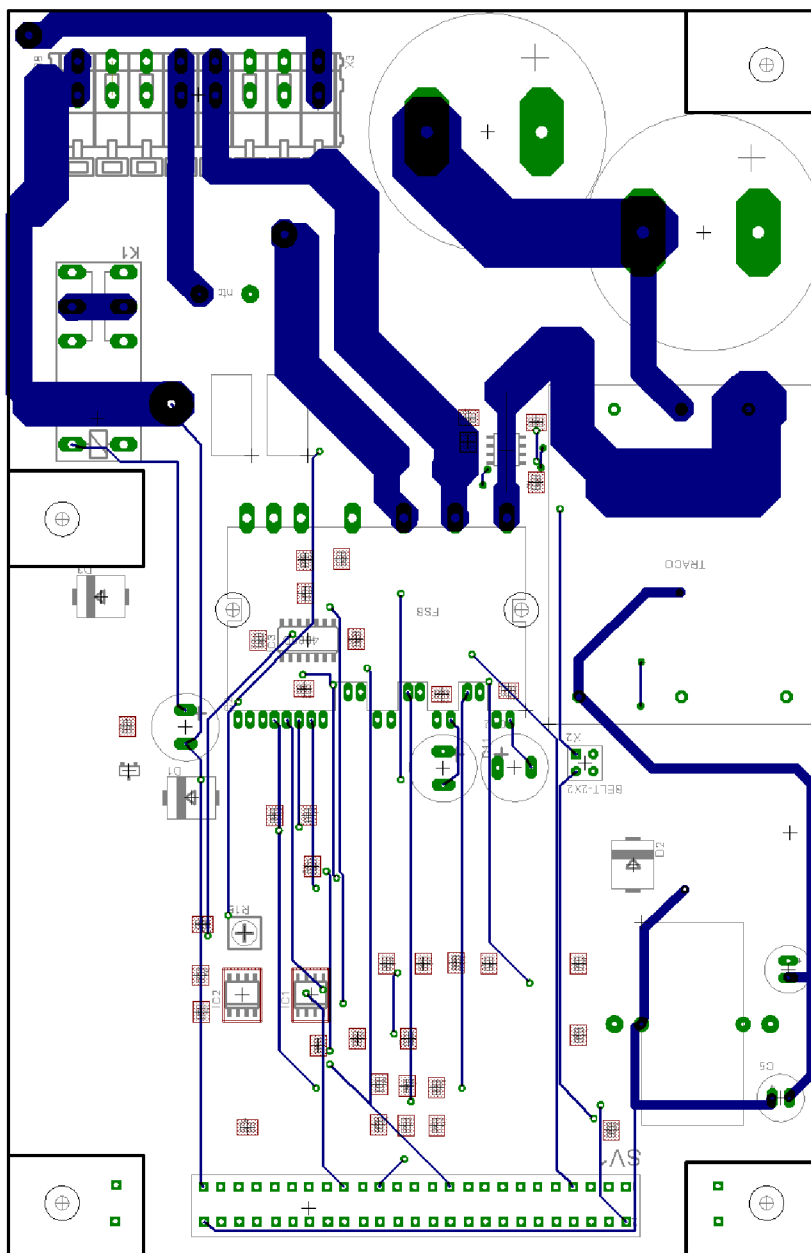
6.1.1 Top



Obrázek 21 Deska plošných spojů aktivního usměrňovače - top



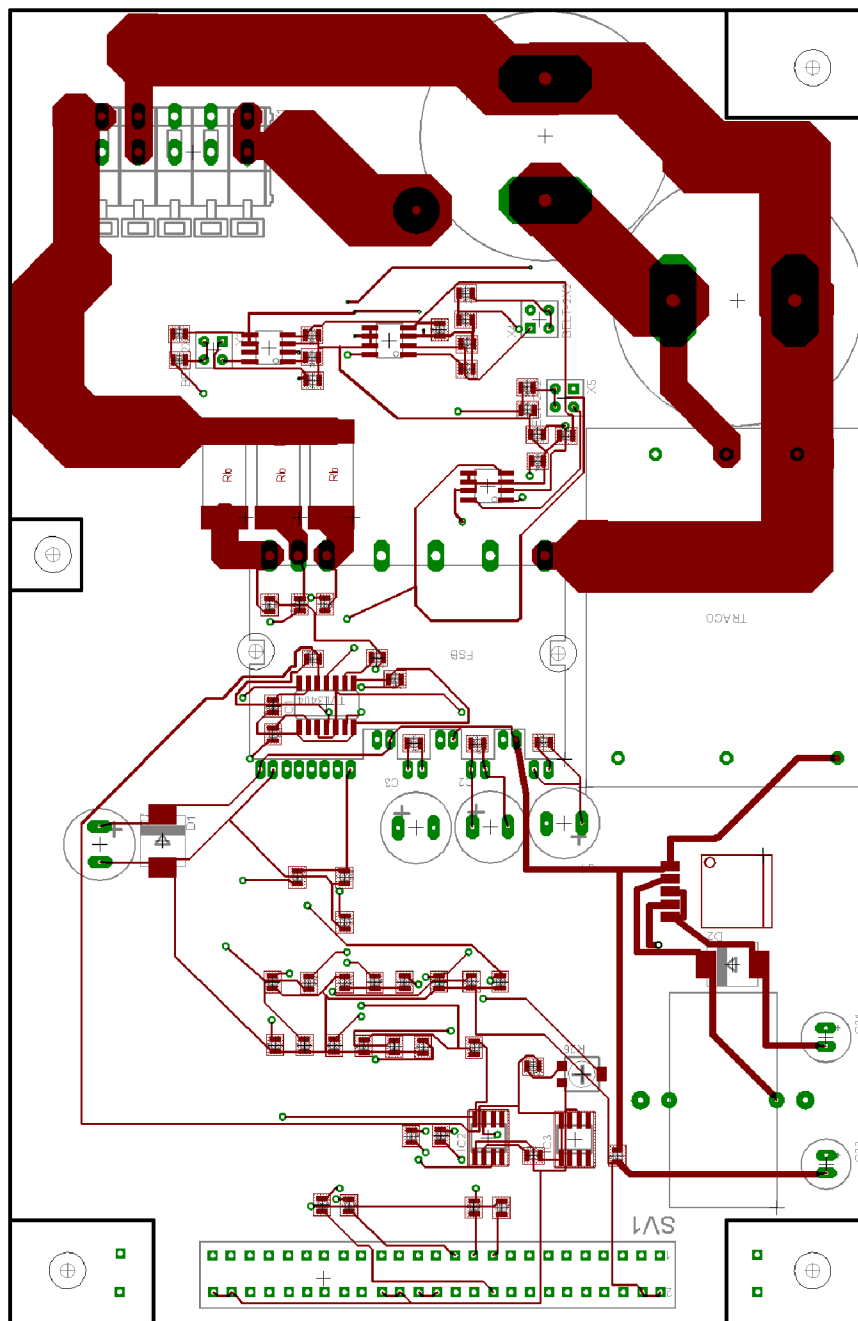
6.1.2 .Botton



Obrázek 22 Deska plošných spojů aktivního usměrňovače - botton

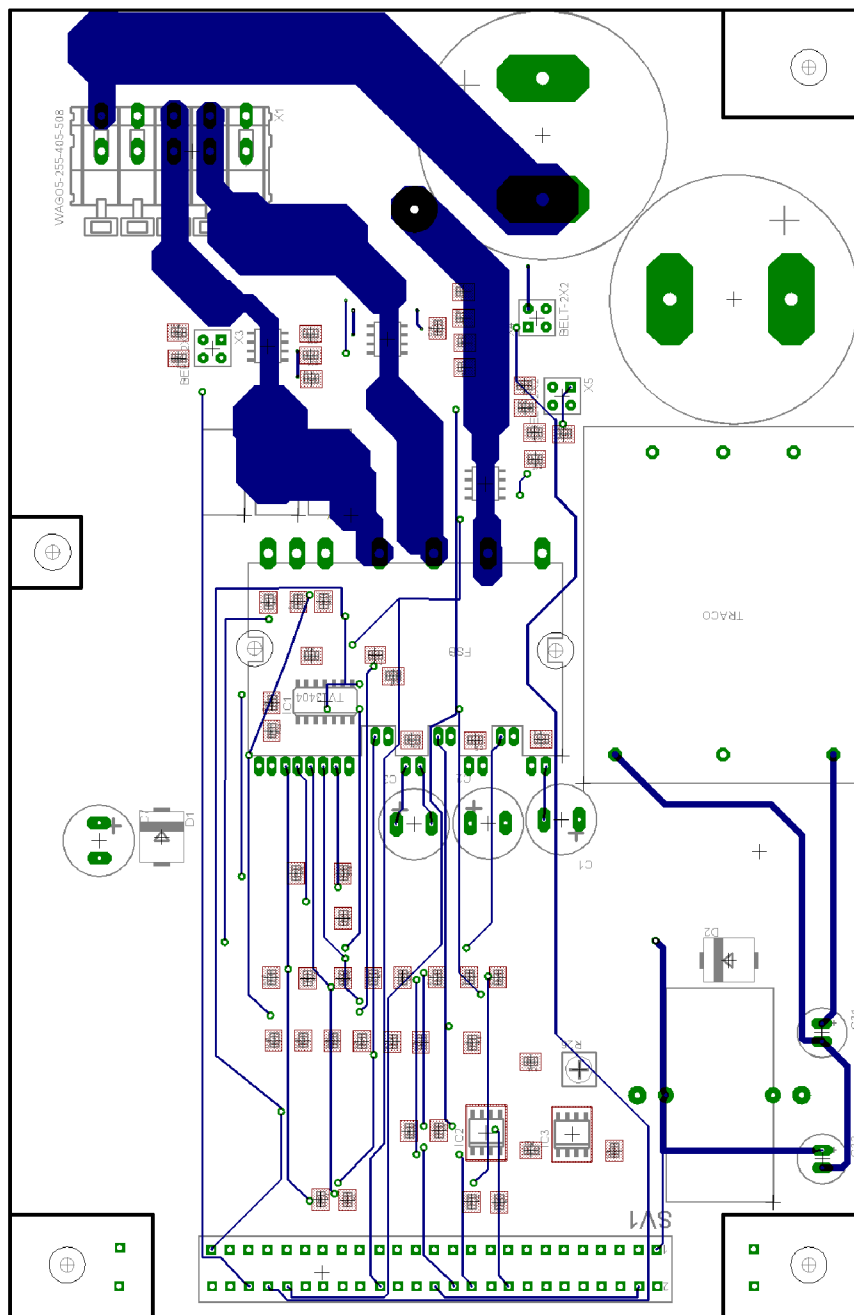
6.2 Deska plošných spojů výkonového měniče

6.2.1 Top



Obrázek 23 Deska plošných spojů výkonového měniče - top

6.2.2 Botton



Obrázek 24 Deska plošných spojů výkonového měniče - botton



7 ROZPISKA SOUČÁSTEK

7.1 Výkonový frekvenční měnič

Značka na DPS	Hodnota
R1, R2,R3,R4,R5,R6,R7,R8,R10,R11,R25	100Ω - smd - 0805
R8,R15,R22,R23,R27,R30,R32,R34	4700Ω- smd - 0805
R16,R18,R20	1600Ω- smd - 0805
R17,R19,R21	2500Ω- smd - 0805
R24	1200Ω- smd - 0805
R36	250Ω- smd - 0805
R26 - triml	4700Ω
R9	1500Ω- smd - 0805
Rb 3x	WSR HIGH Power 0,01Ω (5W)
C1,C2 - meziobvod	470μF/400V
C1,C2,C3	22μF/25V
C4,C5,C6	100nF- smd - 0805
C17	33nF- smd - 0805
C9,C10,C11,C12,C13,C14,C15,C16,C18,C22,C29,C30	1nF- smd - 0805
C19,C21,C22,C24,C25,C27	47nF- smd - 0805
C20,C23,C26	4,7nF- smd - 0805
C7	1000μ/25V
C8	1μF/25V
C31	100μF/25V
C32	330μF/25V
L	330μH/3A
D1,D2	schott dioda 1A/40V - SMC
FSBB- výkonový integrovaný obvod	FSBB30CH60B
IC2 - operační zesilovač	LM311 - SO8
IC3 - zdroj ref. Napětí	TL431 - SO8
IC1 operační zesilovač	TVL3404 - SO14
LM2575	LM2575 - TO-236(S)
TRACO	TRACOPOWER - TMS 15115
LEM - snímač proudu	FSH 40-P/SP600
WAGO - výkonový konektor	WAGO5-255-405-508
SV1 - konektor pro připojení řídicí jednotky	SLOT50



X3,X4,X5-schwitch konektor	BELT-2X2
Cladič	120x184x60 (š x d x v) mm

Tabulka 1. Rozpiska součástek pro výkonový frekvenční měnič

7.2 Aktivní usměrňovač

Značka na DPS	Hodnota
R6,R7,R9,R10,R11,R14,R15	100Ω - smd - 0805
R5,R8,R12,R19,R20,R22,R23	4700Ω- smd - 0805
R1	1600Ω- smd - 0805
R2,R3	2500Ω- smd - 0805
R17	1200Ω- smd - 0805
R16	250Ω- smd - 0805
R18 - triml	4700Ω
R13	1500Ω- smd - 0805
R 2x	WSR HIGH Power 0,01Ω (5W)
C1,C2 - meziobvod	470μF/400V
C11,C12	22μF/25V
C14,C15	100nF- smd - 0805
C17	33nF- smd - 0805
C4,C5,C7,C8,C9,C10,C18,C19,C20	1nF- smd - 0805
C16,C16	47nF- smd - 0805
C21	4,7nF- smd - 0805
C2	1000μ/25V
C1	1μF/25V
C3	100μF/25V
C6	330μF/25V
L	330μH/3A
D1,D2,D3	schott dioda 1A/40V - SMC
FSBB- výkonový integrovaný obvod	FSBB30CH60B
IC2 - operační zesilovač	LM311 - SO8
IC3 - zdroj ref. Napětí	TL431 - SO8
IC1 operační zesilovač	TVL3404 - SO14
LM2575	LM2575 - TO-236(S)
TRACO	TRACOPOWER - TMS 15115



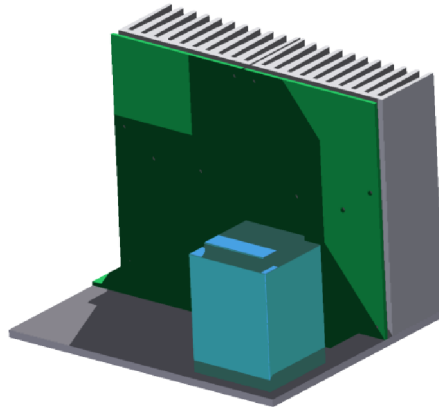
LEM - snímač proudu	FSH 40-P/SP600
WAGO - výkonový konektor	WAGO8-255-408-508
SV1 - konektor pro připojení řídicí jednotky	SLOT50
X2-schwitch konektor	BELT-2X2
Cladič	120x184x60 (š x d x v) mm
RELÉ	RELEF 4061 - 18
NTC	EPCOS S464

Tabulka 2. Rozpiska součástek pro výkonový měnič

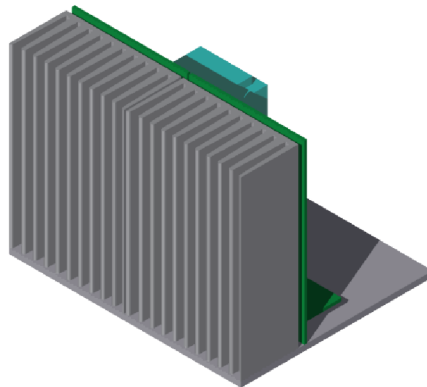
8 MECHANICKÉ USPOŘÁDÁNÍ

Mechanické uspořádání výkonového měniče naznačují níže uvedené obrázky.

Výkresová dokumentace je součástí přílohy.



Obrázek 25 Model mechanického uspořádání – pohled 1.



Obrázek 26 Model mechanického uspořádání – pohled 2.



Obrázek 27 Model mechanického uspořádání – pohled 3.



9 ZÁVĚR

V bakalářské práci byl řešen výkonový měnič pro asynchronní dynamometr. V úvodu je uvedeno, z jakých částí se skládá výkonový měnič pro asynchronní dynamometr a dále, kde je možné použít aktivní usměrňovače a výkonové měniče.

V další části byla nastíněna problematika tranzistorů a budičů, které jsou hlavním stavebním prvkem aktivních usměrňovačů a výkonových střídačů a o nárocích na ně kladených. Bylo uvedeno zapojení aktivního usměrňovače a popsány jeho jednotlivé prvky. Nastíněna jeho funkce a uvedena nutná podmínka pro jeho správnou činnost. Dále byl popsán trojfázový výkonový frekvenční měnič. Podobně jako u aktivního usměrňovače bylo uvedeno zapojení trojfázového výkonového frekvenčního měniče a popsána jeho funkce.

V dalším bodě byly specifikovány požadavky na konkrétní zapojení výkonového měniče pro asynchronní dynamometr.

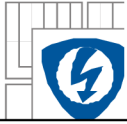
V kapitole 4. bylo řešeno dimenzování stěžejních prvků výkonového měniče.

V kapitole 5. byly popsány jednotlivé části schématu zapojení a to jak výkonového frekvenčního měniče tak aktivního usměrňovače.

V kapitole 6. jsou nastíněny návrhy desek plošných spojů pro výkonový frekvenční měnič a aktivní usměrňovač.

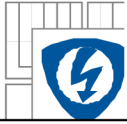
Kapitola 7 obsahuje rozpisky součástek pro obě zapojení.

Kapitola 8 je věnována mechanickému uspořádání výkonového měniče pro asynchronní dynamometr.



LITERATURA

- Pavelka J.; Čeřovský Z; Lettl J. *Výkonová elektronika*. ČVUT Praha 2007. ISBN 3-1181.400
- Patočka M.; Vybrané statě z výkonové elektroniky svazek II. E-text Brno, 2005
- Javůrek J.; Regulace moderních elektrických pohonů. Grana Publishing Praha 2003 ISBN 2-1124.909
- Vrba J. ; Výkonová elektronika 1, E-text Brno
- Vorel P., Patočka M. Budiče výkonových tranzistorů MOSFET a IGBT elektorevue [inline] [21.5.2004]
Dostupné na WWW: < <http://www.elektorevue.cz/clanky/04030/index.html> >
- Moeller Přístroje výkonové elektrotechniky Dostupné na WWW:
<<http://www.moeller.cz/priruckazapojeni/drives004.html>>



PŘÍLOHY

1. Schéma Zapojení výkonového měniče a aktivního usměrňovače
2. Katalogový list integrovaného obvodu FSBB30CH60B
3. Katalogový list integrovaného obvodu FSH 40-P/SP600
4. Dokumentace k řídicímu modulu
5. Katalogový list vstupně výstupní tlumivky
6. Výkresová dokumentace mechanického uspořádání výkonového měniče