



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

STŘÍDAČ S AKTIVNÍM USMĚRŇOVAČEM

POWER INVERTER WITH ACTIVE RECTIFIER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Daniel Dvořáček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Rubeš

BRNO 2018

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Daniel Dvořáček

ID: 173642

Ročník: 3

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Střídač s aktivním usměrňovačem

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Navrhnete výkonovou elektroniku střídače s aktivním usměrňovačem.
2. Realizujete obvody měniče dle pokynů vedoucího.
3. Ověřte funkci jednotlivých obvodů měniče.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Patočka M. Vybrané statě z výkonové elektroniky, skripta VUT FEKT Brno, 2005.
- [2] Patočka M., Výkonová elektronika, skripta VUT FEKT Brno, 2010.
- [3] Umans S. D., Fitzgerald & Kingsley's Electric Machinery, McGraw-Hill Education; 7 edition, 2013.

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 28.5.2018

Vedoucí práce: Ing. Ondřej Rubeš

Konzultant:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato práce se zabývá principem funkce, konstrukcí a možnostmi řízení asynchronních strojů. Také je zde stručně popsána problematika výkonových měničů, ze kterých frekvenční měniče vycházejí, a také je zde popsán postup návrhu silové části měniče.

Klíčová slova

Asynchronní motor, asynchronní generátor, řízení otáček, aktivní usměrňovač, střídač, pulsní šířková modulace (PWM), frekvenční měnič, LC filtr

Abstract

This thesis deals with the principle of functions, constructions and possibilities of the control of inductions machines. There is also briefly described the issue of the power transducers from which the frequency converters are coming out, as well as is described here the process of designing of the power part of the converter.

Keywords

Induction machine induction generator, speed control, active rectifier, power inverter, pulse width modulation (PWM), frequency converter, band-pass filter

Bibliografická citace:

DVOŘÁČEK, D. *Střídač s aktivním usměrňovačem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 48s.
Vedoucí práce: Ing. Ondřej Rubeš

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma Střídač s aktivním usměřovačem jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální 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 závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 28. května 2018

.....

podpis autora

Obsah

1	Úvod	1
2	Asynchronní stroje	2
2.1	Úvod do problematiky AS.....	2
2.2	Princip funkce a vznik točivého magnetického pole.....	2
2.3	Konstrukce AS.....	5
2.3.1	Statorový svazek AS	5
2.3.2	Rotor s klecí nakrátko	6
2.3.3	AS s kroužkovým motorem	7
2.4	Energetická bilance a ztráty AS.....	8
2.4.1	Rozdělení ztrát při práci AS	8
2.5	Rozdělení AS podle funkce	10
2.5.1	Asynchronní motor	10
2.5.2	Asynchronní generátor	10
2.5.3	Asynchronní brzda	10
2.6	Řízení rychlosti AS.....	10
2.6.1	Změna počtu pólových dvojic.....	10
2.6.2	Změna napětí statoru	11
2.6.3	Změna statorové frekvence.....	11
3	Výkonové měniče.....	13
3.1	Klasifikace měničů.....	13
3.2	Pulsní měniče	13
3.3	Rozdělení dle kvadrantů	13
3.4	STEP-DOWN měnič	14
3.5	Pulse Width Modulation (PWM).....	15
4	Frekvenční měniče	18
4.1	Princip a funkce frekvenčního měniče	18
5	Návrh silové části měniče	19
5.1	Dimenzování tranzistorů a zpětných diod střídače	19
5.2	Návrh tlumivky síťového LC filtru	21
5.2.1	Určení počtu závitů	22
5.2.2	Výpočet vzduchové mezery	23
5.3	Návrh kondenzátoru síťového LC filtru	26
5.4	Návrh kondenzátoru do stejnosměrného meziobvodu	26
5.5	Návrh rezistorů pro nabití kondenzátorů v stejnosměrném meziobvodu	27
5.6	Návrh chlazení měniče.....	27
5.7	Návrh měření velikosti stejnosměrného napětí v meziobvodu.....	31

5.8	Návrh desky plošných spojů.....	32
6	Oživení měniče.....	35
6.1	Oživení budiče.....	35
6.2	Konstrukce a osazení silové části	37
6.3	Oživení silové části měniče	39
7	Závěr	44
	literatura.....	45
	Přílohy	47

Seznam obrázků

Obr. 1 - Řez asynchronním strojem [6].....	2
Obr. 2 - Režimy AS [10]	4
Obr. 3 - Konstrukce asynchronního motoru [5].....	5
Obr. 4 - Statorový svazek [9]	6
Obr. 5 - Rotor s klecí nakrátko [7]	7
Obr. 6 - Řez AS s vinutým rotorem [11].....	8
Obr. 7 - Schéma AS s vinutým rotorem [8]	8
Obr. 8 - Ztráty asynchronního motoru [3].....	9
Obr. 9 - Průběhy veličin při frekvenčním řízení AS [13].....	12
Obr. 10 - Režim zátěže v kvadrantech V-A roviny [14]	14
Obr. 11 - STEP-DOWN měnič [14]	15
Obr. 12 - Šířkově pulsní řízení napětí [13]	16
Obr. 13 - Princip PWM [13]	16
Obr. 14 - Modulátor PWM [14]	17
Obr. 15 - Frekvenční měnič [17].....	18
Obr. 16 - Frekvenční měnič s aktivním usměrňovačem.....	19
Obr. 17 - Zvlnění proudu	21
Obr. 18 - Průběh ztrát v čase.....	29
Obr. 19 - Vliv φ na ztráty	30
Obr. 20 - Tepelné schéma tranzistorového modulu	31
Obr. 21 - Návrh DPS silové části	33
Obr. 22 - Schéma budiče	34
Obr. 23 - Osazení budiče.....	35
Obr. 24 - Ověření správné funkce budiče.....	36
Obr. 25 - Konstrukce silové části měniče	37
Obr. 26 - Silová část, pohled zepředu	38
Obr. 27 - Silová část, pohled zezadu.....	38
Obr. 28 - Ověření funkce budiče se silovou částí měniče.....	39
Obr. 29 - Měření pod napětím se zátěží.....	40
Obr. 30 - Měření pod napětím se zátěží, pracoviště.....	40
Obr. 31 - Napětí gate-emitor, měření se zátěží	41
Obr. 32 - Detail náběžné hrany napětí gate-emitor	42
Obr. 33 - Detail sestupné hrany napětí gate- emitor	42
Obr. 34 - Detail náběžné hrany, bez indukčnosti	43
Obr. 35 - Detail sestupné hrany, bez indukčnosti	43
Obr. 36 - Schéma zapojení silové části měniče	47
Obr. 37 - Schéma zapojení tranzistorových modulů	48

1 ÚVOD

Tato práce vznikla ve smyslu současného trendu, který je cítit téměř v každém odvětví lidského počínání. Současným trendem je myšlena neustálá inovace, růst a zejména při výrobě strojů je kladen nemalý důraz na univerzálnost, vysokou účinnost, bezúdržbovost, dlouhou životnost a nízké náklady na provoz.

Je také stále diskutovanějším tématem široké veřejnosti růst cen energií a využívání alternativních zdrojů energie, tudíž je nasnadě se zamyslet nad možnostmi dostupných řešení k vlastním nezávislým zdrojům elektrické energie.

Drtivou většinu těchto dnes požadovaných standardů splňuje v této práci popsany asynchronní stroj s frekvenčním měničem. Asynchronní stroje s kotvou nakrátko jsou téměř bezúdržbové a při správném provozování mají dlouhou životnost. Na vysoké hodnotě účinnosti, tudíž i nízkých nákladů na provoz se výrazně podílí frekvenční měnič. Ne příliš typickou aplikací je soustava, která dokáže pracovat jednak jako motor, tak i jako generátor, což je zajištěno aktivním usměrňovačem, který vyzdvihuje univerzálnost této soustavy.

Jednou z nevýhod asynchronního stroje je, že pracují s lepší účinností při nižším napětí a nižším výkonu, než jsou jmenovité hodnoty sítě. Tento problém řeší již zmíněný měnič, který je schopen měnit provozní stavy stroje a generátor bude schopen pracovat daleko efektivněji, což potlačuje tuto nevýhodu.

V této práci je tedy popsána problematika asynchronních strojů, frekvenčních měničů a v neposlední řadě je zde vypracován návrh silové části měniče s následným oživením dílčích částí.

2 ASYNCHRONNÍ STROJE

Asynchronní stroje (dále jen AS) tvoří velkou část elektrických strojů. Jedná se o nejrozšířenější elektromotory na střídavý proud v elektrotechnice a jejich vynálezcem je Nikola Tesla, který je i vlastníkem prvního patentu [1].

2.1 Úvod do problematiky AS

Asynchronní stroje jsou tvořeny především magnetickým obvodem. Magnetický obvod se skládá z rotoru, který je zde jako kotva, a statoru jako buzení stroje. Tyto dva obvody jsou od sebe rozděleny malou vzduchovou mezerou, která se svou šířkou pohybuje od zlomků až po jednotky milimetrů.

Stator je nejčastěji tvořen třífázovým vinutím, ale není výjimkou provedení jednofázové. Rotorové vinutí je buď v používanější podobě klece nakrátko nebo v provedení vinutého (kroužkového) rotoru [1].

Asynchronní stroje jsou, co se týče konstrukce, velice jednoduché stroje, pyšní se vysokou spolehlivostí, nízkou cenou a malou poruchovostí. Další výhodou je, že AS mají poměrně široký rozsah otáček. Výkonově se AS pohybují od jednotek wattů až po desítky MW a pro otáčky se pohybují opět od jednotek za minutu až po špičkové hodnoty $100\,000\text{ min}^{-1}$. Asynchronní stroje můžeme také znát pod názvem indukční stroje, protože pracují na principu elektromagnetické indukce, podobně jako transformátory [2].



Obr. 1 - Řez asynchronním strojem [6]

2.2 Princip funkce a vznik točivého magnetického pole

Třífázové vinutí je připojeno ke zdroji střídavého napětí. Proud prochází statorovým vinutím a vytváří otáčivé magnetické pole. Díky časové změně magnetického pole se indukuje ve vinutí rotoru spojeného nakrátko elektrický

proud. Tento proud, který je ve vinutí rotoru, opět vytváří magnetické pole, které působí na magnetické pole statoru, tudíž zde vzniká tažná síla a rotor se začne vzhledem ke statoru otáčet. Z toho jasně vyplývá, že otáčky rotoru asynchronního motoru nemohou dosáhnout otáček synchronních, protože by se v rotorovém vinutí neindukovalo žádné napětí, tudíž žádný proud, a ani tažná síla, proto také název „asynchronní motor“ – rotor se otáčí asynchronně vůči poli statoru[1].

Zpoždování rotoru za magnetickým polem statoru nazýváme pojmem skluz. Čím větší bude rozdíl mezi otáčkami rotoru a magnetického pole statoru, tím bude skluz větší a tím budou vyšší hodnoty proudů ve vinutí rotoru. Pokud má stroj střídavým polem vybuzené magnetické pole o jednom severním a jednom jižním pólu (jedné pólové dvojice), což je nejjednodušší případ, odpovídá doba jednoho kmitu otočení osy magnetického pole o 360° , z čehož vyplývá, že jestli n_s jsou otáčky za minutu, pak $n_s/60$ jsou otáčky za sekundu. V takovém případě platí [4]:

$$f = \frac{n_s}{60} \quad (1)$$

nebo

$$n_s = 60 \cdot f \quad (2)$$

kde

f – kmitočet statorového proudu [Hz]

n_s – synchronní otáčky stroje [min^{-1}]

Statorové vinutí může být navrženo tak, že vznikne hned několik pólových dvojic magnetického pole. Pokud vznikne p pólových dvojic magnetického pole, budou při stejném kmitočtu p -krát menší otáčky, neboli osa magnetického pole se otočí o 360° za p dob kmitů [3]. Proto:

$$n_s = \frac{f \cdot 60}{p} \quad (3)$$

nebo

$$f = \frac{n_s \cdot p}{60} \quad (4)$$

Skluz asynchronního motoru je tedy [4]:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 \quad (5)$$

n – otáčky rotoru [min^{-1}]

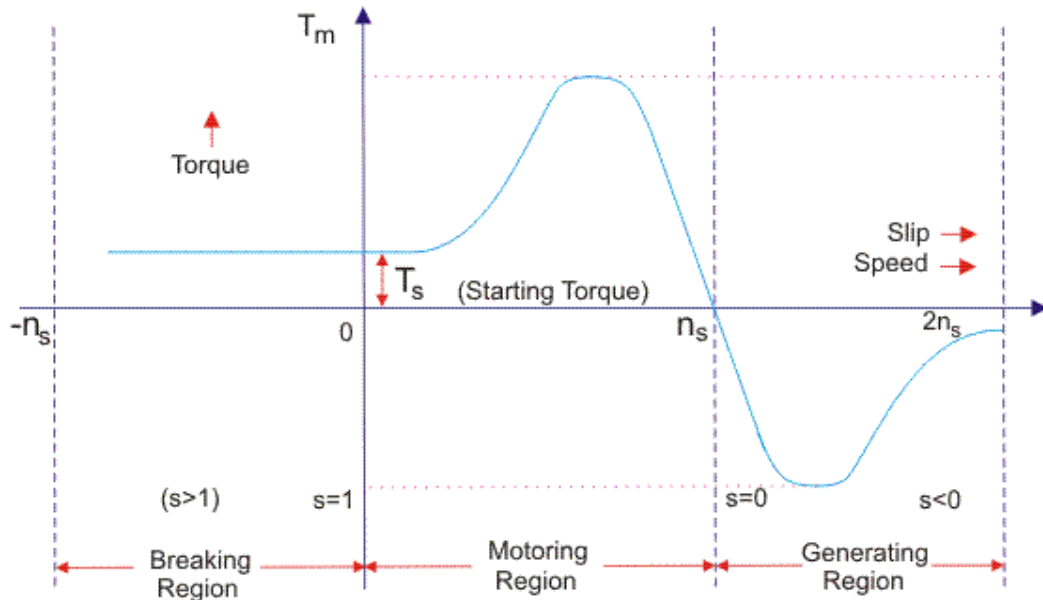
s – skluz AS [%]

Otáčky rotoru stroje lze tedy vypočíst jako [4]:

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} \cdot (1 - s) \quad (6)$$

nebo také:

$$n = n_s \cdot (1 - s) \quad (7)$$



Obr. 2 - Režimy AS [10]

Breaking region – oblast brzda, *Motoring region* – oblast motorického režimu, *Generating region* – oblast generátorového režimu, *Slip* – skluz, *Speed* – otáčky, *Torque* – točivý moment stroje, *Starting Torque* – počáteční točivý moment

s.....	skluz	[%]
n_s	synchronní otáčky	[min^{-1}]
T_s	záběrný točivý moment	[N.m]
T_m	jmenovitý moment	[N.m]

Pro výpočet momentu stroje je třeba počítat s úhlovou rychlostí. Je tedy zřejmé, že musíme dbát na správný rozměr veličin v rovnici [4]:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \quad (8)$$

ω	úhlová rychlost AS	[$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$]
n	otáčky AS	[min^{-1}]

kde moment AS vypočteme jako:

$$M = \frac{P_{mech}}{\omega} \quad (9)$$

M.....moment AS [N.m]

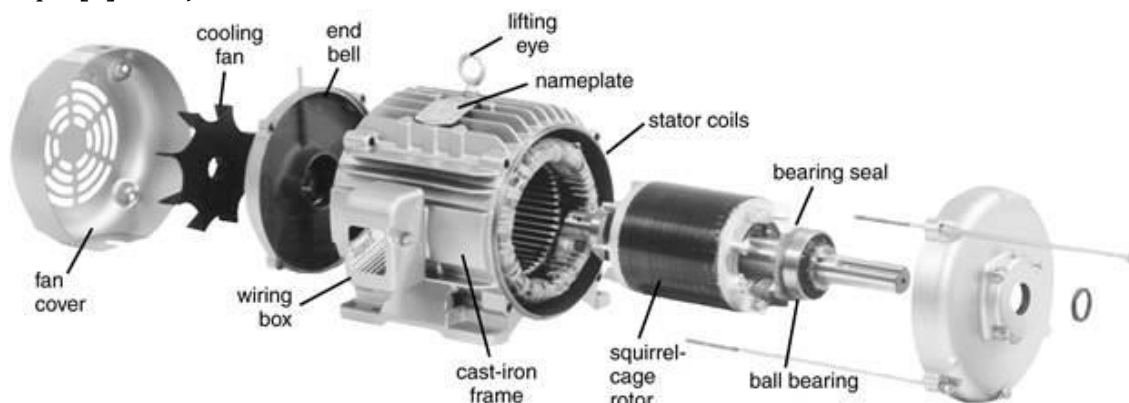
P_{mech} ...výkon na hřídeli AS [W]

2.3 Konstrukce AS

Základní konstrukční části asynchronních motorů tvoří rám stroje, ve kterém je nalisován statorový svazek, jehož součástí je statorové vinutí, dále pak rotor uložený na dvojici ložisek. Vše je uzavřeno v rámu pomocí dvou ložiskových štítů.

Součástí je i ventilátor, který je pevně uložen na hřídeli rotoru, s krytem ventilátoru. V rámu stroje je též svorkovnice pro snadné zapojení stroje.

Geometrické a prostorové vlastnosti kostry a ložiskových štítů se musí vhodně zvolit vzhledem k účelnému chlazení statorových vinutí a samotného magnetického obvodu, zkrátka všech částí, kde vznikají ztráty v podobě jouleova tepla[1]. Vše je názorně zobrazeno na Obr. 3.



Obr. 3 - Konstrukce asynchronního motoru [5]

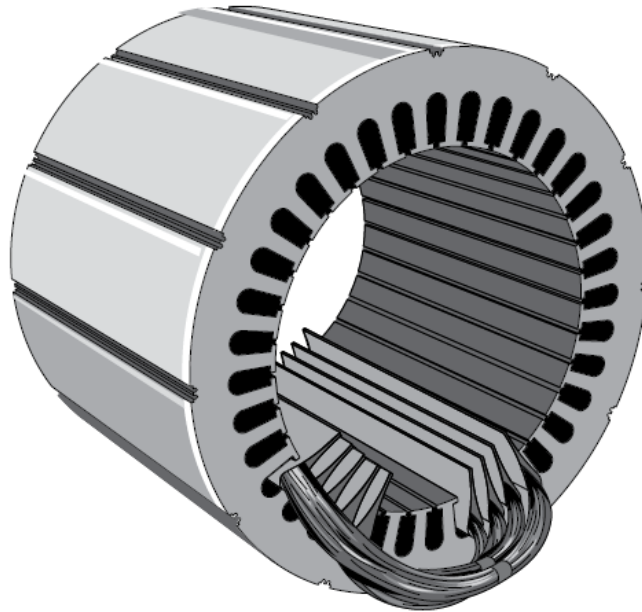
fan cover – kryt ventilátoru, *cooling fan* – ventilátor, *end bell* – ložiskový štít, *wiring box* – svorkovnice, *lifting eye* – závěsné oko, *nameplate* – štítek stroje, *cast-iron frame* – litinový rám (kostra), *stator coils* – cívka statoru, *squirrel-cage rotor* – klec rotoru, *bearing seal* – těsnění ložiska, *ball bearing* – kuličkové ložisko [6]

2.3.1 Statorový svazek AS

Statorový svazek je nepohyblivá část magnetického obvodu. Je složen z elektrotechnických plechů ve tvaru mezikružít. Plechy se válcují za studena na určitém tloušťku a též jsou v nich připraveny otvory pro vinutí. Naskládáním plechů na sebe

je vytvořen svazek ve tvaru dutého válce, na jehož vnitřním odvodu vzniknou díky otvorům podélné drážky[1].

Do drážek se poté navinou statorová vinutí. Konce a začátky statorových vinutí jsou poté vyvedeny do svorkovnice na rámu stroje. Svorkovnice bývá umístěna přímo na vrchní části rámu a je konstrukčně řešena tak, aby se mohla otočit až o 90° pro co možná nejideálnější připojení vodičů [1][3].



Obr. 4 - Statorový svazek [9]

2.3.2 Rotor s klecí nakrátko

Rotor je sestaven podobně jako statorový svazek. Opět je skládaný z elektrotechnických plechů, které mají otvory na vnějším obvodu. Po naskládání plechů na sebe ve vzniklých drážkách se poté tlakovým litím hliníku vytvoří klec se spojovacími kruhy nakrátko, popř. i s lopatkami ventilátoru.

Takový rotorový svazek je nalisován na hřídel stroje, kde je také umístěn ventilátor, který plní funkci aktivního chlazení [1].



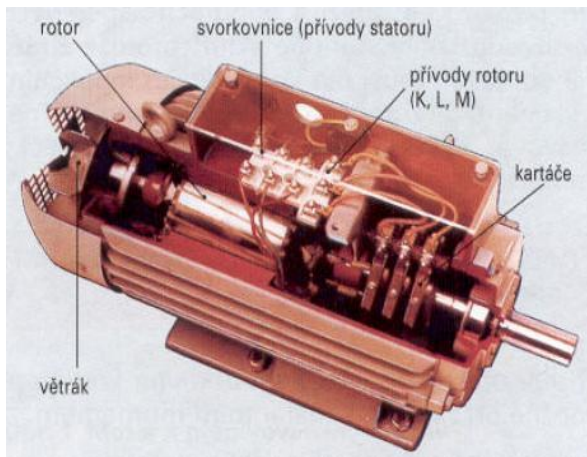
Obr. 5 - Rotor s klecí nakrátko [7]

2.3.3 AS s kroužkovým motorem

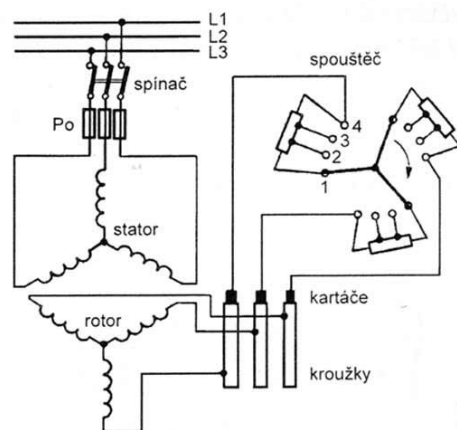
Toto konstrukční řešení se dnes již příliš nevyskytuje kvůli snadnější výrobě a nižší ceně rotorů spojených nakrátko, nicméně je kroužkové provedení vhodné pro velké stroje s velkými výkony, kde je nutno řídit otáčky a proudový ráz při spuštění pomocí rezistoru zařazeného do obvodu rotoru.

Obvod rotoru je namísto klece nakrátko tvořen trojfázovým vinutím navinutém v drážkách rotoru. Zpravidla je toto vinutí spojeno do hvězdy a konce jsou vyvedeny na kroužky stroje, které jsou izolovaně upevněny na hřídeli rotoru. Na kroužky dosedají uhlíkové kartáče a ty jsou spojeny s třemi rezistory o stejné ohmické hodnotě, popř. reostaty pro omezení proudového rázu při spouštění motoru nebo řízení otáček.

Tyto stroje bývají doplněny o zařízení, které po rozběhu motoru spojuje kroužky nakrátko, a odpor rotoru je z obvodu vyřazen. Tato zařízení se nazývají spojovač nakrátko a odklápěč kartáčů. Odklopením kartáčů se snižuje opotřebení kartáčů a snižují se i ztráty[1].



Obr. 6 - Řez AS s vinutým rotorem [11]



Obr. 7 - Schéma AS s vinutým rotorem [8]

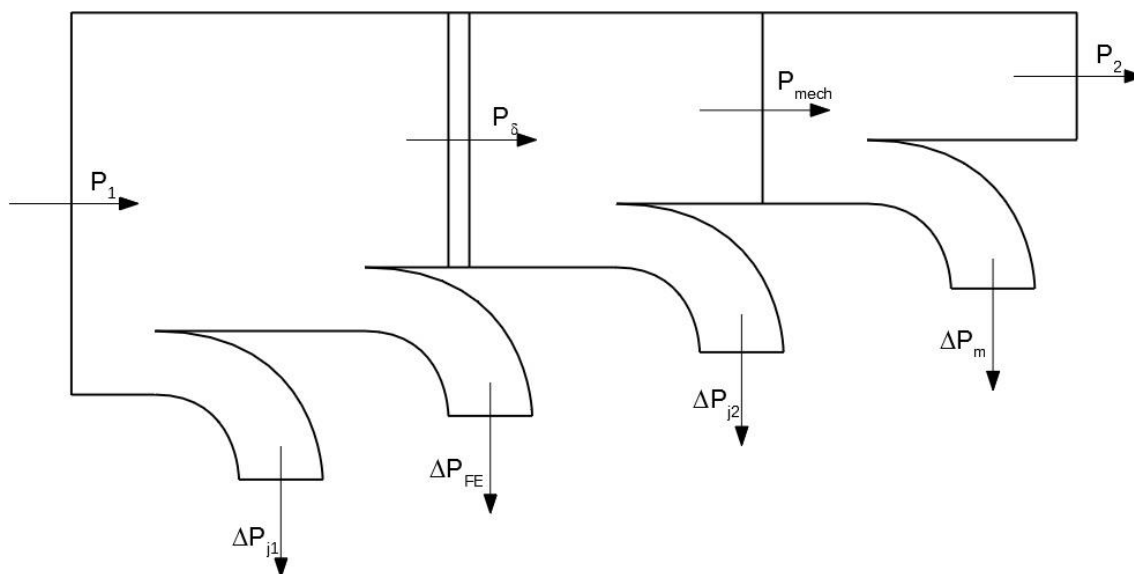
2.4 Energetická bilance a ztráty AS

Z výše popsaného je jasné, že AS pracuje na principu přeměny elektrické energie na mechanickou, a ze zákona o zachování energie zase vyplývá, že energie vstupní je stejná jako výstupní. V našem případě, ať už je vstupní a výstupní energií energie elektrická či mechanická, ovšem zjistíme, že si vstupní a výstupní energie nejsou rovny. Tato nerovnost se dá jednoduše vysvětlit, a to tím, že část elektrické energie se přemění v teplo, jedná se tedy o jouleovy ztráty[4].

2.4.1 Rozdělení ztrát při práci AS

1. Elektrické ztráty vyvolané průchodem proudu vodiči vinutí statorového svazku ΔP_{j1}
2. Magnetické ztráty způsobené vířivými proudy a hysterezí ve feromagnetických částech stroje, které jsou vystaveny střídavému magnetickému poli ΔP_{FE}
3. Elektrické ztráty vyvolané průchodem proudu rotorovým vinutím ΔP_{j2}
4. Mechanické ztráty vzniklé třením v ložiskách (popř. na kartáčích) a ztráty ve ventilátorech stroje ΔP_m

Všechny tyto ztráty ovlivňují oteplení stroje a to je důvod pro návrh správného a rovnoměrného chlazení všech částí stroje. Při překročení maximální dovolené teploty různých částí, která se pohybuje v rozmezí od 100°C do 150°C, může dojít ke snížení izolačních i mechanických vlastností vedoucím k nenávratnému poškození stroje [4].



Obr. 8 - Ztráty asynchronního motoru [3]

P_1	elektrický výkon odebraný ze sítě (příkon)	[W]
ΔP_{j1}	ztráty ve vinutí statorového svazku	[W]
ΔP_{FE}	ztráty v železe statorového svazku	[W]
ΔP_{j2}	ztráty ve vinutí rotoru	[W]
P_δ	výkon ve vzduchové mezeře	[W]
P_{mech}	mechanický výkon stroje	[W]
ΔP_m	mechanické ztráty stroje	[W]
P_2	výkon na hřídeli stroje	[W]

Účinnost AS se pak vypočítá jako podíl výkonu dodaného do stroje a výkonu odebíraného ze stroje [4]. Druh dodávaného a odebíraného výkonu se liší podle funkce AS [4]. Podrobnější rozdělení je popsáno v kapitole 2.5 Rozdělení AS podle funkce.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 \quad (10)$$

η	účinnost AS	[%]
P	příkon AS	[W]
P_1	výkon AS	[W]

2.5 Rozdělení AS podle funkce

Asynchronní stroj běžně pracuje ve třech režimech: motor, generátor a brzda. Můžeme se setkat i s provedením indukčních měničů frekvence nebo s různým speciálním provedením strojů (stopmotory, indukční spojky aj.)[1].

2.5.1 Asynchronní motor

Drtivá většina použití AS jsou v provedení motorů. V motorickém režimu se elektrická energie přivedená na svorky asynchronního stroje mění na mechanickou. Jakým způsobem se tak děje, je vysvětleno v kapitole: 2.2 Princip funkce a vznik točivého magnetického pole[1].

2.5.2 Asynchronní generátor

Pokud stroj mění mechanickou energii v elektrickou, jedná se o generátor. AS pracuje v generátorovém režimu, pouze pokud otáčky rotoru mají hodnotu vyšší, než jsou otáčky synchronní [2], což je dobře vidět na Obr. 2.

2.5.3 Asynchronní brzda

Nepříliš časté použití je režim brzda, známe také jako brzdění protiproudem. Toto brzdění je vyvoláno změnou směru otáčení magnetického pole statoru. Takové brzdění je velice efektivní, ale bohužel velmi nevhodné, protože veškerá energie vynaložená na brzdění se přemění v teplo[2].

2.6 Řízení rychlosti AS

Pro rychlost motoru platí rovnice 6 nebo 7 a z těchto rovnic plynou tyto možnosti řízení rychlosti [13]:

- a) změnou počtu pólových dvojic – změna rychlosti probíhá stupňovitě
- b) změnou skluzu, který se dá měnit změnou napětí statoru nebo rotorového odporu – změna rychlosti probíhá plynule
- c) změnou statorové frekvence – změna rychlosti probíhá plynule

2.6.1 Změna počtu pólových dvojic

Různý počet pólových dvojic asynchronního motoru může být tvořen dvěma a více samostatnými vinutími nebo změnou ve spojení jednoho vinutí. Použití více vinutí má za následek zvětšení rozměrů a hmotnosti stroje.

Změnu počtu pólů lze zrealizovat hned několika způsoby, např. přepínáním cívek jedné fáze statoru ze základního zapojení do sériového či paralelního zapojení.

Dále pak přepínáním zapojení hvězda – dvojitá hvězda, ale také i přepínáním trojúhelník – dvojitá hvězda [13].

2.6.2 Změna napětí statoru

Toto řízení se dá použít pouze u asynchronních kroužkových motorů. Vhodně zvoleným odporem zařazeným do obvodu rotoru lze rozšířit regulační rozsah. Tento odpor lze měnit buď plynule nebo nejčastěji ve dvou nebo ve třech stupních, jak je vidět na Obr. 7.

Napájením statoru asynchronního motoru souměrným třífázovým napětím s proměnnou hodnotou velikosti napájecího napětí se hodnota momentu AS mění s druhou mocninou napětí statoru. Snížením napájecího napětí snížíme nejen moment stroje, ale zvyšujeme i skluz, tudíž se snižují otáčky motoru. Taková regulace je však značně energeticky nevýhodná, protože zvyšování skluzu má za následek zvětšení ztrát v rotoru, což vede k nadměrnému ohřívání nejen samotného rotoru, ale i celého stroje [13].

2.6.3 Změna statorové frekvence

Způsob řízení asynchronního motoru změnou frekvence vyplývá z rovnice[13]:

$$\omega_m = \omega_s \cdot (1 - s) = \frac{2\pi \cdot f}{p} \cdot (1 - s) \quad (11)$$

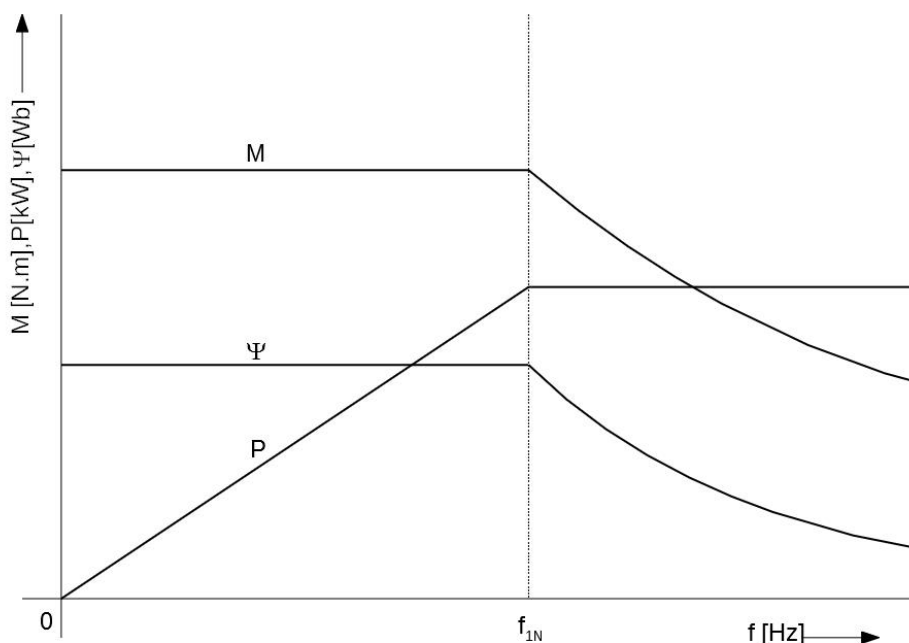
ω_s	synchronní otáčky	[rad.s ⁻¹]
ω_m	otáčky motoru	[rad.s ⁻¹]
f	frekvence síťového napětí	[Hz]
p	počet pólů stroje	[-]

Při prvním způsobu řízení je třeba zachovat stálý spřažený magnetický tok motoru ψ a to je dosaženo tím, že poměr napětí a úhlové rychlosti je udržován na konstantní hodnotě. Motor lze pak řídit v rozsahu od nuly až po jmenovitou frekvenci motoru, za stálé hodnoty momentu[13].

Druhý způsob řízení funguje na principu odbuzování motoru a je vhodný pro frekvence vyšší než je frekvence jmenovitá, napětí je konstantní. První a druhý způsob je často a velmi příhodně kombinován[13]. Princip prvního a druhého způsobu řízení je vidět na Obr. 9.

Dále je pak možné se setkat s řízením podle rotorové frekvence. Toto řízení je výhodné použít pro určitá kritéria, jako jsou např. minimální ztráty motoru, minimální jalový výkon nebo minimální proud statoru. Nejčastější aplikací tohoto typu řízení však bývá řízení na konstantní rotorovou frekvenci[13].

Posledním, v elektrické trakci hojně využívaným způsobem je řízení orientované podle vektoru magnetického toku rotoru. Na rozdíl od synchronních nebo i stejnosměrných motorů se u asynchronních motorů změnou řídicí veličiny mění nejenom magnetický tok, ale i moment motoru, které jsou ve vzájemné vazbě. Poloha vektoru magnetického toku je zde ve funkci rychlosti i zátěžného momentu. Aby bylo dosaženo nezávislého řízení magnetického toku a momentu motoru, musí být aplikován právě tento způsob řízení. Právě proto je řízení podle vektoru magnetického toku považováno za nejprogresivnější způsob řízení AS. Řízení může být orientováno na magnetický tok rotorový, statorový nebo hlavní, který je výsledkem složení rotorového a statorového magnetického toku. Avšak pouze při orientaci na vektor rotorového magnetického toku je možné řídit obě veličiny nezávisle. K tomuto řízení je však nutné mít nepřetržitou informaci o poloze vektoru magnetického toku a jeho velikosti. Tyto informace se dají získat buď přímo měřením, s nutností umístění měřících cívek, popř. Hallových sond přímo do motoru, nebo nepřímo z měření statorových proudů, popř. napětí a rychlosti[13].



Obr. 9 - Průběhy veličin při frekvenčním řízení AS [13]

- Mmoment motoru
- P výkon motoru
- Ψspřažený magnetický tok
- f_{1N} jmenovitá frekvence motoru

3 VÝKONOVÉ MĚNIČE

Výkonové měniče regulují průchozí výkon a jsou používány k přeměně elektrické energie dané kvality na energii kvality jiné. Pojmem kvalita elektrické energie rozumíme její velikost, regulovatelnost a stálost výstupních veličin (napětí, proud, výkon a frekvence), časové průběhy (tvar a kmitočet) napětí a proudu a spektrální kvalitu (obsah vyšších harmonických složek) [15].

3.1 Klasifikace měničů

Můžeme si definovat čtyři základní typy výkonových měničů:

1. střídavé → stejnosměrné – usměrňovače
2. střídavé → střídavé – střídavé měniče napětí
3. stejnosměrné → stejnosměrné – stejnosměrné pulsní měniče
4. stejnosměrné → střídavé – střídače (měniče kmitočtu)

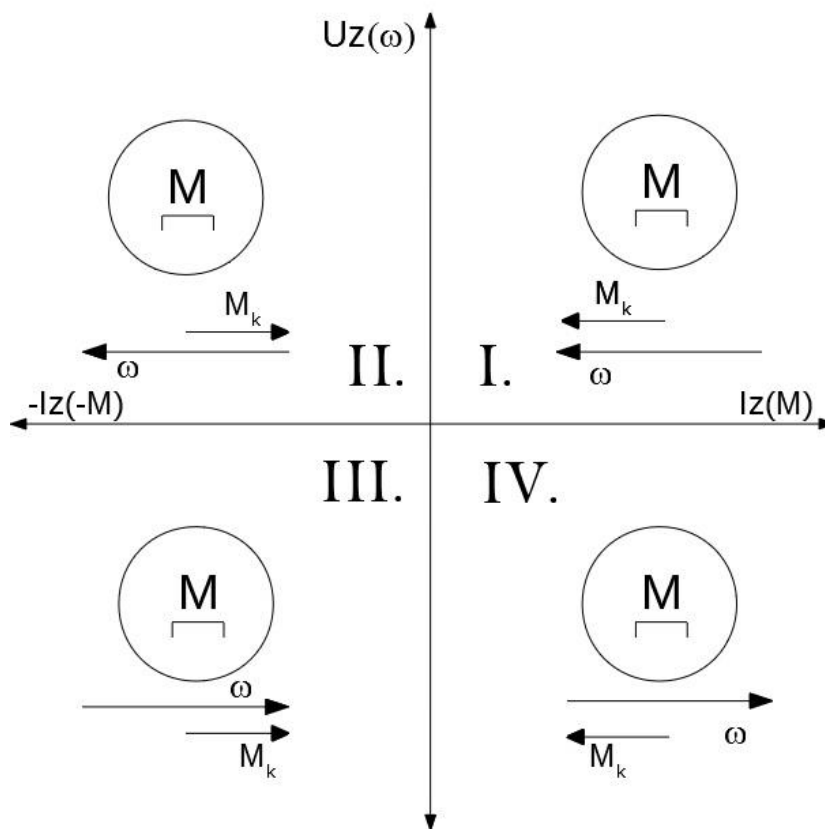
3.2 Pulsní měniče

Typickou aplikací pulsních měničů je elektrická trakce pracující jako měniče stejnosměrného napětí pro motory se sériovým buzením, avšak řada průmyslových aplikací slouží jako zdroje stejnosměrného napětí v obvodech polovodičových měničů frekvence [13].

3.3 Rozdělení dle kvadrantů

Pulsní měniče jsou rozeznávány dle čtyř kvadrantů, v nichž pracují. Pokud se bavíme o stejnosměrném motoru, tak práce v I. a III. kvadrantu je motorického charakteru, otáčky i moment působí ve stejném směru. Rozdíl je ve smyslu otáčení hřídele či směru svorkového napětí zátěže: pokud budeme uvažovat v I. kvadrantu kladný smysl otáčení, a tudíž i kladný směr napětí, tak ve III. kvadrantu bude smysl otáčení záporný a opačný bude i směr svorkového napětí. V obou těchto režimech je směr napětí i proudu ve stejném směru, což ukazuje, že soustava se chová jako spotřebič.

Práce v II. a IV. kvadrantu je v režimu brzděném či generátorovém. Jedná se o případ, kdy smysl otáčení hřídele je opačný než směr působení momentu na hřídeli, neboli proud je opačného směru, než je směr svorkového napětí, což odpovídá skutečnosti, že soustava se chová jako zdroj [14].

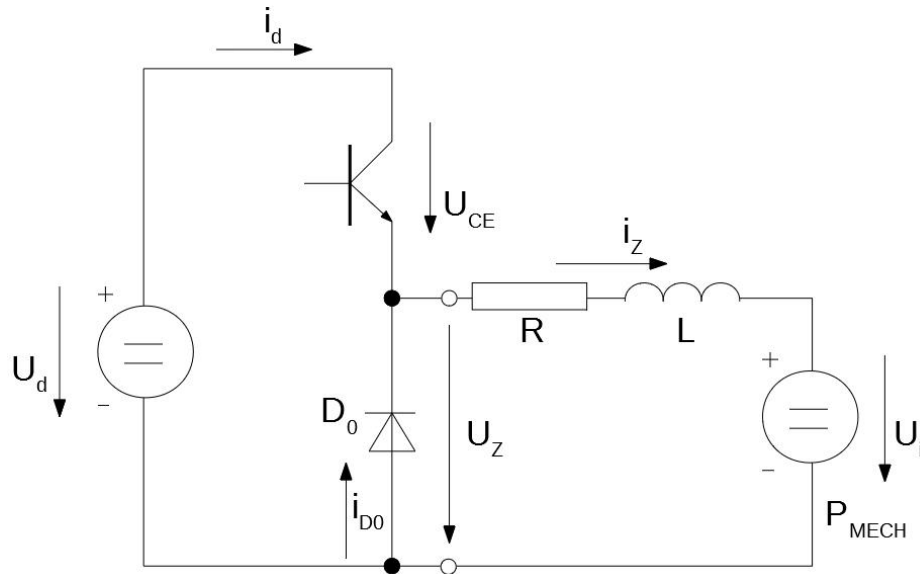


Obr. 10 - Režim zátěže v kvadrantech V-A roviny [14]

3.4 STEP-DOWN měnič

Měnič STEP-DOWN, známý také pod názvem CHOPPER, je jednokvadrantový stejnosměrný pulsní měnič, který pracuje v I. kvadrantu. Pokud na výstupní svorky měniče připojíme stejnosměrný motor, tak při sepnutém tranzistoru bude procházet proud motorem. Po vypnutí tranzistoru by motor ztratil energii a měl by tendenci se zastavovat, ale jelikož se cívka snaží zachovat průchod a směr proudu,

stane se na určitý čas proudovým zdrojem. Při vypnutém tranzistoru se proud uzavírá do smyčky přes nulovou diodu [14]. Vše je vidět na Obr. 11.

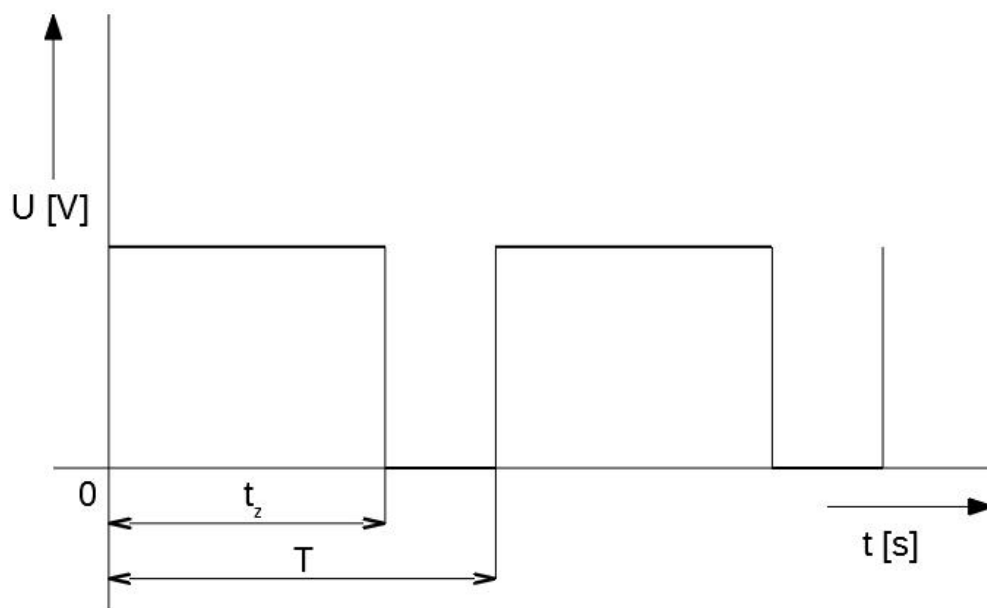


Obr. 11 - STEP-DOWN měnič [14]

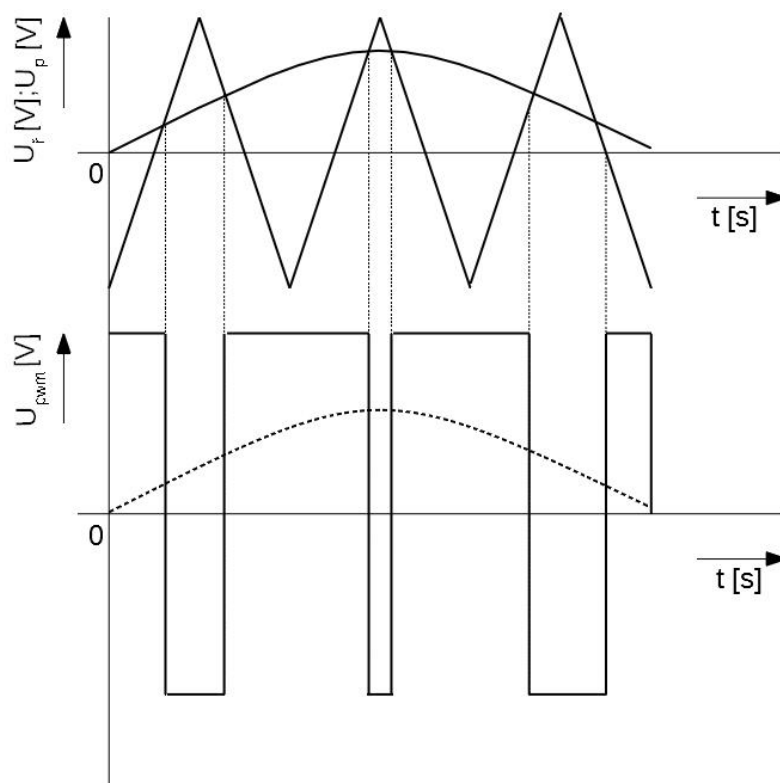
3.5 Pulse Width Modulation (PWM)

Pulsní šířková modulace (anglicky Pulse Width Modulation, dále jen PWM) je modulace signálu, která spočívá v tom, že spínače ve větvích střídačového můstku jsou periodicky zapínány a vypínány. Díky PWM soustava pracuje s dobrým účínkem a také se snižuje náročnost na stejnosměrný meziobvod. Při řízení spínačů je perioda konstantní, ale doba zapnutí je proměnlivá. Poměr doby zapnutí a periody je nazýván střída. Střída je definována dle rovnice 20 a její podstata je znázorněna na Obr. 12. Toto řízení je možné zdokonalit, a to tím, že střída nebude během jedné půlperrody konstantní. Pokud je střída vhodně modulována, dá se vytvořit napěťový signál o střední hodnotě, která odpovídá funkci sinus [13].

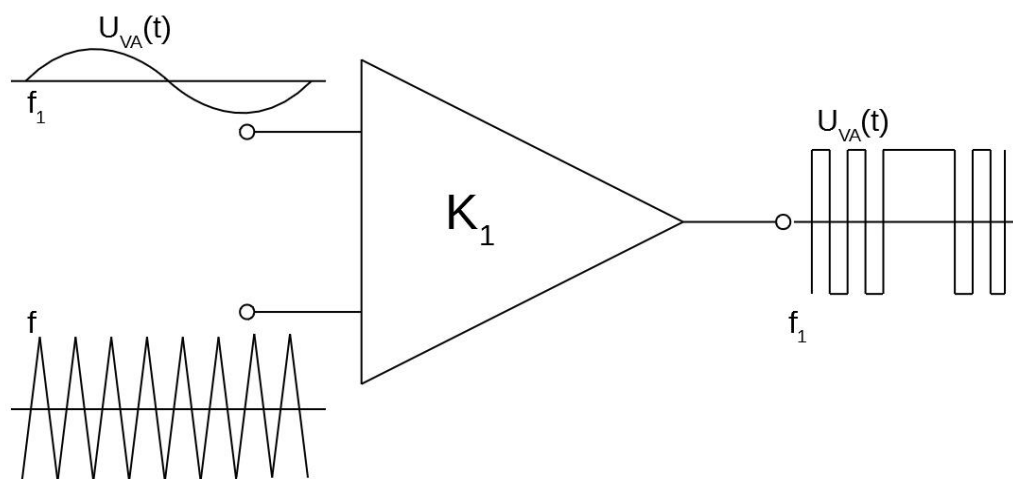
Nejjednodušší a zároveň nejkvalitnější pulsní šířkový modulátor je komparátor, znázorněný na Obr. 14. Do komparátoru se do jednoho vstupu přivede nosný signál a do druhého vstupu pak modulační signál. Nosný signál bývá trojúhelníkový a modulační bývá sinusový nebo stejnosměrný. Na výstupu pak dostaneme modulační produkt v podobě pulsního šířkově modulovaného obdélníkového signálu. Princip je patrný i z Obr. 12 a Obr. 13. Výstup z modulátoru PWM je pak vhodně připojen na spínací prvky. V případě STEP-DOWN měniče (Obr. 11) by byl signál z PWM připojen do báze tranzistoru.



Obr. 12 - Šířkově pulsní řízení napětí [13]



Obr. 13 - Princip PWM [13]



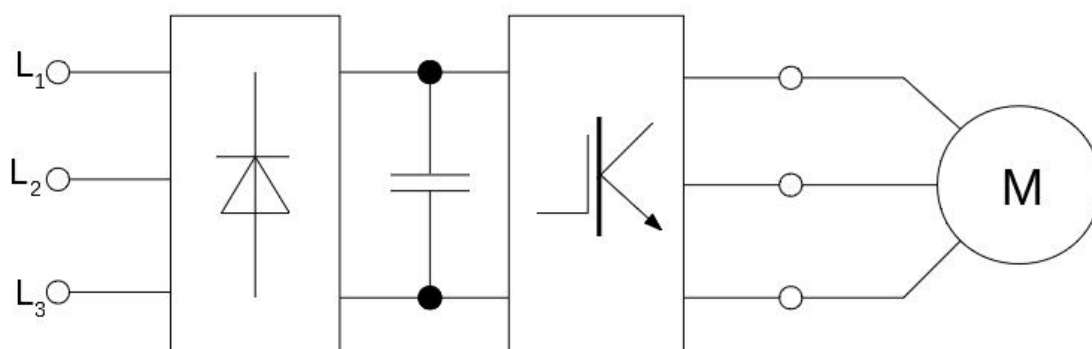
Obr. 14 - Modulátor PWM [14]

4 FREKVENČNÍ MĚNIČE

Jak už napovídá název, frekvenční měnič je zařízení, které mění vstupní napětí o určité amplitudě a frekvenci na napětí s odlišnou amplitudou a frekvencí. První sériově vyráběný frekvenční měnič, který byl používán pro řízení běžných asynchronních motorů, byl vyvinut v druhé polovině 70. let 20. století [12].

4.1 Princip a funkce frekvenčního měniče

Pro jednoduchost lze frekvenční měnič rozdělit do čtyř částí: usměrňovač, stejnosměrný meziobvod, střídač a řídicí mikroprocesor. Princip frekvenčního měniče spočívá v usměrnění střídavého síťového napětí, které se přivede do napětěvého meziobvodu s kondenzátory, odkud bere elektrickou energii, v podobě stejnosměrného napětí, třífázový střídač, který je pulzně spínán, čímž se mění výstupní parametry dle požadavků uživatele.



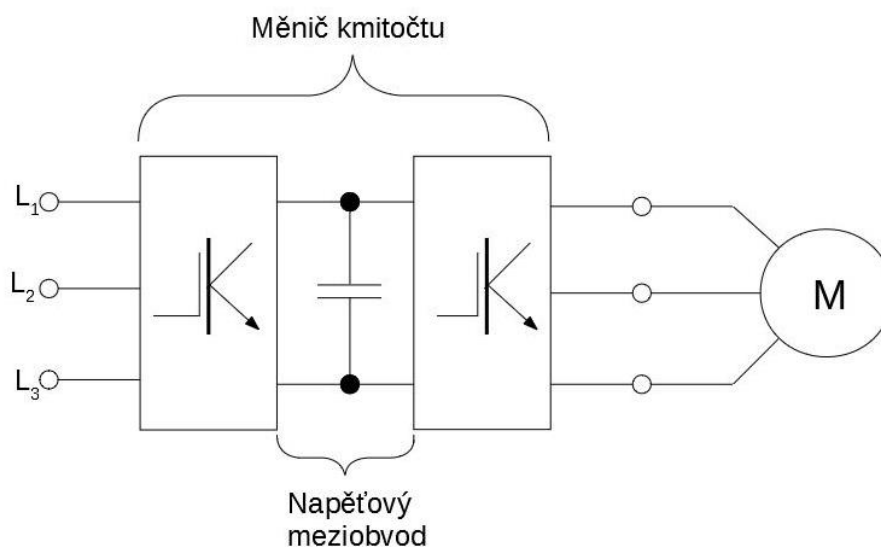
Obr. 15 - Frekvenční měnič [17]

5 NÁVRH SILOVÉ ČÁSTI MĚNIČE

V této části se budeme věnovat dimenzování jednotlivých částí námi konstruovaného měniče. Měnič je složen z dvou totožných IGBT tranzistorových modulů. Jeden plní funkci aktivního usměrňovače a druhý funguje jako střídač. Mezi tranzistorovými moduly je stejnosměrný meziobvod s kondenzátory, které zde plní funkci zdroje konstantního napětí pro střídač a umožňují výměnu jalového výkonu mezi motorem a měničem.

Dále zde bude popsán návrh síťového LC filtru, který bude filtrovat vysokofrekvenční rušení měniče a nepustí do sítě vyšší harmonické.

Součástí této kapitoly je také návrh rezistorů pro nabití kondenzátorů v meziobvodu. Tyto nabíjecí rezistory jsou důležité, protože po připojení měniče na síťové napětí by docházelo k velké proudové špičce, která by mohla způsobit poškození buď tlumivky LC filtru, nebo usměrňovače, a v neposlední řadě by s největší pravděpodobností vybavil jistič, na kterém je zásuvka jištěna. V prvním okamžiku je proudová špička omezena pouze impedancí přívodního vedení a tlumivkou LC filtru.



Obr. 16 - Frekvenční měnič s aktivním usměrňovačem

5.1 Dimenzování tranzistorů a zpětných diod střídače

Prvním předpokladem pro správné dimenzování polovodičových součástí je určení maximální hodnoty napětí [14]. Špičková hodnota síťového napětí se vypočte podle:

$$U_a = U_s \cdot \sqrt{2} \quad (12)$$

nebo:

$$U_a = U_f \cdot \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \quad (13)$$

kde:

U_s sdružená hodnota napětí

U_ffázová hodnota napětí

U_aamplituda napětí

$$U_a = 400 \cdot \sqrt{2} = 565 \text{ V} \quad (14)$$

V našem případě se jedná o třífázový, aktivní usměrňovač, který je tvořen třemi větvemi tranzistorů a diod, vstupními tlumivkami a na výstupu je kondenzátor. Aktivní usměrňovač je v podstatě třífázový střídač a má, oproti pasivnímu diodovému usměrňovači, řadu výhod. Nejpodstatnější výhodou je volitelnost parametrů výstupních veličin. Aktivní usměrňovač pracuje jako zvyšující měnič, takže výstupní usměrněné napětí je vyšší než vstupní střídavé. Stálým připojováním a odpojováním fází, pomocí tranzistorů, se na tlumivkách vytváří napětí, které se přičte k vstupnímu střídavému napětí. Výsledkem pak je vyšší usměrněné napětí [19].

Pro náš případ platí špičková hodnota síťového napětí a dovolené deseti-procentní kolísání sítě:

$$U_{max} = 565 \cdot (1 + 0.1) = 621,5 \text{ V} \quad (15)$$

což bude minimální hodnota napětí v stejnosměrném meziobvodu, proto jsme tedy vybrali nejbližší vyšší hodnotu napětí z řady tranzistorů včetně určité bezpečnostní rezervy, což je 1200 V.

Proudové dimenzování se provádí podle typu zátěže[14], naší zátěží bude asynchronní motor. Z datasheetu motoru jsme zjistili nominální hodnotu proudu, což je 30 A. Špičková hodnota proudu se vypočítá dle:

$$I_a = I_n \cdot \sqrt{2} \quad (16)$$

$$I_a = 30 \cdot \sqrt{2} = 42,426 \text{ A} \quad (17)$$

Krátkodobé proudové přetížení motoru je tří-násobek amplitudy proudu:

$$I_{max} = I_a \cdot 3 \quad (18)$$

$$I_{max} = 42,426 \cdot 3 = 128,28 \text{ A} \quad (19)$$

Proto jsme vybrali, s určitou rezervou, nejbližší vyšší z řady IGBT tranzistorových modulů FS150R12KT3.

5.2 Návrh tlumivky síťového LC filtru

V první řadě musíme určit indukčnost tlumivky, tudíž potřebujeme vědět, v jakém případě bude největší zvlnění proudu [18]. Jestliže vztah pro výpočet střídě je:

$$s = \frac{t_z}{T} \quad (20)$$

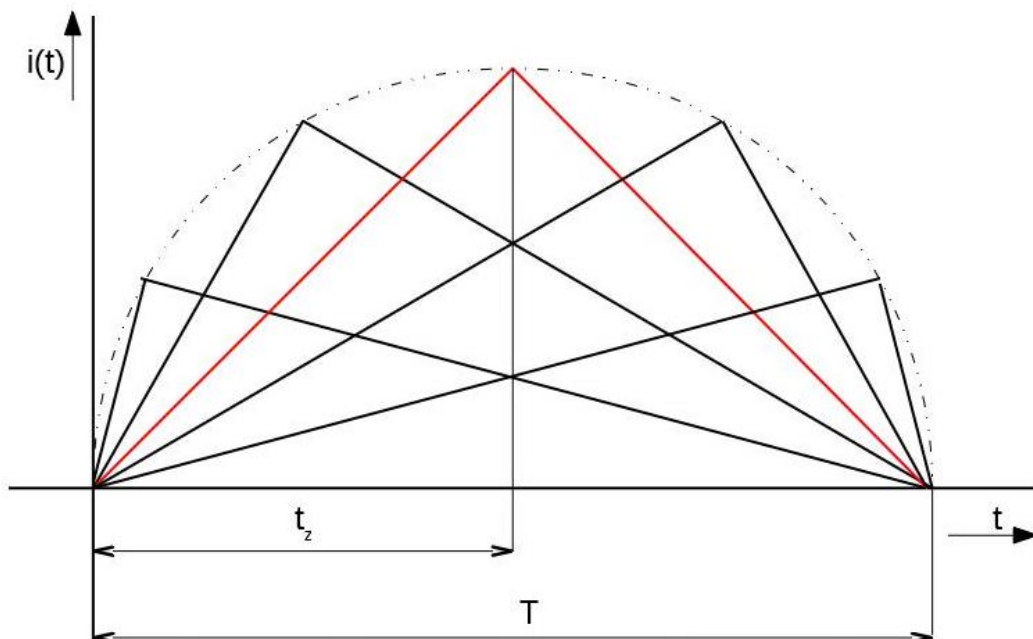
kde:

s střída [-]

t_z doba zapnutí [s]

Tperioda [s]

Víme, že největší zvlnění proudu bude při střídě $s = 0,5$ [18], což je znázorněno na Obr. 17, kde vidíme, že pokud doba zapnutí je rovna polovině času periody, tak dochází k největšímu možnému zvlnění proudu.



Obr. 17 - Zvlnění proudu

Vycházíme tedy ze známého vztahu[18]:

$$u(t) = \frac{d\psi(t)}{dt} = \frac{dLi(t)}{dt} \quad (21)$$

Takže tedy můžeme napsat:

$$U_L = L \cdot \frac{di(t)}{dt} = L \cdot \frac{di}{dt} \quad (22)$$

Odtud tedy vyjádříme indukčnost cívky:

$$L = \frac{U_L \cdot dt}{di} \quad (23)$$

Při střídě $s = 0,5$ bude napětí na cívce U_L přibližně 300 V a za dt volíme polovinu periody pulsně-šířkové modulace, což odpovídá dané střídě. Zvlnění proudu je volitelné a čistě na úvaze konstruktéra tlumivky, zvolíme tedy 13 A.

$$L = \frac{300 \cdot 2,5 \cdot 10^{-5}}{13} = 576 \cdot 10^{-6} = 576\mu H \quad (24)$$

5.2.1 Určení počtu závitů

Vycházíme z obecného vztahu pro výpočet spřaženého toku [18]:

$$\psi = N \cdot \Phi = L \cdot I \quad (25)$$

kde:

ψ	spřažený tok	[Wb]
N	počet závitů	[-]
Φ	magnetický tok	[Wb]

Pro maximální hodnoty budeme uvažovat [18]:

$$N \cdot \Phi_{max} = N \cdot B_{max} \cdot S_{Fe} = L \cdot I_{max} \quad (26)$$

kde:

B_{max}	maximální použitelná magnetická indukce feromagnetika	[T]
----------------	---	-----

S_{Fe} průřez jádra [m²]

Jádro volíme z práškových feritů z důvodu eliminace vířivých proudů, čemuž odpovídá maximální možná hodnota magnetické indukce 0,3 T. Průřez jádra má rozměry (28 × 30)mm.

Z rovnice 26 tedy vyjádříme počet závitů N :

$$N = \frac{L \cdot I_{max}}{B_{max} \cdot S_{Fe}} \quad (27)$$

Zbývá tedy zvolit maximální proud tlumivkou, což můžeme odvodit z požadovaného výkonu měniče. Zvolili jsme tedy požadovaný výkon 30kW a odtud už určíme proud:

$$I_{ef} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_s \cdot \cos \varphi} = \frac{30 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 1} = 43,478 \text{ A} \quad (28)$$

$$I_m = I_{ef} \cdot \sqrt{2} = 43,478 \cdot \sqrt{2} = 61,5 \text{ A} \quad (29)$$

Abychom dosáhli určité bezpečnostní rezervy, proud zaokrouhlíme:

$$I_m = 70 \text{ A}$$

Nyní dosadíme do rovnice 27 pro určení počtu závitů tlumivky:

$$N = \frac{576 \cdot 10^{-6} \cdot 70}{0,3 \cdot 8,4 \cdot 10^{-4}} = 160 \text{ závitů} \quad (30)$$

5.2.2 Výpočet vzduchové mezery

Pro výpočet vzduchové mezery vyjdeme z Hopkinsonova zákona [18]:

$$U_m = N \cdot I = H \cdot l \quad (31)$$

kde:

U_m magnetické napětí [A] “ampéřzávití”

Hintenzita magnetického pole [A/m]

Dále pak vztah mezi magnetickou indukcí a intenzitou magnetického pole[18]:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (32)$$

μ permeabilita [H.m⁻¹]

Magnetický obvod tlumivky tedy můžeme popsat podle Hopkinsonova zákona, a tudíž rozdělit na magnetické napětí jádra a magnetické napětí vzduchové mezery [18]:

$$U_m = H_{Fe} \cdot l_{Fe} + H_v \cdot l_v \quad (33)$$

A jestliže upravíme rovnici 32, dostaneme vztah:

$$H = \frac{B}{\mu} \quad (34)$$

a můžeme magnetický obvod přepsat podle rovnice 33:

$$U_m = \frac{B \cdot l_{Fe}}{\mu_{rFe}} + \frac{B \cdot l_v}{\mu_0} \quad (35)$$

Z tohoto plyne, že:

$$\frac{B \cdot l_{Fe}}{\mu_{rFe}} \ll \frac{B \cdot l_v}{\mu_0} \quad (36)$$

Z Hopkinsonova zákona vyplývá vztah pro výpočet vzduchové mezery ve tvaru [18]:

$$l_v = \frac{N \cdot \mu_0 \cdot I_{max}}{B_{max}} - \frac{l_{Fe}}{\mu_{rFe}} \quad (37)$$

Výše uvedené odvození jasně vypovídá o tom, že člen „ $\frac{l_{Fe}}{\mu_{rFe}}$ “ je zanedbatelně malý a nemá podstatný vliv na délku vzduchové mezery.

Dosadíme tedy do rovnice 37 bez členu „ $\frac{l_{Fe}}{\mu_{rFe}}$ “, tudíž ho zanedbáme

$$l_v = \frac{160 \cdot 1,25664 \cdot 10^{-6} \cdot 70}{0,3} = 0,046638m \quad (38) \\ = 46,9mm$$

Pokud bychom chtěli i tento zanedbatelný člen dopočítat, musíme zvolit několik parametrů:

B_{max}	maximální magnetická indukce	[T]
k_{pCu}	činitel plnění vodiče	[-]
k_{pFe}	činitel plnění jádra	[-]
σ	proudová hustota	[A.mm ⁻²]
μ_{rFe}	relativní permeabilita materiálu	[H.m ⁻¹]

Klíčový je výpočet sloupku jádra [18]:

$$S_j = \sqrt{\frac{L \cdot I_{max} \cdot I_{ef}}{B_{max} \cdot \sigma \cdot k_{pCu} \cdot k_{pFe}}} \quad (39)$$

Dosadíme tedy do rovnice 39:

$$S_j = \sqrt{\frac{576 \cdot 10^{-6} \cdot 70 \cdot 43,48}{0,3 \cdot 3,3 \cdot 0,45 \cdot 1}} = 2,1169 \cdot 10^{-3} m^2$$

Výpočet délky siločáry ve feromagnetiku je dán vztahem[18]:

$$l_{Fe} \cong 6 \cdot \sqrt{S_j} \quad (40)$$

Dosazením do rovnice 40 získáme tedy délku siločáry ve feromagnetiku:

$$l_{Fe} \cong 6 \cdot \sqrt{2,1169 \cdot 10^{-3}} = 0,2761 m = 276,1mm \quad (41)$$

Pro srovnání dopočítáme kompletní rovnici 37:

$$l_v = \frac{160 \cdot 1,25664 \cdot 10^{-6} \cdot 70}{0,3} - \frac{0,2761}{1000} = 0,046638m = 46,6mm \quad (42)$$

Pokud tedy zanedbáme člen „ $\frac{l_{Fe}}{\mu_{rFe}}$ “, je rozdíl v délce vzduchové mezery necelé tři desetiny milimetru, jedná se tedy o 0,59% chybu.

5.3 Návrh kondenzátoru síťového LC filtru

Při návrhu kondenzátoru síťového LC filtru vyjdeme z Thompsonova vztahu[18]:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad (43)$$

f_0rezonanční frekvence [Hz]

Za rezonanční frekvenci f_0 volíme desetinu frekvence pulsně-šířkové modulace, a z rovnice 43 tedy vyjádříme kapacitu C :

$$C = \frac{\left(\frac{1}{2\pi \cdot f_0}\right)^2}{L} = \frac{\left(\frac{1}{2\pi \cdot 2000}\right)^2}{576 \cdot 10^{-6}} = 1,099 \cdot 10^{-5} F \quad (44)$$
$$= 10,99 \mu F$$

5.4 Návrh kondenzátoru do stejnosměrného meziobvodu

Vyjdeme ze známého vztahu pro proud kondenzátorem:

$$i(t) = C \cdot \frac{du(t)}{dt} \quad (45)$$

Pro zjištění proudu kondenzátorem vyjdeme z požadovaného výkonu měniče. Zvolili jsme požadovaný výkon 30kW a odtud určíme proud:

$$I_d = \frac{P_d}{U_d} \quad (46)$$

Po dosazení do rovnice 46 dostaneme proud v stejnosměrném meziobvodu:

$$I_d = \frac{30 \cdot 10^3}{600} = 50 A \quad (47)$$

Obecný tvar rovnice 45 můžeme upravit a dosadit do následujícího tvaru:

$$C = I_d \cdot \frac{\Delta t}{\Delta U} \quad (48)$$

Pokles napětí na kondenzátoru ΔU a časová změna Δt jsou parametry, které opět volíme. Pokles napětí na kondenzátoru nechceme vyšší než 50 V a za časovou změnu volíme periodu pulsně-šířkové modulace 50 μ s.

$$C = 50 \cdot \frac{5 \cdot 10^{-5}}{50} = 50 \cdot 10^{-6} F = 50 \mu F \quad (49)$$

5.5 Návrh rezistorů pro nabíjení kondenzátorů v stejnosměrném meziobvodu

Připojením měniče k napájecí síti by došlo k průchodu proudu přes diody tranzistorového modulu přímo do stejnosměrného meziobvodu a docházelo by tak k velkým proudovým špičkám. Aby nedošlo k poškození měniče, vřadí se ke kondenzátorům v meziobvodu nabíjecí rezistor, sériově do každé fáze.

Zvolíme tedy běžně dostupný drátkový vinutý rezistor o jmenovitém výkonu 50W a jmenovitém odporu 1000 Ω . Jelikož na každém rezistoru bude efektivní hodnota napětí 230 V, tak z ohmového zákona je pak zřejmé:

$$I_N = \frac{U_{ef}}{R_N} \quad (50)$$

kde:

I_Nnabíjecí proud [A]

U_{ef}Efektivní hodnota napětí [V]

R_NOdpor nabíjecího rezistoru [Ω]

Po dosazení do rovnice 50 dostaneme maximální hodnotu nabíjecího proudu:

$$I_N = \frac{230}{1000} = 0,23 A = 230 mA \quad (51)$$

5.6 Návrh chlazení měniče

Průchod proudu jakoukoliv součástí není bezztrátový a tyto ztráty se projevují tepelnou emisí. Největším zdrojem tepla v měniči jsou bezesporu výkonové tranzistorové moduly. Tyto moduly obsahují šest IGBT tranzistorů s antiparalelními diodami. Ztráty v tranzistorech jsou dvojího původu, jsou to ztráty vedením a ztráty

při přepínání jednotlivých tranzistorů. Budeme tedy vycházet z hodnot uvedených v datasheetu od výrobce modulů.

Ztráty přepínám tranzistoru:

$$P_{přep} = \frac{W_{T_{on}} + W_{T_{off}}}{T} = \frac{16 \cdot 10^{-3} + 14,5 \cdot 10^{-3}}{\frac{1}{10 \cdot 10^3}} = 305 \text{ W} \quad (52)$$

Tato hodnota ztrát způsobených přepínáním je maximální a poměrně vysoká, ale je důležité si uvědomit, že tranzistory usměrňují střídavý proud, takže vycházíme z faktu, že tepelné ztráty zde vytváří myšlená hodnota stejnosměrného proudu, která je rovna dvojnásobku amplitudy střídavého proudu podělená konstantou π . Výsledek tohoto podílu, který je tedy 0,63 a tudíž výsledné střední ztráty přepínáním jsou rovny:

$$P_{T_{stř}} = 0,63 \cdot P_{přep} = 0,63 \cdot 305 = 192,15 \text{ W} \quad (53)$$

Stejným způsobem jsme určili i ztráty na antiparalelních diodách

$$P_{diod} = \frac{W_{Recovery}}{T} = \frac{13 \cdot 10^{-3}}{\frac{1}{10 \cdot 10^3}} = 130 \text{ W} \quad (54)$$

Zajímají nás opět ztráty střední, tedy jsou, stejně jako u tranzistorů, sníženy o 0,63 násobek maximální hodnoty ztrát na diodě

$$P_{D_{stř}} = 0,63 \cdot P_{diod} = 0,63 \cdot 130 = 81,9 \text{ W} \quad (55)$$

Je více způsobů jak dojít k číselné hodnotě reprezentující ztráty vedením, my budeme opět vycházet z datasheetu tranzistorových modulů a údajů, které máme k dispozici.

Jelikož máme k dispozici hodnotu prahového napětí, vyjdeme z rovnice 56

$$P_{\check{c}} = U_p \cdot I_z = 2,15 \cdot 30,74 = 66,1 \text{ W} \quad (56)$$

kde:

$P_{\check{c}}$ztráty vedením	[W]
U_pprahové napětí tranzistoru	[V]
I_z amplituda proudu motorem	[A]

Opět jsou i ztráty vedením proměnné a to v závislosti na střídě (průběhu napětí). Střední hodnota ztrát vedením na tranzistorech pak bude:

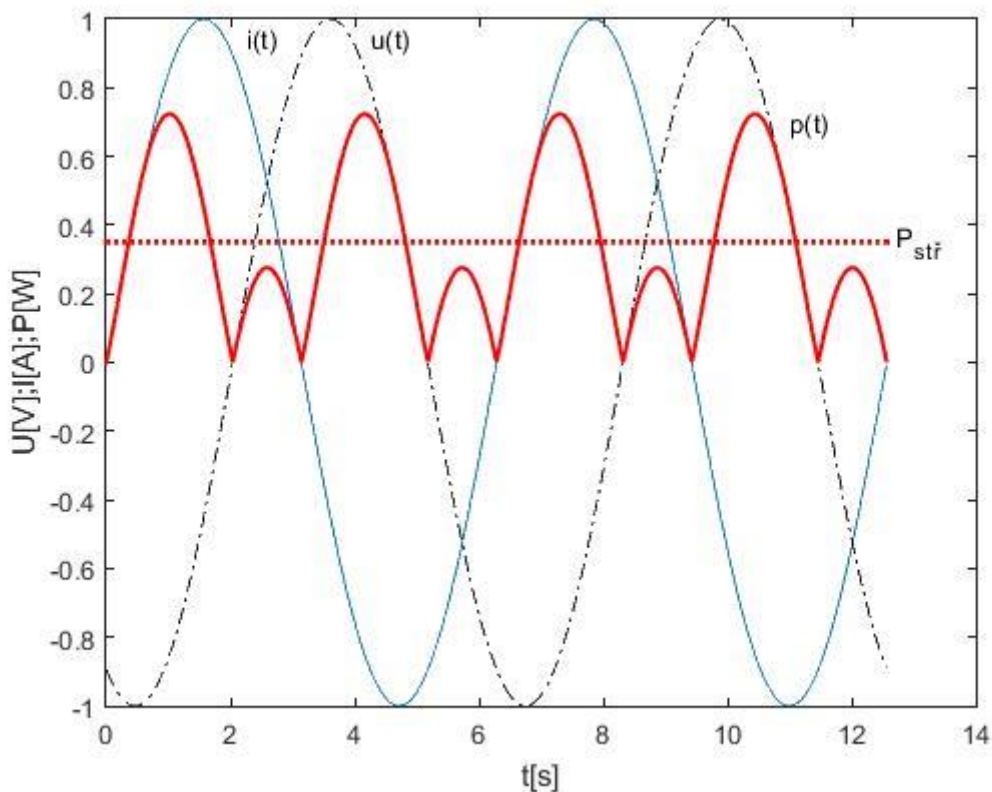
$$P_{AVG} = U_p \cdot I_z \cdot s = 2,15 \cdot 66,1 \cdot 0,5 = 33,05 \text{ W} \quad (57)$$

Stejně postupujeme i u výpočtu ztrát vedením u diod. Jelikož diody mají stejné prahové napětí jako tranzistory a poteče jimi i stejný proud, tak výsledné ztráty vedením budou stejné jako u tranzistorů.

Celkové ztráty jedné větve modulu pak můžeme definovat jako:

$$\begin{aligned} P_{ZC1} &= P_{T_{stř}} + P_{D_{stř}} + 2 \cdot P_{AVG} \\ &= 192,15 + 81,9 + 66,1 = 340,15 \text{ W} \end{aligned} \quad (58)$$

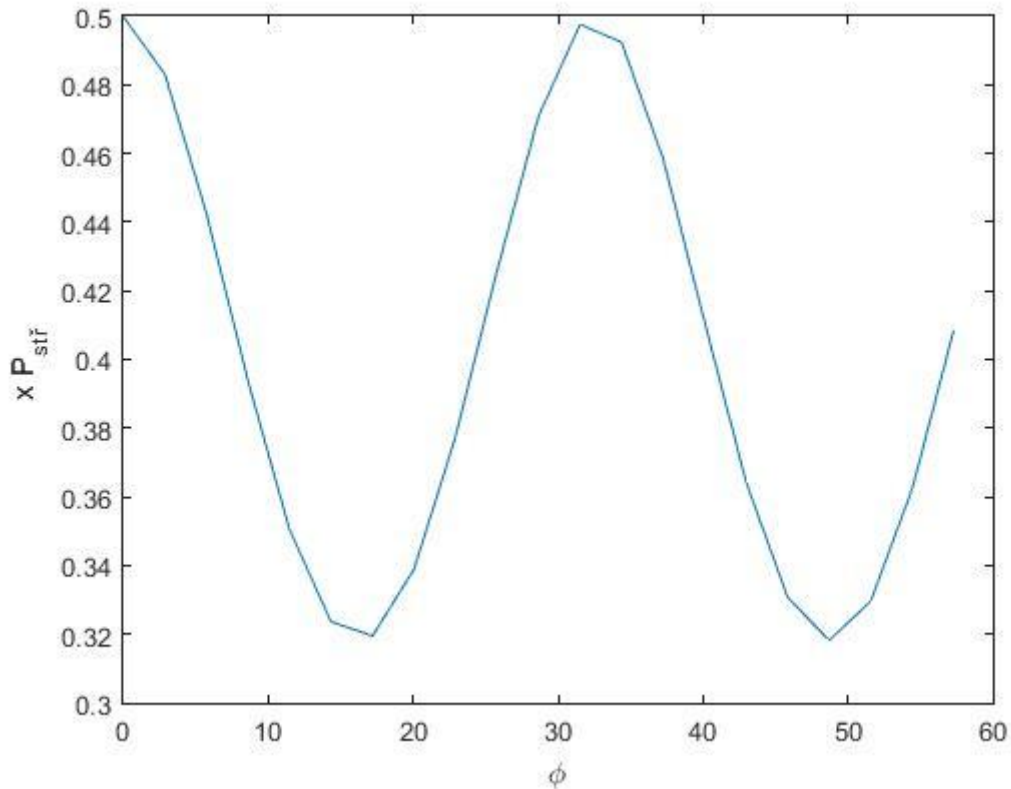
Dále jsme provedli simulaci v prostředí Matlab a ověřili vliv proměnných a výsledných středních ztrát v čase.



Obr. 18 - Průběh ztrát v čase

Jak je vidět, vzhledem k měnícím se ztrátám jejich střední hodnota je na hodnotě 0,35 při uvažování fázového posunu mezi proudem a napětím 90° .

Dále jsme tedy simulovali i vliv měnícího se úhlu φ (fázového posunu) na průběhu velikosti ztrát, jak je vidět na Obr. 19 níže a z něj jasně vyplývá, že střední hodnota ztrát nikdy nepřesáhne víc jak polovinu hodnoty ztrát maximálních.



Obr. 19 - Vliv φ na ztráty

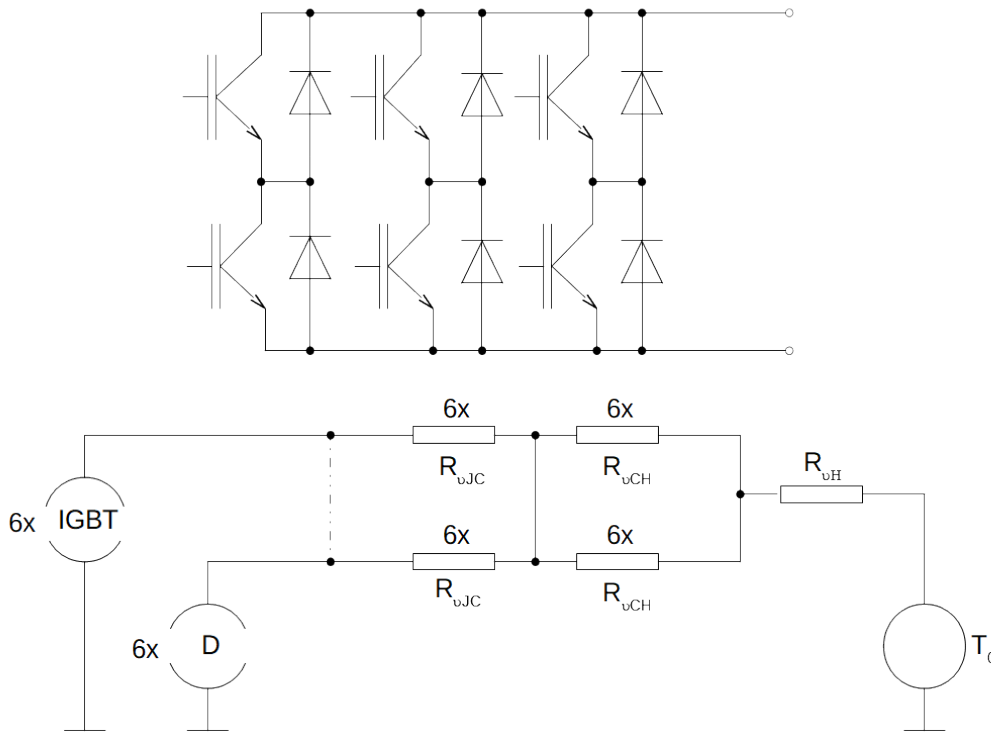
Pro kontrolu jsme srovnali vypočtené ztráty s datasheetem od výrobce, který udává celkové ztráty na jeden tranzistor a diodu 700 W, v případě ideálního chladiče, tedy je to hypotetická hodnota vycházející z faktu že tepelný odpor chladiče je roven nule. Z výše uvedeného je tedy patrné, že ztráty jedné větve, dva tranzistory a dvě diody, jsou menší o více jak polovinu hypotetických ztrát, na jeden tranzistor a diodu s ideálním chladičem, uváděných od výrobce.

Hodnoty dle datasheetu od výrobce jsou v Tabulka 1.

Tabulka 1 - Hodnoty tepelných odporů od výrobce

Tepelný odpor	IGBT	Dioda	Modul
$R_{\theta JC}$	0,18	0,34	-
$R_{\theta CH}$	0,09	0,14	0,009

$$\begin{aligned}
 R_{\theta H} &= \frac{\Delta T}{P_{ZC1} \cdot 3} - \frac{R_{\theta JC}}{6} - \frac{R_{\theta CH}}{6} \\
 &= \frac{125 - 40}{925,5} - \left(\frac{6}{0,18} + \frac{6}{0,34} \right)^{-1} \\
 &\quad - \left(\frac{6}{0,09} + \frac{6}{0,14} \right)^{-1} = 0,0578 \text{ KW}^{-1}
 \end{aligned}
 \tag{59}$$



Obr. 20 - Tepelné schéma tranzistorového modulu

Při takové hodnotě tepelného odporu chladiče, který jsme spočítali by chladič, který máme k dispozici, při pasivním chlazení celkový ztrátový výkon neuchladil, proto jsme rozhodli, že osadíme chladič dvojicí větráků, díky kterým klesne výsledný tepelný odpor chladiče zhruba na polovinu oproti přirozenému proudění vzduchu a tudíž se námi stanovený ztrátový výkon uchladí.

5.7 Návrh měření velikosti stejnosměrného napětí v meziobvodu

Pro získání hodnot napětí v stejnosměrném meziobvodu jsme vybrali LEM čidlo, pracující na principu hallova jevu. Toto čidlo pracuje s proudem, jehož hodnota je dle výrobce požadována na 10 mA. Pokud budeme vycházet

z předpokladu, že měnič bude pracovat s napětím v meziobvodu o velikosti až 800V, je třeba navrhnout předřadný odpor.

$$R_{před} = \frac{U_{DC}}{I_{LEM}} = \frac{800}{0,01} = 80 \text{ k}\Omega \quad (60)$$

Na předřadném odporu se však bude vlivem průchodu daného proudu mařit určitý elektrický výkon.

$$P_{před} = U_{DC} \cdot I_{LEM} = 800 \cdot 0,01 = 8 \text{ W} \quad (61)$$

Pro tuto aplikaci jsme vybrali rezistory, které jsou dimenzované na 2W, tedy je jasné že musíme použít minimálně čtyři odpory zapojené do série. V naší aplikaci je použito pět sériově zapojených rezistorů o hodnotě dle rovnice 62:

$$R_{1_před} = R_{před} \cdot \frac{1}{5} = \frac{80 \cdot 10^3}{5} = 16 \text{ k}\Omega \quad (62)$$

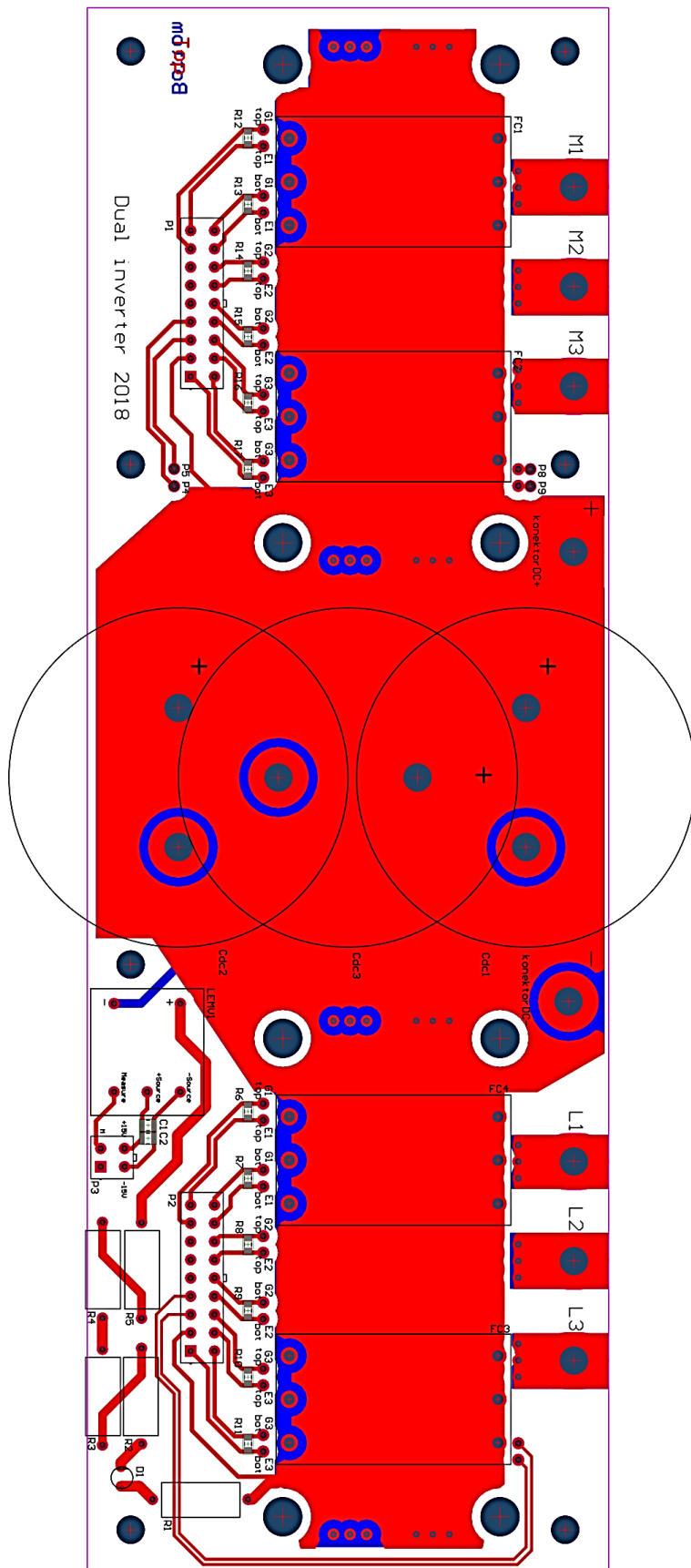
5.8 Návrh desky plošných spojů

Pro kompaktnost, dobrou manipulaci a pro efektivním využívání měniče jsme navrhli ve vývojovém designeru desku plošných spojů (dále jen DPS).

Prvotní myšlenka byla umístit veškeré potřebné součástky měniče na jednu desku. Kvůli značně velkým finančním nároků takového řešení, jsme rozhodli rozdělit měnič z hlediska plošných spojů do tří částí a to silové, řídicí a měřící.

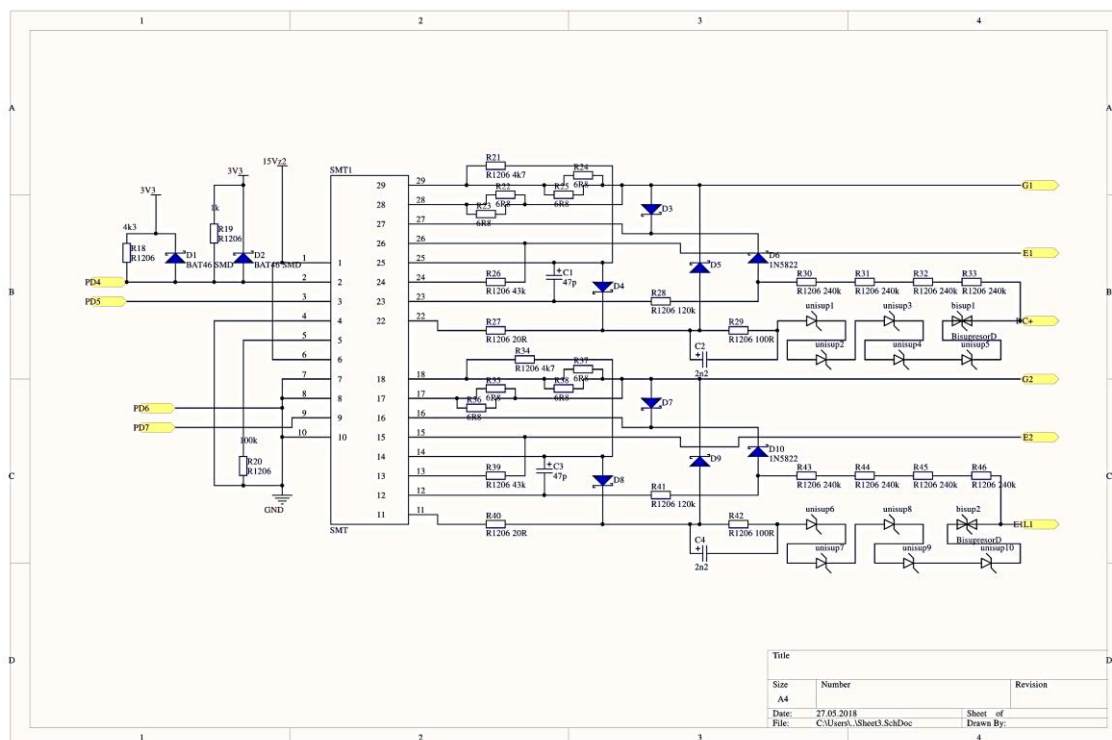
Silová část obsahuje tranzistorové moduly, napěťový meziobvod tvořený jedním velkokapacitním svitkovým a čtyřmi nízkokapacitními kondenzátory, výstupy pro AS a síťové přípojky, připojovací body napěťového meziobvodu, konektory pro připojení řídicí desky a měření napětí v meziobvodu, která zahrnuje signalizaci nabitého meziobvodu v podobě LED diody.

Ve stejnosměrném meziobvodu, byly vytvořeny možnosti pro zapojení buď jednoho nebo dvou velkokapacitních kondenzátorů, pro možné zvýšení kapacity.



Obr. 21 - Návrh DPS silové části

Řídící část desky je tvořena šesti budiči, každý pro jednu větev tranzistorového modulu, sloužící pro správnou funkci tranzistorových modulů a zajištění dostatečných časových spínacích odskoků pro zabránění nechtěnému sepnutí horního i spodního tranzistoru zároveň. V takovém případě dochází ke zkratu a tudíž k nevratné destrukci tranzistorového modulu a mnohdy i ke zranění osob v blízkosti měniče. Aktuální stav této části měniče pouze v předběžném návrhu a tudíž je zde prostor na navázání v další práci.



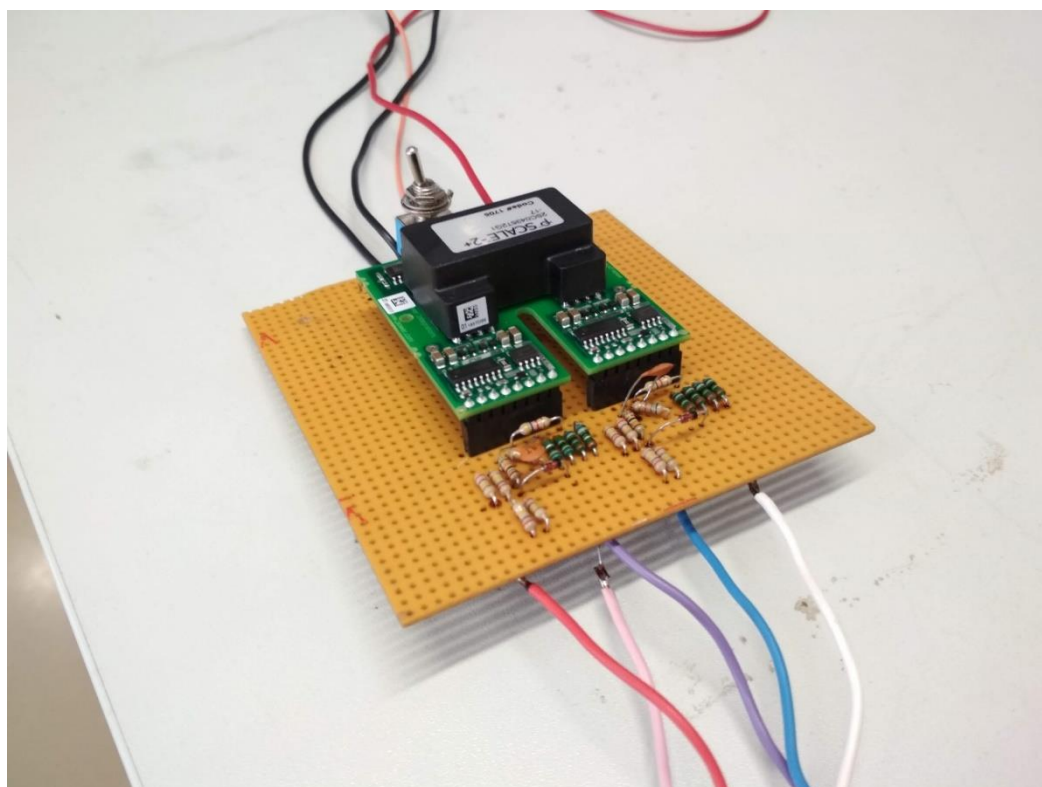
Obr. 22 - Schéma budiče

Měřicí část se skládá z proudových LEM čidel, pracujících na hallově principu, pro měření proudů na síťové straně a na straně k AS. Dále pak z měřicích transformátorů napětí s již navrženým L-C filtrem na síťové straně.

6 OŽIVENÍ MĚNIČE

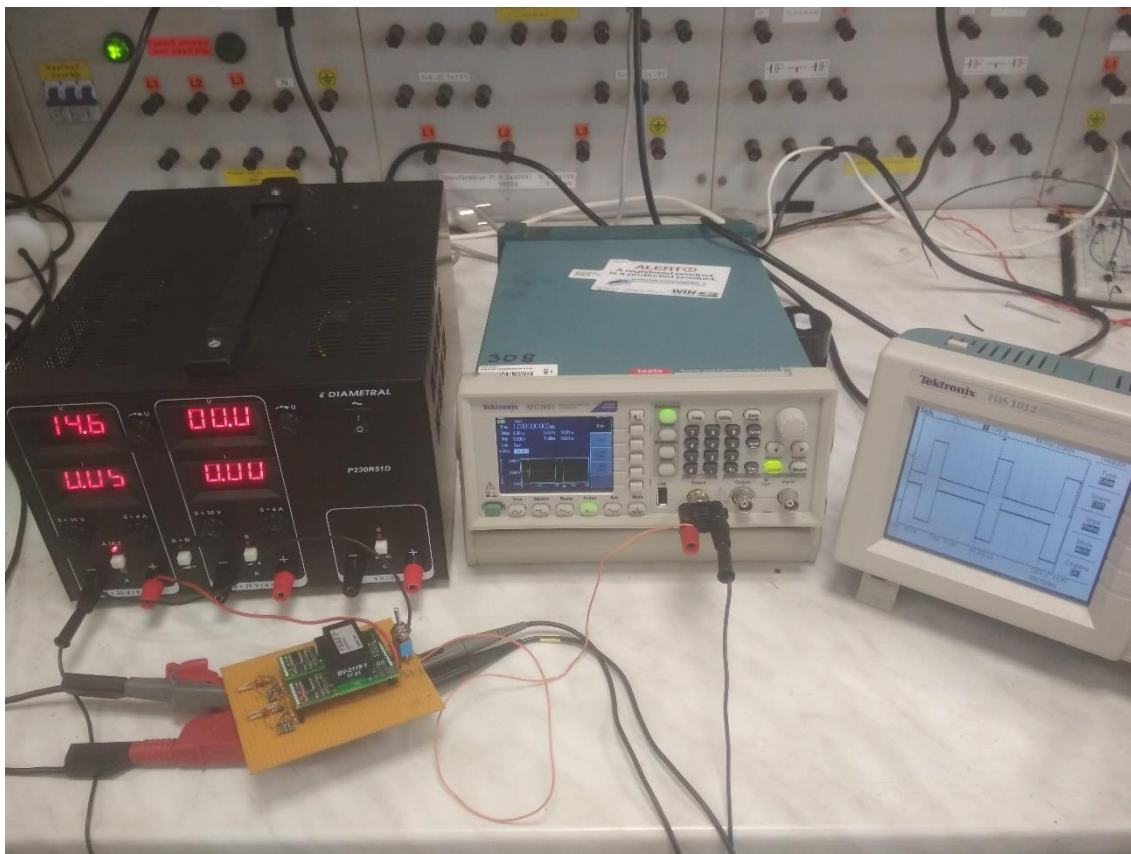
6.1 Oživení budiče

Prvním krokem při oživování měniče bylo ověřit správnou funkci a parametry jednoho budiče. Dle dostupného datasheetu jsme navrhli elektrické součástky na vstupu a výstupu z budiče, čímž jsme zvolili hodnoty časových odskoků (dále už jen deadtime) při spínání tranzistorových modulů.



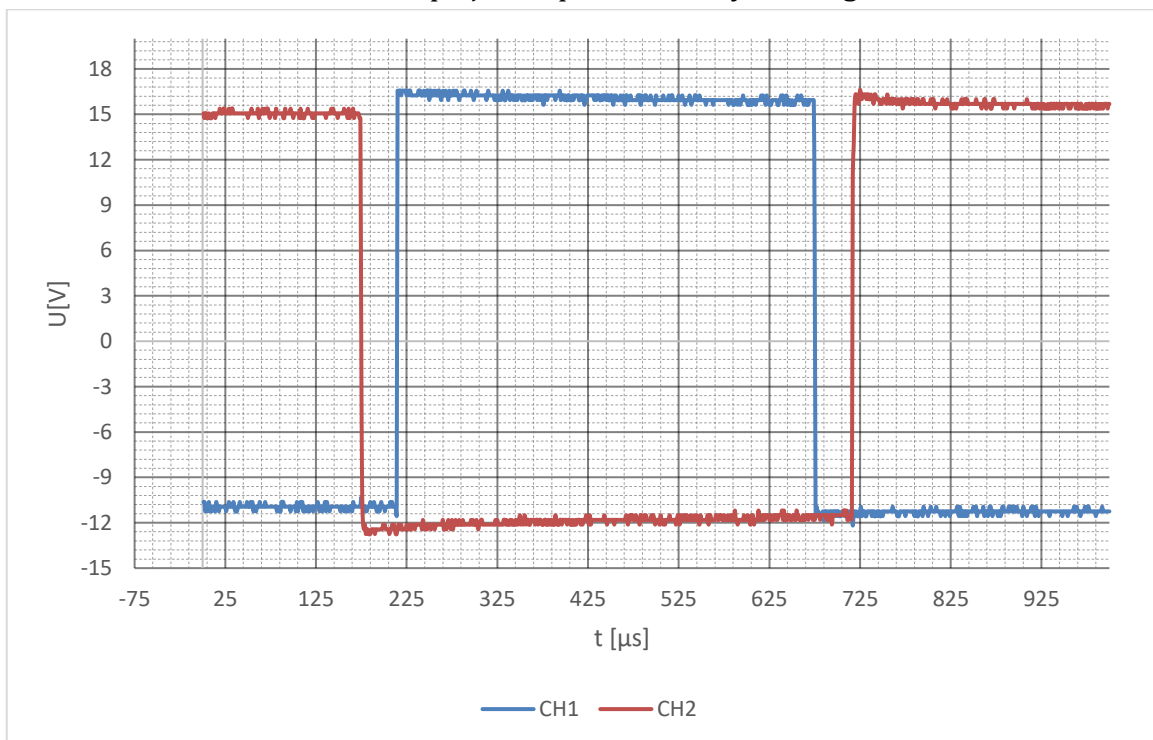
Obr. 23 - Osazení budiče

Funkci tohoto budiče jsme ověřili pomocí měření jeho výstupních signálu na osciloskopu.



Obr. 24 - Ověření správné funkce budiče

Získaná data z osciloskopu jsme zpracovali a vynesli v grafu č.1:

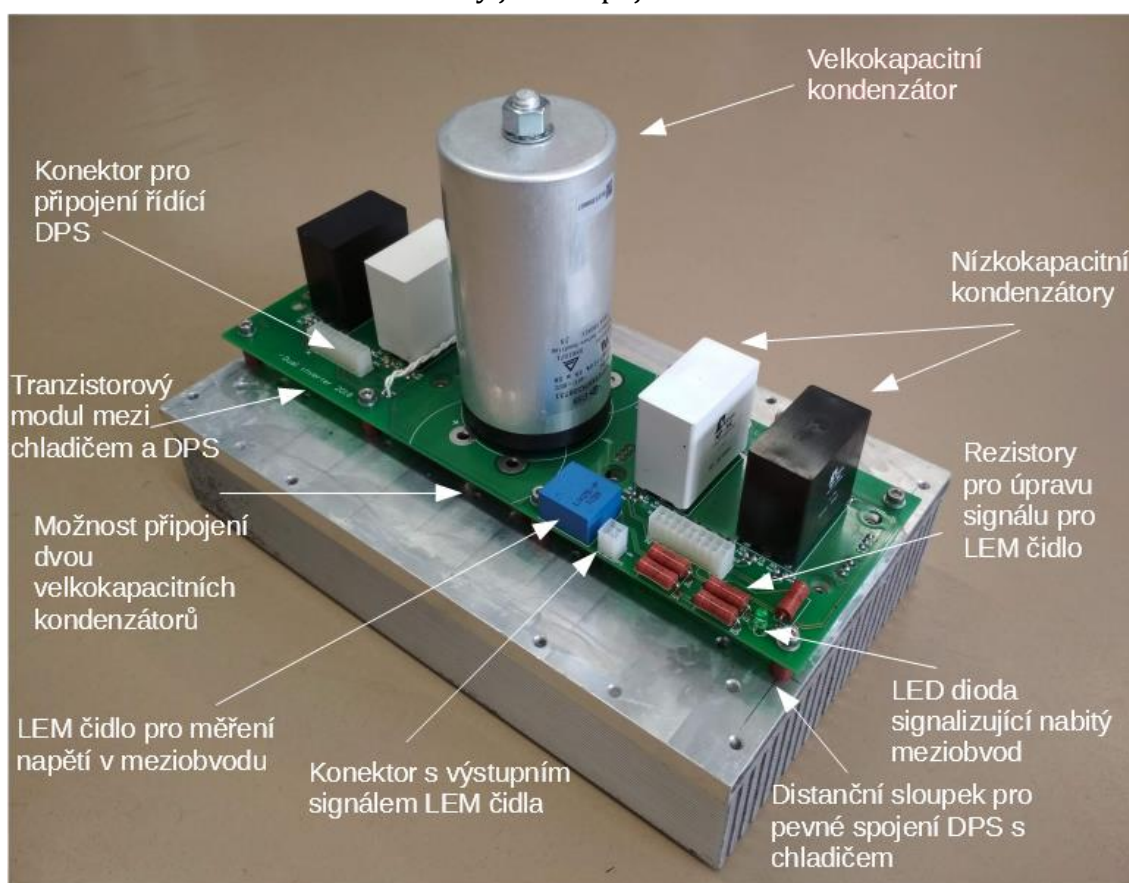


Graf č. 1 - Výstupní signály z budiče

V grafu č. 1 je dobře vidět správná funkce budiče, kde CH1 a CH2 jsou signály, které se připojují na svorky Gate tranzistorových modulů. Z grafu je patrné i to, že námi nastavený deadtime je s dostatečnou rezervou vhodně zvolený.

6.2 Konstrukce a osazení silové části

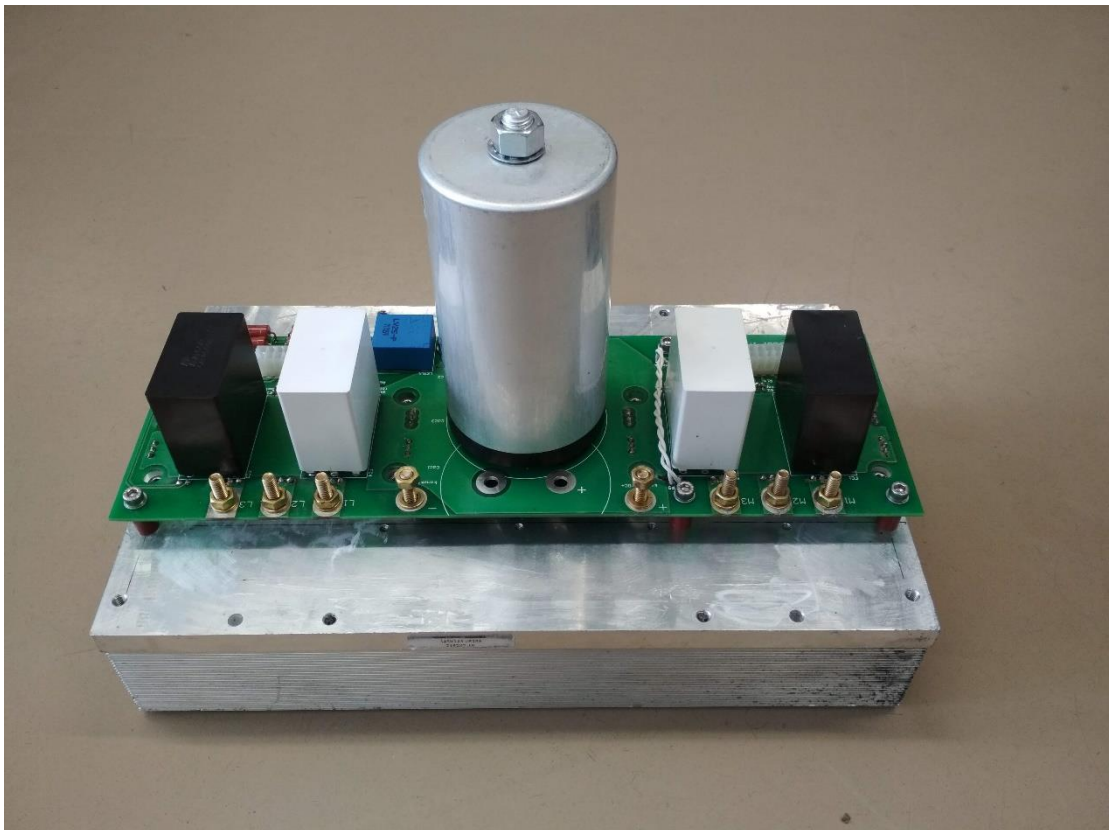
V první řadě bylo nutné správně umístit tranzistorové moduly na chladič a zajistit pevné spojení DPS s chladičem. Po přesném vyvrtání potřebných děr a vyřezání závitů jsme nanесли teplovodivou pastu a upevnily tranzistorové moduly na chladič. Dalším krokem bylo přisadit DPS na tranzistorové moduly a přes distanční sloupky připevnit DPS k chladiči. Závěrem se DPS osadila ostatními potřebnými součástkami na vrchní vrstvě a veškeré kontakty jsme zapájeli.



Obr. 25 - Konstrukce silové části měniče



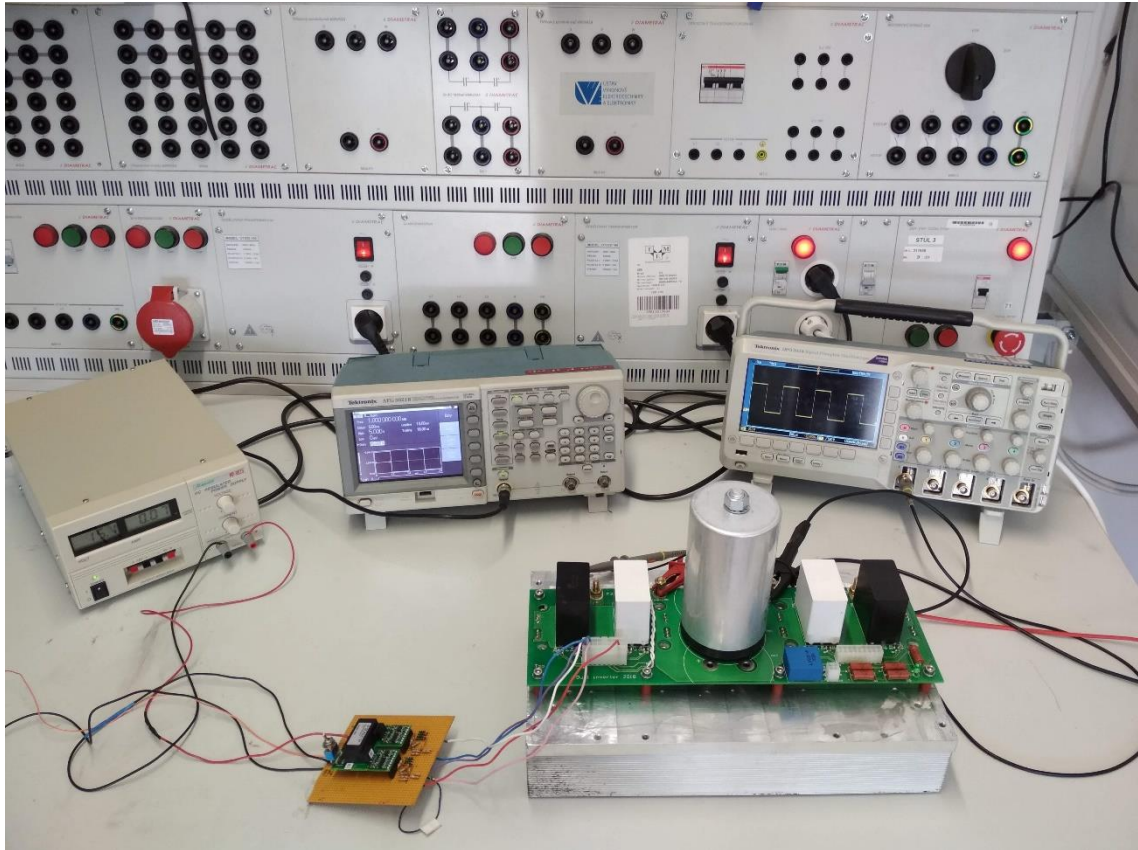
Obr. 26 - Silová část, pohled zepředu



Obr. 27 - Silová část, pohled zezadu

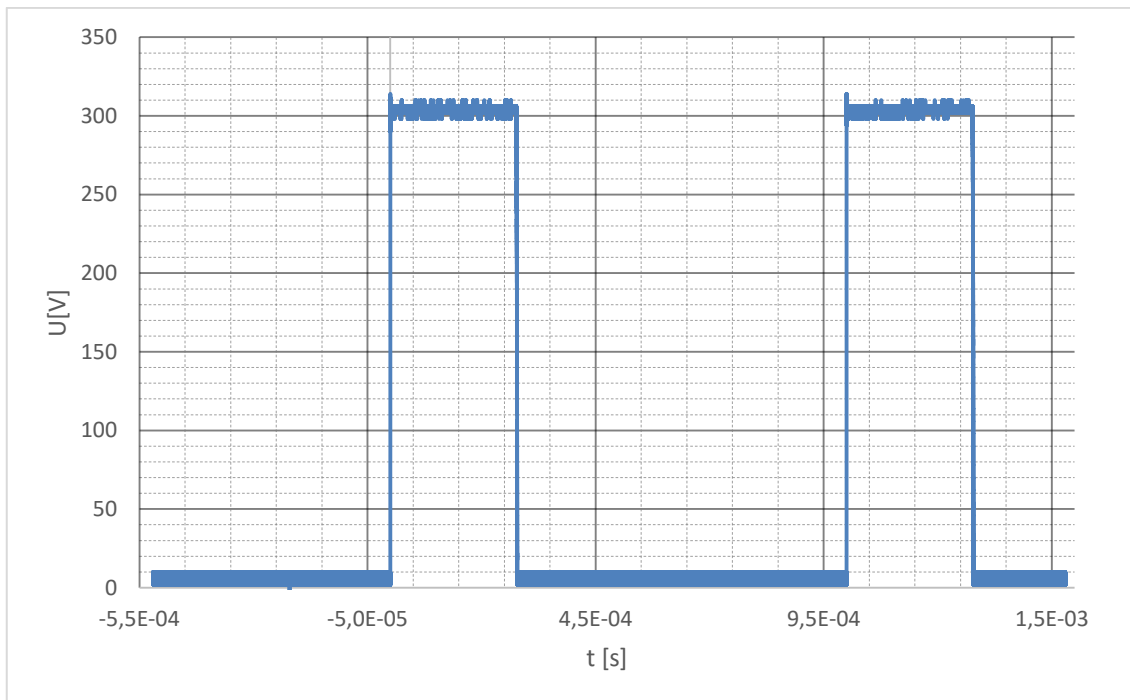
6.3 Oživení silové části měniče

Po sestavení silové části měniče jsme přešli k jejímu oživování. Jelikož jsme ověřili správnou funkci budiče, připojili jsme ho k silové části a ověřili správnou funkci spínání tranzistoru.

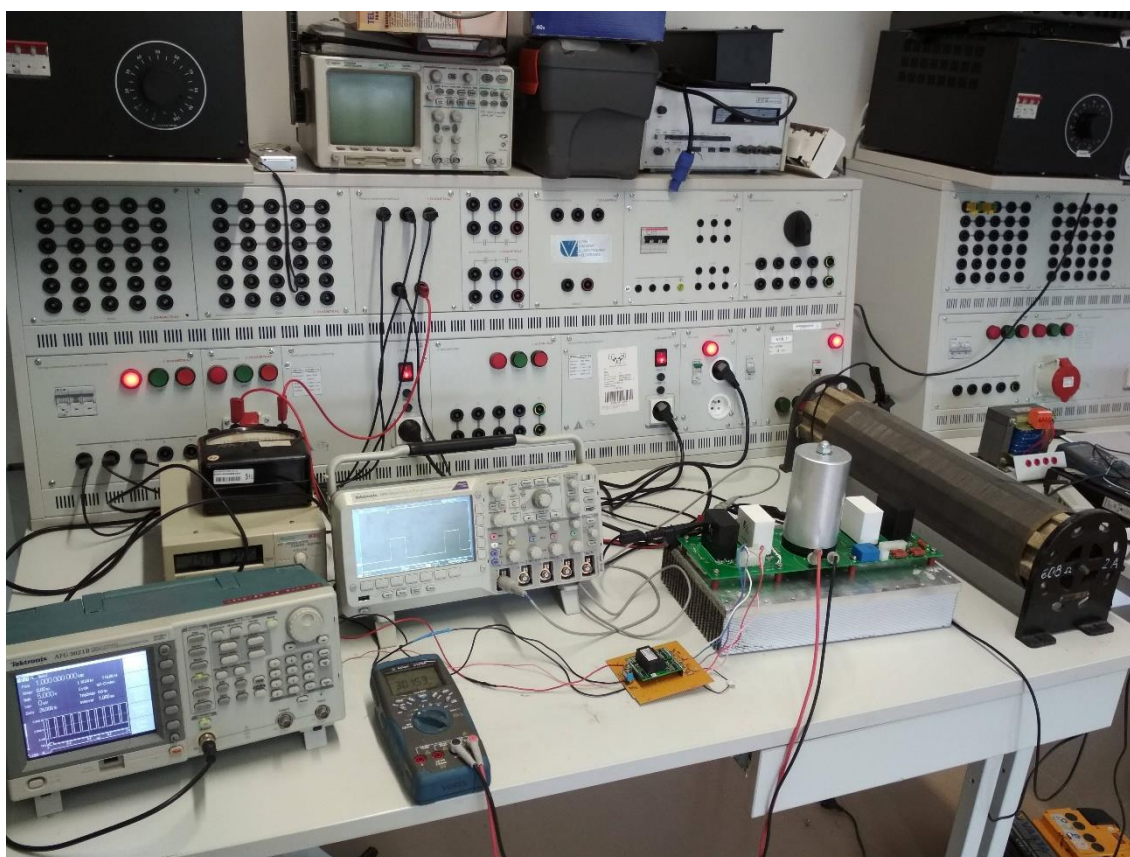


Obr. 28 - Ověření funkce budiče se silovou částí měniče

Dalším krokem bylo ověřit funkci pod napětím, tudíž jsme na svorky meziobvodu připojili napětí, přes usměrňovač, z autotranformátoru, prvně naprázdno, tedy bez zátěže a poté s drátovým rezistorem. Při zkoušení naprázdno jsme na autotranformátoru postupně zvyšovali napětí až na amplitudu usměrněného síťového napětí, tedy 565V. Při zkoušení se zátěží jsme z důvodu bezpečnosti omezili velikost napětí na 300V.

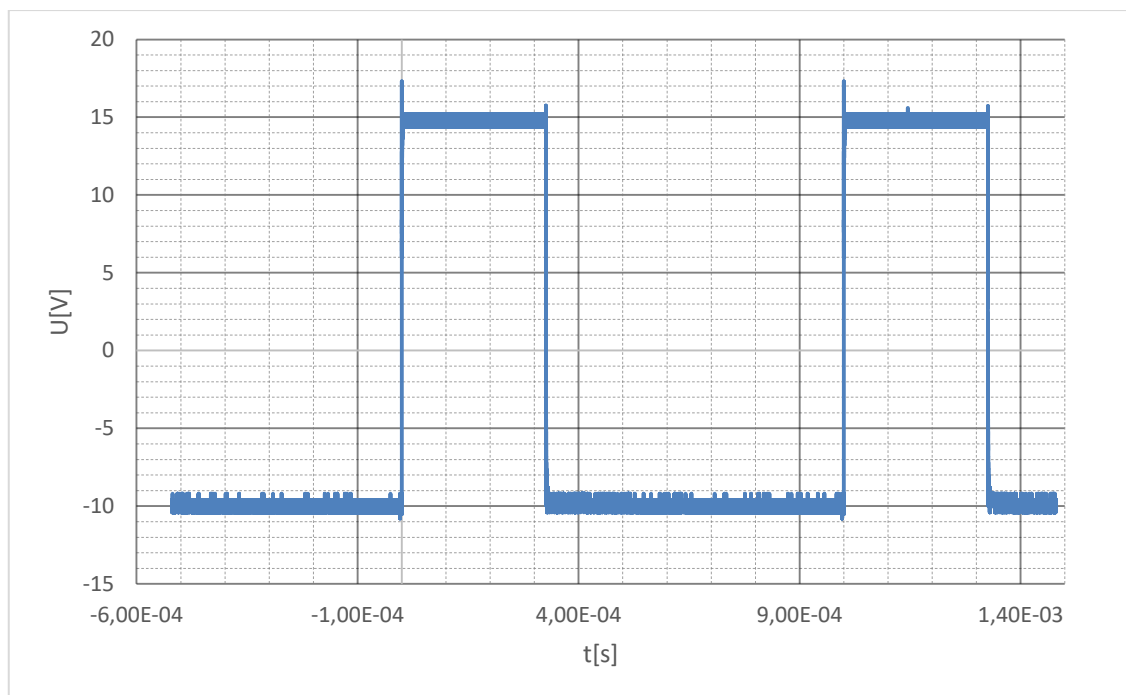


Obr. 29 - Měření pod napětím se zátěží



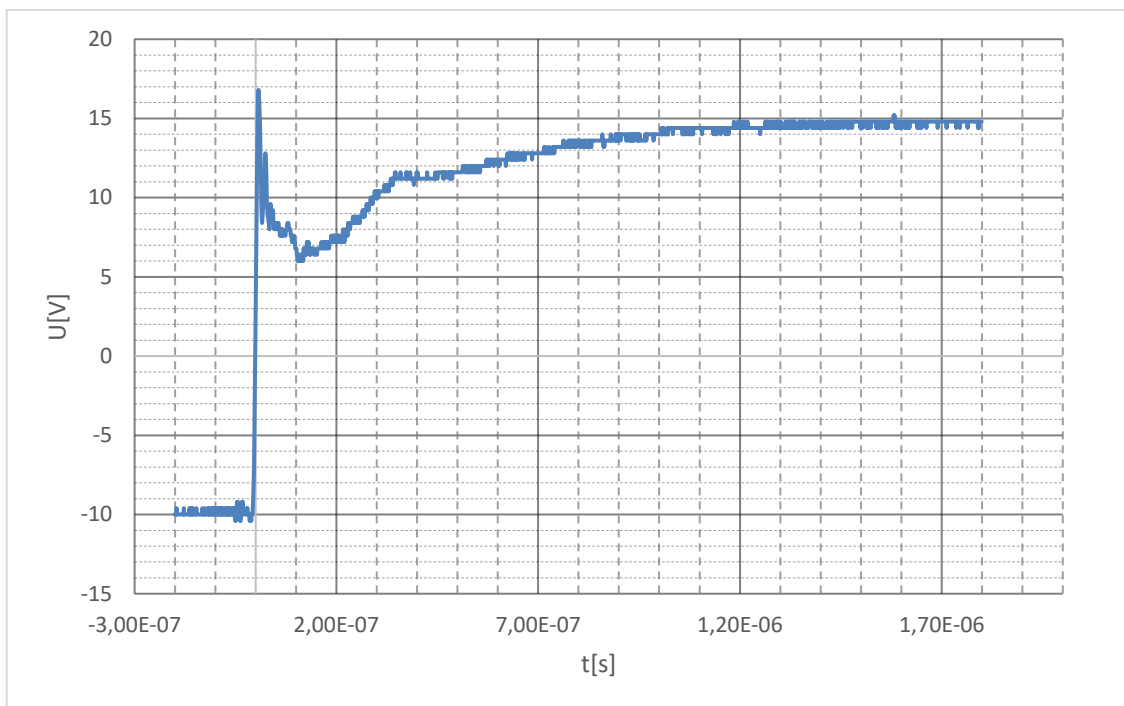
Obr. 30 - Měření pod napětím se zátěží, pracoviště

Měnič byl tedy napájen napětím o 300V a zatížen odporem 608 Ω , proud měničem se blížil hodnotě 0,5 A, avšak při tomto měření se zátěží jsme zaregistrovali určitý rozdíl na průběhu napětí gate-emitor, při připojení k silové části, jak je vidět na obrázku č. 31:

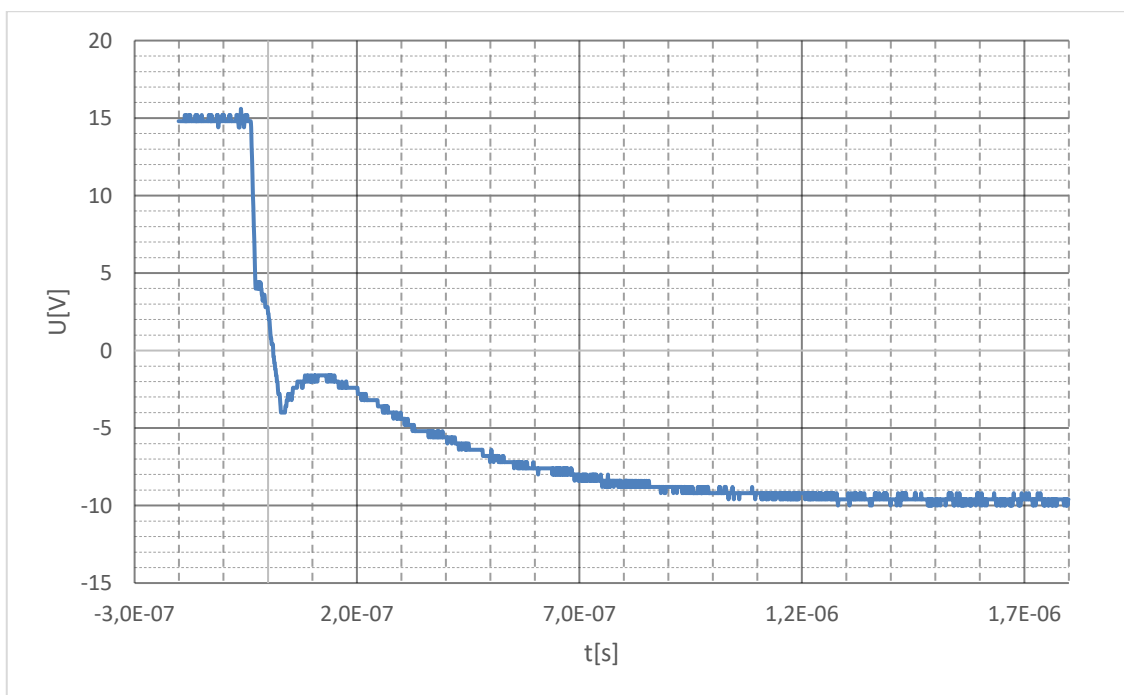


Obr. 31 - Napětí gate-emitor, měření se zátěží

Zobrazili jsme si detail náběžné a sestupné hrany jak ukazují obrázky č. 32 a č. 33:



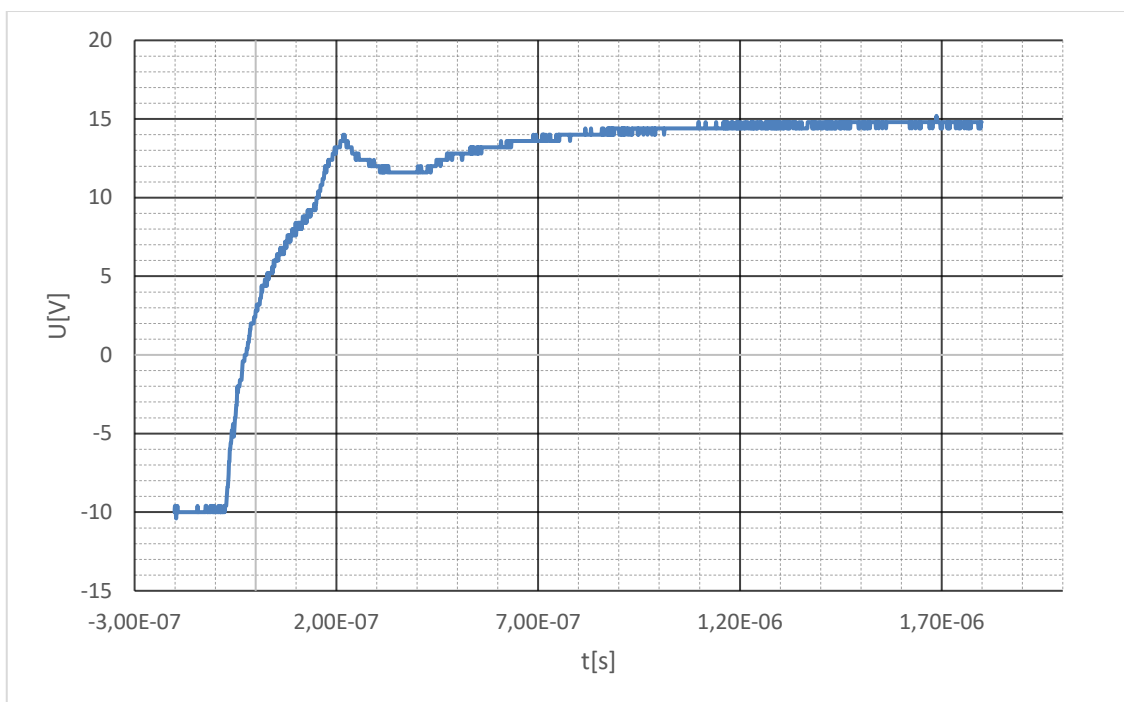
Obr. 32 - Detail náběžné hrany napětí gate-emitor



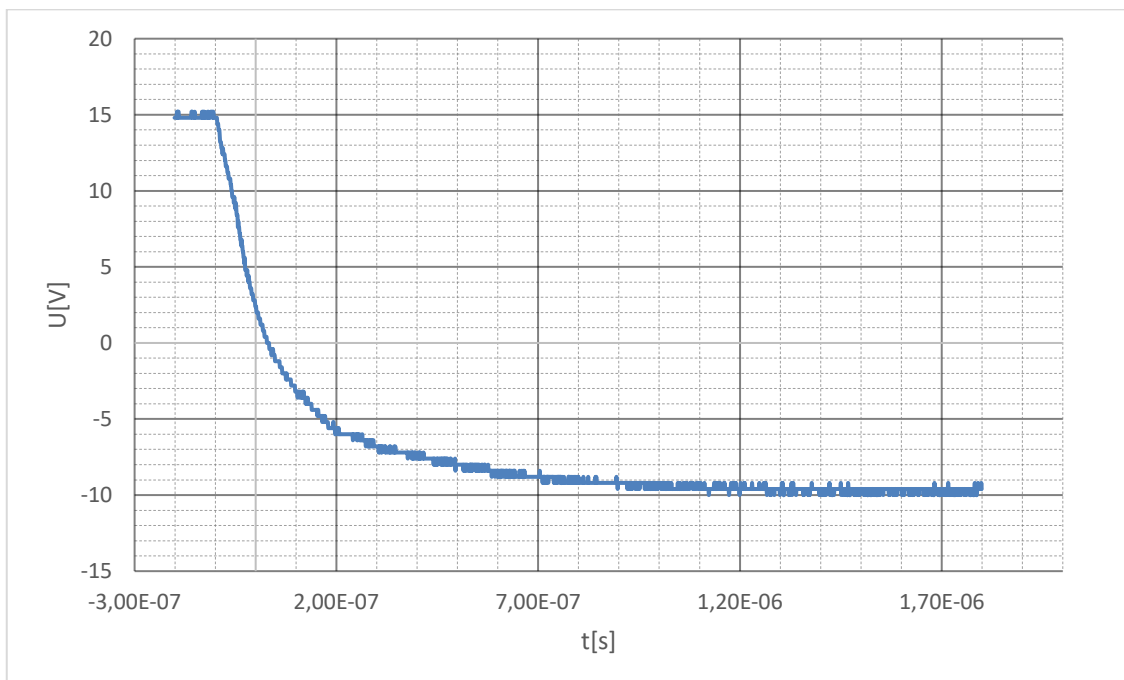
Obr. 33 - Detail sestupné hrany napětí gate- emitor

Tento jev nastává kvůli vzájemné indukčnosti jednotlivých signálových vodičů budiče a od samotného měniče. Tento poznatek je velkým přínosem zejména proto, že v budoucnu, při dokončení řídicí DPS, budou signálové vodiče navrženy se stíněním, aby nedocházelo právě k těmto negativním vlivům. Na obrázcích č. 34 a

č. 35 jsou vidět průběhy napětí gate-emitor měřené s připojenou silovou částí pod zátěží hned u výstupních svorek budiče, tedy neprojevuje se zde negativní vliv indukčnosti ostatních vodičů.



Obr. 34 - Detail náběžné hrany, bez indukčnosti



Obr. 35 - Detail sestupné hrany, bez indukčnosti

7 ZÁVĚR

Cílem práce bylo navrhnout výkonovou elektroniku pro střídač a aktivní usměrňovač výkonového měniče, realizovat obvody měniče a ověřit jejich funkci.

Tato práce obsahuje teoretické podklady pro stavbu frekvenčního měniče, řešerši asynchronních strojů s frekvenčními měniči, návrh silové části měniče, návrh měření veličin v měniči a návrh chlazení měniče.

Výsledkem provedené řešerše je seznámení s funkcí, konstrukcí a způsoby řízení asynchronních strojů, dále pak seznámení s měniči, ze kterých jsou sestaveny frekvenční měniče.

Následně jsou v práci obsaženy postupy při návrhu silové části měniče. Návrh L-C filtru, dimenzování kondenzátorů do stejnosměrného meziobvodu, dimenzování tranzistorových modulů, předběžný návrh rezistorů pro nabití kondenzátorů meziobvodu a konečně pak také návrh chlazení měniče.

Pro měření elektrických veličin byly předběžně navrženy hallové sondy, a to pro měření proudu na vstupu i výstupu měniče. Je předpokladem, že měření napětí fází bude provedeno pomocí měřicích transformátorů napětí na síťové straně měniče a měření napětí v meziobvodu zajišťuje napěťová hallova sonda.

Dále jsme v návrhovém designeru vytvořili schéma zapojení silové části měniče a její návrh DPS, podle kterého byla deska vyrobena. Poté jsme provedli osazení ostatními součástkami a sestrojili tak fungující silovou část měniče.

Též jsme sestrojili budič pro jednu větev tranzistorového modulu a poté otestovali funkci samotného budiče. Otestovali jsme i budič ve spojení s tranzistorovým modulem jako celistvou soustavu a ověřili její funkci.

Tato práce tedy v budoucnu může sloužit jako názorný podklad pro jinou práci nebo může být dobrým základem pro práci navazující. Návaznost by mohla obsahovat návrh a stavbu řídicí DPS s budiči pro aktivní usměrňovač a střídač, návrh pro umístění a oživení obvodů řídicího mikrokontroléru, brzdny výkonový odpor pro nouzové zastavení AS a otestování funkce měniče v motorickém i generátorovém režimu.

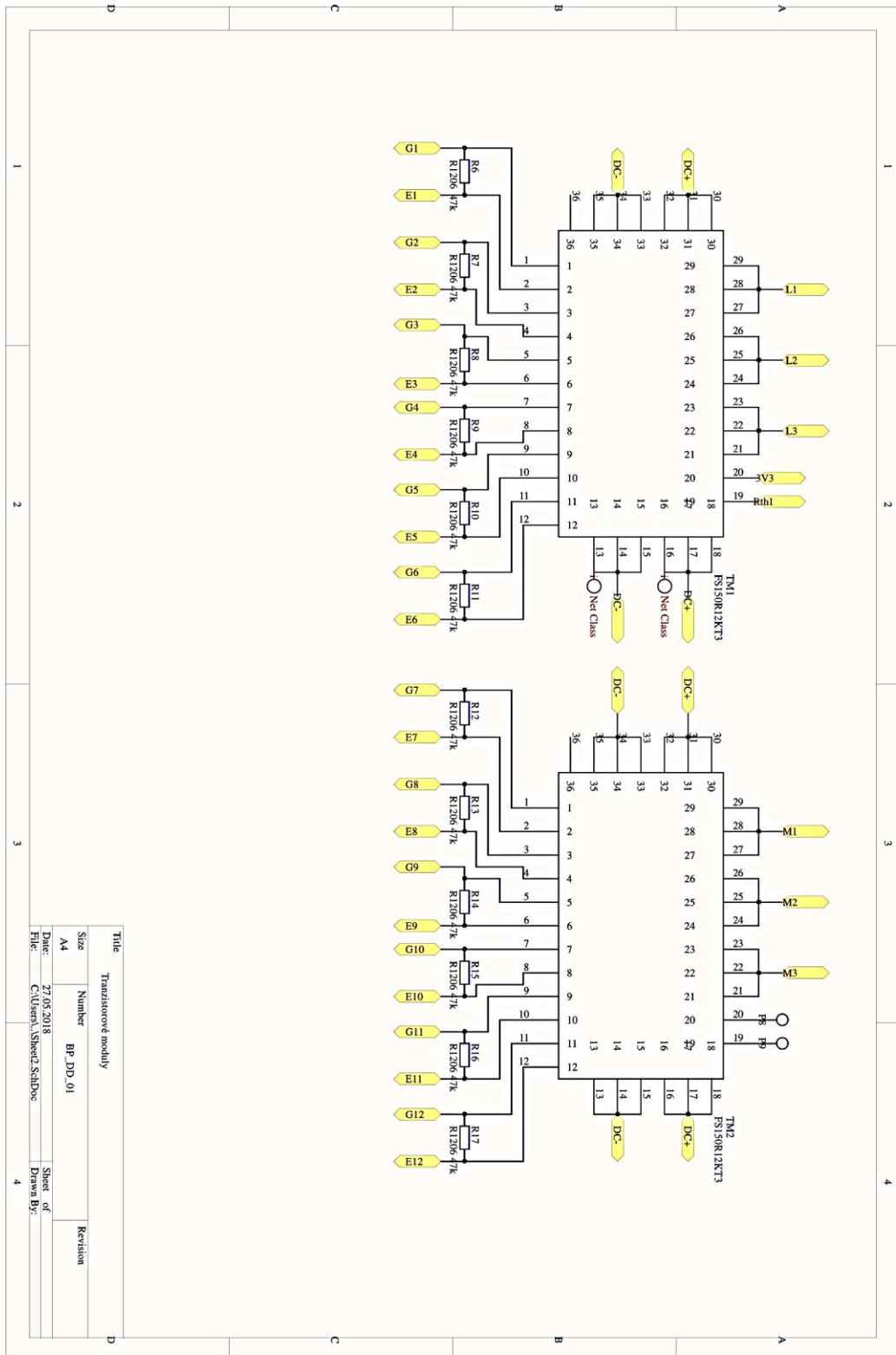
Po dokončení kompletního měniče, věřím ve skutečný přínos této práce v oblasti zabývající se problematikou frekvenčních měničů, efektivního využití nákladů a praktické uplatnění celého projektu. V kompletním provedení by tento měnič s AS mohl pracovat jako generátor malé vodní elektrárny, dokonce i malé přečerpávací vodní elektrárny vzhledem k oboustrannému toku energie měničem nebo jako tří-fázový pohon pracující ve všech čtyřech kvadrantech např. elektromobil.

LITERATURA

- [1] *Elektrické stroje a přístroje I: učebnice pro 3. ročník studia oboru 26-61-6 Zařízení silnoproudé elektrotechniky na středních průmyslových školách.* Praha: SNTL, 1990. ISBN 80-03-00406-3.
- [2] SEIML, Jan. *Paralelní spolupráce synchronního a asynchronního generátoru v ostrovním režimu.* Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014.
- [3] PETROV, G.N. *Elektrické stroje 2: Asynchronní stroje-synchronní stroje.* Praha: Academia, 1982, 728 s.
- [4] PETROV, G.N. *Elektrické stroje 1: Úvod - transformátory.* Praha: Academia, 1980, 385 s.
- [5] Chapter 7 Three-Phase Induction Motors, *Electrical Power and Controls*, by Timothy L. Skvarenina and William E. DeWitt, 2004, Prentice Hall, [online]. [cit. 2017-10-26]. Dostupné z:
http://www.etcs.ipfw.edu/~lin/ECET211/spring2014/1-Lectures/ECET211_Lect_3pIM.htm
- [6] What do electric motors and loudspeakers have in common? *Woodharbinger* [online]. www.woodharbinger.com: Yirak Jeff, 2015 [cit. 2017-10-26]. Dostupné z:
<https://www.woodharbinger.com/what-do-electric-motors-and-loudspeakers-have-in-common/>
- [7] AC Induction Motors with Squirrel Cage Rotors. *AC Induction Motors with Squirrel Cage Rotors* [online]. <https://gearmotorblog.wordpress.com>: Sarah Prais, 2016 [cit. 2017-11-07]. Dostupné z:
<https://gearmotorblog.wordpress.com/2016/06/08/ac-induction-gearmotors/>
- [8] Spouštění kroužkového motoru. *Spouštění kroužkového motoru* [online]. <http://elektrika.cz>: Ing. František Krejčí, 2010 [cit. 2017-11-07]. Dostupné z:
<http://elektrika.cz/data/clanky/spousteni-krouzkoveho-motoru/view>
- [9] RUSNOK, Stanislav a Pavel SOBOTA. *Cvičení z elektrických strojů.* Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3288-3.
- [10] Torque Slip Characteristics of Induction Motor. *Torque Slip Characteristics of Induction Motor* [online]. <https://www.electrical4u.com>: Electrical4u, 2017 [cit. 2017-11-07]. Dostupné z: <https://www.electrical4u.com/torque-slip-characteristics-of-induction-motor/>
- [11] Motor s kroužkovou kotvou: Prezentace. *Motor s kroužkovou kotvou indukční motor. Princip jeho činnosti je stejný jako u motoru s kotvou nakrátko* [online]. <http://docplayer.cz>: Radovan Esterka, 2016 [cit. 2017-11-08]. Dostupné z:
<http://docplayer.cz/13185905-Motor-s-krouzkovou-kotvou-motor-s->

krouzkovou-kotvou-indukcni-motor-princip-jeho-cinnosti-je-stejny-jako-u-motoru-s-kotvou-nakratko.html

- [12] SOCHOR, P. Systém pohonu frekvenční měnič – elektromotor – převodovka. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 55 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Malášek, Ph.D.
- [13] CAHA, Zdeněk a Miroslav ČERNÝ. *Elektrické pohony*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1990. ISBN 80-03-00418-7.
- [14] PATOČKA, Miroslav. *Vybrané stati z výkonové elektroniky: Svazek II. Pulsní měniče bez vf. impulsního transformátoru*. 2. vyd. Brno: PC-DIR Real, 1998, 175 s. ISBN 80-214-1258-5.
- [15] PATOČKA, Miroslav. *Vybrané stati z výkonové elektroniky: Svazek I. Tepelné jevy, činný výkon*. 3. vyd. Brno: VUT, 2000, 61 s. ISBN 80-214-1736-6.
- [16] PILCH, Tomáš Jednoduchý měnič pro 3f asynchronní motor: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky, 2014/2015. 44 s. Vedoucí práce byl Ing. Dalibor Červinka, PhD.
- [17] ELKNER, Ing. Pavel. Řízení motorů pomocí frekvenčních měničů [online]. Praha, 2010 [cit. 2017-11-19]. Dostupné z: <http://goo.gl/rcFUcg>. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Jindřich Fuka.
- [18] PATOČKA, Miroslav. *Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice*. V Brně: VUTIUM, 2011. ISBN 978-80-214-4003-6.
- [19] BAREŠ, J. Návrh a realizace aktivního trojfázového usměrňovače. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 44 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Huták, Ph.D..



Title		Revision	
Tranzistorové moduly			
Size	Number	BP_DD_01	
A4			
Date	27.05.2018	Sheet of	
File	C:\Users\... \Siber2\SchDoc	Drawn By:	
		4	

Obr. 37 - Schéma zapojení tranzistorových modulů