

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

**Realizace jednofázového a třífázového
tyristorového usměrňovače s mikroprocesorovým
řízením**
**Realization of Microprocessor Control One and
Three Phase Thyristor Rectifier**

2012

Bc. Jiří Špička

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jiří Špička**

Studijní program: N2649 Elektrotechnika

Studijní obor: 2612T015 Elektronika

Téma: Realizace jednofázového a třífázového tyristorového usměrňovače s mikroprocesorovým řízením
Realization of Microprocessor Control One and Three Phase Thyristor Rectifier

Zásady pro vypracování:

1. Proved'te teoretický popis výkonového měniče a simulací tyto předpoklady ověřte.
2. Dimenzujte komponenty výkonového měniče.
3. Vytvořte 3D CAD modelovou sestavu usměrňovače.
4. Navržené řešení realizujte.
5. Proved'te seznámení se s řídicími obvody měniče.
6. Proved'te ověření funkčnosti spolupráce výkonové části s řídicími obvody v rozsahu stanoveném vedoucím diplomové práce.

Seznam doporučené odborné literatury:

- Vondrášek, F.: Výkonová elektronika II- Měniče s vnější komutací, Plzeň 1994.
- Slavík, I., Konštrukcia výkonových polovodičových meničov, 1. vydání, ALFA, Bratislava 1985.
- Aksenov, A. I., Glušková, D.N., Ivanov, V.I.: Chlazení polovodičových součástek, 1. vydání, SNTL, Praha 1975.
- Tremblay, T.: Autodesk Inventor 2010: No Experience Required, Indianapolis 2009.
- Bose, B.: Modern Power Electronics and AC drives, The University of Tennessee 2001.
- William, M.: Introduction to Solid State Power Electronics, POWEREX Semiconductor Division Youngwood, Pennsylvania 1977.

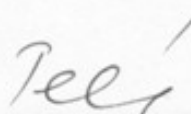
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

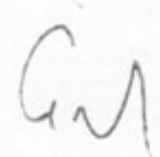
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Vaculík**

Datum zadání: 18.11.2011

Datum odevzdání: 04.05.2012

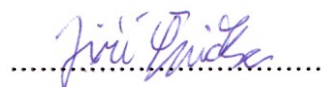



doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry


prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně a uvedl všechny literární prameny, materiály a publikace, ze kterých jsem čerpal.



Bc. Jiří Špička

Datum odevzdání diplomové práce: 4. 5. 2012

Poděkování

Touto cestou děkuji Ing. Petru Vaculíkovi, Ph.D. za čas strávený konzultací mé diplomové práce a odpornou pomoc při její realizaci a Ing. Davidu Slívkovi za uvedení do programovacího prostředí a odbornou pomoc při zavádění algoritmů řízení.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá návrhem a konstrukcí jednofázového a třífázového řízeného usměrňovače. Tento měnič bude sloužit především k výuce, praktickému měření a ověřování principů řízených usměrňovačů. Práce je rozdělena do tří částí. První část je určena k teoretickému popisu měniče. Ve druhé části je popsána simulace, návrh a dimenzování komponentů výkonového měniče. Třetí část se zabývá samotnou konstrukcí řízeného usměrňovače. V závěru diplomové práce jsou uvedeny výsledky simulací, přílohy a průvodní dokumentace řízeného usměrňovače.

Klíčová slova

Výkonový polovodičový měnič, řízený usměrňovač, jednofázový usměrňovač, třífázový usměrňovač, tyristor, tyristorový usměrňovač, MC56F8037.

Abstract

This thesis describes the design and construction of one phase and three phase controlled rectifier. The power converter will be used primarily for teaching, practicing the principles of measurement and verification of controlled rectifiers. The work is divided into three parts. The first part is intended for theoretical description of the power converter. In the second part describes the simulation, design and dimensioning of components of the power converters. The third part deals with the actual construction of a controlled rectifier. In conclusion, the thesis presents the results of simulations, attachments and accompanying documents controlled rectifier.

Key words

Semiconductor converter, Control rectifier, One-phase Rectifier, Three-phase Rectifier, Thyristor, Thyristor Rectifier, MC56F8037.

Seznam použitých symbolů a zkratk

symbol	jednotka	popis symbolu
α	$^{\circ}$	řídící úhel
Δ	-	symbol udávající rozdíl veličin

zkratka	popis zkratky
DPS	deska plošných spojů
IPULSE	zdroj proudových pulzů
P	pulz řídicího signálu
P_{fav}	zdroj výkonu (pro výpočet tepelných ztrát)
SKKT	tyristorový modul
SP	signálový procesor
TH	tyristor
V	zdroj síťového napětí
VDC	zdroj stejnosměrného napětí
VSIN	zdroj střídavého napětí

veličina	jednotka	popis veličiny
<i>alfa</i>	$^{\circ}$	řídící úhel
<i>FREQ</i>	Hz	konstanta udávající frekvenci fázového (sdruženého) napětí a proudu síťového zdroje
I^2t	A^2s	tepelný integrál
I_{RMS}^2	A^2	kvadrát efektivní hodnoty proudu tekoucím tyristorem
I_D	A	střední hodnota výstupního proudu tyristorového usměrňovače
I_f	A	fázový proud tyristorového usměrňovače
I_{GT}	A	okamžitá hodnota spínacího proudu hradla tyristoru
I_{MAX}	A	amplituda proudů v usměrňovači při odporové zátěži
I_{out}	A	výstupní proud tyristorového usměrňovače
I_{RMS}	A	kvadrát efektivní hodnoty proudu tekoucím tyristorem
I_{TAV}	A	střední hodnota proudu tekoucím tyristorem
I_{th}	A	proud tekoucí tyristorem
k	-	konstanta udávající číslo IPULSE zdroje
L	H	induktanční složka impedance zdroje
L_Z	H	Indukční složka zátěže
p	-	konstanta udávající číslo pulsu usměrněného napětí
P_{FAV}	W	ztrátový výkon polovodičové součástky, tyristoru
PW	s	šířka pulzu řídicího signálu tyristorového usměrňovače
R	Ω	reálná složka impedance zdroje
r_T	Ω	odpor polovodičové struktury při toku propustného proudu

veličina	jednotka	popis veličiny
R_{th}	K/W	tepelný odpor
R_{thc-h}	K/W	tepelný odpor styku pouzdra součástky a chladičem
R_{thh-a}	K/W	tepelný odpor mezi chladičem a okolím
R_{thj-c}	K/W	tepelný odpor mezi polovodičovou strukturou a pouzdrem součástky
R_Z	Ω	odporová složka zátěže
T	s	perioda signálu
T_A	$^{\circ}\text{C}$	teplota okolního prostředí
T_c	$^{\circ}\text{C}$	teplota pouzdra součástky
TD	s	časové zpoždění pulzu pulzního zdroje
T_h	$^{\circ}\text{C}$	teplota chladiče
T_j	$^{\circ}\text{C}$	teplota polovodičové struktury
u_1, u_2, u_3	V	fázová napětí síťového zdroje
U_{DAV}	V	střední hodnota výstupního napětí usměřovače
U_{GT}	V	okamžitá hodnota spínacího napětí mezi hradlem a katodou tyristoru
U_{in}	V	vstupní napětí
U_{out}	V	výstupní napětí
$u_{S1}-u_{S6}$	V	sdílená napětí síťového zdroje
U_{TO}	V	úbytek napětí polovodičové struktury tyristoru při průchodu propustným proudem
$VAMPL$	V	konstanta udávající amplitudu fázového napětí

Obsah

Úvod.....	8
1. Teoretická část.....	9
1.1. Rozdělení výkonových polovodičových měničů.....	9
1.2. Usměrňovače.....	11
1.2.1. Princip usměrňovačů.....	11
1.2.2. Dvoupulzní usměrňovač.....	12
1.2.3. Třífázový usměrňovač.....	13
1.3. Řízené usměrňovače.....	14
1.3.1. Jednofázový řízený usměrňovač.....	14
1.3.2. Třífázový řízený usměrňovač.....	15
1.4. Popis řídicího systému tyristorového usměrňovače.....	16
2. Návrhová část.....	18
2.1. Simulace.....	18
2.1.1. Popis hlavního schématu.....	18
2.1.2. Zdroj napájení tyristorového usměrňovače.....	19
2.1.3. Tyristorový modul SKKT.....	20
2.1.4. Řízení simulace.....	21
2.1.5. Budicí obvody tyristorového usměrňovače.....	22
2.2. Návrh chlazení a jištění.....	24
2.2.1. Předpoklady k řešení ztrátových výkonů tyristorového usměrňovače.....	24
2.2.2. Výpočet ztrátových výkonů tyristorů jednofázového usměrňovače.....	24
2.2.3. Tepelný model jednofázového tyristorového usměrňovače.....	28
2.2.4. Výpočet ztrátových výkonů tyristorů třífázového usměrňovače.....	31
2.2.5. Tepelný model třífázového tyristorového usměrňovače.....	35
2.2.6. Jištění tyristorového usměrňovače.....	37
2.3. 3D CAD modelová soustava.....	41
2.3.1. Chladicí systém s tyristorovými moduly SKKT.....	42
2.3.2. 3D modely řídicí elektroniky tyristorového usměrňovače.....	43
2.3.3. Kryt tyristorového usměrňovače.....	46
3. Realizační část.....	47
3.1. Konstrukce plechů.....	49
3.2. Řídicí elektronika tyristorového usměrňovače.....	50
3.2.1. Budicí obvody tyristorového usměrňovače.....	50
3.2.2. Desky čidel pro měření vstupních a výstupních signálů.....	55
3.2.3. Popis řídicího systému.....	57
3.3. Spolupráce řídicí elektroniky a výkonové části tyristorového usměrňovače.....	58
Závěr.....	61
Seznam použité literatury.....	62
Seznam příloh.....	64

Úvod

Tyristorové řízené usměrňovače patří do skupiny měničů s vnější komutací převádějící střídavou elektrickou energii na stejnosměrnou. Využívají se k řízení stejnosměrných motorů, jako soft-startéry střídavých motorů, k regulaci osvětlení, k řízení teploty pecí nebo řízení teploty u chemických procesů atd.

Cílem diplomové práce je realizování jednofázového a třífázového tyristorového usměrňovače s mikroprocesorovým řízením. S realizací tyristorového usměrňovače souvisí body zadání. Vypracování bodů zadání je chronologicky popsáno ve třech hlavích úsecích diplomové práce. První částí diplomové práce je teoretický popis výkonových polovodičových měničů se zřetelem na popis usměrňovačů. Druhou částí diplomové práce je popis návrhu tyristorového usměrňovače a ve třetí části je popsána jeho realizace. S realizací tyristorového usměrňovače souvisí nejenom poskládání jeho jednotlivých komponentů ale i návrh a výroba řídicí elektroniky, její zprovoznění a ověření funkčnosti spolupráce řídicí elektroniky s výkonovou částí tyristorového usměrňovače.

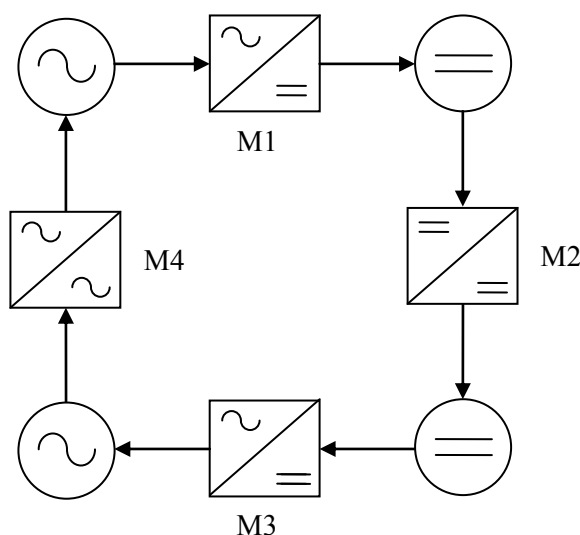
Větší část diplomové práce souvisí se simulací tyristorového usměrňovače vytvořené v programu OrCAD - PSpice. Simulací je ověřen teoretický popis řízeného usměrňovače. Od simulace se odvíjí dimenzování komponentů výkonového měniče a částí simulace jsou i podsimulace například pro návrh budicích obvodů tyristorového usměrňovače. Vzorce a popisující obrázky při dimenzování komponentů tyristorového usměrňovače jsou zpracovány v programu MATLAB. 3D CAD modelová soustava tyristorového usměrňovače je namodelována v programu Autodesk – Inventor a v diplomové práci jsou popsány všechny namodelované komponenty tyristorového usměrňovače. Popsány jsou i návrhy částí řídicí elektroniky tyristorového usměrňovače především návrh budicích obvodů.

V závěru diplomové práce je zhodnocený postup jejího vypracování. Popis realizace tyristorového usměrňovače v textu celé diplomové práce provázen názornými blokovými schémata a obrázky dílčích i celkových výsledků. K diplomové práci jsou přiloženy vybrané simulace, fotky zhotoveného tyristorového usměrňovače a měřících stanovišť při jeho oživování.

1. Teoretická část

1.1. Rozdělení výkonových polovodičových měničů

Výkonové polovodičové měniče lze dělit dle více kritérií. Hlavní rozdělení výkonových polovodičových měničů spočívá ve způsobu změny vstupních parametrů elektrické energie na výstupní parametry elektrické energie. Především se jedná o změnu střídavé elektrické energie na stejnosměrnou elektrickou energii a naopak. Základní rozdělení výkonových polovodičových měničů je zobrazeno na následujícím obrázku 1.1.



Obr. 1.1. Základní rozdělení výkonových polovodičových měničů [3]

M1 představuje skupinu usměrňovačů, tedy měničů přeměňující střídavou elektrickou energii na stejnosměrnou. M2 představuje skupinu stejnosměrných měničů, které mění parametry stejnosměrné elektrické energie, například velikost odporu či střední hodnoty napětí. M3 představuje skupinu střídačů, tedy měničů převádějící stejnosměrnou elektrickou energii na střídavou a M4 skupinu střídavých měničů měnících parametry střídavé elektrické energie, kterými jsou velikosti napětí, kmitočtu, impedance či počet fází.

Dále se výkonové polovodičové měniče mohou dělit dle způsobu komutace spínacích prvků nebo dle způsobů řízení toku elektrické energie.

Dle možností komutace se dělí výkonové polovodičové měniče:

- měniče s vnější komutací
- měniče s vlastní komutací
- měniče bez komutace.

Dle řízení toku elektrické energie se výkonové polovodičové měniče dělí:

- neřízené měniče
- polořízené měniče
- řízené měniče.

Tyristorový jednofázový a třífázový tyristorový usměrňovač patří dle výše popsaného rozdělení do skupiny usměrňovačů s vnější komutací a díky tyristorovým modulům jsou plně říditelné.

1.2. Usměrňovače

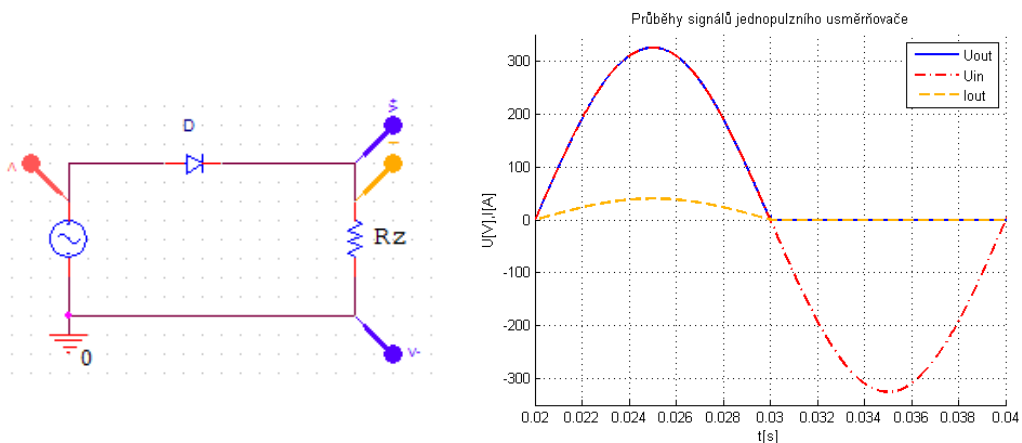
Usměrňovače patří do skupiny měničů měnící střídavou elektrickou energii na stejnosměrnou. Při této změně elektrické energie je usměrňovač v usměrňovacím chodu a platí zde, že přenášený výkon je kladný, respektive výstupní proud usměrňovače nabývá pouze kladných hodnot.

Usměrňovače se dělí:

- dle zapojení na můstkové a uzlové
- dle počtu fází na jednofázové, dvoufázové, až n – fázové
- dle počtů pulzů usměrněného napětí 1pulzní, 2pulzní až n – pulzní.

1.2.1. Princip usměrňovačů

Princip usměrňovače vychází z principů vedení proudu polovodičovými součástkami, které se v usměrňovačích používají. Vedení proudu polovodičovou součástkou, například diodou, je vysvětlen a zobrazen na následujícím obrázku, kde polovodičová dioda je zapojena jako jednopulzní usměrňovač s odporovou zátěží.

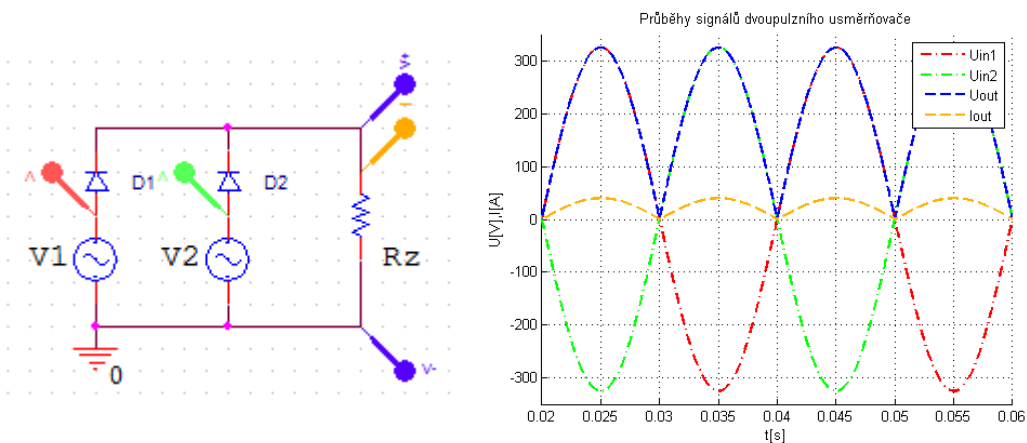


Obr. 1.2.1. Schéma zapojení a průběhy signálů 1pulzního usměrňovače

Polovodičová dioda D vede proud pouze při kladné polaritě napájecího napětí U_{in} . Průběh výstupního proudu I_{out} je shodný s průběhem výstupního napětí U_{out} při odporové zátěži R_z .

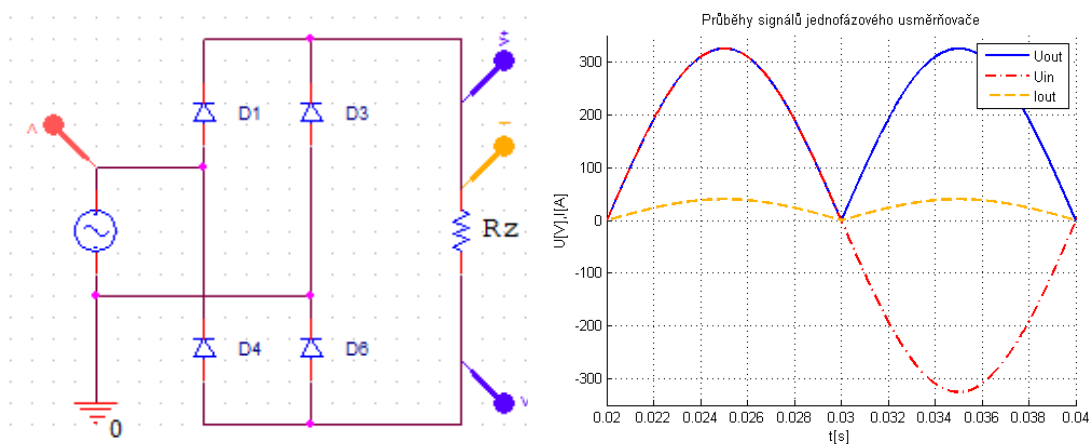
1.2.2. Dvoupulzní usměrňovač

Na následujícím obrázku je znázorněn 2pulzní usměrňovač v uzlovém zapojení, průběhy napětí a výstupního proudu. Jedná se o paralelní zapojení dvou 1pulzních usměrňovačů. Napětí zdroje V2 je fázově posunuto o polovinu periody.



Obr. 1.2.2.1. Schéma zapojení a průběhy signálů 2pulzního usměrňovače v uzlovém zapojení

2pulzní usměrňovač v můstkovém zapojení je zobrazen na následujícím obrázku.

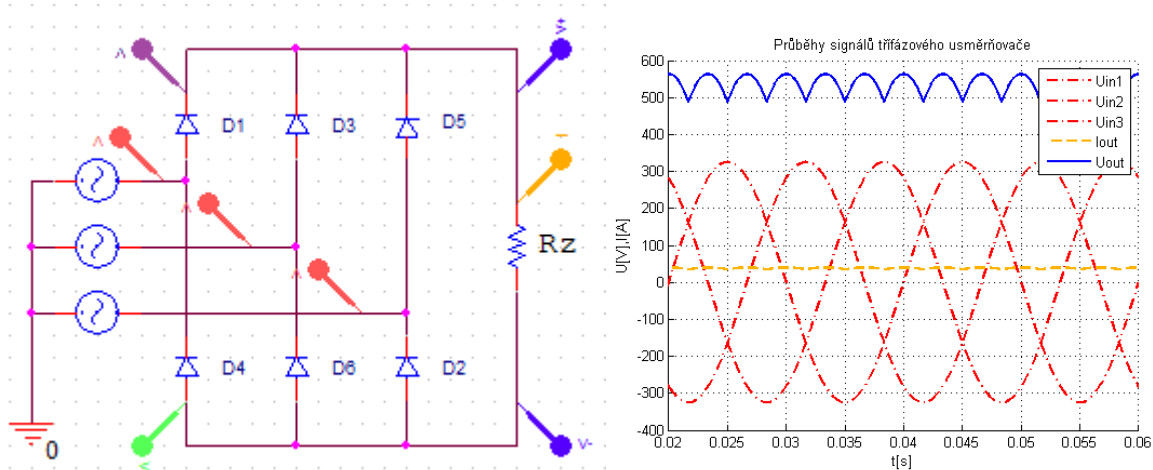


Obr. 1.2.2.2. Schéma zapojení a průběhy signálů jednofázového usměrňovače

Průběh výstupního proudu I_{out} při odporové zátěži R_z kopíruje průběh výstupního napětí U_{out} . Výstupní napětí nabývá kladných hodnot v obou půlperiodách napájecího napětí. Při kladné hodnotě napájecího napětí vedou proud diody D1 a D6, zápornou půlplnu napájecího napětí vedou proud diody D3 a D4.

1.2.3. Třífázový usměrňovač

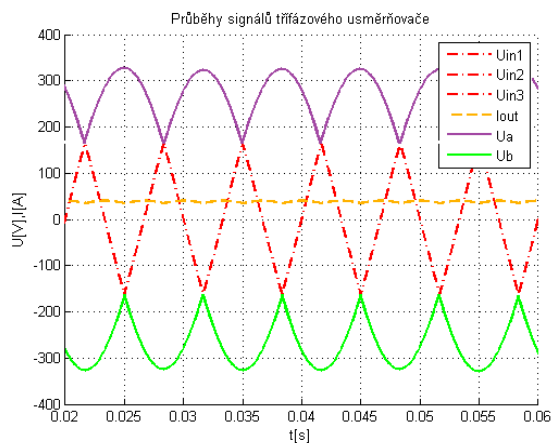
Na následujícím obrázku je zobrazený 6pulzní usměrňovač v můstkovém zapojení.



Obr. 1.2.3.1. Schéma zapojení a průběhy signálů třífázového usměrňovače

V tomto případě protéká diodami proud, který se uzavírá přes dva napájecí zdroje, to znamená, že diody nejsou pod fázovým napětím nýbrž pod napětím sdruženým. Sdružené napětí je rozdílem fázových napětí.

Na obrázku vpravo jsou znázorněny průběhy napětí anodové U_a a katodové skupiny U_b diod. Výsledné usměrňené napětí U_{out} je rozdílem těchto napětí.



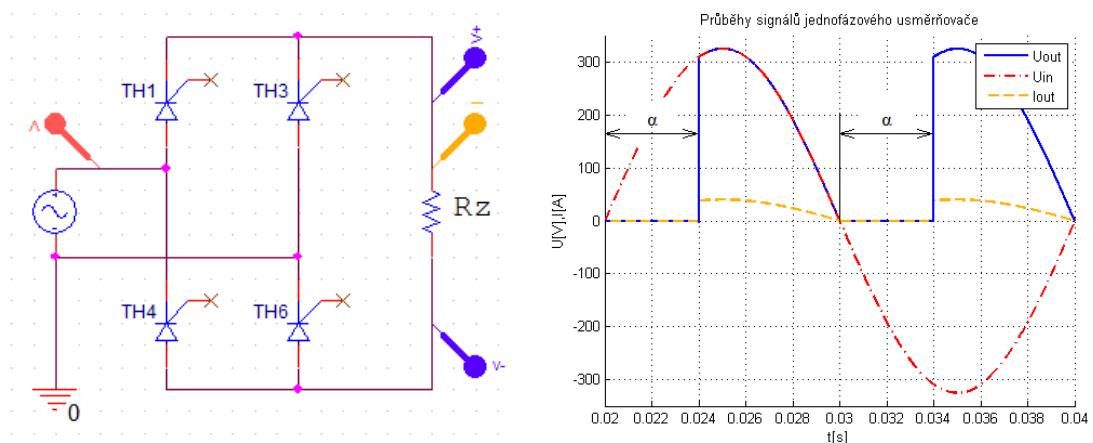
Obr. 1.2.3.2. Průběhy signálů třífázového usměrňovače

1.3. Řízené usměrňovače

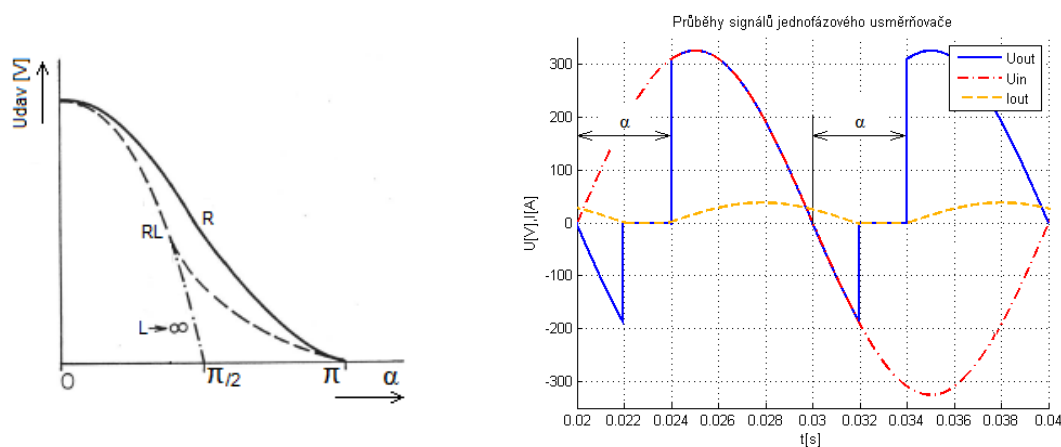
V řízených usměrňovačích se používají polovodičové součástky, tyristory, které jsou spínány vnějšími řídicími pulzy. Řídicími pulzy se nastavuje úhel řízení α . Řídicí úhel α je úhel (doba), o který je zpožděno sepnutí každého z tyristorů usměrňovače, vzhledem k úhlu (době), ve kterém by na jeho místě sepnula dioda. Udává se obvykle ve stupních přičemž $360^\circ = 2\pi =$ perioda signálu. Řídicím úhlem α se nastavuje střední hodnota výstupního napětí usměrňovače a platí zde nepřímá úměra, čili čím větší úhel α tím menší střední hodnota výstupního napětí. Tento předpoklad udává řídicí charakteristika řízeného usměrňovače.

1.3.1. Jednofázový řízený usměrňovač

Na následujících obrázcích je zobrazen jednofázový řízený usměrňovač s popsány mi průběhy napětí a proudu při úhlu řízení α a při odporové zátěži a odporově-indukční zátěži.



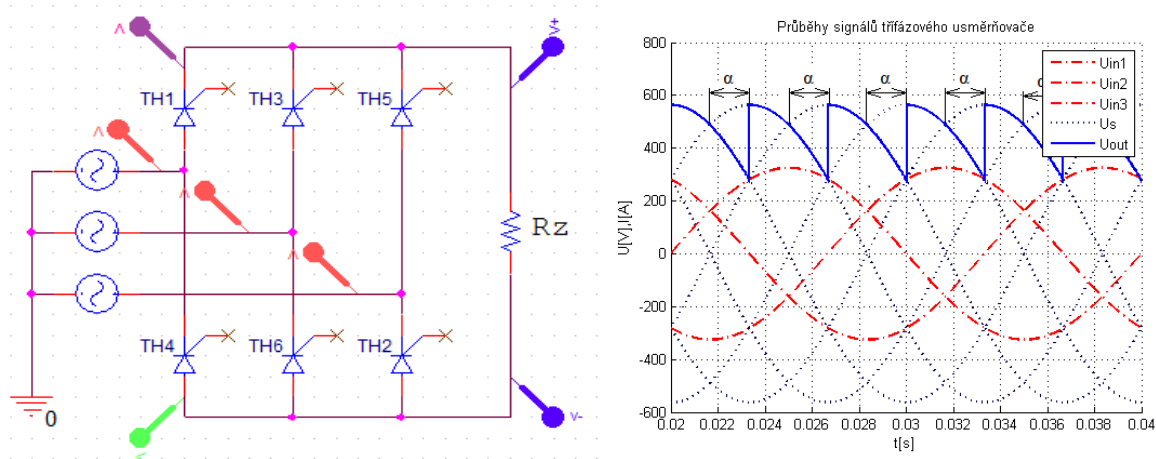
Obr. 1.3.1.1. Schéma zapojení a průběhy signálů jednofázového usměrňovače při R zátěži



Obr. 1.3.1.2. Řídicí charakteristika a průběhy signálů I_f usměrňovače s RL zátěží

1.3.2. Třífázový řízený usměrňovač

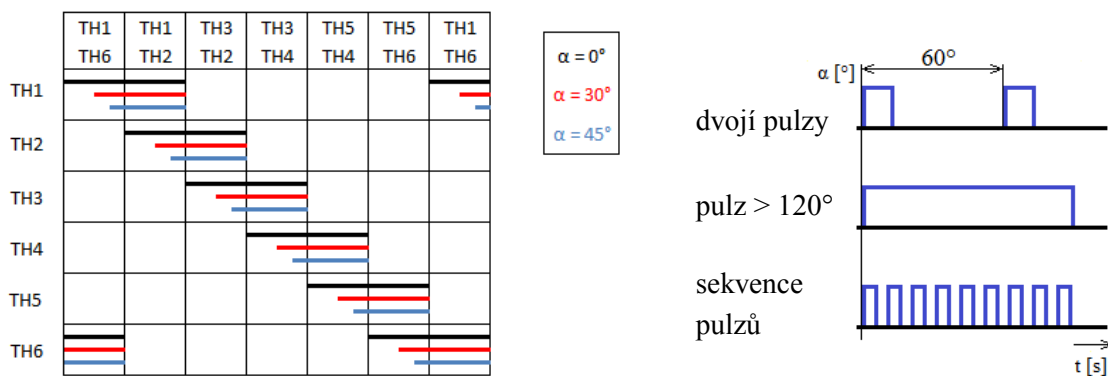
Na následujícím obrázku je zobrazen třífázový řízený usměrňovač s popsány průběhy napětí při úhlu řízení α .



Obr. 1.3.2.1. Schéma zapojení a průběhy signálů třífázového usměrňovače

Řízení třífázového usměrňovače

Na následujícím obrázku jsou zobrazeny takty spínání třífázového můstku. Takt je dlouhý $1/6$ periody napájecího napětí neboli 60° . V každém taktu je spínána dvojice tyristorů. Každým tyristorem protéká proud nejvýše dva takty, čili při plně otevřeném můstku je délka vedení proudu tyristorem $1/3$ periody napájecího napětí. Při úhlu řízení α se čas sepnutí tyristoru posouvá v rozmezí $0 < \alpha < 60^\circ$. Tyristorem musí protékat proud více než jeden takt, usměrňovač by jinak pracoval v oblasti nespojitých proudů.

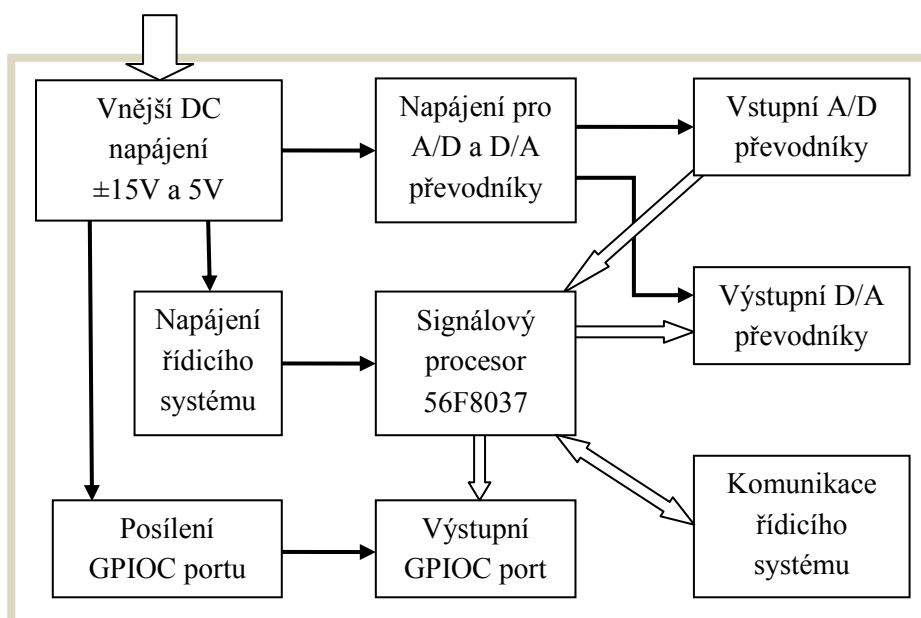


Obr. 1.3.2.2. Spínací diagram třífázového usměrňovače

Obr. 1.3.2.3. Možnosti řídicích pulzů

1.4. Popis řídicího systému tyristorového usměrňovače

Řídicí systém se signálovým procesorem 56F8037 od firmy Freescale byl vytvořen Ing. Davidem Slivkou. Deska řídicího systému slouží ke komunikaci tyristorového usměrňovače s počítačem přes programovací a komunikační rozhraní JTAG pomocí programu FreeMASTER [17]. V programu FreeMaster se nastavují parametry k řízení tyristorového usměrňovače a slouží pro zobrazení zpětné vazby. Zpětnou vazbou je myšleno snímání napěťových a proudových signálů tyristorového usměrňovače. Následující blokové schéma znázorňuje vnitřní strukturu řídicího systému.



Obr. 1.5. Blokové schéma řídicího systému tyristorového usměrňovače

Popis využívaných periférií [13]

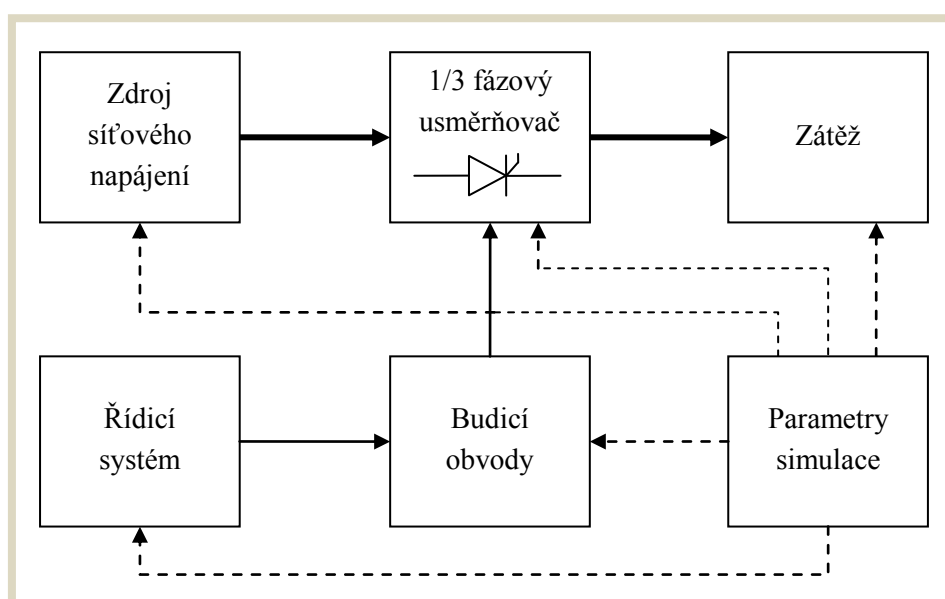
- dva nezávislé 12bitové A/D převodníky
 - o každý z nich má 8 vstupních kanálů
 - o s vzorkovací frekvencí až 2,67 miliónů vzorků za sekundu
 - o výsledek je 16bitový
- dva - A/D převodníky
 - o automatické generace přednastavených signálů ve tvaru obdélníku a trojúhelníku s nastavitelnou periodou, obnovovací frekvencí a rozsahem
- dva 16bitové čtyřnásobné časovače
 - o maximálně 96Mhz
 - o 8 nezávislých 16bitových časovačů/čítačů s možností spojení do kaskády
 - o možnost odečtení a porovnání hodnoty
- tři programovatelné časovače PIT
 - o dva analogové komparátory
 - o možnost vybrání zdroje vstupu včetně externích pinů
 - o nastavitelná výstupní polarita
 - o výstup může řídit vstup časovače, externí výstup a trigger
 - o výstupní sestupné a nástupné hrany mohou být použity pro generování přerušení
- JTAG/EOnce ladící programovací rozhraní pro možnost ladění v reálném čase.

Výše je uveden popis využívaných periférií k řízení tyristorového usměrňovače. Popis dalších periférií a podrobnější popis řídicího systému se signálovým procesorem 56F8037 je uveden v diplomové práci Ing. Davida Slivky [13] a datasheetech uvedených v seznamu literatury.

2. Návrhová část

2.1. Simulace

Výkonová část a část řídicí elektroniky tyristorového usměrňovače je sestavena a simulována v programu OrCAD - PSpice. Obvodové schéma je uspořádáno do hierarchických bloků, které jsou popsány v následujících podkapitolách. Kompletní simulační blokové schéma je uvedeno v příloze I.



Obr. 3. Simulační blokové schéma jednofázového a třífázového tyristorového usměrňovače

2.1.1. Popis hlavního schématu

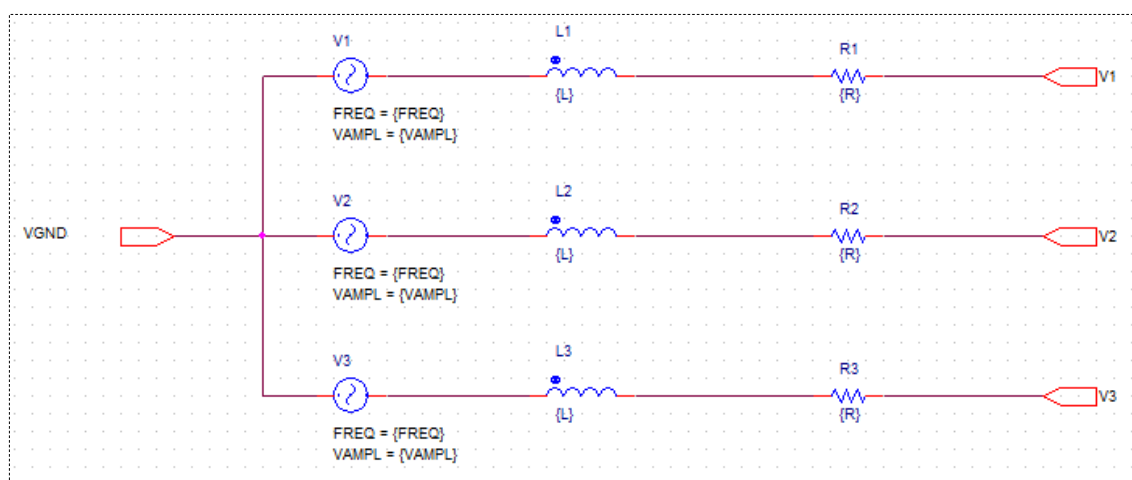
Rozložení jednotlivých bloků hierarchické struktury hlavního schématu je především dáno konstrukčním uspořádáním výkonového polovodičového měniče, zpřehledňuje zapojení vodivých cest v měniči, usnadňuje implementaci algoritmů řízení. Slouží jako vizuální pomůcka při realizaci tyristorového usměrňovače.

Hlavní schéma umožňuje nastavování všech parametrů simulace tyristorového usměrňovače bez nutnosti zásahu do jednotlivých bloků hierarchické struktury. Každý blok má přiřazené parametry, s ním související, a jsou popsány v následujících kapitolách.

2.1.2. Zdroj napájení tyristorového usměrňovače

Tyristorový usměrňovač je napájen ze zdroje síťového napětí 3x230/400V. Síťová fázová napětí jsou v simulaci reprezentována VSIN zdroji generujícími ideální sinusové napětí o 1. harmonické. V napájecím zdroji je reprezentována i jeho vnitřní impedance.

Parametry napájecího zdroje jsou nastavitelné v hlavním schématu. Lze nastavit amplitudu: $VAMPL$ a frekvenci: $FREQ$ napájecích napětí a složky vnitřní impedance zdroje: R a L . Defaultně je nastavená zanedbatelná impedance napájecího zdroje.



Obr. 2.1.2. Vnitřní struktura bloku napájecího zdroje

Vztahy pro napájecí fázová napětí

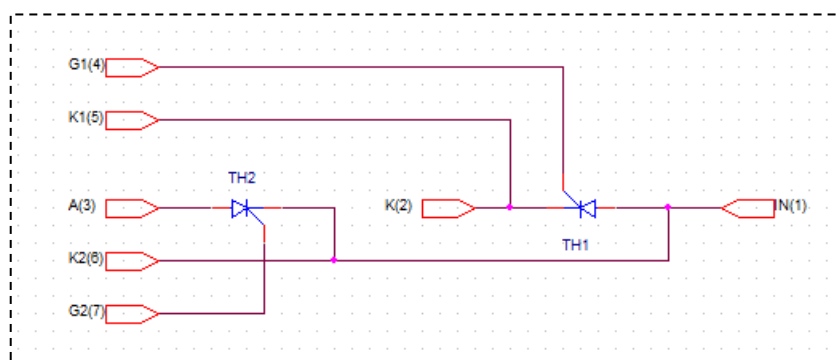
$$u_1(t) = VAMPL \cdot \sin(2\pi \cdot FREQ \cdot t) \quad (2.1.2.1)$$

$$u_2(t) = VAMPL \cdot \sin\left(2\pi \cdot FREQ \cdot t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.1.2.2)$$

$$u_3(t) = VAMPL \cdot \sin\left(2\pi \cdot FREQ \cdot t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.1.2.3)$$

2.1.3. Tyristorový modul SKKT

Knihovny PSpice neobsahují tyristorové moduly SKKT, proto je vytvořen PSpice model tyristorů obsažených v modulu SKKT42B08D. Modul obsahuje dvojici tyristorů zapojených dle obr. 2.1.3. Tímto způsobem spojené tyristory a vyvedené očíslované piny zpřehledňují reálné zapojení modulů tyristorového usměrňovače.



Obr. 2.1.3. Tyristorový modul SKKT

PSpice model tyristoru modulu SKKT je vytvořen přepsáním již existujícího modelu tyristoru MCR225-10FP podle údajů datasheetu SKKT42B08D. [6]

PSpice model tyristorů simulace

```
.subckt MCR225-10FP      anode gate cathode
* Min and Max parameters
X1 anode gate cathode Scr params:
+ Vdrm=800v  Vrrm=800v   Ih=250ma      Vtm=1.95v    Itm=1000
+ dVdt=100e6 Igt=150ma  Vgt=3v       Ton=1u       Toff=80u
+ Idrm=10u
.ends
```

2.1.4. Řízení simulace

Hlavním parametrem simulace je nastavení počtu pulsů usměřovače, to znamená zvolení jednofázového nebo třífázového můstku. Třífázový tyristorový usměřovač pracuje se všemi třemi moduly SKKT a fázovými síťovými napětími. Můstek jednofázového tyristorového usměřovače tvoří moduly SKKT2 a SKKT3 tedy tyristory TH3, TH5, TH6 a TH2. Jednofázový tyristorový usměřovač je napájen sdruženým napětím $u_{S2} = u_2 - u_3$. Přepínání mezi jednofázovým a třífázovým usměřovačem je dáno softwarovým řízením.

Signálový procesor SP je v simulaci zastoupen proudovými zdroji IPULSE generujícími budící pulsy P1-P6 o šířce PW . Tyto pulsy spínají optočleny v budících obvodech. Dalším důležitým parametrem je úhel řízení $alfa$ (α) [°].

Parametr TD (Time Delay), IPULSE zdrojů, pro spínání tyristorů je dána následujícími vztahy za předpokladu, že napájecí napětí jsou definována dle vztahů uvedených v kapitole 2.1.2. tedy $u_1(0) = 0V$ a pořadí tyristorů je dáno dle teoretického popisu usměřovače

vztah pro generování pulsů pro třífázový tyristorový usměřovač

$$TD = \frac{1}{12 \cdot \text{FREQ}} \cdot \left(2 \cdot k - 1 + \frac{\text{alfa}}{30} \right) \quad k \in \{1,2,3,4,5,6\} \quad (2.1.4.1)$$

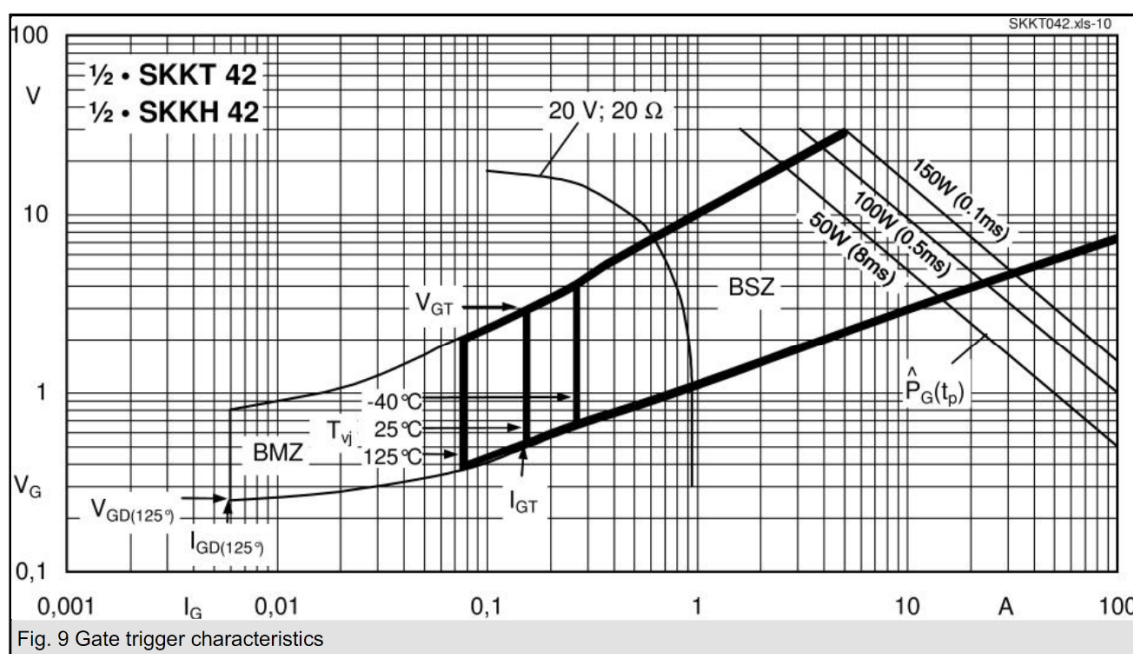
vztah pro generování pulsů pro jednofázový tyristorový usměřovač

$$TD = \frac{1}{12 \cdot \text{FREQ}} \cdot \left(3^p + \frac{\text{alfa}}{30} \right) \quad p \in \{1,2\} \quad (2.1.4.2)$$

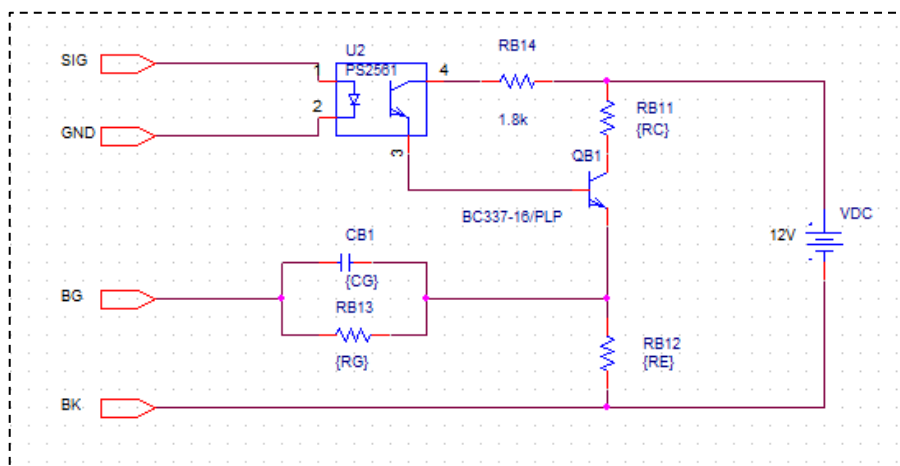
2.1.5. Budicí obvody tyristorového usměrňovače

Vlastní simulace budičů tyristorů je nedílnou součástí simulace činnosti tyristorového usměrňovače. Jedná se o prvotní návrh budičích obvodů, který je dále v rámci realizace rozšířen a doplněn například o jistící elektronické prvky.

Návrh budičeho obvodu tyristorů není omezen na zdroj stejnosměrného (pulzního) napětí zajišťujícího mezi hradlem a katodou tyristoru $U_{GT} = 3V$ a rezistor dodávajícího do hradla tyristoru požadovaný proud $I_{GT} = 150mA$ (dle statické spínací charakteristiky tyristoru zobrazené na obrázku 2.1.5.1.) což pro spínání tyristorů v simulačním programu stačí, ale je rozpracován dle návrhu zobrazeného na obrázku 2.1.5.2.

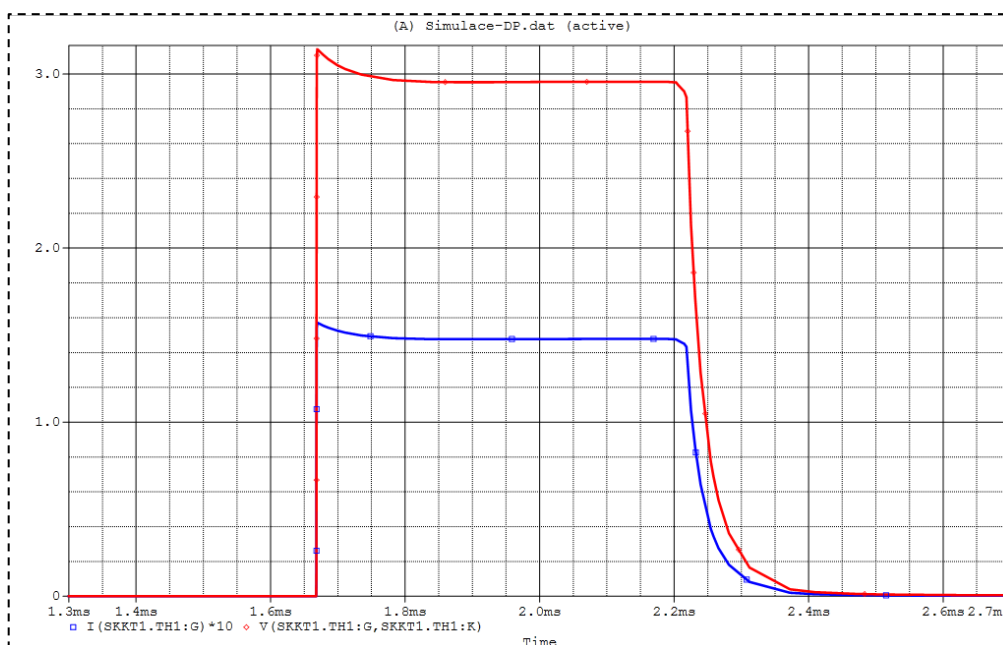


Obr. 2.1.5.1. Spínací charakteristika tyristorů tyristorového modulu SKKT42B08D [6]



Obr. 2.1.5.2. Blok budicího obvodu tyristoru

Zdroj stejnosměrného napětí VDC reprezentuje výstupní napětí DC/DC měničů pro napájení budících obvodů. Galvanické oddělení řídicího systému od výkonové části tyristorového usměrňovače zajišťují optočleny UB, které spínají bipolární NPN tranzistory. Obvody zajišťující proud tekoucí diodou optočlenu nejsou v simulaci znázorněny, jelikož signálový procesor je v simulaci reprezentován proudovými pulzními zdroji. Vazba kondenzátoru CB1 a rezistoru RB13 zajišťuje náběžnou špičku proudu hradla tyristoru. Průběh spínacího napětí a proudu je zobrazen na obrázku 2.1.5.3. Popis návrhu, realizace a oživení budících obvodů je popsán v kapitole 3.2.1. Budící obvody tyristorového usměrňovače.



Obr. 2.1.5.3. Průběh spínacího napětí a proudu hradla tyristoru

2.2. Návrh chlazení a jištění

Všechny výpočty a grafy uvedené v této kapitole jsou řešeny programem MATLAB a ověřovány s výsledky simulací programem OrCAD.

2.2.1. Předpoklady k řešení ztrátových výkonů tyristorového usměrňovače

Velikost ztrátového výkonu tyristoru tyristorového usměrňovače je dána především propustným proudem. Zapínací a vypínací ztrátový výkon a ztrátový výkon vzniklý blokovacím a závěrným proudem je zanedbatelný.

Prvním krokem k určení vhodného chlazení tyristorového usměrňovače je znát a uvědomit si průběhy výsledných i dílčích proudů a napětí řízeného usměrňovače. Teoretické předpoklady byly ověřené simulací a v následujících kapitolách je popsán postup řešení. Při výpočtech ztrátových výkonů tyristorů jsou idealizovány parametry tyristorového usměrňovače. To znamená, že průběhy napájecích napětí (tím se odvíjející jednotlivé napětí v usměrňovači) mají ideální sinusový průběh o 1. harmonické bez vlivu impedance zdroje, komutací, úbytků napětí na tyristorech a dalších nepříznivých vlivů. Zátěž je reprezentována čistě odporovou složkou, tedy průběhy proudu mají totožný tvar jako průběhy napětí a dá se vycházet z Ohmova zákona.

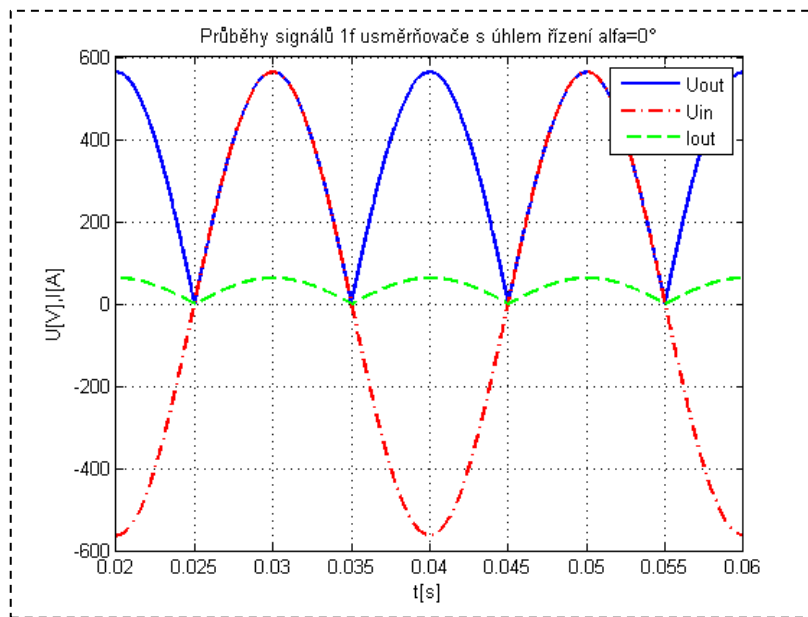
$$R_z = \frac{u(t)}{i(t)} \quad (2.2.1)$$

2.2.2. Výpočet ztrátových výkonů tyristorů jednofázového usměrňovače

Jednofázový tyristorový usměrňovač, jak již bylo popsáno v kapitole 2.1.4, je realizovaný na třífázovém můstku vhodným řízením. Z toho vyplývá, že tento usměrňovač je napájen sdruženým napětím vycházejícího ze způsobu řízení simulace. Na následující obrázku je zobrazen průběh sdruženého napětí u_{S2} , usměrňené výstupní napětí a proud při úhlu řízení $\alpha = 0^\circ$.

Velikost střední hodnoty proudu tekoucím tyristorem $I_{TAV} = 40A$ udává datasheet tyristorového modulu SKKT [6] při použití tyristorů v jednofázovém můstku. Maximální hodnotu proudu tekoucím tyristorem při odporové zátěži lze tedy získat dle následujícího vzorce.

$$I_{MAX} = \left(\frac{2}{I_{TAV} T} \int_0^{T/2} \sin(2\pi \cdot FREQ \cdot t) dt \right)^{-1} \quad (2.2.2.1)$$



Obr. 2.2.2.1. Průběhy signálů 1f usměrňovače s úhlem řízení $\alpha=0^\circ$

Dalším krokem je výpočet ztrátového výkonu tyristoru (později celého jednofázového můstku). Pro výpočet ztrátového výkonu tyristoru je potřeba znát úbytek napětí $U_{TO}=1\text{V}$ na odporu polovodičové struktury $r_T = 4,5\text{m}\Omega$ při průchodu propustného proudu tyristorem. Tyto hodnoty udává datasheet tyristorového modulu SKKT [6]. Ztrátový výkon polovodičové součástky se určuje dle následujícího vzorce.

$$P_{FAV} = U_{TO} \cdot I_{TAV} + r_T \cdot I_{RMS}^2 \quad (2.2.2.2)$$

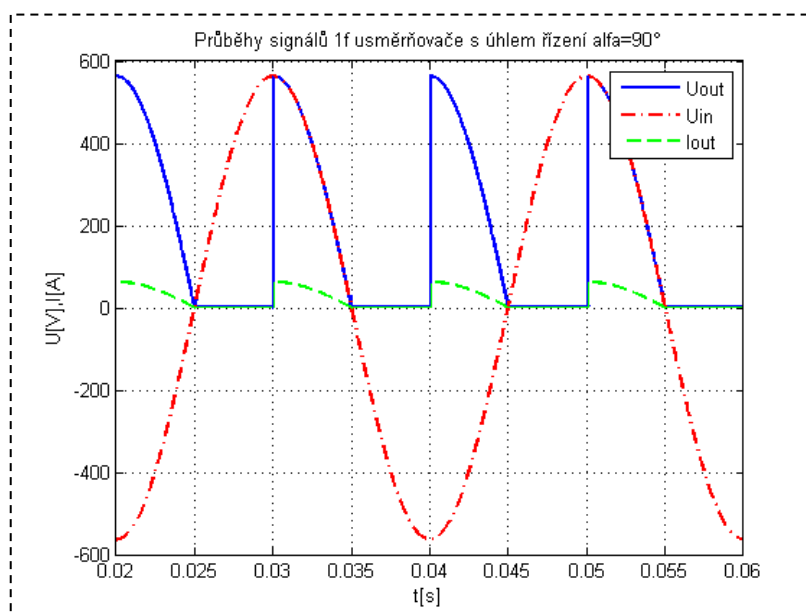
Kvadrát efektivní hodnoty proudu I_{RMS}^2 tekoucím tyristorem při odporové zátěži a známé amplitudy proudu I_{MAX} se určí dle následujícího vzorce.

$$I_{RMS}^2 = \frac{2}{T} \cdot \int_0^{T/2} (I_{MAX} \sin(2\pi \cdot \text{FREQ} \cdot t))^2 dt \quad (2.2.2.3)$$

Ztrátový výkon tyristoru je vypočten dle algoritmu programu MATLAB uvedeného v odstavci: algoritmus pro výpočet ztrátových výkonů. Hodnota ztrátového výkonu tyristoru v jednofázovém tyristorovém usměrňovači s úhlem řízení $\alpha=0^\circ$ se rovná:

$$\underline{\underline{P_{FAV} = 48.9\text{W}}}$$

Pro zjištění maximálního možného -ztrátového výkonu tyristoru jednofázového tyristorového usměrňovače jsou provedeny výpočty střední hodnoty výstupního proudu I_{TAV} a kvadrátu efektivní hodnoty I_{RMS}^2 v závislosti na úhlu řízení, v tomto případě $\alpha=90^\circ$, dle stejných vzorců jako v předchozích výpočtech jen v jiných mezích integrace. Následující obrázek znázorňuje signály tyristorového usměrňovače s úhlem řízení $\alpha=90^\circ$.



Obr. 2.2.2.2. Průběhy signálů 1f usměrňovače s úhlem řízení $\alpha=90^\circ$

Vzorce pro výpočet ztrátového výkonu tyristoru jednofázového usměrňovače v závislosti na úhlu řízení α

$$I_{TAV} = \frac{2}{T} \int_{\frac{\alpha \cdot T}{360}}^{T/2} I_{MAX} \sin(2\pi \cdot \text{FREQ} \cdot t) dt \quad (2.2.2.4)$$

$$I_{RMS}^2 = \frac{2}{T} \cdot \int_{\frac{\alpha \cdot T}{360}}^{T/2} (I_{MAX} \sin(2\pi \cdot \text{FREQ} \cdot t))^2 dt \quad (2.2.2.5)$$

Ztrátové výkony tyristoru dle výpočtů pomocí programu MATLAB

$P_{FAV} = 42.2\text{W}$ při úhlu řízení $\alpha=45^\circ$

$P_{FAV} = 24.4\text{W}$ při úhlu řízení $\alpha=90^\circ$

Algoritmus pro výpočet ztrátových výkonů jednofázového tyristorového usměrňovače

```
%Diplomová Práce: výpočet ztrátového výkonu jednofázového tyristorového
usměrňovače s tyristorovými moduly SKKT42B08B
%autor Jiří Špička

clear all; close all; syms t k;
vsechno_vynulovano='true'
%definice vstupních veličin
f=50; %frekvence síťového napětí
Uin=230; %efektivní hodnota fázového napětí
Idav=40; %maximální střední hodnota výstupního
proudu
alfa=90; %hodnota řídicího úhlu
Uto=1;
rt=0.0045;
Umax=sqrt(2)*Uin;
T=1/f;
s=0.000001; %přesnost výpočtu
t=0:s:10*T; %délka výpočtu

%definovaná vstupní fázová napětí
u1=Umax*sin(2*pi*f*t);
u2=Umax*sin(2*pi*f*t-(2*pi/3));
u3=Umax*sin(2*pi*f*t+(2*pi/3));

%definovaná vstupní sdružená napětí
us1=u1-u2; us2=u2-u3; us3=u3-u1; %kladná polarita sdružených napětí
us4=u1-u3; us5=u2-u1; us6=u3-u2; %záporná polarita sdružených napětí

%definice vstupních a výstupních signálů pro jednofázový můstek při alfa=0°
Uout=abs(us2);
Uin=us2;
Imax1f=1/((1/(20*T))*int(sin(2*pi*f*k),0,T/2));
Imax1f=double(Imax1f);
% Idavkontrola=1/(T/2)*int(Imax1f*sin(2*pi*f*k),0,T/2);
% Idavkontrola=double(Idavkontrola)
Iout=abs(Imax1f*sin(2*pi*f*t-pi/2));
%zobrazení signálů jednofázového usměrňovače
figure(1)
plot(t,Uout,'-b',t,Uin,'-.r',t,Iout,'--g','LineWidth',2);axis([T,3*T,-
600,600]);grid on;
h=legend('Uout','Uin','Iout');
set(h,'interpreter','none')
title('Průběhy signálů 1f usměrňovače s úhlem řízení alfa=0°');
xlabel('t[s]');
ylabel('U[V],I[A]');

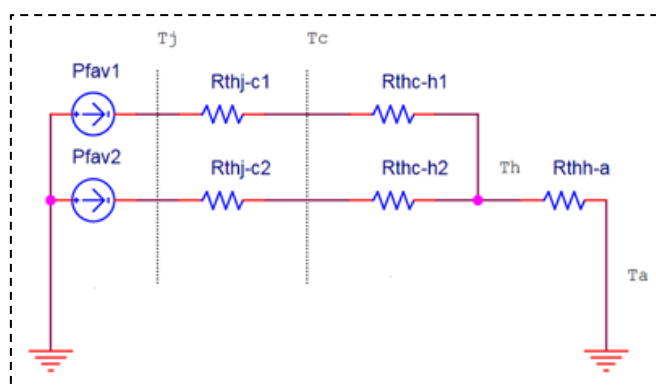
%výpočet ztrátového výkonu tyristoru při plném otevření můstku
Idavth=2/T*int(Imax1f*sin(2*pi*f*k),0,T/2);
I2rmsth=2/T*int(((Imax1f*sin(2*pi*f*k))^2),0,T/2);
Idavth=double(Idavth);
I2rmsth=double(I2rmsth);
Pfavth=Uto*Idavth+rt*I2rmsth;
Pfavth=double(Pfavth)
%výpočet ztrátového výkonu tyristoru při zadání úhlu alfa
Idavth2=2/T*int(Imax1f*sin(2*pi*f*k),alfa*T/360,T/2);
I2rmsth2=2/T*int(((Imax1f*sin(2*pi*f*k))^2),alfa*T/360,T/2);
Idavth2=double(Idavth2);
I2rmsth2=double(I2rmsth2);
Pfavth2=Uto*Idavth2+rt*I2rmsth2;
Pfavth2=double(Pfavth2)
```

2.2.3. Tepelný model jednofázového tyristorového usměrňovače

Z předchozích výpočtů lze usoudit, že největší ztrátový výkon tyristoru je při plném otevření jednofázového můstku, tedy při úhlu řízení $\alpha=0^\circ$. Z teorie je jasné, že v můstkovém zapojení jednofázového usměrňovače vedou vždy dva tyristory v jedné větvi a to vždy jeden tyristor modulu SKKT. Touto dedukcí lze považovat ztrátový výkon jednotlivých tyristorů za celkový ztrátový výkon tyristorového modulu.

Na následujícím obrázku je zobrazen teplotní model jednofázového tyristorového usměrňovače. Zdroje P_{fav1} a P_{fav2} představují ztrátový výkon jednotlivých tyristorů. T_j (Junction temperature) představuje teplotu polovodičové struktury, T_c (Case temperature) znamená teplotu na pouzdru elektronické součástky, T_h (Headsink temperature) udává teplotu chladiče a T_A teplotu okolí. Rezistory R_{th} ve schématu značí tepelný odpor mezi jednotlivými teplotami a lze aplikovat modifikovaný Ohmův zákon.

$$\Delta T = P_{FAV} \cdot \sum R_{th} \quad (2.2.3.1)$$



Obr. 2.2.3. Tepelný model jednofázového tyristorového usměrňovače

Tab. 2.2.3.1. Parametry modulu SKKT42B08D. [6]

T_{Jmax}	125	°C	
T_{Jmin}	-40	°C	
R_{thj-c}	0,35	K/W	R_{thj-c} modulu
R_{thj-c}	0,69	K/W	R_{thj-c} tyristoru
R_{thc-h}	0,1	K/W	0,005 K/W
T_A	40	°C	
U_{TO}	1	V	
r_T	4,5	mΩ	

Výpočet tepelného odporu chladiče R_{thh-a} jednofázového tyristorového usměrňovače

$$\Delta T = P_{FAV} \cdot \sum R_{th}$$

$$T_j - T_A = 2 \cdot P_{FAV} \cdot \left((R_{thj-c1} + R_{thc-h1}) \parallel (R_{thj-c2} + R_{thc-h2}) \right) + R_{thh-a}$$

$$R_{thh-a} = \frac{T_j - T_A}{2 \cdot P_{FAV}} - \frac{R_{thj-c} + R_{thc-h}}{2} \quad (2.2.3.2)$$

$$\underline{\underline{R_{thh-a} = 0.5219 \text{K/W}}}$$

Výpočet tepelného odporu chladiče R_{thh-a} pomocí programu MATLAB

```
%výpočet tepelného odporu chladiče Rthh-a
Pfavth=48.8826;
Tj=125;
Ta=40;
Rthjc=0.69;
Rthch=0.005;                                %použití teplovodivé pasty

Rthha=( (Tj-Ta) / (2*Pfavth) ) - ( (Rthjc+Rthch) / 2 );
Rthha=double(Rthha)
```

Tab. 2.2.3.2. Parametry dostupných chladičů. [7]

Typ	R_{thh-a} pro přirozené chlazení [K/W]	R_{thh-a} pro nucené chlazení [K/W] (vh= 6 m/s)
L280 typ 35.5	0,51	0,170
L140 typ 34.2	0,61	0,185
L100 typ 33.2	0,76	0,220
L65 typ 32.2	0,79	0,280

Dle výpočtů teoreticky stačí chladič s nejbližší nižší hodnotou tepelného odporu k uchlazení výkonového polovodičového měniče. Prakticky nejlepší volbou, co se týče chlazení, je použít chladič s co jak nejmenší tepelným odporem.

Při realizaci tyristorového usměrňovače je použit chladič L140 typ 34.2 s nuceným chlazením a tepelným odporem $R_{thh-a} = 0,185 \text{ K/W}$.

Zpětné dopočítání teploty polovodičové struktury T_j při použití výše zvoleného chladiče L140 typ 34.2 s tepelným odporem $R_{thh-a} = 0,185 \text{ K/W}$

$$\begin{aligned} \Delta T &= P_{FAV} \cdot \sum R_{th} \\ T_j - T_A &= 2 \cdot P_{FAV} \cdot \left(\left((R_{thj-c1} + R_{thc-h1}) \parallel (R_{thj-c2} + R_{thc-h2}) \right) + R_{thh-a} \right) \\ T_j &= 2 \cdot P_{FAV} \cdot \left(\frac{R_{thj-c} + R_{thc-h}}{2} + R_{thh-a} \right) + T_A \quad (2.2.3.3) \\ \underline{\underline{T_j}} &= \underline{\underline{74,2^\circ C}} \end{aligned}$$

Výpočet teploty polovodičové struktury T_j pomocí programu MATLAB

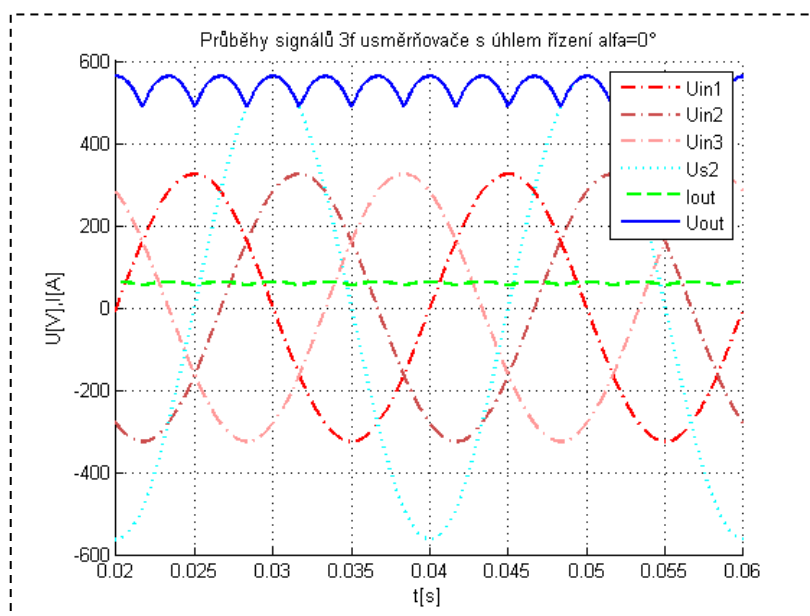
```
%zpětné dopočítání Tj
Pfavth=48.8826;
Ta=40;
Rthha=0.185; %chladič L140 s nucených chlazením
Rthjc=0.69; %Rthjc SKKT
Rthch=0.005; %použití teplovodivé pasty

Tj=(2*Pfavth*(Rthjc+Rthch)/2)+Rthha)+Ta;
Tj=double(Tj)
```

Teplota polovodičové struktury tyristoru v jednofázovém můstku tyristorového usměřovače je dostatečně nízká i při maximální zatížitelnosti měniče. Zvolený chladič L140 typ 34.2 s nuceným chlazením splňuje tepelné kritéria jednofázového můstku třífázového tyristorového usměřovače.

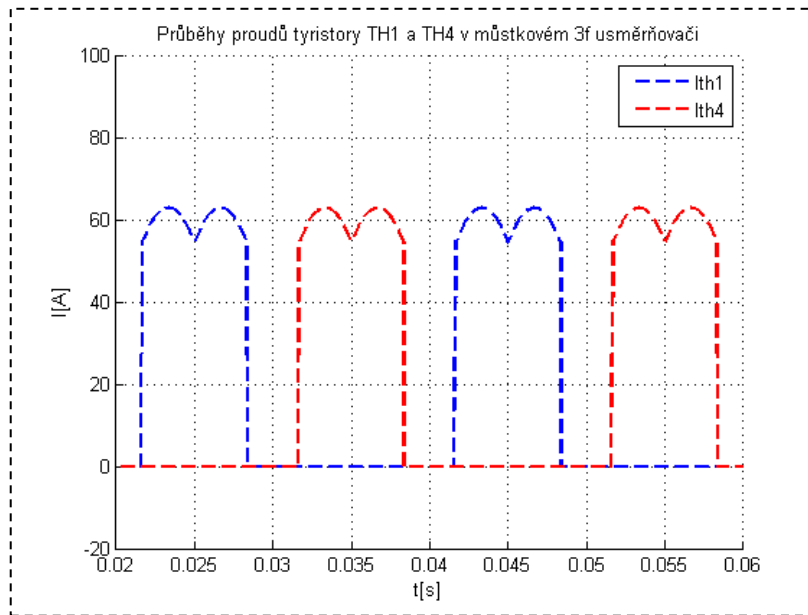
2.2.4. Výpočet ztrátových výkonů tyristorů jednofázového usměrňovače

Při výpočtech ztrátových výkonů v třífázovém tyristorovém usměrňovači je vycházeno z výpočtů střední hodnoty proudu tyristorem I_{TAV} jednofázového můstku a platí zde vzorec 2.2.2.4 pro získání amplitudy výstupního proudu při odporové zátěži I_{MAX} . Ověřením těchto předpokladů jsou průběhy signálů a výpočty jejich středních a efektivních hodnot shodujícími se s hodnotami uváděnými v datasheetu modulu SKKT [6]. Následující obrázek zobrazuje průběhy signálů třífázového tyristorového usměrňovače.



Obr. 2.2.4.1. Průběhy signálů třífázového tyristorového usměrňovače s $\alpha=0^\circ$

Průběhy proudů tyristory jsou ve trojfázovém můstku jiné, než v jednofázovém můstku tyristorového usměrňovače. V jednofázovém usměrňovači protéká proud tyristorem polovinu periody, za předpokladu že úhel řízení $\alpha=0^\circ$, kdežto v trojfázovém usměrňovači protéká proud třetinu periody za předpokladu $\alpha=0^\circ$ a při ideálně induktivní zátěži má obdélníkový průběh. Nicméně při návrhu chlazení tyristorového usměrňovače je vycházeno z toho, že zátěž je reprezentována jen odporovou složkou. To znamená, že tyristorem protéká proud dvě šestiny periody a má tvar výšek sinusového průběhu. Průběhy proudů tyristory TH1 a TH4 (dvojice tyristorů v modulu SKKT) jsou zobrazeny na následujícím obrázku.



Obr. 2.2.4.2. Průběhy proudů tyristorů modulu SKKT třífázového usměrňovače s $\alpha=0^\circ$

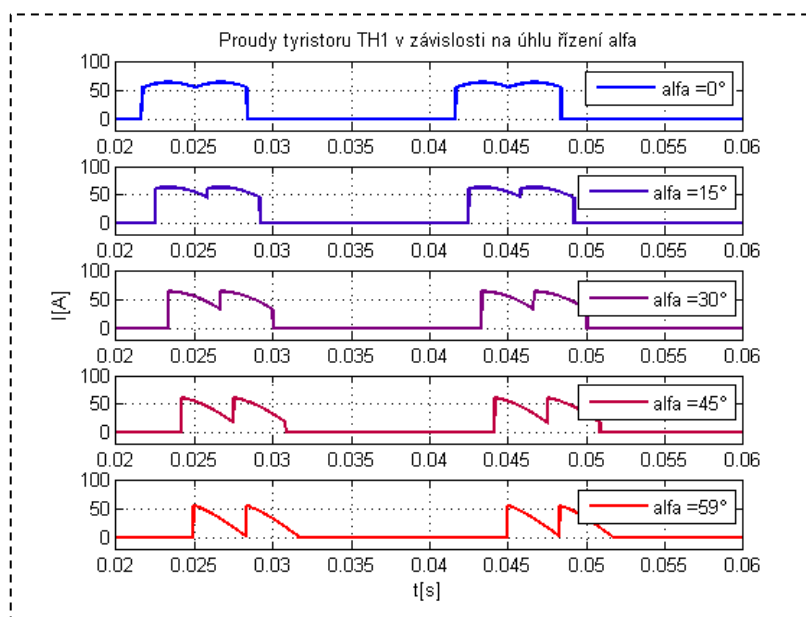
Vzorce pro výpočet ztrátového výkonu tyristoru trojfázového usměrňovače při úhlu řízení $\alpha=0^\circ$

$$I_{TAV} = \frac{2}{T} \int_{T/6}^{T/3} I_{MAX} \sin(2\pi \cdot FREQ \cdot t) dt \quad (2.2.4.1)$$

$$I_{RMS}^2 = \frac{2}{T} \cdot \int_{T/6}^{T/3} (I_{MAX} \sin(2\pi \cdot FREQ \cdot t))^2 dt \quad (2.2.4.2)$$

$$P_{FAV} = U_{TO} \cdot I_{TAV} + r_T \cdot I_{RMS}^2 \quad (2.2.4.3)$$

$$\underline{\underline{P_{FAV} = 25.4W}}$$



Obr. 2.2.4.3. Průběhy proudů tyristorů modulu SKKT třífázového usměrňovače v závislosti na úhlu řízení $0 = \alpha < 60^\circ$.

Vzorce pro výpočet ztrátového výkonu tyristoru trojfázového usměrňovače v závislosti na úhlu řízení α

$$I_{TAV} = \frac{2}{T} \cdot \int_{T/6+\alpha T/360}^{T/3+\alpha T/360} I_{MAX} \sin(2\pi \cdot FREQ \cdot t) dt \quad (2.2.4.4)$$

$$I_{RMS}^2 = \frac{2}{T} \cdot \int_{T/6+\alpha T/360}^{T/3+\alpha T/360} (I_{MAX} \sin(2\pi \cdot FREQ \cdot t))^2 dt \quad (2.2.4.5)$$

$$P_{FAV} = U_{TO} \cdot I_{TAV} + r_T \cdot I_{RMS}^2 \quad (2.2.4.6)$$

Ztrátové výkony tyristoru dle výpočtů pomocí programu MATLAB

$$P_{FAV} = 24.4W \text{ při úhlu řízení } \alpha=15^\circ$$

$$P_{FAV} = 21.5W \text{ při úhlu řízení } \alpha=30^\circ$$

$$P_{FAV} = 17.1W \text{ při úhlu řízení } \alpha=45^\circ$$

$$P_{FAV} = 12.1W \text{ při úhlu řízení } \alpha=59^\circ$$

Algoritmus pro výpočet ztrátových výkonů třífázového tyristorového usměrňovače

```
%Diplomová Práce, výpočet ztrátového výkonu třífázového tyristorového
usměrňovače s tyristorovými moduly SKKT42B08B
%autor Jiří Špička

clear all; close all; syms t k;
vsechno_vynulovano='true'
%definice vstupních veličin
f=50; %frekvence síťového napětí
Uin=230; %efektivní hodnota fázového napětí
Idav=40; %maximální střední hodnota výstupního
proudu
Uto=1;
rt=0.0045;
Umax=sqrt(2)*Uin;
T=1/f;
s=0.000001; %přesnost výpočtu
t=0:s:10*T; %délka výpočtu
%definovaná vstupní fázová napětí
u1=Umax*sin(2*pi*f*t);
u2=Umax*sin(2*pi*f*t-(2*pi/3));
u3=Umax*sin(2*pi*f*t+(2*pi/3));

%definovaná vstupní sdružená napětí
us1=u1-u2; us2=u2-u3; us3=u3-u1; %kladná polarita sdružených napětí
us4=u1-u3; us5=u2-u1; us6=u3-u2; %záporná polarita sdružených napětí

%definice vstupních a výstupních signálů pro 3 fázový můstek při alfa=0°
Imax=1/((1/(20*T))*int(sin(2*pi*f*k),0,T/2));
Imax=double(Imax);
Umaxpom=Umax*sin(2*pi*f*T/2-(2*pi/3))-Umax*sin(2*pi*f*T/2+(2*pi/3));
Umaxpom=double(Umaxpom);

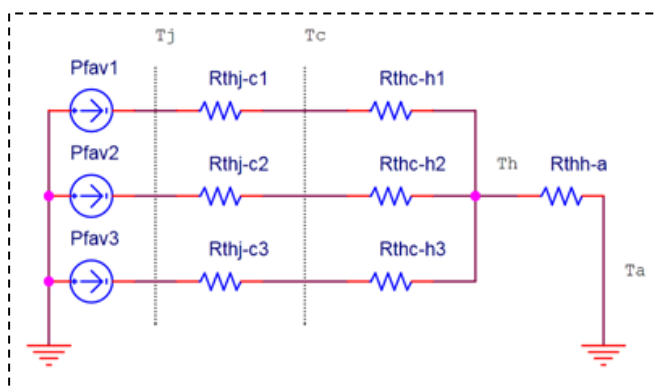
%výpočet ztrátového výkonu 3 fázového plně otevřeného můstku
Idav3f=2/T*int(Imax*sin(2*pi*f*k),T/6,T/3);
I2rms3f=2/T*int(((Imax*sin(2*pi*f*k))^2),T/6,T/3);
Idav3f=double(Idav3f);
I2rms3f=double(I2rms3f);
Pfav3f=Uto*Idav3f+rt*I2rms3f;
Pfav3f=double(Pfav3f)
n=0;
for n=0:4
    alfa=n*15;
    if (alfa==60)
        alfa=59;
    end;
    krok=alfa*T/360;
    Idav3fa=2/T*int(Imax*sin(2*pi*f*k),T/6+krok,T/3+krok);
    I2rms3fa=2/T*int(((Imax*sin(2*pi*f*k))^2),T/6+krok,T/3+krok);
    Idav3fa=double(Idav3fa);
    I2rms3fa=double(I2rms3fa);
    alfa=double(alfa)
    Pfav3fa=Uto*Idav3fa+rt*I2rms3fa;
    Pfav3fa=double(Pfav3fa)
end;
```

2.2.5. Tepelný model třífázového tyristorového usměrňovače

Postup určení vhodného chlazení pro třífázový tyristorový usměrňovač je totožný s postupem popsaným v kapitole 2.2.3. Rozdílem však je sestavení tepelného modelu, který se od jednofázového liší. Rozdílem je způsob toku proudů v usměrňovači a z toho vycházející ztrátové výkony tyristorů vypočtené v předchozí kapitole. Z těchto výpočtů lze usoudit, že největší ztrátový výkon tyristoru třífázového usměrňovače je při plném otevření tohoto usměrňovače, tedy při úhlu řízení $\alpha=0^\circ$.

Dle simulací toku proudů jednotlivých tyristorů lze teplotní model třífázového tyristorového usměrňovače sestavit z tyristorových modulů SKKT, poněvadž nemůže nastat situace, kdy by vedly oba tyristory obsažené v modulu proud zároveň. Každým z dvojice tyristorů protéká proud třetinu periody. Průběhy těchto proudů jsou zobrazeny v předchozí kapitole na obrázku 2.2.4.2.

Ztrátový výkon tyristorového modulu SKKT je roven součtu ztrátových výkonů dvojice tyristorů v něm obsažených. Parametry pro tepelný model třífázového tyristorového usměrňovače jsou stejné jako v kapitole 2.2.3., jsou uvedeny v tabulce 2.2.3.1. Jediným rozdílem je tepelný odpor mezi polovodičovou strukturou a pouzdrem $R_{thj-c}=0,35\text{ K/W}$ uváděný pro modul. Na následujícím obrázku je zobrazen tepelný model usměrňovače.



Obr. 2.2.5. Tepelný model třífázového tyristorového usměrňovače

Výpočet tepelného odporu chladiče R_{thh-a} jednofázového tyristorového usměrňovače

$$\Delta T = P_{FAV} \cdot \sum R_{th}$$

$$T_j - T_A = 3 \cdot P_{FAV(MODULU)} \cdot \left((R_{thj-c1} + R_{thc-h1}) \parallel (R_{thj-c2} + R_{thc-h2}) \parallel (R_{thj-c2} + R_{thc-h2}) \right) + R_{thh-a}$$

$$R_{thh-a} = \frac{T_j - T_A}{3 \cdot P_{FAV(MODULU)}} - \frac{R_{thj-c} + R_{thc-h}}{3} \quad (2.2.5.1)$$

$$\underline{\underline{R_{thh-a} = 0.4392 \text{K/W}}}$$

Pro chlazení třífázového tyristorového usměrňovače dle výše uvedených výpočtů je již potřeba použít chladič s nuceným chlazením. Pro tento účel se hodí již zmíněný chladič L140 typ 34.2 s nuceným chlazením s tepelným odporem chladiče $R_{thh-a} = 0,0185 \text{ K/W}$.

Zpětné dopočítání teploty modulu T_j při použití výše zvoleného chladiče L140 typ 34.2 s tepelným odporem $R_{thh-a} = 0,185 \text{ K/W}$

$$\Delta T = P_{FAV} \cdot \sum R_{th}$$

$$T_j - T_A = 3 \cdot P_{FAV(MODULU)} \cdot \left((R_{thj-c1} + R_{thc-h1}) \parallel (R_{thj-c2} + R_{thc-h2}) \parallel (R_{thj-c2} + R_{thc-h2}) \right) + R_{thh-a}$$

$$T_j = 3 \cdot P_{FAV(MODULU)} \cdot \left(\frac{R_{thj-c} + R_{thc-h}}{3} + R_{thh-a} \right) + T_A \quad (2.2.5.2)$$

$$\underline{\underline{T_j = 58,2^\circ\text{C}}}$$

Při realizaci tyristorového usměrňovače je použit chladič L140 typ 34.2 s nuceným chlazením a dle výpočtů, uvedených v kapitole 2.2., uchladí i maximálně zatížený výkonový polovodičový měnič ať se jedná o jednofázový či trojfázový řízený usměrňovač.

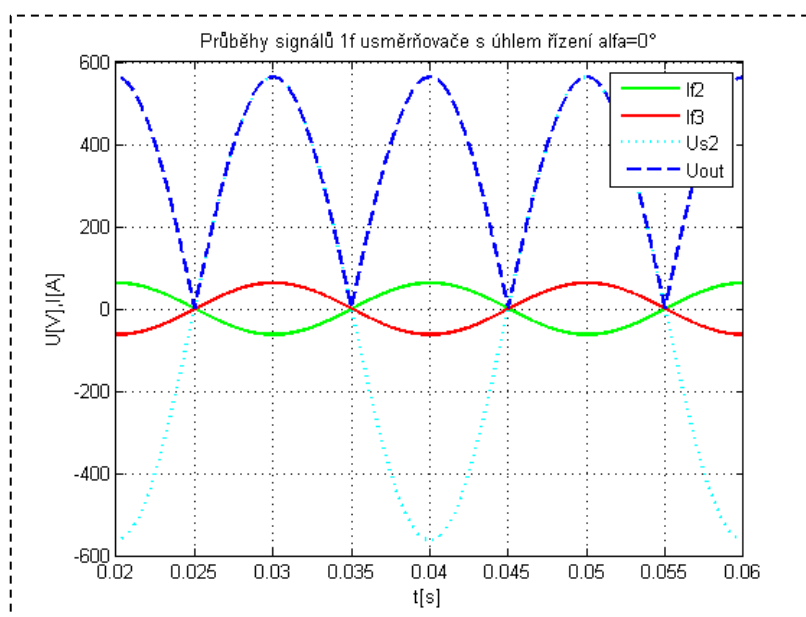
Výpočet tepelného odporu chladiče R_{thh-a} a zpětné dopočítání teploty polovodičové struktury T_j pomocí programu MATLAB

```
%výpočet tepelného odporu chladiče Trhh-a
Pfav=2*25.4095;
Tj=125;
Ta=40;
Rthjc=0.35; %Rthjc SKKT
Rthch=0.005; %použití teplovodivé pasty

Rthha=(Tj-Ta)/(3*Pfav)-(Rthjc+Rthch)/3;
Rthha=double(Rthha)
%zpětné dopočítání Tj
Rthha=0.185; %chladič L140 s nuceným chlazením
Rthjc=0.35; %Rthjc SKKT
Tj=(3*Pfav*((Rthjc+Rthch)/3)+Rthha)+Ta;
Tj=double(Tj)
```

2.2.6. Jištění tyristorového usměrňovače

Návrh jištění tyristorového usměrňovače vychází z průběhů proudů jednotlivých fází a výpočtů jejich efektivních hodnot. Opět je jištění dimenzováno jak pro jednofázový, tak i pro trojfázový můstek tyristorového usměrňovače za předpokladu odporové zátěže, zanedbání nepříznivých vlivů ovlivňující tvary signálů a maximální velikostí proudů procházejícího tyristorem dle datasheetu [6]. Na následujícím obrázku jsou zobrazeny fázové proudy a výstupní napětí pro jednofázový můstek tyristorového usměrňovače při úhlu řízení $\alpha=0^\circ$.



Obr. 2.2.6.1. Průběhy fázových proudů napájecího zdroje, sdruženého napájecího napětí a usměrněného výstupního napětí

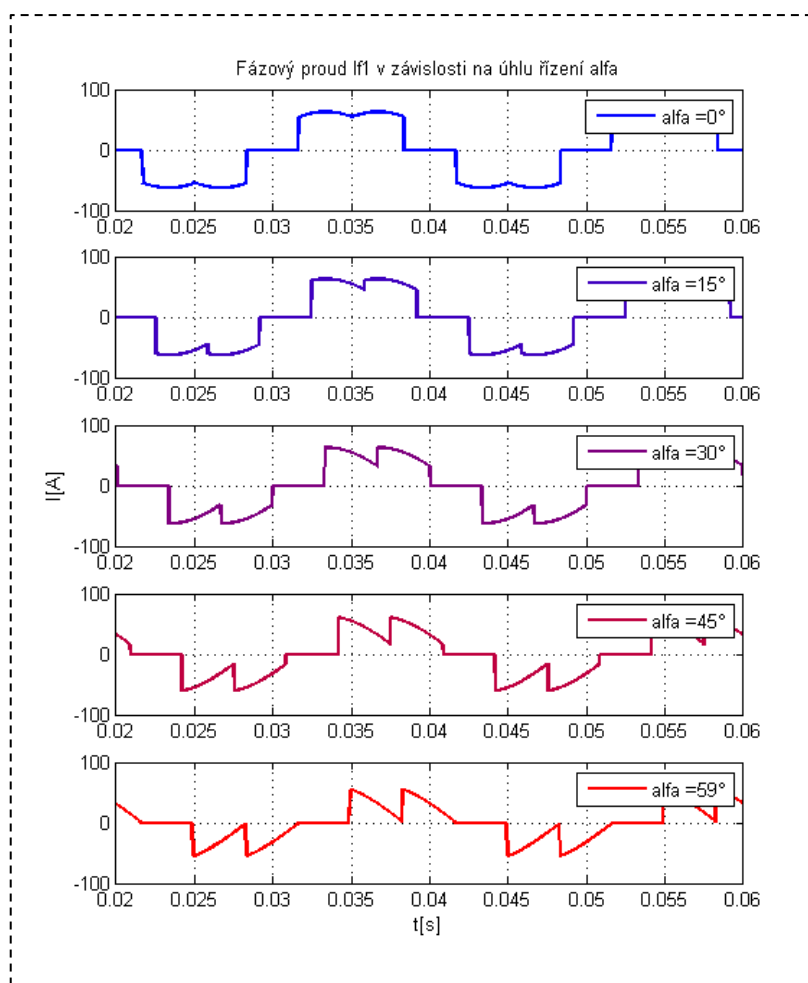
Výpočet efektivní hodnoty fázového proudu jednofázového můstku

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T (I_{MAX} \sin(2\pi \cdot \text{FREQ} \cdot t))^2 dt} \quad (2.2.6.1)$$

Výpočet efektivní hodnoty fázového proudu jednofázového můstku v závislosti na úhlu řízení α

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{I_{MAX}^2}{T} \cdot \left(\int_{\alpha T/360}^{T/2} (\sin(2\pi \cdot \text{FREQ} \cdot t))^2 dt + \int_{\frac{T}{2}(1+\frac{\alpha}{180})}^T (\sin(2\pi \cdot \text{FREQ} \cdot t))^2 dt \right)} \quad (2.2.6.2)$$

Následující obrázek znázorňuje průběh fázového proudu zdroje V1 třífázového tyristorového usměrňovače v závislosti na úhlu řízení α .



Obr. 2.2.6.2. Průběhy fázového proudu napájecího zdroje V1 třífázového tyristorového usměrňovače v závislosti na úhlu řízení α

Výpočet efektivní hodnoty fázového proudu třífázového můstku

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{2 \cdot I_{MAX}^2}{T} \cdot \left(\int_{\frac{T}{6} \left(1 + \frac{\alpha}{60}\right)}^{\frac{T}{3} \left(1 + \frac{\alpha}{120}\right)} (\sin(2\pi \cdot \text{FREQ} \cdot t))^2 dt + \int_{\frac{T}{6} \left(5 + \frac{\alpha}{60}\right)}^{\frac{T}{3} \left(2 + \frac{\alpha}{120}\right)} (\sin(2\pi \cdot \text{FREQ} \cdot t))^2 dt \right)} \quad (2.2.6.3)$$

Výpočty efektivních hodnot fázových proudů jednofázového i třífázového tyristorového usměrňovače při maximální možné zatížitelnosti tyristorových modulů SKKT jsou zpracovány algoritmem napsaným na následující stránce. V následující tabulce jsou vypsány vypočtené hodnoty fázových proudů.

Tab. 2.2.6. Výsledné efektivní hodnoty proudů tyristorového usměrňovače při maximální zátěži.

Úhel řízení α [°]	Efektivní hodnota fázového proudu [A]	
	1f můstek	3f můstek
0	44,4	49,0
30	43,8	43,1
59	40,1	28,4
90	31,4	-
120	19,6	-

Pro jištění tyristorového usměrňovače jsou zvoleny dostupné pojistky PV514 se jmenovitým proudem 25A a s tepelným integrálem $I^2t= 108A^2t$ [8]. V případě využití maximálního potenciálu tyristorového usměrňovače je třeba použít pojistky s větším jmenovitým proudem například pojistky PV514 s jmenovitým proudem 50A a tepelným integrálem $I^2t= 830A^2t$ [8]. Tepelné integrály pojistek jsou řádově menší než je tepelný integrál tyristorového modulu ($I^2t= 3600A^2t$ při $T_j 125^\circ C$). Při překročení jmenovitého proudu pojistky dochází k jejímu rychlému přepálení a tím jsou tyristorové moduly dostatečně chráněny.

Algoritmus pro výpočet efektivních hodnot fázových proudů tyristorového usměrňovače

```
%Diplomová Práce, dimenzování jištění tyristorového usměrňovače
%autor Jiří Špička

clear all; close all; syms t k;
vsechno_vynulovano='true'

%definice vstupních veličin
f=50; %frekvence síťového napětí
Uin=230; %efektivní hodnota fázového napětí
Idav=40; %maximální střední hodnota výstupního
proudu
Umax=sqrt(2)*Uin;
T=1/f;
s=0.000001; %přesnost výpočtu
t=0:s:10*T; %délka výpočtu

%definována vstupní fázová napětí
u1=Umax*sin(2*pi*f*t);
u2=Umax*sin(2*pi*f*t-(2*pi/3));
u3=Umax*sin(2*pi*f*t+(2*pi/3));

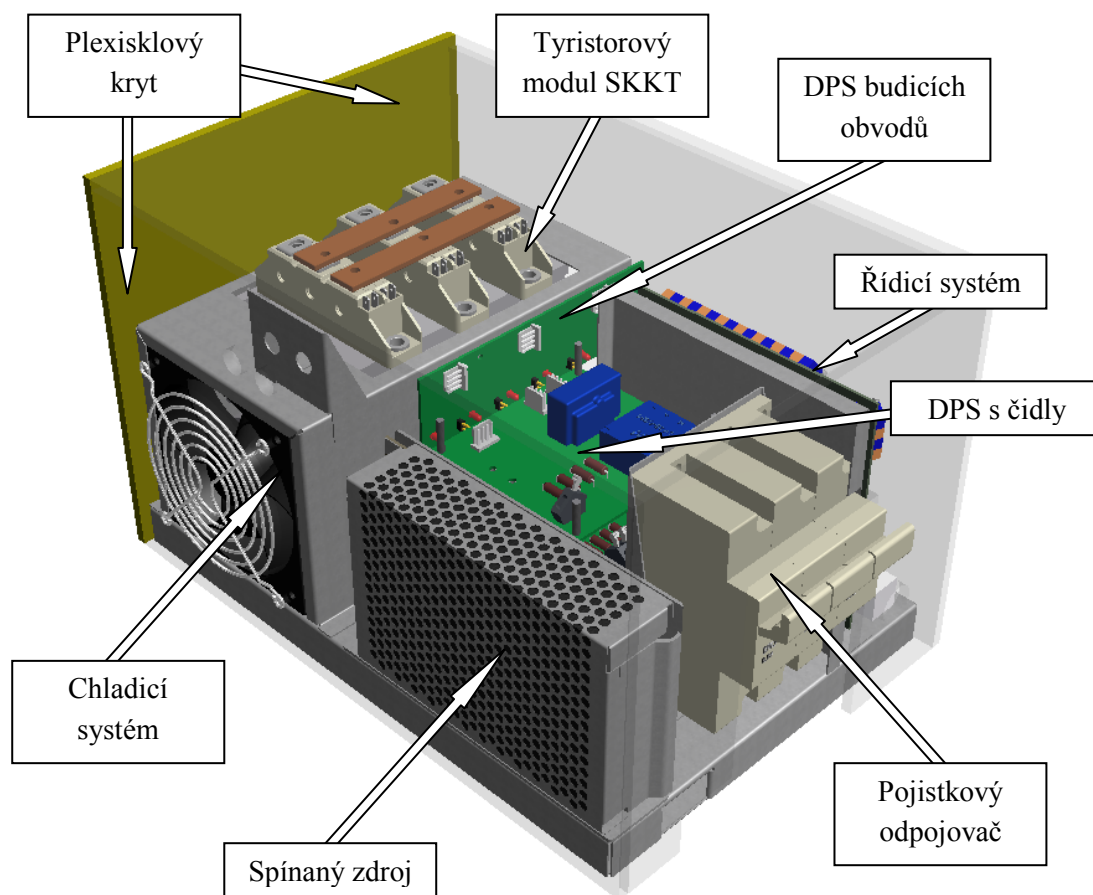
%definovaná vstupní sdružená napětí
us1=u1-u2; us2=u2-u3; us3=u3-u1; %kladná polarita sdružených napětí
us4=u1-u3; us5=u2-u1; us6=u3-u2; %záporná polarita sdružených napětí

%výpočet efektivních hodnot fázových proudů
Imax1f=1/((1/(20*T))*int(sin(2*pi*f*k),0,T/2));
Imax1f=double(Imax1f);
If2=Imax1f*sin(2*pi*f*t+pi/2);
If3=Imax1f*sin(2*pi*f*t-pi/2);

for n=0:4
    alfa=n*30;
    if (alfa==60)
        alfa=59;
    end;
    alfa=double(alfa)
    Irms1f=sqrt(Imax1f^2/T*(int(sin(2*pi*f*k)^2,(alfa*T/360),(T/2))+int(sin(
    2*pi*f*k)^2,(T/2*(1+alfa/180)),T)));
    Irms1f=double(Irms1f)
    if (alfa<=60)
        Irms3f=sqrt(2*Imax1f^2/T*(int(sin(2*pi*f*k)^2,(T/6*(1+alfa/60)),(T/3*(1+
        alfa/120)))+int(sin(2*pi*f*k)^2,(T/3*(2+alfa/120)),(T/6*(5+alfa/60)))));
        Irms3f=double(Irms3f)
    end;
end;
```


2.3. 3D CAD modelová soustava

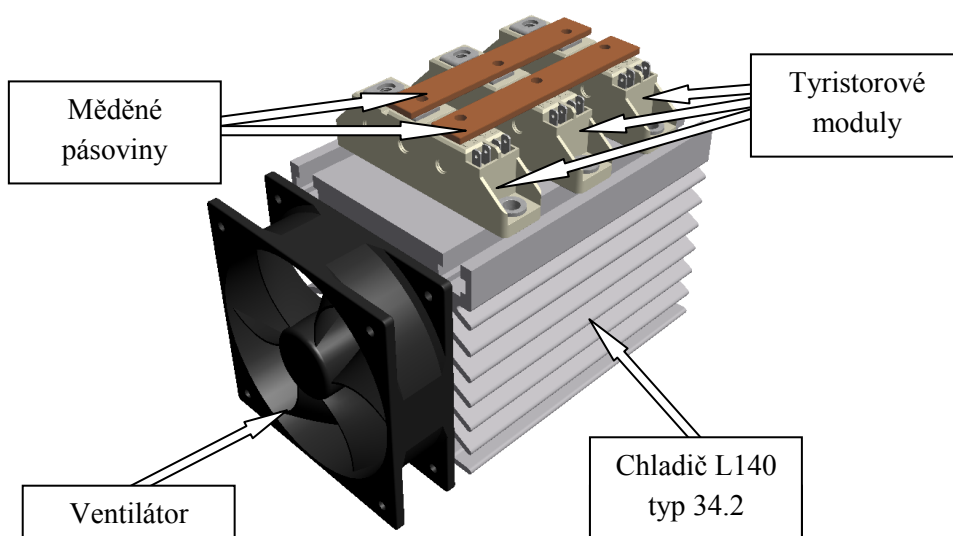
3D model tyristorového usměrňovače je vytvořen v programu Autodesk Inventor. Tento model je sestaven pro vizualizaci možnosti rozložení jednotlivých komponentů tyristorového usměrňovače. Pro přehlednější zobrazení komponentů 3D model neobsahuje šroubové spoje a vedení kabeláže. Na následujícím obrázku je zobrazena kompletní soustava tyristorového usměrňovače.



Obr. 2.3. 3D CAD modelová soustava tyristorového usměrňovače

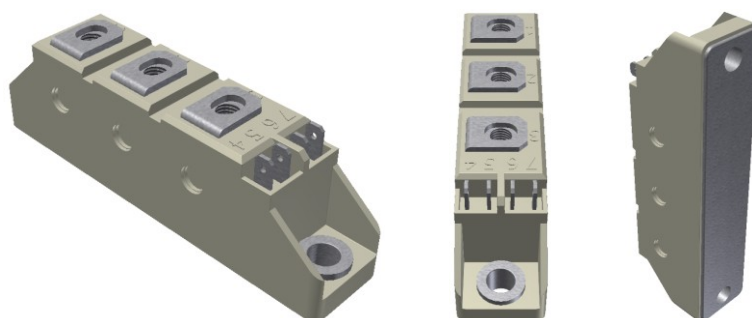
2.3.1. Chladicí systém s tyristorovými moduly SKKT

Základním prvkem chladicího systému tyristorového usměrňovače je hliníkový chladič L140 typ 34.2, DC ventilátor reprezentuje jeho nucené chlazení. Chladič s ventilátorem jsou zakryty plechem tvořícím vzduchový tunel, který je zobrazen na obrázku 2.3. Na následujícím obrázku jsou zobrazeny, mimo chladiče s ventilátorem, tyristorové moduly SKKT pevně připevněnými k chladiči. Měděné pásoviny vodivě spojují anodovou a katodovou skupinu tyristorů třífázového usměrňovače.



Obr. 2.3.1.1. 3D model chladicího systému tyristorového usměrňovače

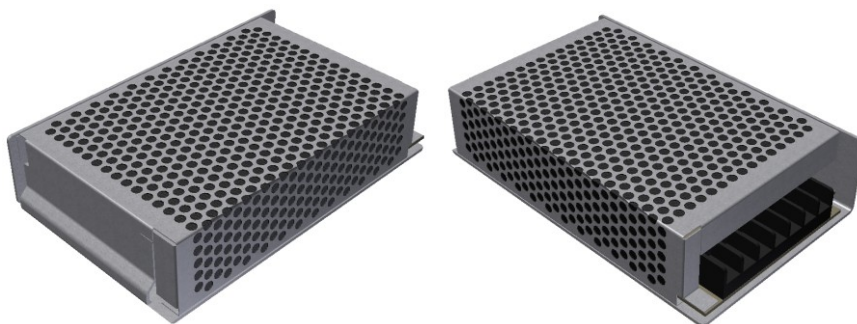
Na následujícím obrázku je detailně zobrazen namodelovaný tyristorový modul SKKT.



Obr. 2.3.1.2. 3D model tyristorového modulu SKKT

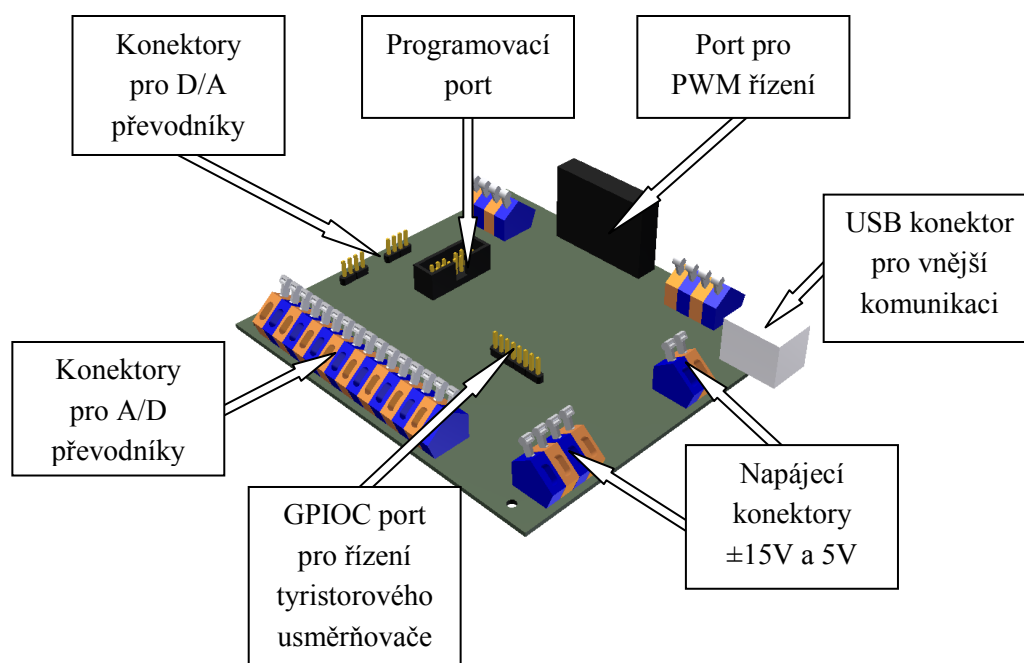
2.3.2. 3D modely řídicí elektroniky tyristorového usměrňovače

K slaboproudé elektronice tyristorového usměrňovače nepochybně patří zdroj napájení. Jako zdroj napájení řídicí elektroniky je použit spínaný zdroj s výstupními napětími $\pm 15V$ a $5V$.



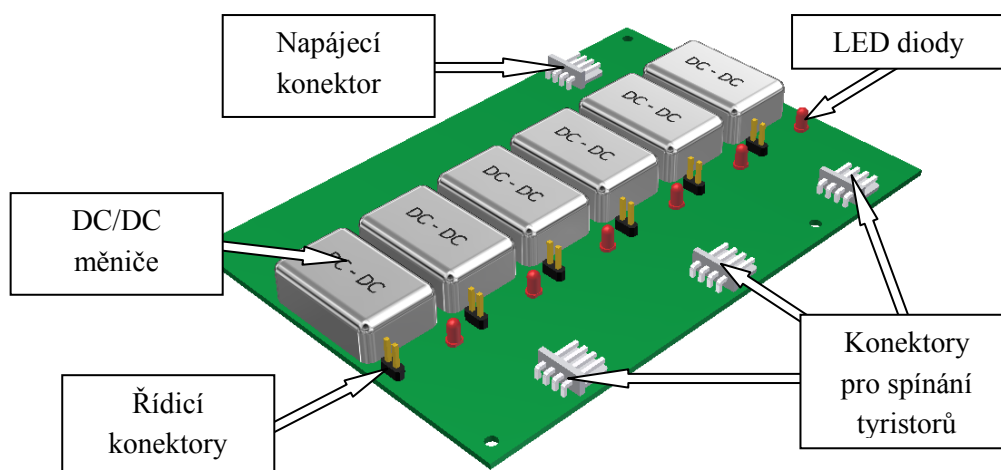
Obr. 2.3.2.1. 3D model spínaného zdroje

Řídicí systém se signálovým procesorem 56F8037 je namodelován s využívanými konektory pro napájení, port pro řízení tyristorového usměrňovače, programovacím portem a konektory A/D a D/A převodníků.



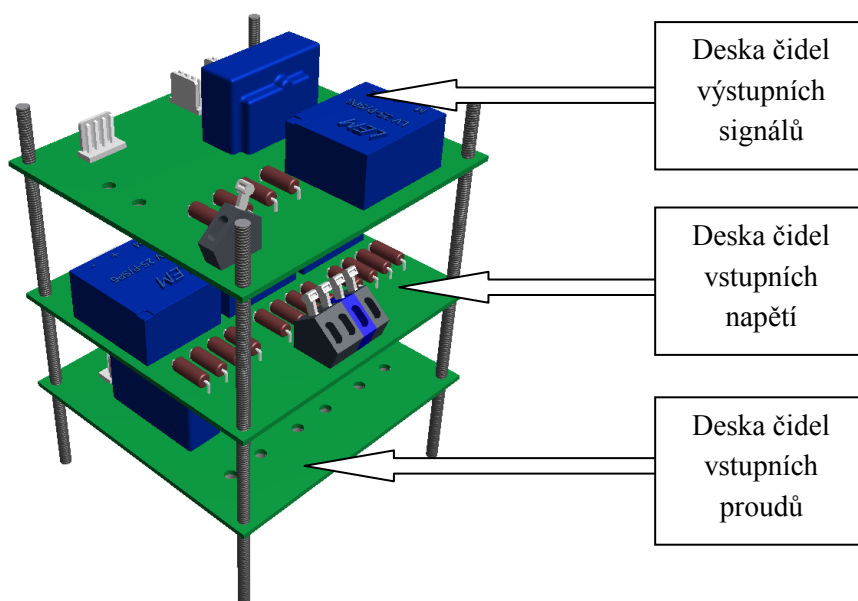
Obr. 2.3.2.2. 3D model řídicího systému

Deska budicích obvodů pro tyristorový usměrňovač je modelována s DC/DC měniči pro napájení jednotlivých budicích obvodů, LED diodami indikujícími výstupní napětí DC/DC měničů, konektorem pro napájení, konektory pro spínání jednotlivých tyristorů a konektory pro řízení z řídicího systému.



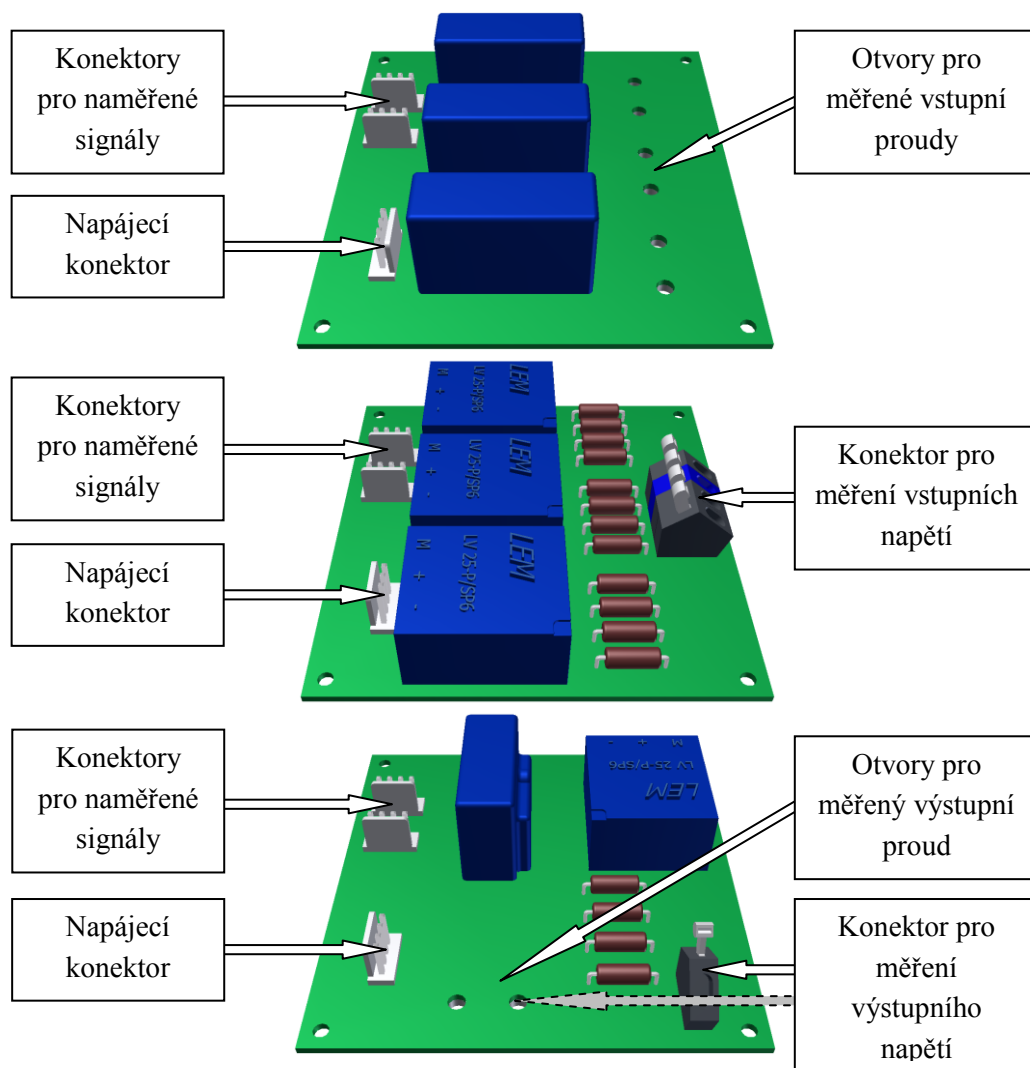
Obr. 2.3.2.3. 3D model desky budicích obvodů

Desky čidel pro snímání vstupních a výstupních signálů tyristorového usměrňovače jsou umístěny nad sebou kvůli úspoře místa a to v následujícím pořadí: nejnižší umístěna deska snímající vstupní proudy, uprostřed umístěná deska snímající vstupní napětí a nejvýše je umístěná deska snímající výstupní signály.



Obr. 2.3.2.4. 3D model desek čidel pro snímání signálů tyristorového usměrňovače

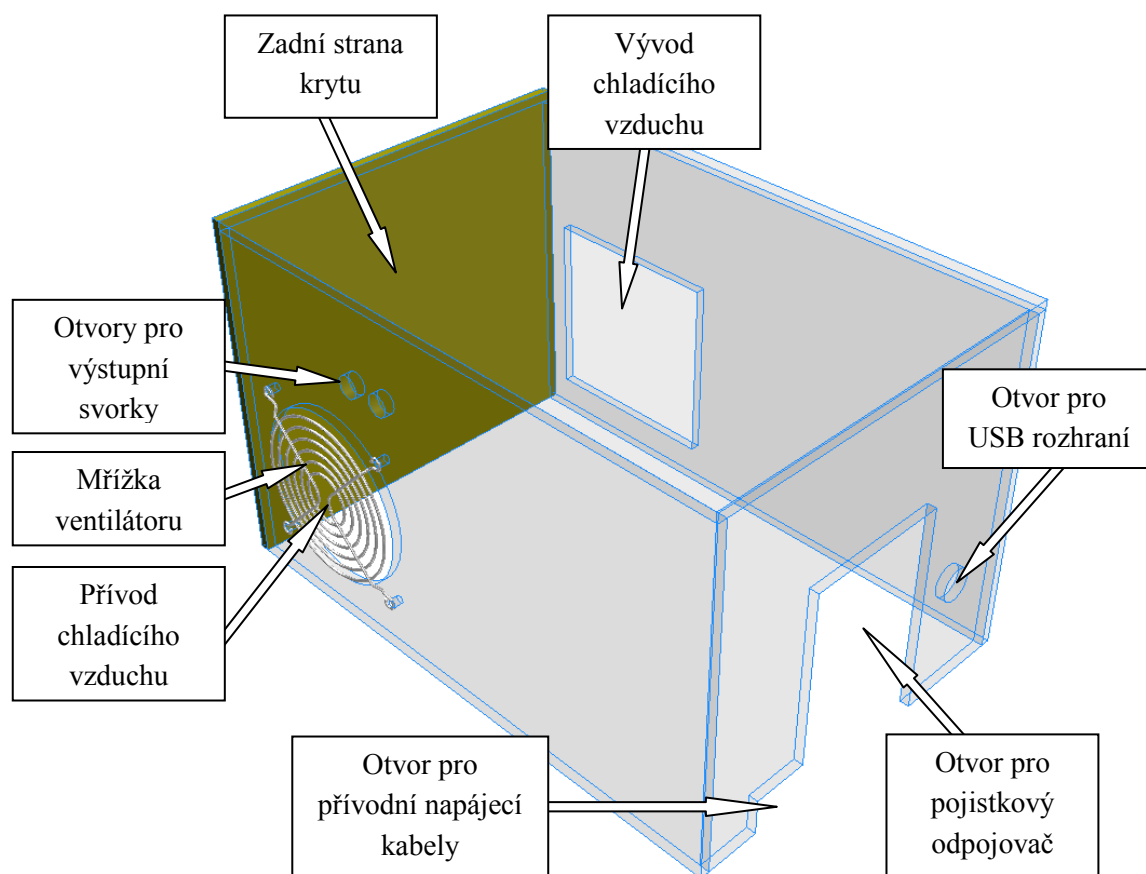
Desky s čidly pro snímání signálů tyristorového usměrňovače jsou namodelovány se všemi komponenty dle reálného návrhu. Pořadí měřících desek je shodné s předchozí stranou. První měřící deska měří vstupní proudy, druhá měřící deska vstupní napětí a třetí výstupní signály tyristorového usměrňovače.



Obr. 2.3.2.5. 3D modely desek čidel pro snímání signálů tyristorového usměrňovače

2.3.3. Kryt tyristorového usměrňovače

Plexisklový kryt slouží k ochraně uživatelů před úrazem elektrickým proudem a zároveň umožňuje pohled do vnitřního uspořádání tyristorového usměrňovače. Namodelovaný kryt znázorňuje všechny otvory, které jsou popsány na následujícím obrázku. Na zadní straně krytu je zobrazeno logo Katedry elektroniky.

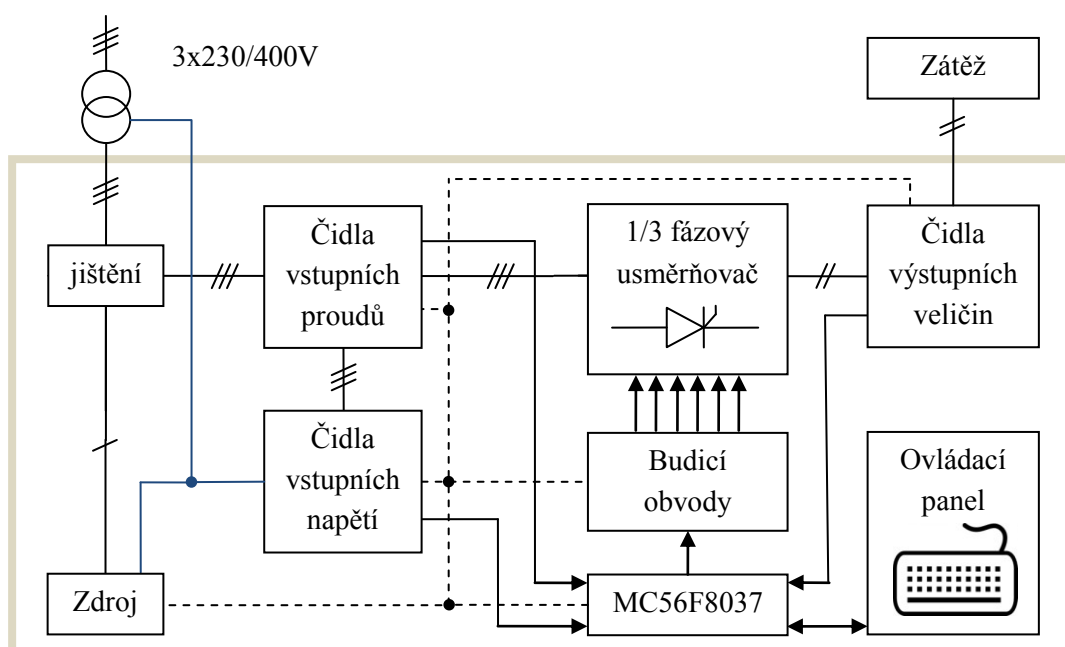


Obr. 2.3.3. 3D model ochranného plexisklového krytu

3. Realizační část

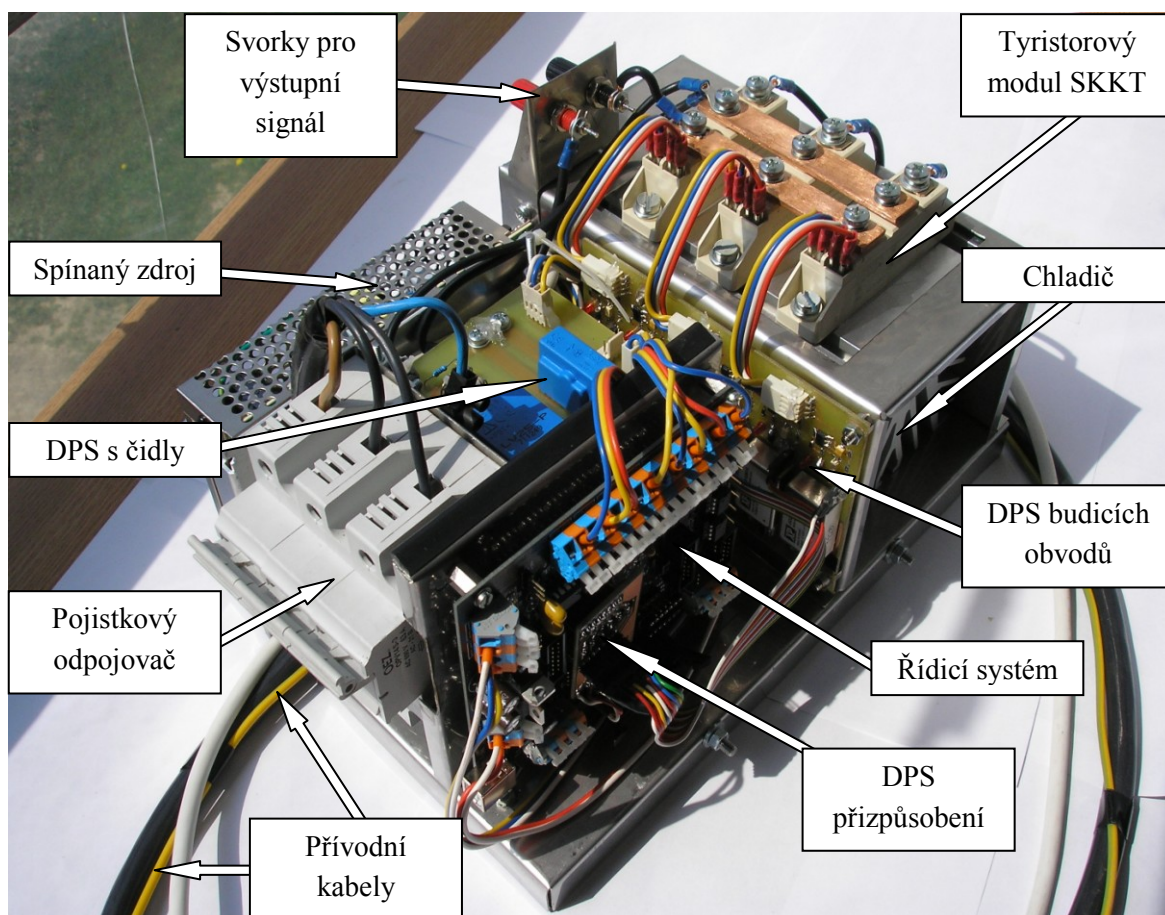
V realizační části diplomové práce je popsána konstrukce tyristorového usměrňovače, popsán návrh, realizace a oživení řídicí elektroniky a popsán postup oživení tyristorového usměrňovače.

Následující blokové schéma znázorňuje všechny reálné komponenty tyristorového usměrňovače a způsob, jakým jsou vodičově propojeny. Jedná se v podstatě o blokově znázorněnou 3D CAD modelovou soustavu tyristorového usměrňovače s vyjádřenou kabeláží.



Obr. 3.1. *Blokové schéma jednofázového a třífázového tyristorového usměrňovače*

Kabely pro přenos silové elektrické energie jsou znázorněny s vyjádřeným počtem fází. Nulový (modrý) vodič musí být vyveden na napěťová čidla z důvodů měření fázových, nikoliv sdružených napětí. Spínaný zdroj, pro napájení řídicí elektroniky má napájecí přívod vyveden samostatně. Napájení pro řídicí elektroniku je znázorněno přerušovanou čarou. Ochranné vodiče nejsou v blokovém schématu znázorněny, v případě připojení tyristorového usměrňovače přímo na rozvod elektrické sítě, mimo oddělovací trafo, je potřeba zajištění oddělení nulového a ochranného vodiče například sítí: 3 PEN ~50Hz/400V / TN-S ,případně TN-C-S.



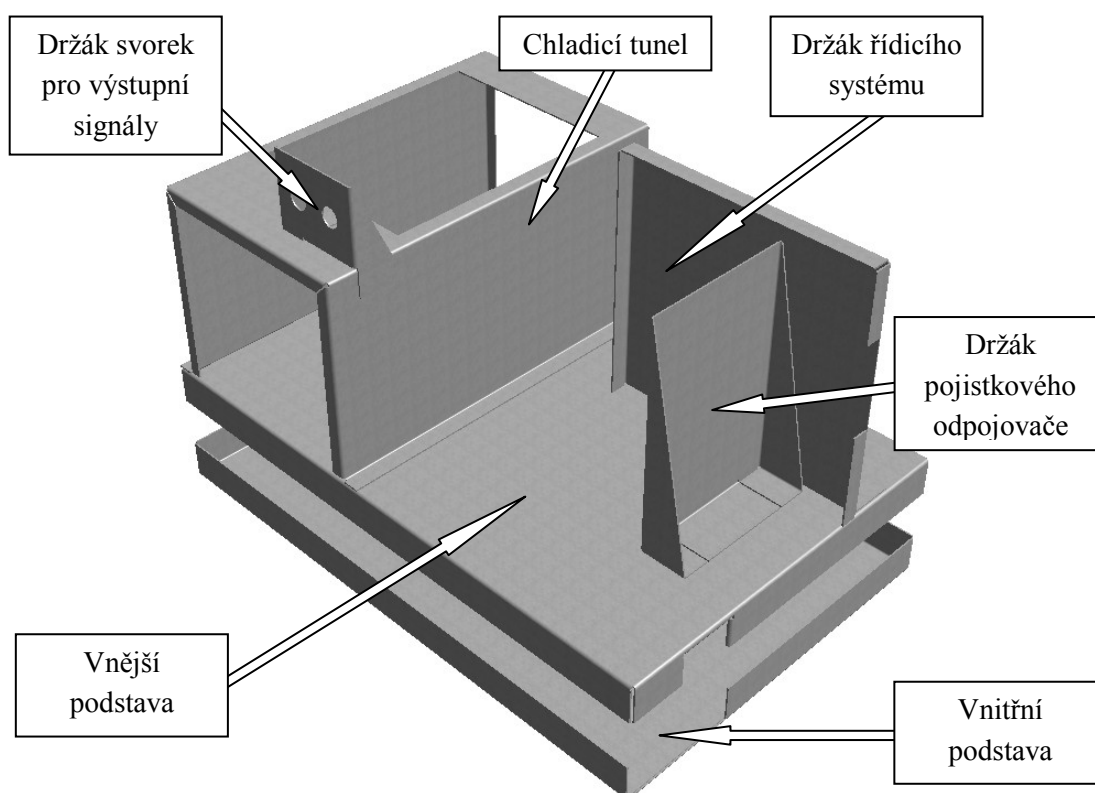
Obr. 3.2. Realizovaný tyristorový usměrňovač

Na výše uvedeném obrázku je znázorněn a popsán již hotový tyristorový usměrňovač se sundaným krytem a popsány viditelnými komponenty. V následujících podkapitolách je popsána konstrukce plechů, popsány všechny komponenty řídicí elektroniky a jejich spolupráce s výkonovou částí tyristorového usměrňovače.

3.1. Konstrukce plechů

Tyristorový usměrňovač je jedním ze tří výkonových polovodičových měničů konstruovaných na Katedře elektroniky v roce 2012, proto bylo stanoveno konstrukční kritérium pro velikost těchto měničů. Vnější podstava tyristorového usměrňovače o rozměrech 200 x 300 mm je poloviční oproti zbývajícím měničům.

Plechové části tyristorového usměrňovače jsou zhotoveny z nerezového plechu o tloušťce 0,8 mm. Konstrukce a montáž plechů vychází z rozvinů a umístění plechových částí namodelovaných v 3D CAD modelové soustavě tyristorového usměrňovače.



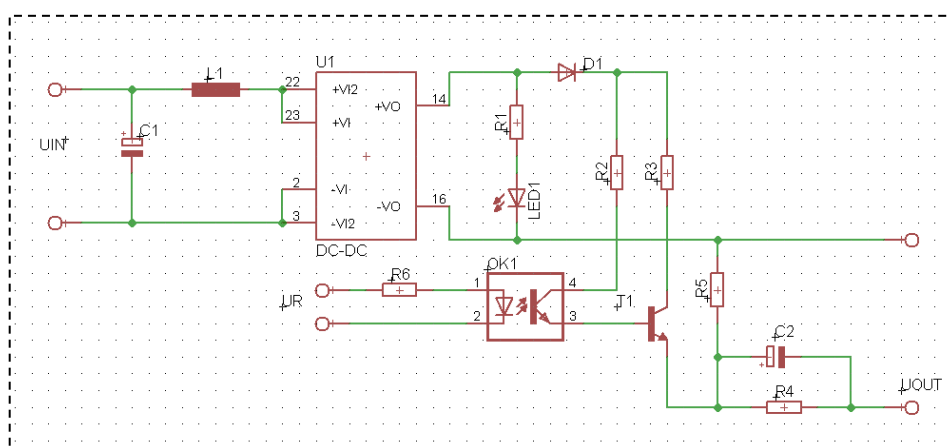
Obr. 3.1. Plechové části tyristorového usměrňovače

3.2. Řídicí elektronika tyristorového usměrňovače

V této kapitole je popsán návrh, realizace funkce řídicích prvků tyristorového usměrňovače, jejich vzájemné napájecí a signálové propojení.

3.2.1. Budicí obvody tyristorového usměrňovače

Prvotní návrh a simulace byl popsán v kapitole 2.1.5. Nicméně reálnou funkci budících obvodů nelze omezit na simulační předpoklady, ale počítat s chováním elektronického obvodu v reálném zapojení. Programem EAGLE je vytvořeno schéma zapojení zobrazené na následujícím obrázku.



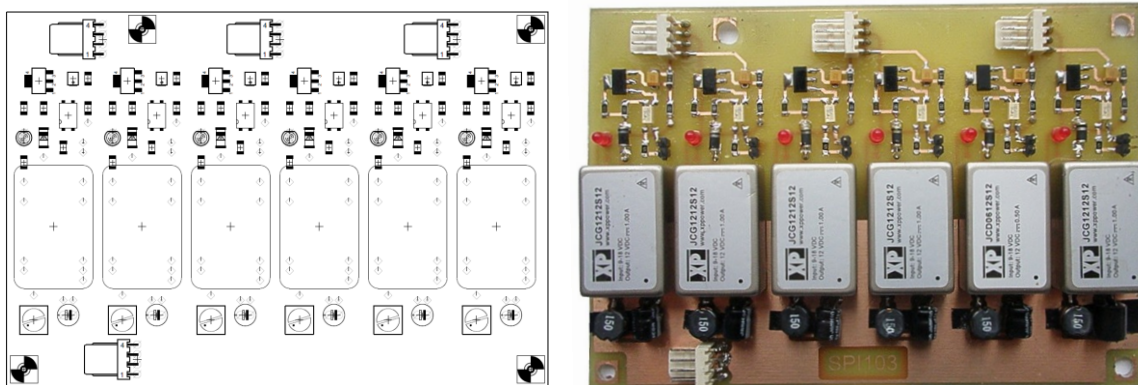
Obr. 3.2.1.1. Schéma zapojení budícího obvodu tyristoru

Popis návrhu výše uvedeného schématu

Svorky UIN slouží k napájení budících obvodů. Kondenzátor C1 a tlumivka L1 slouží k filtraci napájení DC/DC měniče. Funkcí DC/DC měniče je galvanicky oddělit napájecí spínací zdroj od výkonové části tyristorového usměrňovače. Nízkovýkonová LED dioda indikuje výstupní napětí DC/DC měniče. Rezistory R1, R2 a R6 jsou použity jako proudové ochrany přiřazených součástek. Optočlen a bipolární NPN tranzistor mají v tomto zapojení funkci spínačů, optočlen mimo spínání NPN tranzistoru slouží ke galvanickému oddělení řídicího systému od výkonové části tyristorového usměrňovače. Rezistor R5 je ochranou hradla tyristoru. Dioda D1 chrání DC/DC měnič proti zpětnému toku proudu. Vazba kondenzátoru C2 a rezistoru R4 zajišťuje náběžnou špičku proudu hradla tyristoru. Rezistorem R3 se v poměru s ostatními rezistory nastavuje proud do hradla tyristoru, je proto nutné zvolit vhodný výkonový rezistor. Svorky UR souží k přivedení řídicího signálu a svorky UOUT slouží k připojení spínacích kabelů k tyristorům.

Popis realizace budicích obvodů tyristorového usměrňovače

DPS budicích obvodů má rozměry 140 x 97 mm a je přimontována zboku k chladicímu tunelu tyristorového usměrňovače, jak lze vidět v 3D CAD modelové soustavě zobrazené na obrázku 2.3. Popis konektorů je popsán v 3D modelu desky budicích obvodů na obrázku 2.3.2.3. Na následujícím obrázku je zobrazeno rozložení součástek na desce plošných spojů a realizovaná deska budicích obvodů.



Obr. 3.2.1.2. *Návrh a realizace desky budicích obvodů tyristorového usměrňovače*

Rozložení konektorů pro spínání tyristorů (nahore), konektoru pro napájení desky budicího obvodu (dole) a konektorů k řízení desky budicího obvodu (uprostřed) je dáno konstrukčním uspořádáním komponentů tyristorového usměrňovače. Jednotlivé konektory jsou umístěny nejbližší ke konektorům ostatních komponentů, se kterými jsou vodičě spojeny.

Elektronické součástky jsou většinou voleny v pouzdrech SMD. Je nutné zdůraznit, že výkonový rezistor R3 na desce budicích obvodů je také v SMD pouzdru. SMD rezistory řady 1206 jsou použitelné do příkonu 250mW, což znamená, že oživení a používání desky budicích obvodů má své pravidla popsané v dalším odstavci.

Popis oživení desky budicích obvodů tyristorového usměrňovače

Před realizací byla funkčnost budicího obvodu tyristoru simulována programem NI Multisim. Simulace sloužila pro ověření průběhů a velikostí jednotlivých napětí, proudů a výkonů v obvodové struktuře budicího obvodu.

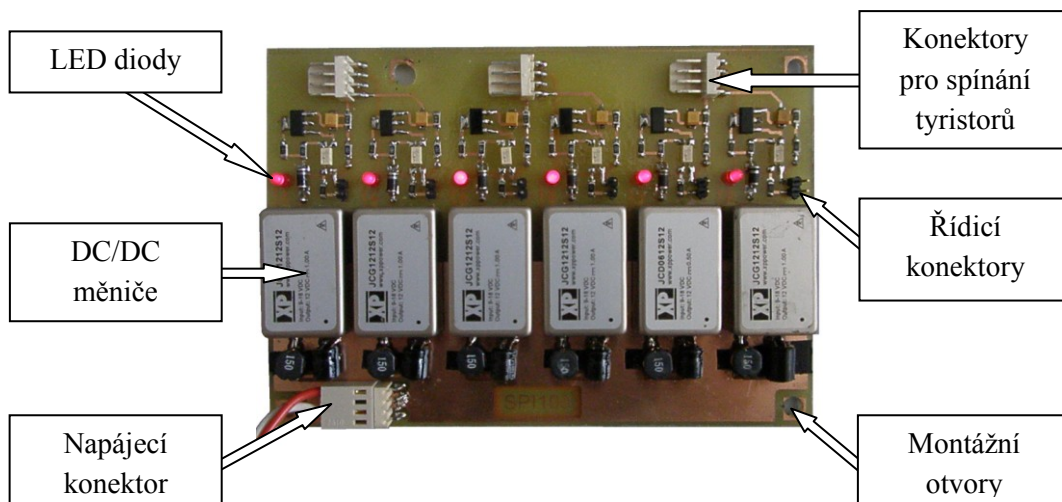
Budicí obvod byl sestaven na nepájivém poli s 2W výkonovým rezistorem R3. Díky výkonovému rezistoru R3 mohl být budicí obvod trvale sepnut přivedením stejnosměrného napětí na řídicí konektor.

Měřením bylo zjištěno, že napětí mezi hradlem a katodou tyristoru U_{GT} bylo 1V místo předpokládaného $U_{GT} = 3V$. Z toho důvodu byl simulační program upraven a tyristor byl simulován jen jako PN přechod mezi hradlem a katodou. To znamená, že v simulačním programu byl tyristor nahrazen stejnosměrným 1V zdrojem a parametry simulace byly zvoleny tak, aby proud tekoucí do hradla tyristoru I_{GT} (v simulaci proud vyrovnávající potenciál napětí budicího obvodu a přidaného 1V zdroje) byl, dle spínací charakteristiky tyristoru (obr. 2.1.5.1) v rozmezí 200 – 700mA.

Zapojení na nepájivém poli bylo dle simulace upraveno a budicí obvod byl připojen k tyristoru. Tyristor byl zapojen, přes oddělovací trafo (~230V), jako jednopulzní usměrňovač a jako zátěž byla použita 60W žárovka, která svitem prokazovala sepnutý obvod. Řídicí signál byl stále reprezentován stejnosměrným zdrojem napětí. Při připojení stejnosměrného řídicího signálu žárovka svítila (respektive velice rychle problikávala, což byl následek toho, že tyristor vede proud polovinu periody při odporové zátěži) Ampérmetrem byl naměřený proud do hradla tyristoru I_{GT} přibližně 250mA. Při odpojení stejnosměrného řídicího signálu tyristorem přestal protékat proud a naopak.

Tímto byla funkčnost návrhu budicího obvodu tyristoru ověřena. Po zhotovení desky budicích obvodů tyristorového usměrňovače následovala kontrola správného napájení součástek a proměření vodivých cest a možných zkratovaných cest na desce plošných spojů.

Deska budicích obvodů byla připojena k napájení a bylo vizuálně zkontrolováno výstupní napětí všech DC/DC měničů.



Obr. 3.2.1.3. *Kontrola výstupních napětí DC/DC měničů desky budicích obvodů*

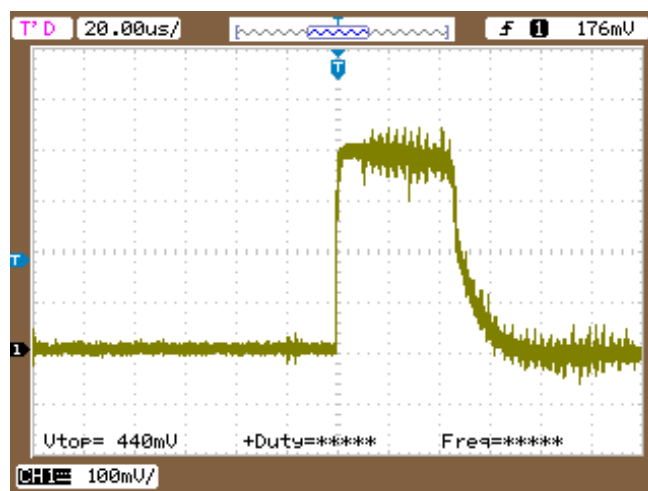
V následujícím měření byl tyristor zapojen také jako jednopulzní usměrňovač přes oddělovací trafo a zátěž byla reprezentována 60W žárovkou.

Řídicí signál již nemohl být reprezentován stejnosměrným napětím, jelikož by byl překročen příkon SMD rezistoru R3. Požadovaný řídicí signál byl vytvořen z funkčního generátoru generujícího obdélníkový průběh se střídou 50%. Frekvence řídicího signálu byla 150 Hz, protože bylo nutné zajistit sepnutí tyristoru v libovolném okamžiku. Frekvence řídicího signálu byla tedy 3x větší než je frekvence síťového napětí, což tento předpoklad spínání splňovalo.

Bohužel ani řídicí signál obdélníkového průběhu se střídou 50% nespĺňoval výkonové požadavky rezistoru R3. Tento problém byl vyřešen zapojením jednoduchého derivačního členu mezi funkční generátor a konektor pro spínání budicího obvodu tyristoru. Šířka takhle vytvářených pulzů byla přibližně 50 μ s. Generované záporné pulzy nebyly problémem, protože budicí obvod je řízený svitem diodou optočlenu.

Do hradla tyristoru byl přidán 1,3 Ω odpor, na kterém byl osciloskopem měřený úbytek napětí. Tímto způsobem (dle Ohmova zákona) byla zjištěná maximální hodnota proudu tekoucím do hradla přibližně $I_{GT} = 310$ mA. Obrázek na další straně zobrazuje průběh proudu hradla tyristoru.

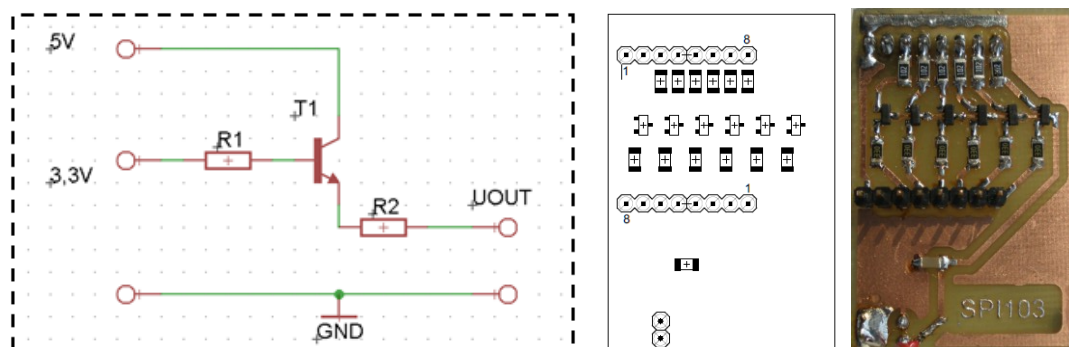
Tímto bylo připravené prostředí pro odzkoušení a měření všech budicích obvodů na desce plošných spojů. V přílohách jsou uvedeny fotografie, jak je možné analogově regulovat svit žárovky v závislosti na frekvenci spínacích pulzů.



Obr. 3.2.1.4. Průběh měřeného proudu hradla tyristoru (úbytek napětí na $1,3\Omega$ rezistoru)

Přizpůsobení desky budících obvodů k řízení pomocí signálového procesoru 56F8037

Galvanickým oddělením řídicího systému od výkonové části tyristorového usměrňovače jsou optočleny potřebující k sepnutí vstupní proud 50mA. Signálový procesor dokáže generovat pulzy maximálně v jednotkách mA, proto je potřeba proudově posílit řídicí konektor a to následujícím způsobem.



Obr. 3.2.1.5. Schéma zapojení, rozvržení součástek desky přizpůsobení

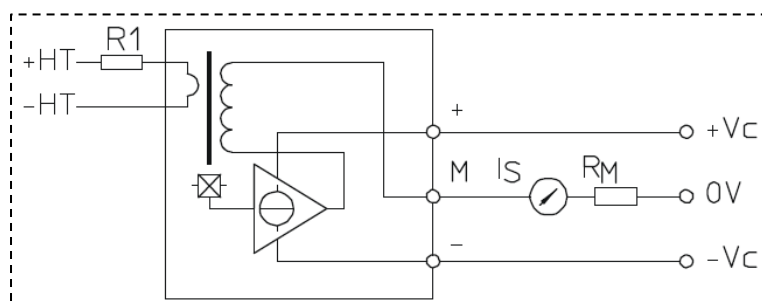
Princip tohoto obvodu spočívá v tom, že optočlen bude sepnut pomocí 3,3V hladiny napětí proudem dodávajícím 5V napájecí hladina napětí. Rezistor R1 proudově chrání výstupní pin konektoru GPIOC. Tranzistor v tomto zapojení funguje jako spínač. Tranzistorem a rezistorem R2 se nastavuje vstupní proud optočlenu.

3.2.2. Desky čidel pro měření vstupních a výstupních signálů

Desky čidel tyristorového usměrňovače umožňují měření všech signálů výkonové části tyristorového usměrňovače. Rozložení součástek, čidel, portů pro napájení a portů pro měřicí signály je popsáno v kapitole 2.3.2.: 3D modely řídicí elektroniky na obrázku 2.3.2.5. Jednotlivé porty jsou, také jako u desky budicích obvodů, rozloženy pro nejkratší vzdálenosti k dalším částem řídicí elektroniky, se kterými jsou napájecími nebo měřicími vodiči propojeny. Desky čidel pro měření vstupních a výstupních signálů mají rozměry 89 x 85 mm.

Deska čidel pro měření vstupních fázových napětí

Pro měření vstupních fázových napětí jsou použity napěťové čidla LV 25 – P [10]. Na následujícím obrázku je zobrazeno vnitřní zapojení napěťového čidla.

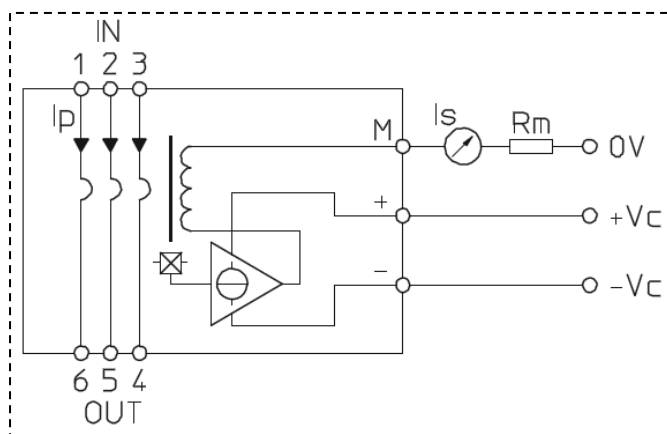


Obr. 3.2.2.1. Vnitřní struktura napěťového čidla LV 25 – P [10]

Na vstupy +HT jsou přivedeny vstupní fáze síťového napětí. Na vstupy -HT je přiveden nulový vodič. Napěťové čidlo je navrženo pro snímání 240V efektivních a efektivní hodnota proudu do čidla je nastavena rezistorovou sítí R1 na 10mA. Rezistory odporové sítě R1 jsou navrženy pro snesení výkonové zátěže na vstupu napěťového čidla ($P_{R1} = 240V * 10mA = 2,4VA$) a zároveň musí mít velice přesné hodnoty kvůli přesnosti snímání fázových napětí pro řízení tyristorového usměrňovače. Přesnost rezistorů v rezistorové síti R1 je řádově desetina procenta. Maximální hodnota vstupního proudu čidla nepřesáhne 14mA. Tímto jsou splněny předpoklady správné funkčnosti napěťového čidla, dle datasheetu [10]. Deska čidel je napájena spínáním zdrojem na svorkách $\pm Vc$. Napěťové čidlo generuje proudový signál nesoucí informaci o tvaru snímaného fázového napětí. Měřený signál je přiveden na vstupní konektory A/D převodníku řídicího systému. Rezistorem R_M se nastavuje napěťová hladina měřeného proudového signálu pro A/D převodníky. Zvolení vhodných rezistorů R_M je popsáno v kapitole popisující řídicí systém.

Deska čidel pro měření vstupních fázových proudů

Pro měření vstupních fázových proudů jsou použity proudové čidla LAH 25-NP [11]. Na následujícím obrázku je zobrazeno vnitřní zapojení proudového čidla.



Obr. 3.2.2.2. Vnitřní struktura proudového čidla LAH 25-NP [11]

Na vstupy IN jsou přivedeny vstupní fáze síťového napětí. Výstupy OUT jsou vedeny na vstupní svorky tyristorových modulů SKKT. Proudové čidlem může téci maximálně 50A. Nominální hodnota proudu I_p je 25A. Tyto hodnoty udává způsob zapojení vstupních svorek dle datasheetu [11]. Deska čidel je napájena spínaným zdrojem na svorkách $\pm V_c$. Proudové čidlo generuje, jako napěťové čidlo, proudový signál, který má shodný tvar s měřeným fázovým proudem. Měřené signály jsou, stejně jako u desky s napěťovými čidly, přivedeny na vstupní konektory A/D převodníků řídicího systému. Rezistorem R_M se nastavuje napěťová hladina měřeného proudového signálů pro A/D převodníky. Zvolení vhodných rezistorů R_M je popsáno v kapitole popisující řídicí systém.

Deska čidel pro měření výstupních signálů

Na desce se nachází jedno napěťové a jedno proudové čidlo. Těmito čidly se snímá usměrněné napětí a výstupní proud tyristorového usměrňovače. Principy činnosti čidel jsou již popsány v předcházejících odstavcích. Rozdílem je rezistorová síť R_1 napěťového čidla, která je navržena pro výstupní napětí 600V a dodává vstupní proud do napěťového čidla 10mA. Rezistory rezistorové sítě R_1 již nemusí být velice přesné, použité rezistory mají přesnost řádově jednotky procent.

3.2.3. Popis řídicího systému

V teoretickém rozboru jsou popsány využívané periferie, nejdůležitější je se zmínit o zapojení výstupních signálů napěťových a proudových čidel.

Signály vstupních fázových napětí, fázových proudů a signály výstupní napětí a proudu jsou přivedeny na vstupy A/D převodníků dle následující tabulky.

Tab. 3.2.3.1. Zapojení A/D převodníků

kanál A/D převodníku	registr vzorků signálů	měřený signál	označení signálu
ANA0	SMP0	fázové napětí u1	f16u1_a
ANA1	SMP1	fázové napětí u2	f16u1_b
ANA2	SMP2	fázové napětí u3	f16u1_c
ANA3	SMP3	výstupní napětí	f16U_out
ANB4	SMP4	fázový proud i1	f16i1_a
ANB5	SMP5	fázový proud i2	f16i1_b
ANB6	SMP6	fázový proud i3	f16i1_c
ANB7	SMP7	výstupní proud	f16I_out

K řízení tyristorového usměrňovače je vyveden vstupní/výstupní port GPIOC respektive piny portu GPIOC 9,10,11,13,14 a 15. Následující výpis zobrazuje propojení výstupního portu GPIOC s deskou budících obvodů.

```
*      Piny portu GPIOC:
*      |__|__|__|__|__|__|__|__|
*      G  NC 15 14 13 11 10  9
*
*      trifazovy mustek rizeny GPIOC:
*      +-----+
*      |
*      |      TH-1      TH-3      TH-5      |
*      |      +9      +11      +14      |
*      |
*      |
*      |      TH-4      TH-6      TH-2      |
*      |      +10      +13      +15      |
*      |
*      +-----+
```

Pro generování řídicích pulzů jsou použity dva programovatelné časovače PIT0 a PIT1. Řídicí systém umožňuje zobrazovat vybrané průběhy, například fázových napětí, na dvou 12bitových D/A převodnících.

3.3. Spolupráce řídicí elektroniky a výkonové části tyristorového usměrňovače

V předchozích kapitolách je popsáno oživení jednotlivých částí řídicí elektroniky. Dalším krokem bylo zajištění generování pulzů řídicím systémem. Pro tento účel byly využity časovače PIT0 a PIT1 přičemž PIT0 nastavoval dobu periody pulzů a PIT1 šířku pulzů. Na následujícím obrázku jsou znázorněny generované pulzy.

Pulzy jsou generovány co 20ms, což odpovídá kmitočtu napájecí fáze. Pulzy zobrazené na kanálu jedna osciloskopu jsou vytvářeny na pinech portu GPIOC 11 a 15. Pulzy zobrazené na kanálu dvě jsou generovány na pinech 13 a 14.



Obr. 3.3.1. Generování pulzů řídicím systémem

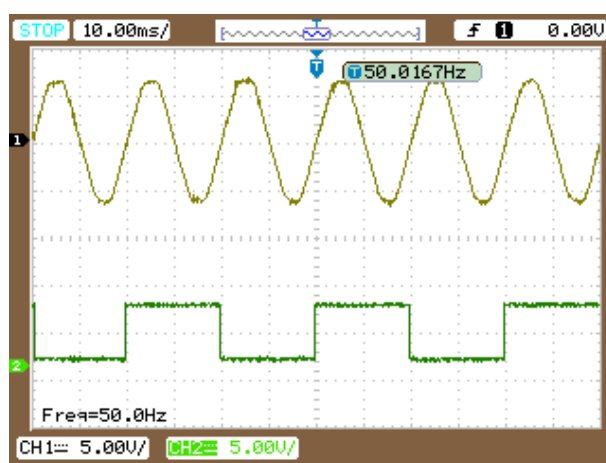
Po ověření funkčnosti řídicího systému byly komponenty řídicí elektroniky sestaveny.

Tyristorový usměrňovač byl zapojen v jednofázovém můstku. Obrázek napravo zobrazuje řídicí pulzy generovány stejným způsobem jako v předchozím případě jen s dvojnásobným kmitočtem a průběh výstupního napětí



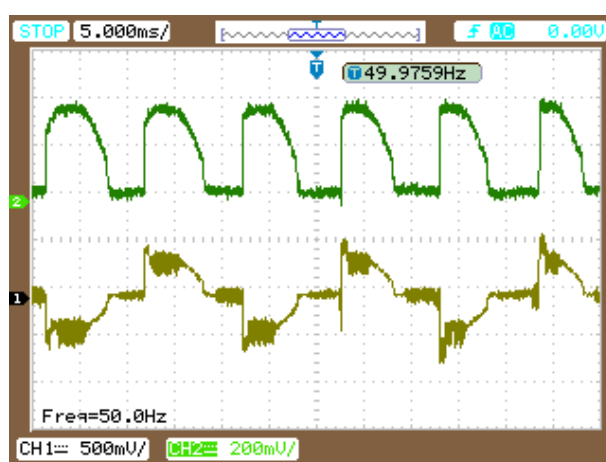
Obr. 3.3.2. Generování pulzů řídicím systémem

Předchozí obrázky dokazují funkčnost spolupráce řídicí elektroniky tyristorového usměrňovače s jeho výkonovou částí. Pro správné generování pulzů pro řízení usměrňovače dle úhlu řízení α je potřeba synchronizovat vstupní napětí s počáteční dobou generování pulzů. Pro tento účel má signálový procesor funkci detekce signálu průchodu nulou. Na následujícím obrázku je znázorněn průběh vstupního napětí snímaným napěťovým čidlem a generovaným zpětně D/A převodníkem a druhým D/A převodníkem generovaný signál průchodu fáze nulou.



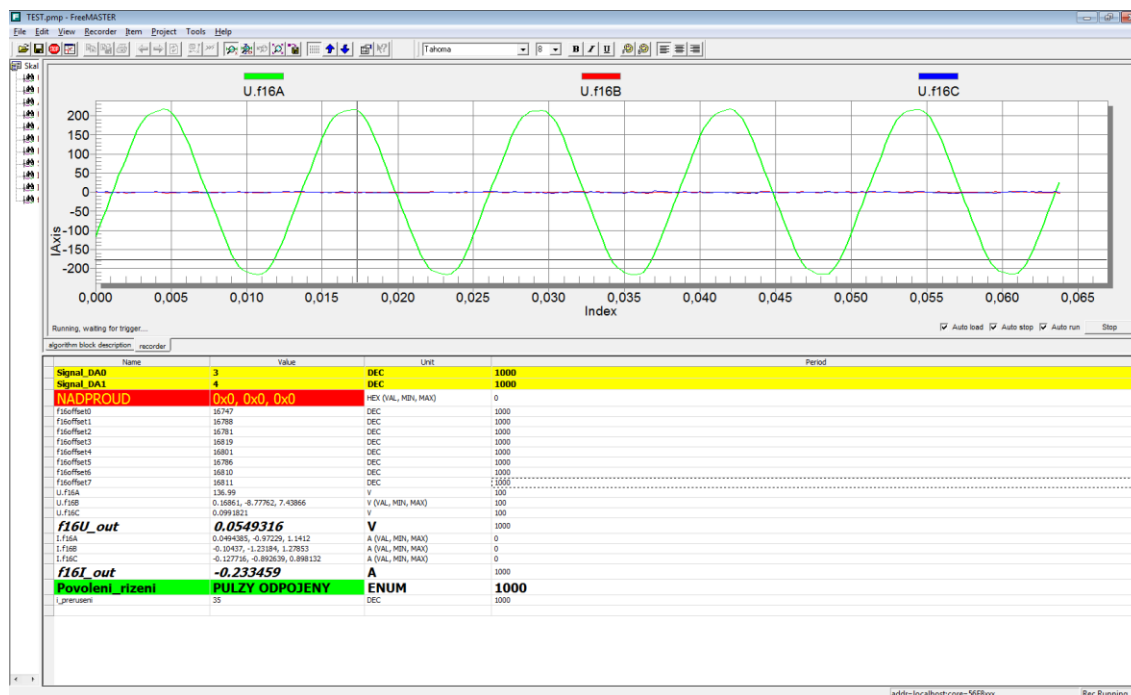
Obr. 3.3.3. Detekce průchodu nulou vstupního napětí

Detekce průchodu nulou vstupních napětí vyžaduje rozsáhlejší zpracování, není spolehlivá. Z tohoto důvodu není synchronizace vstupních napětí s počáteční dobou spínání tyristorů úplná. Na následujícím obrázku je znázorněn fázový proud (kanál 1) a výstupní proud (kanál 2) jednofázového můstku.



Obr. 3.3.4. Průběh výstupního a fázového proudu

Pro komunikaci řídicího systému (tyristorového usměrňovače) přes programovací a komunikační rozhraní JTAG slouží program FreeMASTER. Screen obrazovky FreeMASTERu je zobrazen na následujícím obrázku, lze na něm vidět průběh fázového napětí snímáný napěťovým čidlem a zpracovávaným A/D převodníkem, okamžité hodnoty fázových napětí a proudů, nadproudová ochrana a povolení řízení tyristorového usměrňovače.



Obr. 3.3.5. Screen obrazovky programu FreeMASTER pro řízení tyristorového usměrňovače

Závěr

Cílem mé diplomové práce byla realizace jednofázového a třífázového tyristorového usměrňovače s mikroprocesorovým řízením. Cestou k dokončenému funkčnímu tyristorovému usměrňovači jsem prošel a vypracoval všechny body zadání. Zvláštní pozornost jsem věnoval propracování simulací, které mi v průběhu realizace tyristorového usměrňovače usnadnily spoustu práce při vedení silových vodičů, propojování řídicí elektroniky i zavádění algoritmů řízení tyristorového usměrňovače. Další důležitou částí diplomové práce bylo dimenzování komponentů tyristorového usměrňovače. Všechny výpočty jsem prováděl v programu MATLAB a ověřoval s výsledky simulací. Při návrhu jištění a chlazení tyristorového usměrňovače jsem vycházel z maximální možné zatížitelnosti tyristorových modulů. Mohu říci, že díky těmto výpočtům jsou komponenty tyristorového usměrňovače značně předimenzovány pro použití tyristorového usměrňovače v laboratořích Katedry elektroniky a tyristorový usměrňovač je tedy výkonově nezničitelný. Práci na 3D CAD modelové soustavě tyristorového usměrňovače jsem zvažoval možné umístění komponentů. Všechny komponenty jsem namodeloval a řádně popsal. Výsledná 3D CAD modelová soustava mi byla vzorem pro konstrukci tyristorového usměrňovače. Realizaci diplomové práce jsem začal konstrukcí plechových částí, které jsem v průběhu realizace různě upravoval. Nejdůležitější prací na tyristorovém usměrňovači byl návrh, odsimulování, vytvoření 3D modelu, výroba a ověření funkčnosti desky budicích obvodů tyristorového usměrňovače. Desku budicích obvodů, desky čidel pro vstupní a výstupní signály a řídicí systém jsem detailně popsal a ověřil funkčnost spolupráce řídicí elektroniky s výkonovou částí tyristorového usměrňovače. Oživování jednotlivých prvků řídicí elektroniky a ověřování funkčnosti tyristorového usměrňovače jsem doložil obrázky z měření a fotek laboratorních stanovišť pro tato měření.

Tyristorový usměrňovač se dá dále vylepšovat a práce na něm může být dalšími tématy například bakalářských prací. Jako užitečným vylepšením tyristorovým usměrňovače by mohlo být hardwarové blokování spínacích pulzů, dokud nebude inicializovaný program signálového procesoru a zajištěná funkční komunikace s tyristorovým usměrňovačem. Dalším vylepšením mé diplomové práce může být zdokonalení algoritmů řízení, zajištění vnějšího řízení přes USB rozhraní s nadřazeným počítačem či vytvoření ovládacího prostředí v programu LabView. Z hlediska použití v laboratořích Katedry elektroniky může být tyristorový usměrňovač využit k ovládání pohonů se stejnosměrnými motory či jako soft-startér střídavých motorů.

Seznam použité literatury

- [1] VONDRÁŠEK, František. *VÝKONOVÁ ELEKTRONIKA: MĚNIČE S VNĚJŠÍ KOMUNIKACÍ*. Plzeň: Západočeská univerzita, 1994. sv. 2. ISBN 80-7082-137-X.
- [2] CHLEBIŠ, Petr. VŠB - TUO. *VÝKONOVÁ ELEKTRONIKA I*. Ostrava: VŠB - TUO, 2007. ISBN 978-80-248-1485-8.
- [3] CHLEBIŠ, Petr. *VÝKONOVÉ POLOVODIČOVÉ SYSTÉMY*. Ostrava: VŠB - TUO, 2005.
- [4] VŠB - TUO. *Katedra elektroniky* [online]. 2008 [cit. 2012-03-14]. Dostupné z: http://fe1.vsb.cz/kat430/texty/cs_cz/cz-o_kat.html
- [5] MAXA, Jiří a Vitěslav NOVÁK. FEKT VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. *Počítačové návrhové systémy*. Brno, 2006. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/VIT/images/pdf/studijni_materialy/ing/Pocitacove_navrhove_sytemy_S.pdf
- [6] SKKT 42: Thyristor modules. SEMIKRON. <Http://www.semikron.com/> [online]. 2012 [cit. 2012-03-21]. Dostupné z: http://www.semikron.com/products/data/cur/assets/SKKT_42_07897271.pdf
- [7] Vzduchové chladiče pro moduly. ČKD POWER ELECTRONICS. <Http://www.ckd.cz:> <http://www.ckdpoel.cz> [online]. 2011 [cit. 2012-03-21]. Dostupné z: <http://www.ckdpoel.cz/products.php/46>
- [8] Pojistky pro jištění polovodičů: POJISTKOVÉ VLOŽKY PRO JIŠTĚNÍ POLOVODIČŮ DO 690 V a.c. (VÁLCOVÉ). OEZ. <Http://www.oez.cz/> [online]. 2011 [cit. 2012-04-22]. Dostupné z: http://www.oez.cz/uploads/oez/files/ks/1334-Z01-10_CZ_SK.pdf
- [9] OPV14 Odpínače válcových pojistek. OEZ. <Http://www.oez.cz> [online]. 2011 [cit. 2012-04-29]. Dostupné z: http://www.oez.cz/uploads/oez/files/ks/1297-Z01-12_CZ_SK.pdf
- [10] Voltage Transducer LV 25 – P. LEM. <Http://www.lem.com/> [online]. 2006-2012 [cit. 2012-04-29]. Dostupné z: <http://www.lem.com/docs/products/lv%2025-p.pdf>
- [11] Current Transducer LAH 25-NP. LEM. <Http://www.lem.com/> [online]. 2006-2012 [cit. 2012-04-29]. Dostupné z: <http://www.lem.com/docs/products/lv%2025-p.pdf>
- [12] DC-DC: 12 Watts JCG series. XP POWER. <Http://www.xppower.com/> [online]. 2012 [cit. 2012-03-21]. Dostupné z: http://www.xppower.com/pdfs/SF_JCG.pdf

- [13] SLIVKA, David. *Diplomová práce: Řídící jednotka pohonu vozidla s palivovými články*. Ostrava: VŠB - TUO, 2009.
- [14] MC56F8037. FREESCALE. *Http://www.freescale.com/* [online]. 2004-2012 [cit. 2012-04-30]. Dostupné z: http://www.freescale.com/files/dsp/doc/data_sheet/MC56F8037.pdf
- [15] MC56F80XXRM. FREESCALE. *Http://www.freescale.com/* [online]. 2004-2012 [cit. 2012-04-30]. Dostupné z: http://cache.freescale.com/files/dsp/doc/ref_manual/MC56F80XXRM.pdf?fsrch=1&sr=1
- [16] DSP56800E Quick Start Initialization and Development Tool. FREESCALE. *Http://www.freescale.com/* [online]. 2004-2012 [cit. 2012-04-30]. Dostupné z: http://www.freescale.com/webapp/sps/site/prod_summary.jsp?code=DSP56800EQUICKSTART
- [17] FreeMASTER Run-Time Debugging Tool. FREESCALE. *Http://www.freescale.com/* [online]. 2004-2012 [cit. 2012-04-30]. Dostupné z: http://www.freescale.com/webapp/sps/site/prod_summary.jsp?code=FREEMASTER

Seznam příloh

- I. Simulační blokové schéma tyristorového usměrňovače
- II. Vybrané simulační výsledky jednofázového tyristorového usměrňovače
- III. Vybrané simulační výsledky trojfázového tyristorového usměrňovače
- IV. 3D CAD modelová soustava tyristorového usměrňovače
- V. Oživení budících obvodů – regulace svitu žárovky
- VI. Proměrování funkčnosti čidel a řídicího systému
- VII. Měřicí stanoviště
- VIII. Realizovaný tyristorový usměrňovač