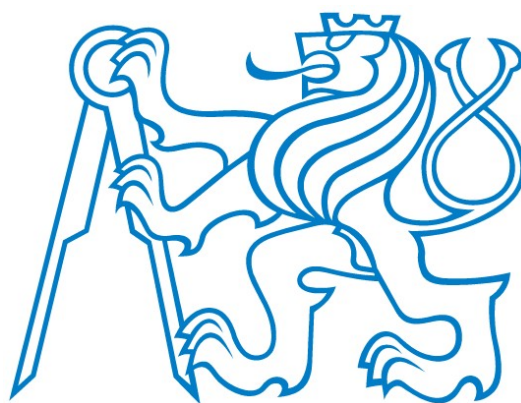


České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektrických pohonů a trakce



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Generátor zapínacích impulsů pro fázově
řízené měniče

Bc. Jan Čedík

Vedoucí práce: Ing. Pavel Mňuk, CSc.

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Obor: Elektrické stroje, přístroje a pohony

Leden 2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Čedík** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **393440**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrických pohonů a trakce**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Elektrické stroje, přístroje a pohony**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Generátor zapínacích impulsů pro fázově řízené měniče

Název diplomové práce anglicky:

Pulse Generation Unit for Phase Controlled Converters

Pokyny pro vypracování:

1. Převedte program ze své bakalářské práce na procesor z řady PIC32MZ.
2. Rozšířte program o řízení dvanáctipulsního usměrňovače včetně reverzačního uspořádání a o řízení střídavých měničů napětí.
3. Zajistěte odolnost generátoru impulsů vůči zkreslení napájecího napětí vyššími harmonickými.
4. Navrhněte a realizujte řídicí jednotku s procesorem z řady PIC32MZ.
5. Sestavte funkční vzorek generátoru impulsů a ověřte funkci pro všechny podporované měniče na laboratorních přípravcích.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Oetter J. Výkonová elektronika pro elektrické pohony. Bratislava: Alfa, 1988.
- [2] Teodorescu R., Liserre M. a Rodrigues P.: Grid converters for photovoltaic and wind power systems. Hoboken, N.J.: Wiley, 2011 ISBN: 978-0-470-05751-3
- [3] Herout, P.: Učebnice jazyka C. 5. vyd. Kopp, Č. Budějovice, 2008
- [4] Microchip: PIC32MZ Embedded Connectivity with Floating Point Unit (EF) -DS60001320C
- [5] Microchip: MPLAB XC32 C/C++ Compiler Users Guide - DS50001686J

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Pavel Mňuk CSc., katedra elektrických pohonů a trakce FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **21.06.2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **09.01.2017**

Platnost zadání diplomové práce: **28.02.2018**

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

2.1.2017

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 5. 1. 2017

.....

Jan Čedík

Poděkování

Děkuji svému vedoucímu diplomové práce Ing. Pavlovi Mňukovi, CSc. za rady, ochotu a velké množství věnovanému času během konzultací pro vypracování praktické části. Stejně tak děkuji za připomínky, které vedly ke zvýšení kvality textu diplomové práce.

Abstrakt

Cílem této práce je návrh generátorů řídicích impulzů pro fázově řízené měniče, které budou určeny pro výuku v laboratoři. Praktická část je věnována zejména realizaci desky plošných spojů pro mikroprocesor řady PIC32MZ a programovému vybavení generátoru. Důležitá součást je sériová komunikace mezi generátory a jejich spojení přes standard RS485. Důraz je kladen na odolnost komunikace proti rušení. Dále je navržen ochranný obvod dodaného koncového obvodu, který je simulován a jeho funkce je následně ověřena.

Teoretický úvod je zaměřen na složitější tyristorové měniče. Jsou vysvětleny vlastnosti a řízení dvanáctipulzního usměrňovače v různých zapojeních a třífázového střídavého měniče napětí. Také jsou uvedeny použité způsoby synchronizace na síťové napětí a synchronizační obvod.

Funkce generátoru je v závěru ověřena na podporovaných tyristorových měničích. Odolnost synchronizace generátoru proti rušení v síti je také otestována.

Navíc je k diplomové práci přiložen návod k použití generátorů. Přidány jsou informace a přílohy, jako je například cena generátoru, mechanické části a seznam použitých komponent.

Klíčová slova

Tyristorový měnič, dvanáctipulzní usměrňovač, střídavý měnič napětí, reverzační usměrňovač, generátor spínacích impulzů, řídicí signál, síťová synchronizace, Fourierova transformace, vzorkování, návrh DPS, mikroprocesor, PIC32MZ, jazyk C, sériová komunikace, RS485, galvanická izolace

Abstract

The object of this thesis is to design pulse triggering generators for phase controlled converters which will be used for education purposes in a laboratory. The practical part mainly deals with the printed circuit board design for the PIC32MZ series microprocessor and its software. An important component is the serial communication between the generators and their connection over the RS485 standard. The main emphasis is put on its noise immunity. Then, the protection circuit of a supplied output stage is designed, simulated and afterwards its function is verified.

The theoretical introduction is focused on more complex thyristor converters. The features and the triggering of twelve-pulse rectifiers in various topologies and the three-phase AC voltage controller are explained. Also, applied methods of the line voltage synchronization and its circuit are described.

At the end, the generator operation is verified on the supported thyristor converters. The generator synchronization immunity against supply voltage disturbances is also tested.

Moreover, the instruction manual for the generators is included. Other information and appendices included are for example the cost of one unit, mechanical parts and a bill of materials.

Key words

Thyristor converter, twelve-pulse rectifier, AC voltage controller, four-quadrant rectifier, trigger pulse generator, triggering signal, line synchronization, Fourier transform, sampling, PCB design, microprocessor, PIC32MZ, C language, serial communication, RS485, galvanic isolation

Obsah

1. Úvod.....	8
2. Tyristorové měniče.....	9
2.1. Dvanáctipulzní usměrňovač.....	9
2.1.1. Sériové zapojení.....	9
2.1.2. Paralelní zapojení.....	10
2.1.3. Reverzační zapojení.....	12
2.1.4. Řídící signál.....	13
2.2. Třífázový střídavý měnič napětí.....	14
2.2.1. Odporová zátěž.....	15
2.2.2. Indukční zátěž.....	16
2.2.3. Položené zapojení.....	17
2.2.4. Řídící signál.....	18
3. Synchronizace.....	20
3.1. Význam.....	20
3.2. Použité způsoby synchronizace.....	21
3.2.1. Detekce průchodu nulou.....	21
3.2.2. Fourierovy koeficienty – měření úhlu φ_1	21
3.2.3. Rekurzivní diskretní Fourierova transformace.....	22
3.3. Korekce vlivu vzorkování AD převodníku.....	24
3.4. Filtrace periody napětí.....	25
4. Generátor spínacích impulsů.....	25
4.1. Struktura.....	25
4.2. Mikroprocesor a programovací prostředky.....	26
4.3. Programové vybavení.....	27
5. Realizace procesorové DPS.....	27
5.1. LCD displej.....	28
5.2. Paměť EEPROM.....	29
5.3. Synchronizace osciloskopu.....	29
5.4. Synchronizace na síťové napětí.....	29
6. Komunikace mezi generátory.....	31
6.1. Standard RS485.....	31
6.1.1. Popis standardu.....	31
6.1.2. Poruchové stavy sběrnice.....	31
6.1.3. Zapojení budičů pro RS485.....	33
6.2. Zapojení na procesorové DPS.....	33
6.3. UART a obsah zprávy.....	34
6.4. Řídící úhel.....	35
6.5. Synchronizace.....	36
6.6. Proces zapnutí a vypnutí generátorů.....	36
7. Ochrana koncového obvodu.....	36
7.1. DPS ochrany.....	36
7.2. Simulace.....	37
7.3. Ověření funkce.....	39
8. Ověření funkce generátoru na měničích.....	40
8.1. Základní měniče.....	40
8.2. Reverzační měniče.....	42
8.3. Třífázový střídavý měnič napětí.....	44
8.4. Dvanáctipulzní usměrňovač.....	45

8.4.1. Sériové zapojení.....	45
8.4.2. Paralelní zapojení.....	47
8.4.3. Reverzační zapojení.....	48
9.Kvalita synchronizace generátoru.....	50
9.1. Způsob porovnání kvality použitých metod synchronizace.....	50
9.2. Rušení v síťovém napětí.....	50
9.3. Výsledky.....	51
9.3.1. Bez rušení v síti.....	51
9.3.2. S rušením v síti.....	53
10.Návod k použití.....	55
10.1. Výběr měniče.....	55
10.2. Nastavení generátoru.....	56
10.3. Spuštění řízení.....	57
10.3.1. Bez sériové komunikace.....	57
10.3.2. Se sériovou komunikací.....	57
10.4. Ovládání generátoru.....	59
10.4.1. Synchronizace osciloskopu.....	59
10.4.2. Řídicí úhel.....	59
10.4.3. MASTER a SLAVE.....	59
10.5. Chybový stav generátoru.....	59
11.Další informace o generátoru.....	60
11.1. Mechanická část.....	60
11.2. Vnitřní a vnější propojení generátoru.....	61
11.3. Seznam součástí a cena generátoru.....	61
12.Pracoviště.....	62
13.Závěr.....	62
14.Seznam obrázků.....	64
15.Seznam tabulek.....	65
16.Použité zkratky.....	65
17.Literatura.....	66
18.Seznam použitého SW.....	67
19.Přílohy.....	68
A. Seznam použitých I/O mikroprocesoru.....	68
B. Grafické rozložení použitých I/O na mikroprocesoru.....	69
C. Schématické zapojení procesorové DPS.....	69
D. Adresy EEPROM.....	71
E. Chybová hlášení.....	71
F. Seznam součástí, cena generátoru.....	72
G. Propojení vodičů.....	75
H. Obsah elektronické přílohy.....	75

1. Úvod

Výsledkem této práce budou řídicí generátory pro fázové řízené měniče, které nahradí zastaralé analogové generátory v laboratoři výkonové elektroniky Katedry elektrických pohonů a trakce na ČVUT FEL. Generátory budou sloužit výhradně pro výuku a jejich návrh je takový, aby bylo jejich použití pro studenty nenáročné. Nicméně i tak mají řídicí jednotky velké množství funkcí, které současným generátorům chybí.

Diplomová práce částečně navazuje na bakalářskou práci [1], ve které se více řešila teoretická stránka spínacích generátorů a základních tyristorových měničů. V praktické části bakalářské práce jsem vytvořil programové vybavení pro mikroprocesor a generátor byl zkoušen pouze na vývojové desce s použitím kontaktních polí. Ostatní obvody, jako koncový stupeň a synchronizace byly dodány pouze k ověření funkce. Oproti tomu, v této práci je řešena úplná konstrukce generátorů. Celkový počet bude 5, z nichž jeden bude sloužit jako rezerva. Postup je takový, že se nejdříve vytvoří jeden prototyp a poté se dodělají další 4 generátory.

Funkce nových generátorů zcela pokrývá náplň cvičení předmětu Výkonová elektronika 1 a Výkonová elektronika 2, co se týče úloh s tyristorovými měniči, a i ji přesahuje. K základním tyristorovým měničům je přidáno řízení pro třífázový střídavý měnič napětí a dvanáctipulzní usměrňovač, který je možné řídit i reverzačně. Jedna jednotka je schopna spínat nejvíce 6 tyristorů a proto jsou všechny reverzační měniče a dvanáctipulzní usměrňovač řízeny najednou pomocí více generátorů, které komunikují přes sériovou komunikaci.

V bakalářské práci [1] již byly popsány spínací vlastnosti tyristorů, základní tyristorové měniče a obvyklá struktura generátoru spínacích impulzů. V teoretické části se proto zaměřím hlavně na dva zmíněné měniče. Dále vysvětlím synchronizaci na síťové napětí, použité metody a synchronizační obvod generátoru.

Velká část praktické části se zabývá návrhem DPS procesorové jednotky, kde budou popsány nejdůležitější obvody. Také popíšu vnitřní strukturu zapojení generátoru. Základem generátoru je mikroprocesor řady PIC32MZ. Stručně se zmíním o programu, který byl celý znova předělán a výrazně rozšířen právě pro tento mikroprocesor. Dále vysvětlím způsob komunikace jednotek přes sériovou komunikaci a fyzický standard přenosu RS485. Kromě procesorové jednotky je v praktické části uveden také návrh ochrany koncového obvodu. Tato ochrana je nejdříve simulována v Simulinku. Výsledky simulace ochrany a skutečného měření budou také uvedeny.

Samotný koncový obvod a zdroj generátoru nejsou součástí diplomové práce a jsou do zařízení dodány jako hotové celky. Mechanická část generátoru je také dodána zvlášť. Protože jsou ale součástí celku generátoru, stručně budou zmíněny.

Ke konci uvedu výsledky ověření funkce generátoru pro všechny říditelné měniče. Také porovnáám kvalitu použitých metod synchronizace na síťové napětí.

Ve zvláštní kapitole je přidán návod k obsluze řídicího generátoru, kde vysvětlím způsob použití jednotky a strukturu menu výběru měničů a nastavení. Součástí jsou kompletní informace o možnostech nastavení a spouštění měničů.

2. Tyristorové měniče

Základní tyristorové usměrňovače: jednopulzní, dvoupulzní uzlový, jednofázový můstkový, trojpulzní uzlový, třífázový můstkový již byly teoreticky zpracovány v bakalářské práci [1]. Spolu s nimi bylo podrobně vysvětleno reverzační řízení měniče a také jednofázový střídavý měnič napětí. V následujících kapitolách jsou popsány zbývající složitější měniče, které jsou říditelné navrženým generátorem. Budou uvedeny vlastnosti a způsob řízení dvanáctipulzního usměrňovače a třífázového střídavého měniče napětí pro odporovou a indukční zátěž.

2.1. Dvanáctipulzní usměrňovač

Dvanáctipulzní zapojení lze získat v uzlovém i můstkovém zapojení. Uzlové zapojení se kvůli nutnosti 12 fází, špatnému využití transformátoru a tyristorů nepoužívá. Pro můstkové zapojení se vytvoří 6 fází tím, že se k původním 3 fázím přidají další 3 fázově posunutě o 30°. Tohoto se dosáhne použitím transformátoru, který má dvě sekundární vinutí – jedno zapojené do hvězdy a druhé do trojúhelníka. Do každého sekundárního vinutí je zapojen jeden třífázový můstkový usměrňovač.

Transformátor tohoto měniče musí být konstruován tak, aby všechna sdružená napětí byla stejná. To znamená, že vinutí zapojené do trojúhelníka musí mít $\sqrt{3}$ krát více závitů než vinutí zapojené do hvězdy. V následujících kapitolách budou vysvětleny dvě možná zapojení – sériové a paralelní [4].

Paralelní nebo sériové spojení lze provést i s jinými měniči. Hlavní výhody jsou přenesení výkonu na více tyristorů a menší zvlnění napětí na zátěži a snížení odběru jalového výkonu ze sítě. V případě dvanáctipulzního měniče je ze síťového proudu eliminována zejména 5. a 7. harmonická (u obou můstků mají opačnou polaritu). Naopak 11. a 13. harmonická je posílená. Jedno z nejčastějších využití sériového zapojení je v HVDC přenosech [5].

2.1.1. Sériové zapojení

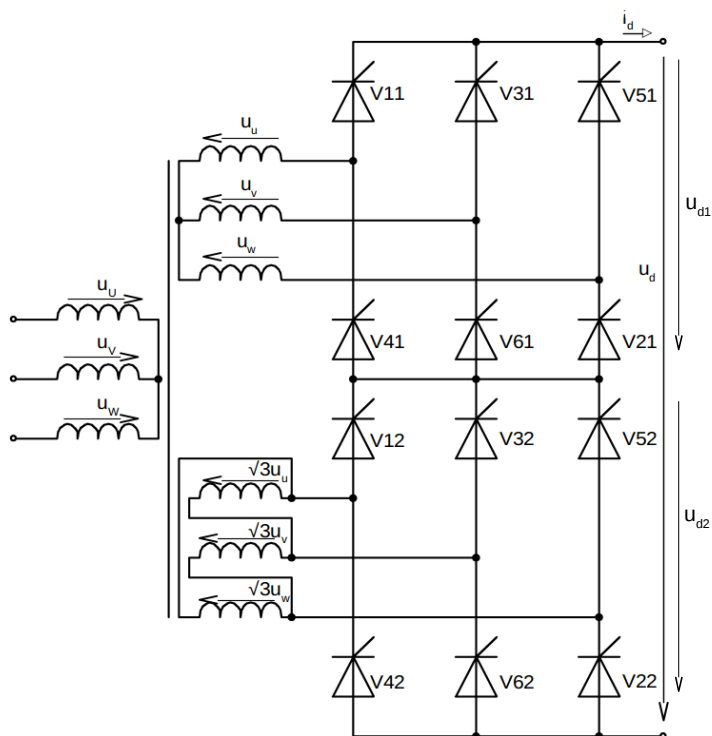
Schéma zapojení je na Obr. 1. Tyristory v jednom můstku komutují nezávisle na tyristorech z druhého a naopak. Nelze však řídit každý můstek nezávisle na druhém. Musí být zachován určitý sled impulsů.

Princip funkce obou můstků v zapojení zůstává stejný jako při samotné práci. Proud ale protéká oběma můstky najednou, vždy minimálně čtyřmi tyristory. Při běžné funkci se ve vedení střídají 4 s 5 tyristory kvůli komutaci. V dalším popisu bude komutace zanedbána a proud vždy poteče 4 tyristory. Pokud budou v každém sekundárním vinutí nejkvalitnější napětí u_{uv} a $\sqrt{3}u_u$, poteče proud zároveň tyristory V61, V11, V62 a V12. Po následující komutaci, v tomto případě v horním můstku, bude další čtveřice V21, V11, V62 a V12. Každý stav mezi komutacemi trvá 30°. Usměrněné napětí je dáno součtem sdružených napětí obou můstků [4] [7].

Průchod proudu čtyřmi tyristory najednou zvyšuje dvojnásobně ztráty oproti šestipulznímu zapojení a také se zvětší celkový úbytek napětí na tyristorech. Naopak jako výhodu má tento měnič dvojnásobné střední usměrněné napětí U_{dAV} při stejném závěrném napětí na tyristorech. Napětí U_{dAV0} při plně otevřeném měniči je následující:

$$U_{dAV0} = \frac{6}{\pi} \sqrt{3} \sqrt{2} U = 4,68 U \quad (1)$$

kde U je efektivní hodnota fázového napětí ve hvězdě. Pro porovnání je tato hodnota u třífázového můstku rovna $2,34U$, tedy poloviční. Pro odvození předchozího vztahu je nejdříve nutné vypočítat součet obou sdružených napětí a poté integrovat v intervalu 30° [4].



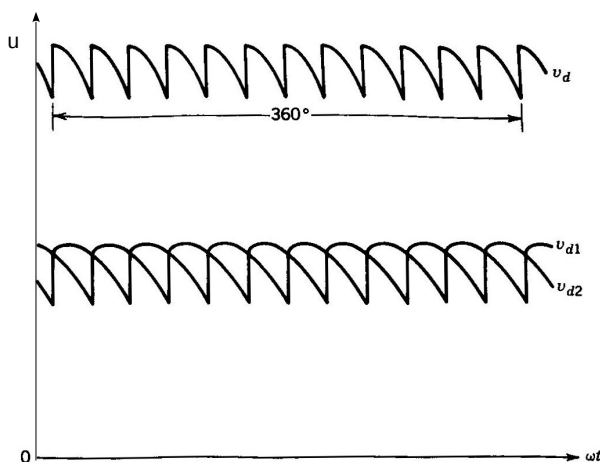
Obr. 1 Dvanáctipulzní usměrňovač v sériovém zapojení

Z Fourierovy analýzy lze odvodit, že obsah harmonických na straně sítě je

$$h = 12k \pm 1, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

a na stejnosměrné straně jsou to pouze násobky 12 [6].

Šestipulzní napětí u_{d1} a u_{d2} a výsledné dvanáctipulzní napětí u_d při $\alpha > 0$ jsou zobrazeny na následujícím obrázku.

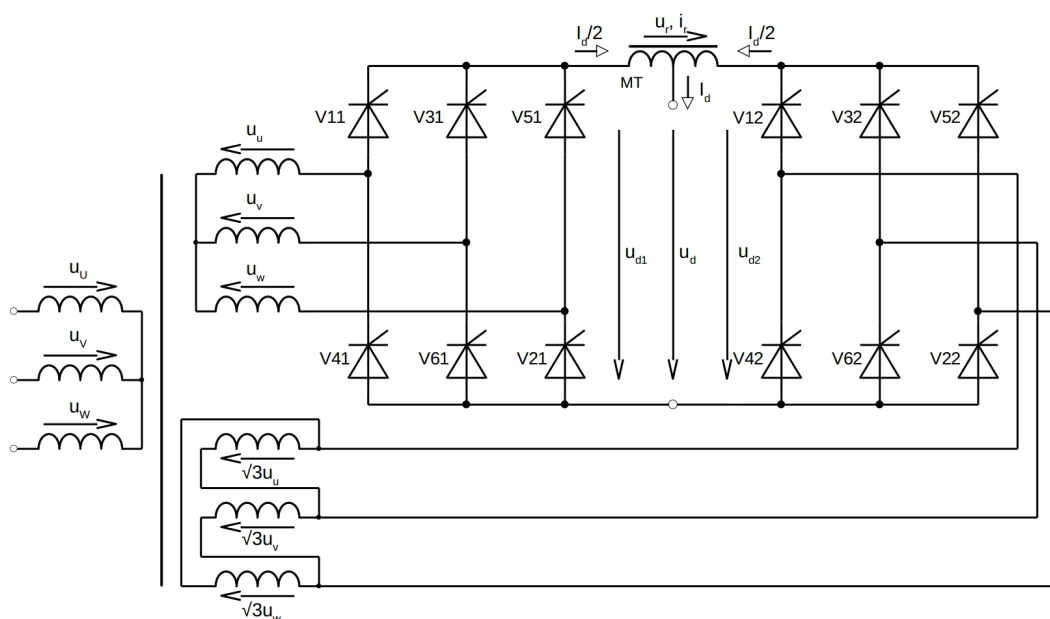


Obr. 2 Průběhy napětí dvanáctipulzního usměrňovače v sériovém zapojení, $\alpha > 0^\circ$

2.1.2. Paralelní zapojení

Zapojení můstků na sekundární vinutí transformátoru je stejné jako v předchozím případě. Můstky ovšem nelze spojit paralelně přímo. Rozdílné okamžité hodnoty usměrněného napětí, kvůli posunu o 30° , by způsobovaly nerovnoměrné proudové zatížení obou můstků. Kromě toho by napětí obou můstků a napětí na zátěži bylo shodné. Na zátěži by potom nebylo přesně definované dvanáctipulzní

napětí. Proto se zátěž připojuje přes tzv. mezifázový transformátor MT (také sací tlumivka), který zajistí rovnoměrné rozložení proudů v obou můstcích [4]. Schéma paralelního zapojení je na Obr. 3.



Obr. 3 Dvanáctipulzní usměrňovač v paralelním zapojení

Kvůli různému zapojení sekundárních vinutí jsou okamžité hodnoty proudu do zátěže z obou stran různé, ale střední hodnoty jsou, v ideálním případě, stejné. Každý můstek dodává do zátěže polovinu celkového proudu I_d .

Společný magnetický tok vytvoří rovnoměrné rozložení u_r na obou vinutích MT. Efekt je takový, že rozdíl okamžitých hodnot napětí MT absorbuje a oba můstky pracují se zátěží nezávisle na sobě.

Pomocí 2. Kirchhoffova zákona lze dojít k následujícím rovnicím

$$u_d = u_{d1} - \frac{u_r}{2}, u_d = u_{d2} + \frac{u_r}{2} \quad (3)$$

kde u_r je napětí na MT. Součtem těchto rovnic se dojde k následujícímu výrazu

$$u_d = \frac{u_{d1} + u_{d2}}{2} \quad (4)$$

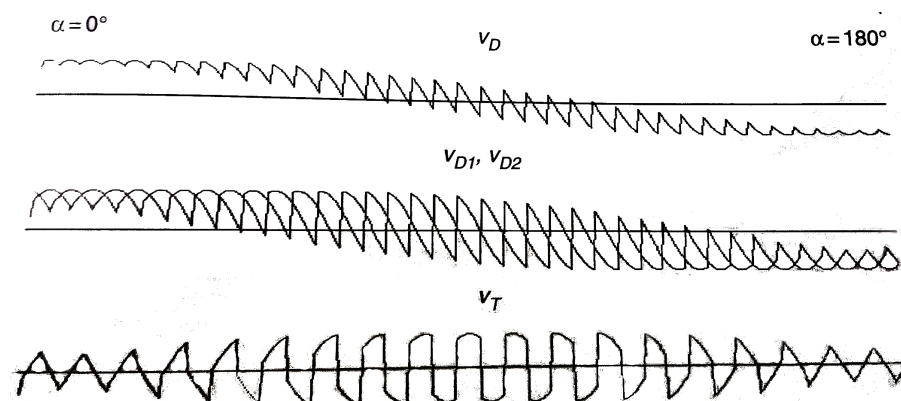
z čehož vyplývá, že napětí na zátěži je střední hodnota napětí obou můstků a že napětí je dvanáctipulzní.

Střední hodnota napětí na MT je nulová a proto jsou střední hodnoty napětí U_{dAV} , U_{dAV1} a U_{dAV2} stejné.

Oproti sériovému zapojení, toto zapojení dovoluje dvojnásobný proud při stejném napětí jednoho můstku. Výhoda je také poloviční úbytek napětí na tyristorech [4].

Pro správnou funkci MT musí platit rovnost ampéřzávitů $N \cdot i_{d1} = N \cdot i_{d2}$, která zajišťuje rovnoměrné rozdělení proudů. Velikost indukčnosti MT se volí taková, aby ve většině provozní oblasti řízení byla komutace tyristorů obou můstků právě přes MT, tzn. aby byl proud nepřerušovaný. Samotný návrh MT je poměrně náročný proces, který závisí na velkém množství parametrů, jako je rozsah řídicího úhlu, obsah harmonických v napětí u_d a nerovnoměrnost reaktancí MT. Kvůli tomu se často používá MT ve formě autotransformátoru, se kterým je možné během řízení měniče doladit rovnoměrnost proudů [4][5].

Napětí u_r je rovno rozdílu okamžitých hodnot napětí na můstcích. Jeho průběh je čistě střídavý dvanáctipulzní. Na Obr. 4 lze vidět stejnosměrné napětí na zátěži u_d , jednotlivá napětí na můstcích u_{d1} a u_{d2} a napětí mezifázového transformátoru u_r (v_T) při změně řídicího úhlu od 0° do 180° [6].



Obr. 4 Průběhy napětí můstků, na zátěži a na mezifázovém transformátoru při změně řídicího úhlu od 0° na 180° [6]

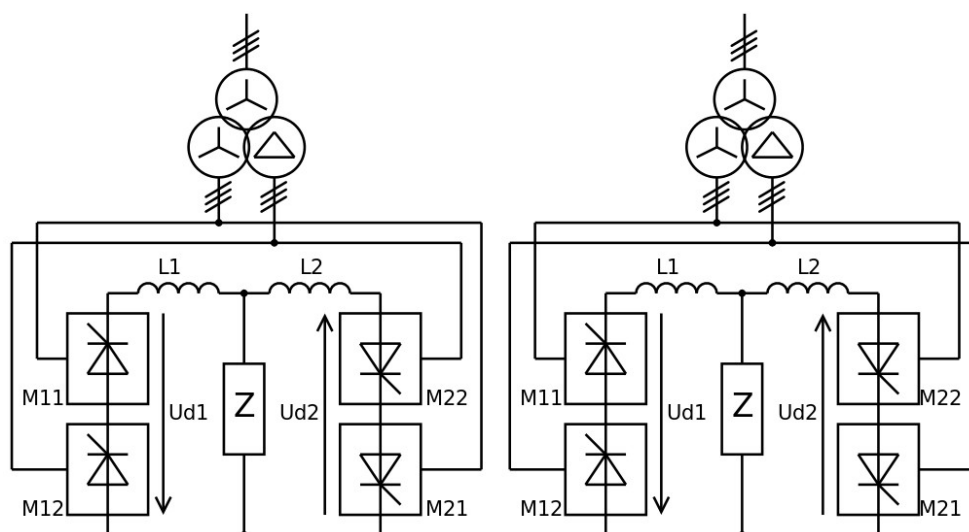
Při nepřerušovaném proudu je amplituda napětí na zátěži menší než amplituda sdruženého napětí transformátoru kvůli napětí úbytku na MT u_r . Pokud je proud přerušovaný, v době když neteče proud (napětí u_r je nulové) vzroste amplituda napětí zátěže na amplitudu sdruženého napětí. Zvlnění je tedy vyšší než při nepřerušovaném proudu a U_{dAV} také vzroste [5].

2.1.3. Reverzační zapojení

Stejně jako u ostatních usměrňovačů lze pro získání obou polarit proudu na zátěži vytvořit reverzační zapojení i pro dvanáctipulzní variantu.

Nejsou dostupné informace, zda existuje či se používá reverzační zapojení pro paralelní variantu měniče. Bude se tedy uvažovat pouze sériové zapojení. Dále bude také uvažováno pouze antiparalelní zapojení, protože takové zapojení lze realizovat s jedním transformátorem [2].

Dvanáctipulzní reverzační usměrňovač lze zapojit čtyřmi způsoby. Protože se napětí obou sériově zapojených můstků sčítají, nezáleží na pozici můstku v měniči jedné polarit. Na obrázku níže, lze vidět dvě blokové zapojení. Prohozením sekundárních vinutí lze získat další dvě možnosti.



Obr. 5 Blokové zapojení dvanáctipulzního reverzačního usměrňovače

Uvažuje se pouze řízení s okruhovými proudy. Rovností napětí U_{d1} a U_{d2} se dojde k podmínce řízení reverzačního měniče

$$\alpha_2 = 180 - \alpha_1 \quad (5)$$

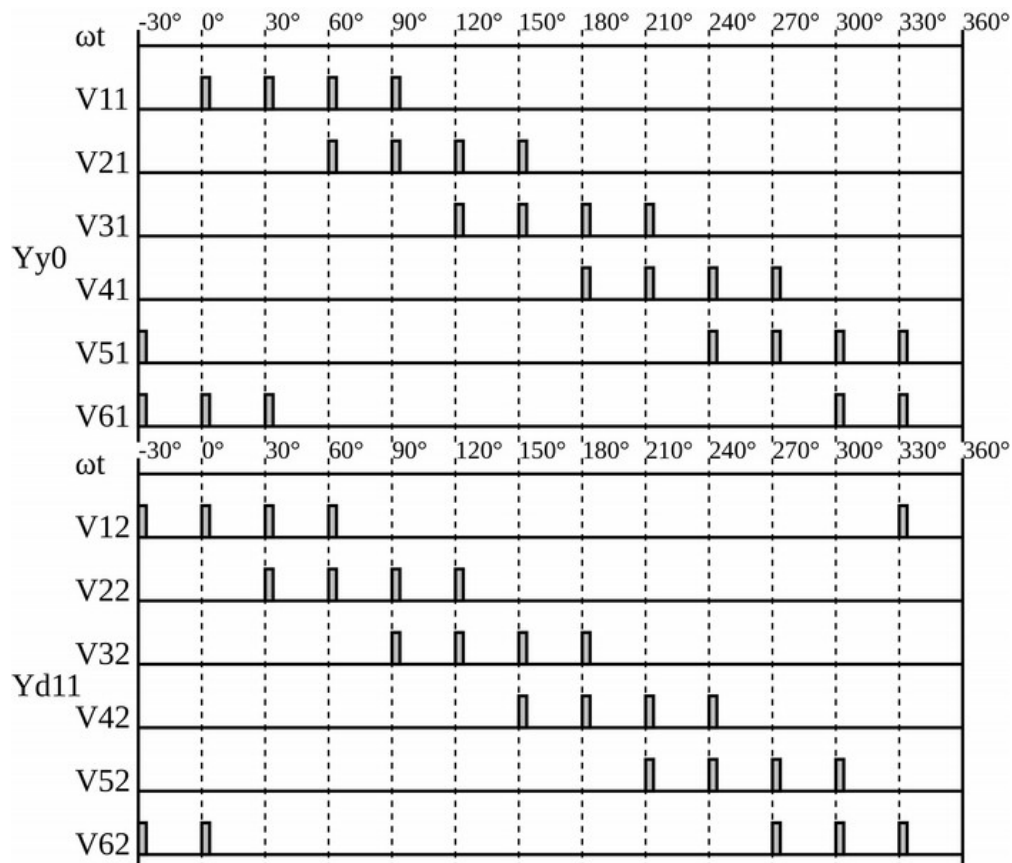
kde α_1 je řídicí úhel pro M1 a α_2 pro M2.

Tato podmínka udává teoretický stav měniče, při kterém neteče statický okruhový proud. Nicméně, kvůli různým okamžitým hodnotám napětí bude i se splněním podmínky okruhový proud nenulový. Výsledný okruhový proud je tlumený zařazenými tlumivkami v okruhu. Kvůli sníženému zvlnění dvanáctipulzního napětí je okruhový proud nižší oproti usměřovačům s méně pulzy. Je třeba zmínit, že úhel v podmínce (5) nemusí být 180° . Zvýšením tohoto úhlu lze snížit statické i dynamické okruhové proudy [2].

2.1.4. Řídicí signál

Řízení dvanáctipulzního usměřovače v paralelním zapojení vychází z řídicího signálu pro třífázový můstek. Na každý můstek jsou přivedeny zdvojené impulzy po 60° . Řídicí signál můstku připojeného na trojúhelník musí být o 30° posunut. V celém měniči tedy vždy spínají pouze 2 tyristory najednou každých 30° .

V sériovém zapojení je způsob spínání jiný. Aby začal zátěží protékat proud, je nutné sepnutí 4 tyristorů najednou. Kvůli posunu napětí o 30° v jednom můstku oproti druhém je stejně posunut řídicí signál. Z toho vyplývá, že řízení pro třífázový můstkový usměřovač nevyhovuje, jelikož by se vždy spínaly 2 tyristory každých 30° . Takto by měnič teoreticky fungoval při nepřerušovaném proudu, ale nikdy by ho nebylo možné spustit.



Obr. 6 Řídicí signál pro dvanáctipulzní usměřovač

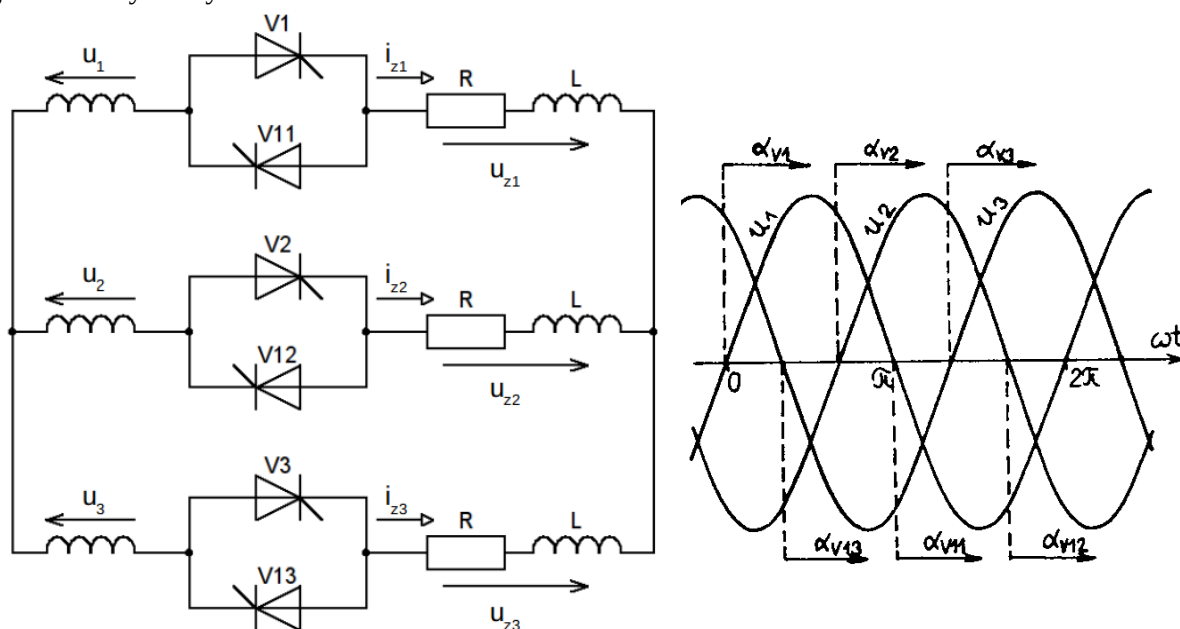
Řešením by bylo prodloužit řídicí pulzy o 30° . Vhodnější řídicí signál je však znázorněn na Obr. 6, konkrétně pro zapojení sekundárů transformátoru Yy0 a Yd11. Sdružené napětí trojúhelníku předchází sdružené napětí hvězdy o 30° .

Stejně jako u řízení ostatních měničů je nutné při skokovém snížení řídicího úhlu vynechat některé impulzy. Například při skoku ze 180° na 0° se vynechá 6 dvojic impulzů, čímž dojde k okamžité změně výstupního napětí. Při skokovém zvýšení se pouze oddálí následující impulzy a napětí se změní pozvolně po sinusovce.

Je třeba říci, že výše uvedené informace nejsou k nalezení v žádné dostupné literatuře. Na nutnost popsaného řídicího signálu se přišlo až během měření na dvanáctipulzním usměrňovači.

2.2. Třífázový střídavý měnič napětí

Třífázový střídavý měnič napětí s RL zátěží je zobrazený na Obr. 7. Při popisu se předpokládá symetrické napájení i zátěž. V průběhu napájecích napětí jsou vyznačeny počátky řídicích úhlu pro jednotlivé tyristory.



Obr. 7 Třífázový střídavý měnič napětí – zapojení a princip funkce [3]

Při správné funkci může být obvod v 5 různých stavech. Mohou být sepnuty nebo vypnuty všechny tři fáze. Dále existují 3 kombinace, kde v každé z nich jsou sepnuty 2 fáze. Při sepnutí všech fází je napětí zátěže stejné jako napětí zdroje. Pokud jsou sepnuty 2 fáze, napětí zátěže jedné fáze je polovina sdruženého napětí sepnutých fází. Napětí na antiparalelně zapojených tyristorech vypnuté fáze je $3/2$ fázového napětí (velikost vychází z fázorového diagramu). Při vypnutí všech fází je na každé dvojici tyristorů fázové napětí [3].

Okamžiky počátku a konce jednotlivých taktů závisí na druhu zátěže. Pro obecnou RL zátěž nelze dobu trvání taktu analyticky stanovit, proto zde budou řešeny krajní případy odporové a čistě indukční zátěže.

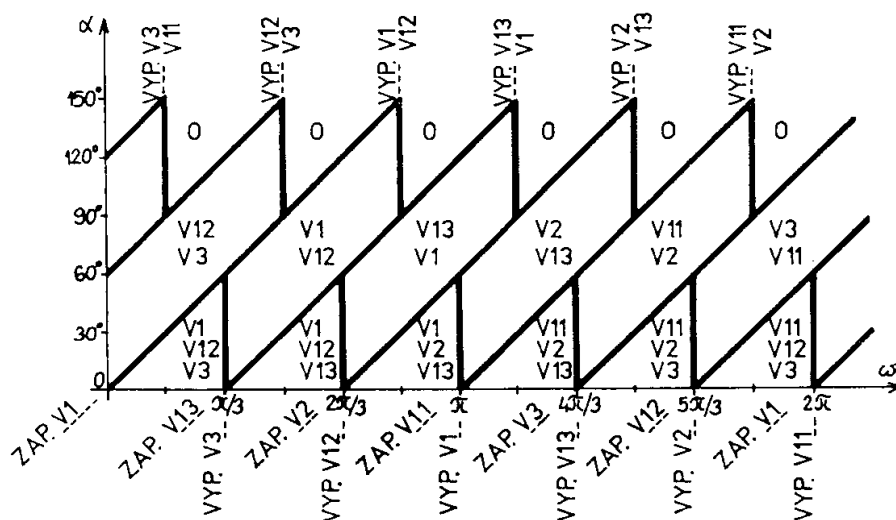
2.2.1. Odporová zátěž

Jednotlivá sepnutí jsou dána řídicím úhlem α od průchodu fázového napětí nulou. Z předchozího obrázku je patrné, že interval sepnutí je dlouhý $\pi/3$. To znamená, že tyristor V1 sepne v α , V13 sepne v $\alpha+\pi/3$, V2 sepne v $\alpha+2\pi/3$ atd.

Vypnutí tyristoru příslušné fáze nastane při poklesu proudu ve fázi na nulu. Již popsané takty se očíslovají: 3 – všechny fáze sepnuty, 2 – 2 fáze sepnuty, 0 – všechny fáze vypnuty. Pro takt 3 dochází k vypnutí tyristoru V1 v úhlu π , V13 vypne v úhlu $\pi+\pi/3$ atd. V taktu 2 je na zátěži polovina sdružené napětí a příslušné tyristory vypínají při poklesu tohoto napětí na nulu. Na konci kladné půlperrody napětí u_{23} oba tyristory vypnou v úhlu $3\pi/2$. Při proudu tekoucím tyristory V3 a V12 (fáze 3 a 2) dochází k vypnutí v úhlu $\pi/2$. Podobné je to pro další kombinace [3].

Oblasti vedení jednotlivých tyristorů znázorňuje tzv. pracovní diagram udávající závislost úhlové frekvence na řídicím úhlu. Pracovní diagram je zobrazen na Obr. 8. Šikmé přímky označují možná místa sepnutí dalšího tyristoru v pořadí. Svislé přímky znázorňují místo vypnutí, které je nezávislé na řídicím úhlu.

Diagram lze rozdělit na oblasti jednotlivých taktů. Spodní trojúhelníky vymezují takt 3 a horní trojúhelníky takt 0. Při $\alpha = 0^\circ$ je měnič trvale otevřen (trvalý takt 3). Od 0° do 60° se střídá takt 3 s jednotlivými kombinacemi taktu 2. Od 60° do 90° se střídají kombinace taktu 2. Od 90° do 150° se střídají kombinace taktu 2 s takt 0. Při $\alpha = 150^\circ$ je měnič trvale vypnut [3].



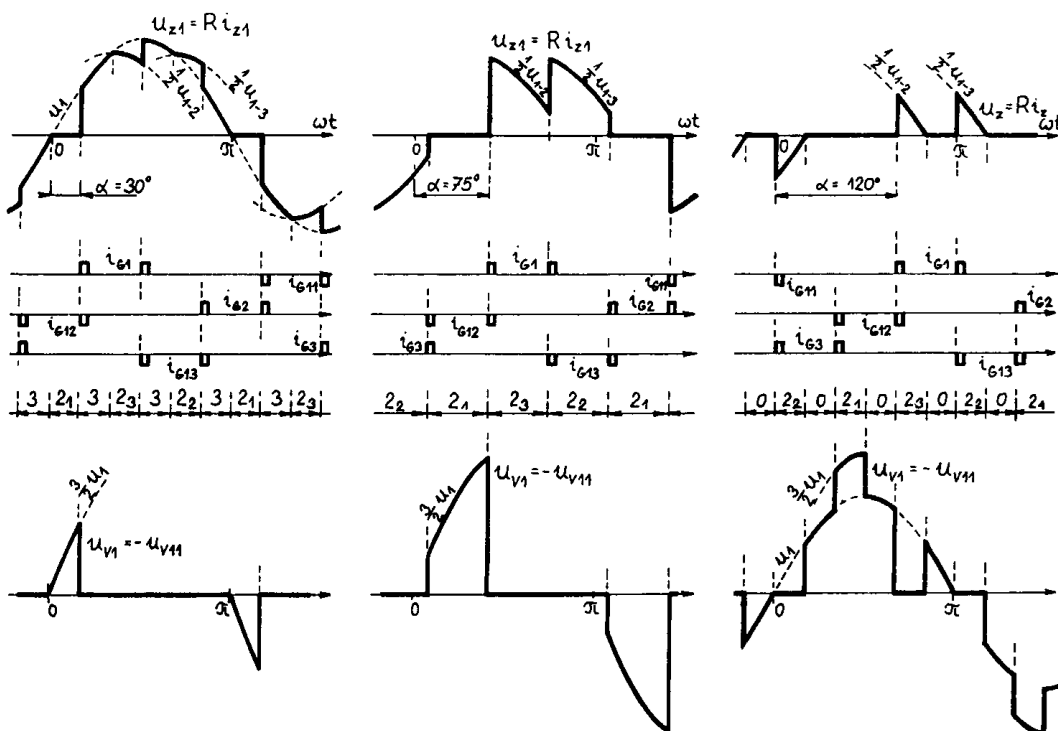
Obr. 8 Pracovní diagram pro odporovou zátěž [3]

Z popisu jednotlivých taktů a pracovního diagramu vychází průběhy napětí a proudu zátěže a napětí na tyristorech. Tyto průběhy jsou znázorněny na Obr. 9 pro různé řídicí úhly. Je patrné, že pro úhel $\alpha > 90^\circ$ je proud jedním tyristorem tvořen dvěma pulzy. Stejně jako u třífázového můstkového usměrňovače je nutné, aby každý tyristor dostal dva spínací impulzy s rozmezím 60° , jinak by tyristor nesepnul při druhém proudovém impulzu. Podobně i při sepnutí musí být současně přivedeny řídicí impulzy pro 2 tyristory. Z toho vyplývá, že pro řízení odporové zátěže lze užít stejného řídicího signálu jako pro třífázový můstkový usměrňovač. Jediný rozdíl je, že pulzy pro trojfázový můstek jsou posunuty o 30° . To znamená, že by trojfázový střídavý měnič napětí nebylo možné úplně otevřít [3].

Jelikož má zátěž jedné fáze během periody různá napětí (fázové a polovina sdruženého), je odvození efektivní hodnoty napětí a řídicí charakteristiky složité. Zjednodušeně lze říci, že při změně

úhlu α od 0° do 150° se mění efektivní napětí od fázové hodnoty až k nule. Maximální hodnota napětí na tyristoru je, jak bylo již uvedeno v popisu taktů, rovna

$$U_{RWM} = \frac{3}{2} \sqrt{2} U \quad (6)$$

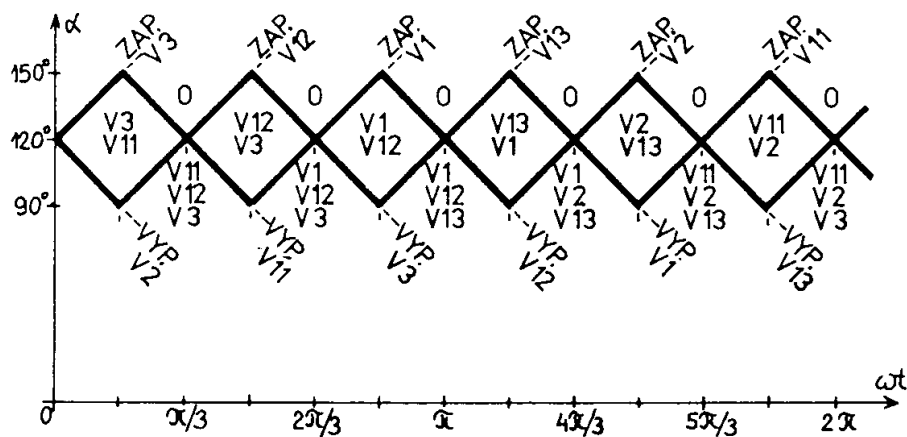


Obr. 9 Průběhy napětí na odporové zátěži a tyristoru [3]

2.2.2. Indukční zátěž

Stejně jako u jednofázové střídavého měniče napětí zde je v jedné fázi proud symetrický okolo průchodu napětí nulou. Při úhlu $\alpha > 90^\circ$ proudový impuls začíná v α a končí v $2\pi - \alpha$. Při plném otevření je tedy proud zpožděn o 90° za fázovým napětím. Sled spínání tyristorů je stejný jako při odporové zátěži, avšak stejně jako u jednofázové varianty, je zde požadavek na spínací signál jiný.

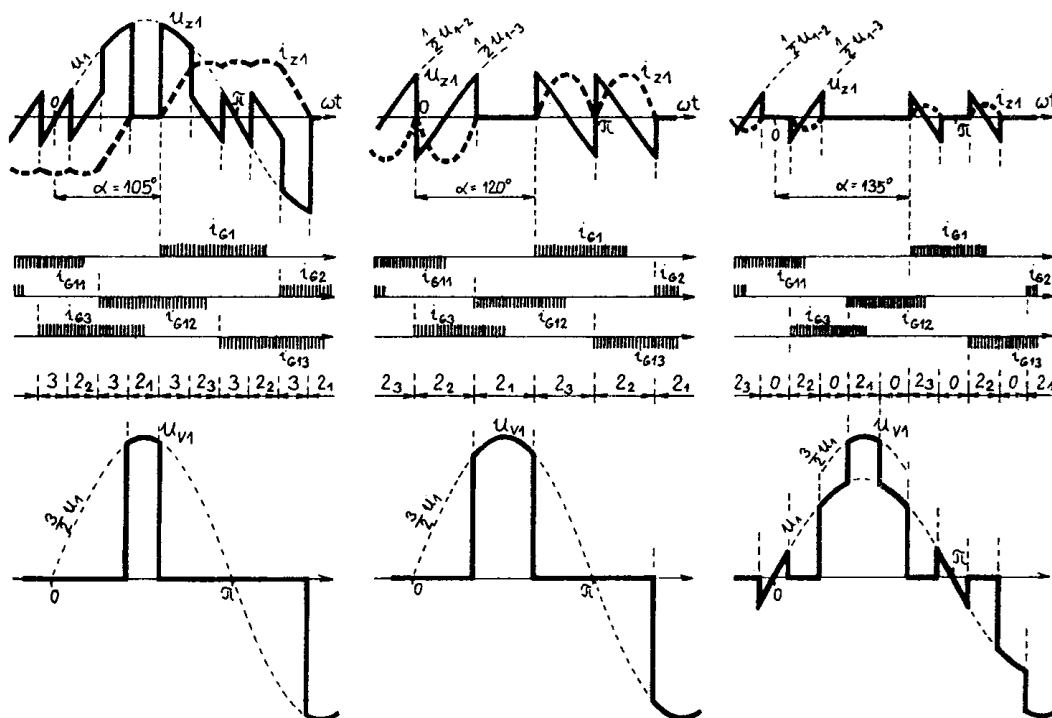
Pracovní diagram je zobrazen na Obr. 10. Místa sepnutí jsou, stejně jako pro R zátěž, znázorněny přímkami s kladnou směrnicí. Vypínání tyristorů zde popisuje přímkami se zápornou směrnicí. Řídicí úhel má smysl měnit mezi 90° a 150° .



Obr. 10 Pracovní diagram pro čistě indukční zátěž [3]

Oblast plného otevření (takt 3) je pod spodní obálkou pracovního diagramu. Při α mezi 90° a 120° se střídá takt 3 s kombinacemi taktu 2. Při α mezi 120° a 150° se střídá takt 0 s kombinacemi taktu 2. Při $\alpha = 150^\circ$ je měnič uzavřen a oblast uzavření (takt 0) je dána horní obálkou [3].

Průběhy napětí a proudu v zátěži jedné fáze a napětí na tyristoru pro 3 různé režimy práce jsou na Obr. 11. Podobně jako u jednofázové varianty tohoto měniče při poklesu úhlu α pod 90° měnič přestane pracovat, protože se prodlouží doba trvání proudu a v okamžiku sepnutí následujícího tyristoru ještě vede proud antiparalelně připojený tyristor. Při $\alpha > 120^\circ$ vzniká přerušování proudu během doby práce jednoho tyristoru, takže stejně jako u R zátěže zde musí být přiveden ještě druhý impuls s posunem 60° . Pro správný start měniče musí být znovu současně přivedeny impulzy na 2 tyristory.



Obr. 11 Průběhy napětí a proudu na indukční zátěži a na tyristoru [3]

Uvedeným požadavkům vyhovuje vhodně upravený řídicí signál. Může to být dlouhý impuls nebo řádka impulsů, která například pro V1 trvá od úhlu α až k 210° kvůli druhému pulzu. Takový dlouhý impuls nebo řádka také vyhovuje i pro spínání R zátěže. Avšak, tento řídicí signál je nevhodný z hlediska namáhání koncového obvodu. Později bude popsán další možný řídicí signál.

Určení průběhu řídicí charakteristiky je obtížné. Oproti odporové zátěži bude ale efektivní hodnota napětí na zátěži při stejném řídicím úhlu vyšší. Kvůli nesinusovým průběhům proudu je také složitý výpočet efektivní hodnoty proudu zátěže [3].

Popis průběhů pro obecnou RL zátěž je obtížný. Stejně jako u jednofázového měniče je kritický úhel roven fázovému posunu

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\omega L}{R}\right) \quad (7)$$

2.2.3. Polořízené zapojení

Trojfázový střídavý měnič napětí, lze provozovat také jako polořízený. Jelikož vždy musí vést alespoň 2 součástky, lze nahradit tyristory v jednom směru diodami. Zapojení se jinak neliší od plně řízeného.

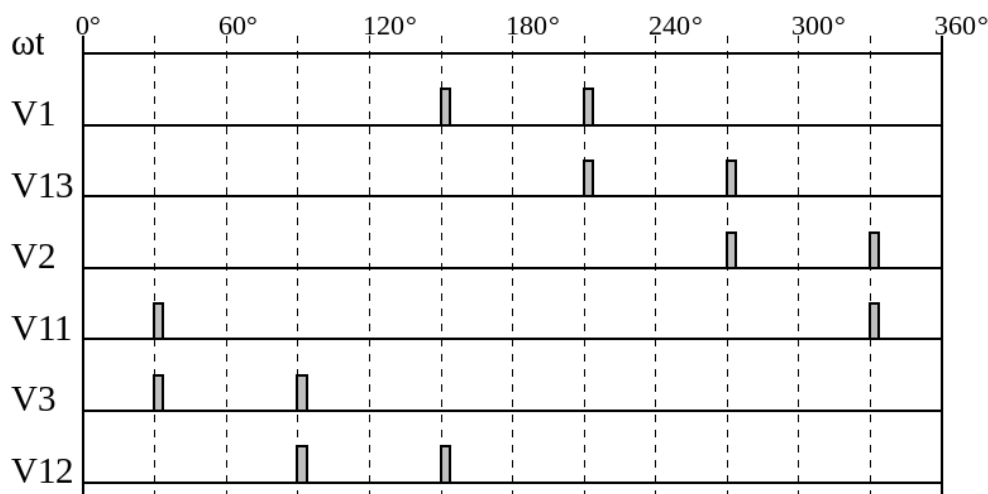
Takty 3 a 2 jsou stejné jako u plně řízeného. Pouze takt 0 se liší rozložením napětí na jednotlivých součástkách a rozlišují se zde tedy 3 různé takty 0. Další rozdíl je v pracovním diagramu. Diody zapínají automaticky při vzrůstu napětí do propustného směru, tzn. při vypnutí antiparalelního tyristoru. Z délky trvání jednotlivých taktů vyplývá, že měnič je plně vypnut až při $\alpha = 210^\circ$. Řídicí rozsah je oproti plně řízenému měniči o 60° vyšší.

Pro odporovou zátěž je rozsah řízení 0° až 210° . Čistě indukční zátěž lze řídit v rozsahu 90° až 210° (vhodným řídicím signálem 0° až 210°). Pro polořízenou variantu měniče a všechny typy zátěží lze využít stejný řídicí signál jako v předchozím případě. Měnič ale nebude možné plně zavřít. Požadavek sepnutí dvou součástek najednou při startu měniče je zde, kvůli diodám, splněn automaticky.

Průběh napětí na zátěži se v tomto případě liší. Rozdíl je v tom, že v kladné a záporné půlperiodě není napětí symetrické a obsahuje i sudé harmonické. Stejnoseměrná složka ale zůstává nulová. Diody také způsobují to, že se na antiparalelních zapojení při plně vypnutém měniči (takt 0) vyskytuje sdružené napětí [3].

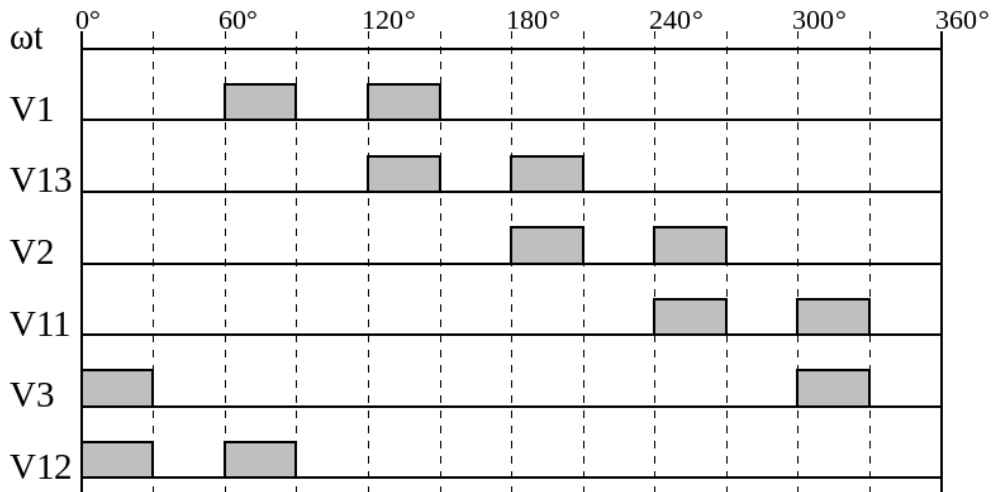
2.2.4. Řídicí signál

Při odporové zátěži, jak bylo uvedeno, je řídicí signál stejný jako pro trojfázový můstkový usměrňovač, ale je přiveden o 30° dříve. Takový signál je pro zavřený měnič ($\alpha = 150^\circ$) na následujícím obrázku. Pro odporovou zátěž je uvedený průběh signálu platný pro celý rozsah řízení, tzn. 0° až 150° . Pro indukční a obecnou zátěž je stejný pouze od 90° do 150° . Zde je tedy změna oproti průběhu řídicího signálu uvedeného na Obr. 11. Tento způsob řízení byl zvolen kvůli nižšímu proudovému namáhání koncového obvodu, který by plný impulz nebo řádku do 210° nesl.



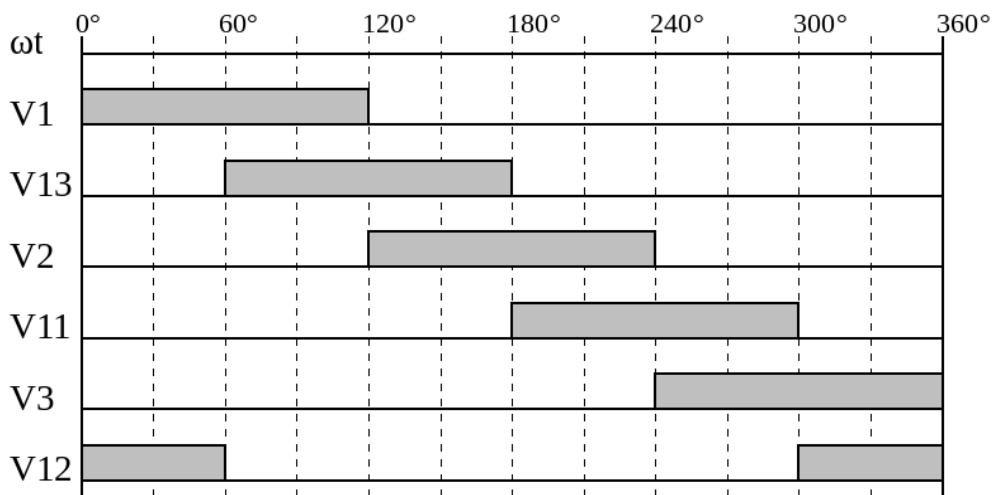
Obr. 12 Řídicí signál pro odporovou a indukční zátěž, $\alpha = 150^\circ$

Při snižování řídicího úhlu pod 90° se oba pulzy začnou natahovat. Vyznačená oblast signálu, na obrázku níže, může být tvořena dlouhým pulzem nebo řádkou pulzů. Vždy musí být zachována stejná délka impulzu nebo řádky pro oba spínající tyristory. Na následujícím obrázku je zobrazen stav pro $\alpha = 60^\circ$. V obrázku je pro zjednodušení plný impulz.



Obr. 13 Řídící signál pro RL zátěž, $\alpha = 60^\circ$

Při dalším snižování úhlu α se při 30° pulz přestane prodlužovat a konec, který byl do této chvíle ve 150° se začne posouvat spolu s počátkem prvního pulzu. Maximální délka každého pulzu/řádky je 60° a celková maximální délka dvojice je 120° . Stav pro $\alpha = 0^\circ$ je na následujícím obrázku.



Obr. 14 Řídící signál pro RL zátěž, $\alpha = 0^\circ$

Skutečný řídicí signál je pro variantu s dlouhým pulzem poupraven. Kvůli jednoduššímu algoritmu generování pulzů, zůstává při $\alpha \leq 30^\circ$ před druhým pulzem z každé dvojice krátká mezera. Výstupy generátoru odpovídají pořadí podle obrázků, tzn. V1 až V6.

Podobně jako v případě dvanáctipulzního usměrňovače byl zvolený řídicí signál vymyšlen a jeho funkčnost ověřena až během práce na diplomové práci.

3. Synchronizace

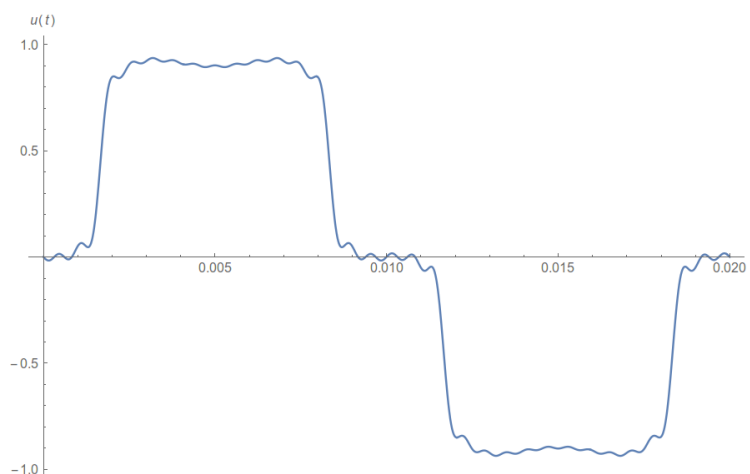
3.1. Význam

Synchronizace na síťové napětí zajišťuje správné přivedení spínacích impulsů na výkonový měnič, tzn. jejich časovou synchronizaci se základní frekvencí napětí sítě. Napětí v síti nemá konstantní amplitudu ani frekvenci a obsahuje vysoký podíl vyšších harmonických, který je proměnný. Obsah harmonických je také závislý na řízeném měniči, proto musí být synchronizace spolehlivá při téměř jakémkoliv průběhu síťového napětí.

Například, pro třífázový můstkový usměrňovač je podíl harmonických v odebíraném proudu ze sítě podle normy CEI 1000-2-1 následující [10]

$$\frac{I_n}{I_1} = \frac{1}{\left(n - \frac{5}{n}\right)^{1,2}} \quad \text{pro } n = 6k \pm 1 \quad (8)$$

Pokud by síť byla měkká a odebíraný proud by byl vysoký, napětí by mělo zdeformovaný průběh. Na Obr. 15 lze vidět síťové napětí jedné fáze odpovídající vztahu (8) pro n až do 31. harmonické. Jedním z největších problémů jsou zákmity kolem průchodu napětí nulou, proto ne vždy lze použít jednoduchou detekci průchodu nulou.



Obr. 15 Průběh síťového napětí pro šestipulzní usměrňovač

Dále budou vysvětleny 3 různé synchronizace, z nichž 2 měly nejlepší výsledky ze všech zkoumaných v této práci a přidána je detekce průchodu nulou pro pozdější porovnání metod. Ve všech případech se jedná o synchronizaci na fázové napětí. Provedení je softwarové pomocí vzorkování signálu AD převodníkem a následnou úpravou signálu. Ke konci bude vysvětlen vliv vzorkovací frekvence a způsob filtrace získané periody napětí.

3.2. Použité způsoby synchronizace

3.2.1. Detekce průchodu nulou

Tento způsob synchronizace spočívá v jednoduché detekci průchodu vzorkovaného napětí nulou. Výhoda je jednoduchost algoritmu a zanedbatelná doba výpočtu. Na rozdíl od předchozích synchronizací je možná funkce i pro jiné frekvence než 50 Hz. Veliká nevýhoda je v tom, že je nutné nezkrasené napětí, u kterého nehrozí vyšší počet průchodů nulou.

Tato synchronizace je celá řešena pouze pomocí AD převodníku. Při splnění podmínky průchodu napětí nulou při růstu napětí se uloží hodnota čítače a vypočítá se hodnota periody. Pro zvýšení přesnosti lze detekovat i průchod nulou nulou při sestupném napětí.

U této synchronizace je nezbytné korigovat vliv vzorkování, protože se hodnota čítače čte v intervalech vzorkovací periody T_s . Tato úprava algoritmu bude vysvětlena později.

3.2.2. Fourierovy koeficienty – měření úhlu φ_1

Způsob synchronizace vyplývá ze základních vztahů Fourierovy řady a výpočtu jeho koeficientů. Fourierův rozvoj funkce $f(t)$ v trigonometrickém tvaru je

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos(k \omega t) + b_k \sin(k \omega t)) \quad (9)$$

kde

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (10)$$

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(k \omega t) dt \quad (11)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(k \omega t) dt \quad (12)$$

a ω odpovídá základní harmonické.

Koeficient a_0 odpovídá střední hodnotě funkce a je pro synchronizaci nezajímavý. Jelikož chci synchronizovat na první harmonickou, k bude rovno 1. Místo tvaru (9) je vhodnější amplitudový tvar

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} A_{mk} \sin(k \omega t + \varphi_k) \quad (13)$$

kde A_{mk} je amplituda k -té harmonické a φ_k je úhel posunutí k -té harmonické.

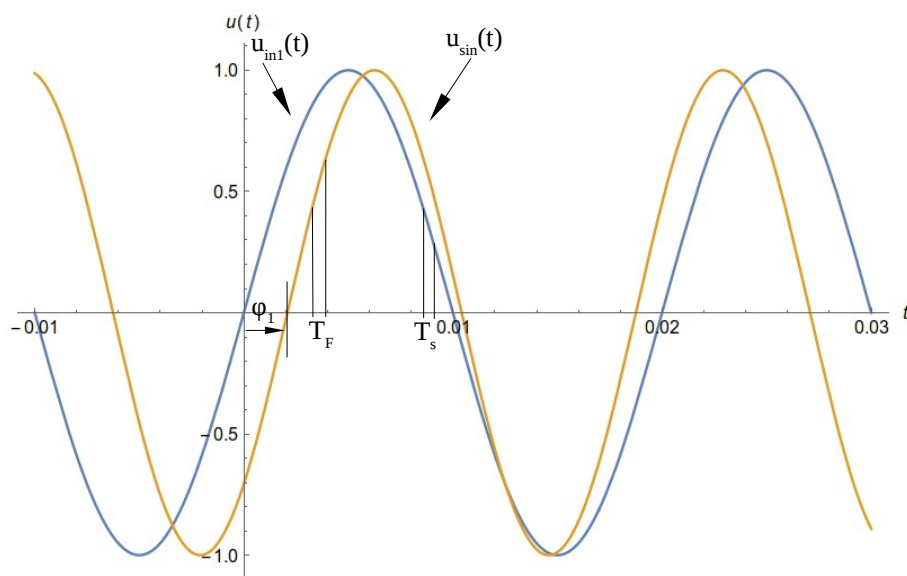
Úhel φ_k lze vypočítat z koeficientů a_k a b_k

$$\varphi_k = \tan^{-1} \left(\frac{a_k}{b_k} \right) \quad (14)$$

Princip synchronizace je ve výpočtu fázového posunu první harmonické φ_1 z koeficientů a_1 a b_1 . Pro výpočet v mikroprocesoru se rovnice (11) a (12) převedou do diskrétní podoby. Hodnoty funkcí sinus a cosinus pro základní frekvenci jsou v tabulkách s počtem vzorků, který odpovídá vzorkovací frekvenci AD převodníku T_s . Každý vzorek se násobí s i -tou hodnotou sinu nebo cosinu a výsledek se přičte k výsledku pro předchozí vzorek. Na konci periody se hodnoty a_1 a b_1 vydělí, není tedy nutné

násobit pokaždé $2/T$. Funkce arctangens je vypočtena pomocí funkce $atan()$ z knihovny $math$. Doba výpočtu této funkce je v použitém mikroprocesoru zanedbatelná.

Na Obr. 16 lze vidět princip synchronizace. Ve skutečnosti jsou průběhy již navzorkované, zde jsou pro jednoduchost spojitě a s amplitudou 1.



Obr. 16 Princip synchronizace pomocí výpočtů Fourierových koeficientů

Napětí u_{in1} je první harmonická vstupního napětí a u_{sin} je tabulková sinusovka použitá i ve výpočtu koeficientu b_1 . Podle úhlu φ_1 , který odpovídá posunu mezi oběma průběhy, se mění perioda T_F , která určuje periodu výpočtu koeficientů a_1 a b_1 . Úhel φ_1 se z koeficientů vypočítá vždy na konci periody a perioda T_F je dána vztahem

$$T_F = T_{F50} \left(1 - \frac{\varphi_1}{2\pi} \right) \quad (15)$$

kde T_{F50} je hodnota periody pro 50 Hz.

Tímto výpočtem se současně koriguje frekvence i fáze generované sinusovky. Se správnou hodnotou T_F se budou oba průběhy napětí překrývat a začátek nové periody je daný posledním vzorkem tabulky se sinusovkou pro první harmonickou. Kvůli hodnotě T_{F50} je tato synchronizace určena pouze pro frekvence blízké 50 Hz.

V programu je tato synchronizace řešena tak, že ADC vzorkuje vstupní napětí s konstantní periodou T_s , ale perioda T_F určuje periodu přerušení čítače a v ISR se provádí výpočty. Počet vzorků na periodu je 256. Po výpočtech pro poslední vzorek, úhlu φ_1 a periody T_F , se vypočítá perioda napětí z hodnoty volně běžícího čítače nové a předchozí periody. Kvůli změně periody T_F je nutné nulovat koeficienty a_1 a b_1 na konci každé periody.

3.2.3. Rekurzivní diskrétní Fourierova transformace

Diskrétní tvar Fourierovy transformace (DFT) je

$$V[n] = \sum_{k=0}^{N-1} v[k] \cdot e^{-j2\pi \frac{k}{N}n}, n=0,1,\dots,N-1 \quad (16)$$

kde $V[n]$ signál n -té harmonické ve frekvenční oblasti, $v[k]$ je k -tý vzorek vzorkovaného signálu a N je počet vzorků za periodu.

DFT je určena pro transformaci, kde N vzorků je transformováno do N komplexních hodnot ve frekvenční oblasti reprezentující vstupní signál. Běžně se využívá pro analýzu obsahu harmonických v signálu. Inverzní DFT (IDFT) lze využít pro získání n -té harmonické vstupního signálu v časové oblasti [8]. Konkrétně pro synchronizaci to je první harmonická.

Vztah pro IDFT je následující

$$v[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} V[n] \cdot e^{j2\pi \frac{n}{N}k}, k=0,1,\dots,N-1 \quad (17)$$

Ze vztahů (16) a (17) je zřejmé, že výpočetní náročnost, zejména při vyšším počtu vzorků za periodu, je velmi vysoká a to i pouze pro získání jedné harmonické. Tuto nevýhodu řeší rekurzivní tvar diskrétní Fourierovy transformace (RDFT).

Vztah (16) pro n -tou harmonickou je vypočítán pro vzorky k_s a k_{s-1}

$$V[n]_{k_s} = \sum_{k=k_s-N+1}^{k_s} v[k] \cdot e^{-j2\pi \frac{k}{N}n} \quad (18)$$

$$V[n]_{k_{s-1}} = \sum_{k=k_s-N}^{k_s} v[k] \cdot e^{-j2\pi \frac{k}{N}n} \quad (19)$$

Po odečtení obou rovnic a provedení úprav lze dojít ke konečnému vzorci pro RDFT

$$V[n]_{k_s} = V[n]_{k_{s-1}} + (v[k_s] - v[k_s - N]) e^{-j2\pi \frac{k_s}{N}n} \quad (20)$$

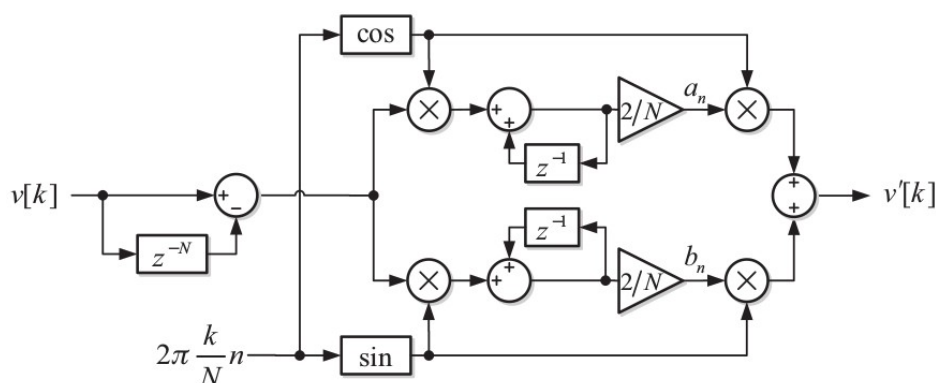
Tento vzorec je ekvivalentní k základní DFT a složitost výpočtu, zejména kvůli eliminaci sumy, je oproti DFT velmi nízká. K výpočtu je nutné zapamatovat si minulou hodnotu výpočtu (20) a vzorkovanou hodnotu před N vzorky, což ale znamená pamatovat si N vzorků [8].

Pro rekonstrukci signálu s požadovanou harmonickou v časové oblasti se provede inverzní transformace

$$v[k] = \frac{2}{N} V[n] e^{j2\pi \frac{n}{N}k} \quad (21)$$

kde $v[k]$ je k -tý vzorek n -té harmonické původního signálu.

Pro výpočet v mikroprocesoru je vhodné rozepsat exponenciální funkci v (20) a (21) na sinus a cosinus. Algoritmus výpočtu s použitím z-transformace je na následujícím obrázku.



Obr. 17 Diagram výpočtu n -té harmonické pomocí RDFT [8]

Na Obr. 17 lze vidět, že počáteční část odpovídá vztahu (20) a konec, počínaje násobením $2/N$, odpovídá vztahu (21). Hodnota $v'[k]$ je k -tý vzorek n -té harmonické původního signálu [8].

Pro 1. harmonickou je $n = 1$. Funkce sinus a cosinus pro $n = 1$ jsou vytvořeny, stejně jako v předchozí synchronizaci, pomocí vzorků v tabulce.

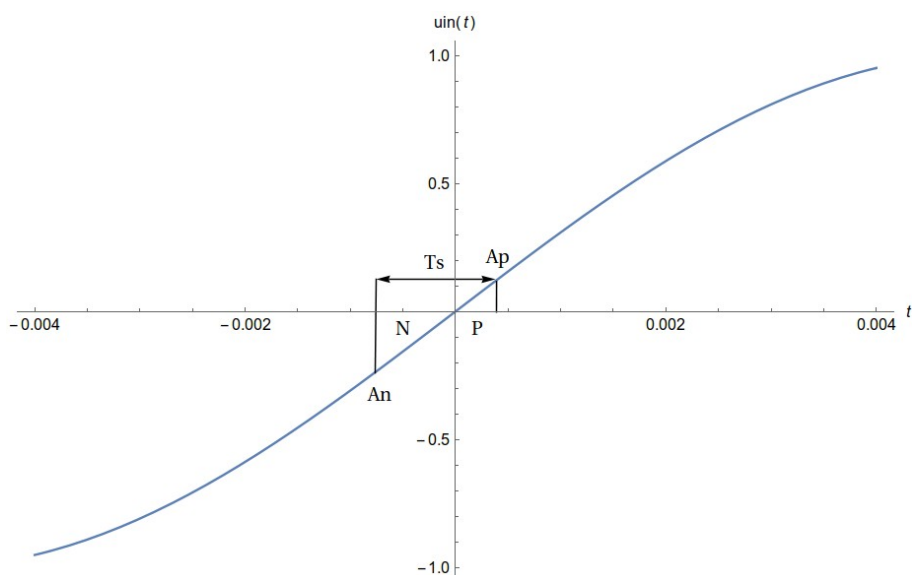
Součin $N \cdot T_s$ musí odpovídat periodě pro základní frekvenci napětí, čímž je umožněna funkčnost synchronizace pouze pro frekvence blízké 50 Hz [8]. V jiném případě by docházelo k fázovému posunu a ke změně amplitudy výsledné harmonické. K výpočtu lze přidat kontrolní smyčku, která upravuje hodnotu T_s podle frekvence vstupního signálu, ale protože se v tomto případě počítá pouze s frekvencí blízkou 50Hz, úprava není nutná.

Dále zbývá pouze detekovat průchod signálu $v[k]$ nulou a vypočítat periodu. Stejně jako u první synchronizace je nutné korigovat vzorkovací frekvenci AD převodníku. Tato synchronizace, na rozdíl od výpočtu Fourierových koeficientů, využívat přerušeni pouze od AD převodníku.

3.3. Korekce vlivu vzorkování AD převodníku

Pro synchronizace, u kterých se detekuje průchod nulou, je nutné zajistit, aby byl průchod napětí nulou nezávislý na vzorkovací frekvenci. Tato úprava se nevztahuje na synchronizaci pomocí Fourierových koeficientů kvůli jinému způsobu určení počátku periody.

Průchod nulou je detekován se zpožděním až při prvním kladném vzorku napětí. Toto zpoždění je proměnné a v intervalu $(0, T_s)$. Proto by i výstupní impulzy měly tento rozkmit. Na následujícím průběhu je vysvětlen způsob úpravy algoritmu. Průběh napětí na obrázku může být přímo vzorkované napětí nebo první harmonická pro případ metody RDFT.



Obr. 18 Korekce vlivu vzorkování na průchod napětí nulou

Označení na obrázku jsou: A_n poslední záporný vzorek, N poměrná hodnota periody T_s před průchodem, A_p první kladný vzorek a P poměrná hodnota T_s za průchodem.

Funkce sinus lze kolem průchodu nulou aproximovat lineární funkcí. Hodnotou směrnice je dáno

$$\frac{A_p}{P} = -\frac{A_n}{N} \quad (22)$$

a společně s podmínkou $N + P = 1$ lze dojít k následujícím výrazům

$$N = \frac{A_p}{A_p - A_n} \quad (23)$$

$$P = -\frac{A_n}{A_p - A_n} \quad (24)$$

Hodnota N je uvedena pouze pro úplnost a pro synchronizaci je použita hodnota P . Od původní odečtené hodnoty čítače v čase pro vzorek A_p je odečtena hodnota $P.T_s$, čímž se získá skutečný počátek periody [9].

3.4. Filtrace periody napětí

Pro další snížení rozkmitu impulzů, čímž je zajištěna kvalita výstupního napětí na zátěži, lze filtrovat hodnotu periody, která je u všech druhů synchronizace vypočítaná stejným způsobem.

Jedním způsobem je průměrování n hodnot periody

$$T_{AV} = \frac{T_1 + T_2 + \dots + T_n}{n} \quad (25)$$

Nevýhoda je nutnost zapamatování všech n hodnot. Následující výpočet střední hodnoty periody je téměř stejný a není nutné si pamatovat předchozí hodnoty periody

$$T'_{AV} = T_{AV} - \frac{T_{AV}}{n} + \frac{T_i}{n} \quad (26)$$

kde T_i je nová hodnota, T_{AV} je předchozí střední hodnota a T'_{AV} je nová střední hodnota [11].

4. Generátor spínacích impulzů

Navržený generátor se skládá z několika desek plošných spojů, z nichž součástí práce jsou DPS procesorové jednotky a DPS ochrany koncového stupně. V následujících kapitolách stručně uvedu nejdůležitější obvody generátoru, zejména ty, které jsou součástí procesorové jednotky. Také se zmíním o použitém mikroprocesoru. Kvůli rozsáhlosti programu vysvětlím pouze jeho základní strukturu.

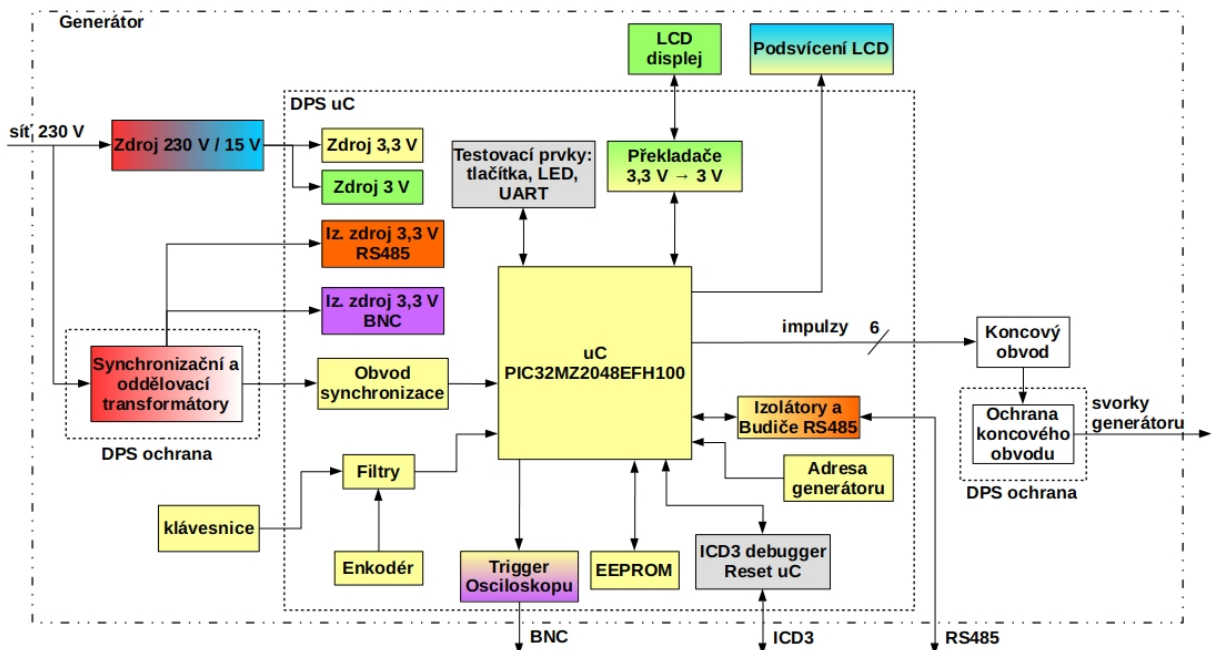
4.1. Struktura

Následující blokový diagram zobrazuje vnitřní propojení generátoru. Vnější ohraničení odpovídá mechanické části generátoru. Dále jsou vyznačeny ohraničení dvou zmíněných DPS. Hlavní zdroj generátoru a koncový obvod jsou každý na své DPS.

Jednotlivé bloky jsou označeny barevně podle jejich pracovního napětí. Z 15 V zdroje jsou napájeny zdroje 3,3 V a 3 V. Dva galvanicky oddělené zdroje, pro trigger osciloskopu a RS485, jsou napájeny z transformátoru se dvěma sekundáry, který je připojen na síťové napětí. Synchronizační napětí je bráno ze dalšího transformátoru.

Základní ovládací prvky jsou enkodér a klávesnice, jejichž signály jsou před vstupem do μC filtrovány. Informace o generátoru zobrazuje LCD displej s podsvícením. Výstup s impulzy (6 kanálů) je přiveden na vstup koncového obvodu. Spínací impulzy pokračují přes ochranu koncového obvodu na vnější výstupy generátoru. V obou zmíněných blocích se nachází různá pracovní napětí, proto nejsou barevně označeny.

Na procesorové DPS se nachází také prvky pro ladění mikroprocesoru. Dále jsou k dispozici testovací prvky, které nemají na chod generátoru žádný vliv. Jedná se o dvě tlačítka, 4 LED a testovací UART, který je také později použit při ověřování funkce synchronizace.



Obr. 19 Struktura generátoru spínacích impulzů

Pro propojení více generátorů pomocí sériové komunikace se na DPS nachází bloky pro galvanickou izolaci signálů a jejich úpravu pro standard RS485 pomocí budičů. K sériové komunikaci dále patří vlastní izolovaný zdroj 3,3 V a nastavení adresy jednotky.

Údaje o nastavení generátoru jsou ukládány do externí paměti EEPROM. Zbývající blok slouží k synchronizaci osciloskopu s napětím sítě. Tento blok je vyveden na BNC konektor. Jeho zdroj je také izolovaný.

4.2. Mikroprocesor a programovací prostředky

Na desce řídicí jednotky je použit poměrně výkonný, 32 bitový, mikroprocesor (dále μC) s pouzdrem se 100 piny PIC32MZ2048EFH100 od firmy Microchip. Hlavní přednost tohoto μC je jednotka FPU (Floating Point Unit). Umí tedy rychle provádět aritmetické operace s proměnnými float, ale i s proměnnými double (dvojitá přesnost). Maximální frekvence jádra je 200 MHz, přičemž frekvence pro periferie je poloviční. Stejně tak instrukční frekvence je poloviční. Tento μC má upravené jádro, mimo jiné pro DSP aplikace. Stejně jako většina DSP μC obsahuje velké množství periférií, z nichž v této práci velké množství není použito. Základní informace o tomto μC , včetně jeho inicializaci a nastavení periférií, lze najít v datasheetu [13]. Podrobnější informace k perifériím je nutné hledat rozšiřujících manuálech ke každé periférii zvlášť.

Při programování byl použit programátor / debugger ICD3. Před zhotovením procesorové DPS byl program testován na vývojové desce Explorer 16 s modulem PIM s použitým μC . Dále byla použita rozšiřovací deska pro vyvedení vstupů a výstupů, například do kontaktního pole.

Samotný program byl vytvořen v jazyku C ve vývojovém prostředí MPLAB X v3.40 s překladačem XC32. Veškeré zvláštnosti lišící se od běžného jazyka C pro tuto řadu procesorů lze nalézt v manuálu k překladači XC32 [14], kde je kromě toho také popsán standardní ANSI C. Lze zde nalézt způsob práce s plovoucí čárkou, s přerušením, zarovnání v paměti apod. Při programování byly také využity funkce ze standardních knihoven jazyka C. Tyto a DSP knihovny pro PIC32 lze najít v manuálu [15].

4.3. Programové vybavení

Ačkoliv část programu byla již vytvořena v rámci bakalářské práce [1] pro μC řady dsPIC33E, byl celý program vytvořen znovu, přičemž došlo k výraznému zpřehlednění a rozšíření. Program je strukturovaný do modulů pro hlavní části generátoru jako jsou: synchronizace, generování impulzů, sériová komunikace (zvláště master a slave), obsluha LCD, vstupy a výstupy, menu měničů a nastavení, a další.

Dále v programu přibylo hlídání a zpracování chyb v běhu programu, v sériové komunikaci a v komunikaci s vnějšími obvody. Při výskytu chyby se vypnou všechny důležité součásti generátoru – impulzy, komunikace a další. Seznam chybových hlášení je uveden v příloze E. Více informací se nachází v návodu k použití.

Pro rozsáhlost programu zde neuvádím více informací o programu. Program je podrobně okomentovaný a projekt v MPLAB X je přiložen v elektronické příloze.

5. Realizace procesorové DPS

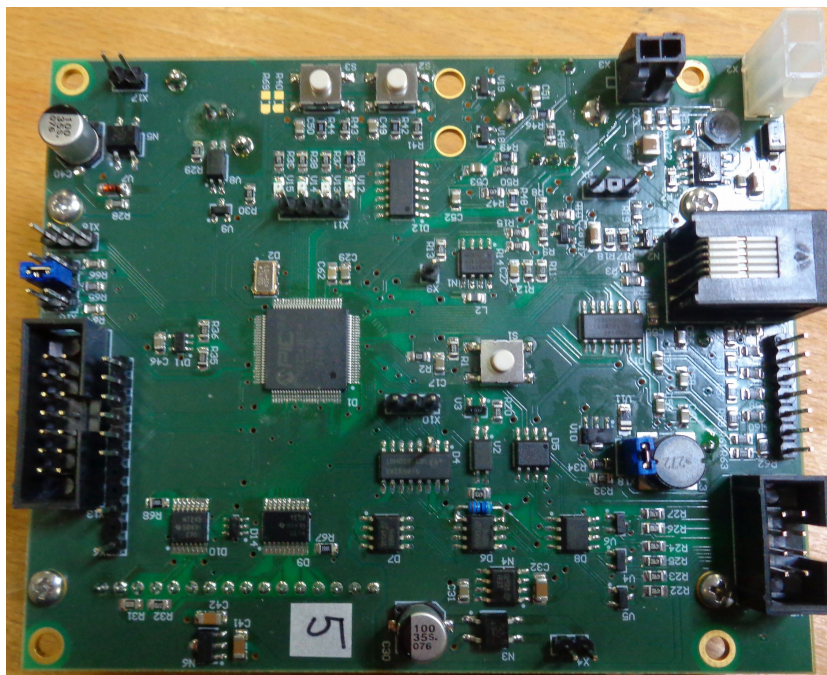
Návrh DPS byl proveden v programu Altium Designer 16. Projekt obsahující schéma zapojení, schéma DPS a výstupní soubory ve formátu Gerber, lze nalézt v elektronické příloze.

V příloze A je seznam a informace o použitých pinech μC . V příloze B jsou znázorněny použité piny v grafické podobě, kde lze lépe vidět použité a nepoužité piny a také napájecí piny μC . Schéma zapojení z programu Altium Designer je přiloženo v příloze C. V elektronické příloze je také přiložen BOM (Bill of Materials) pro tuto DPS.

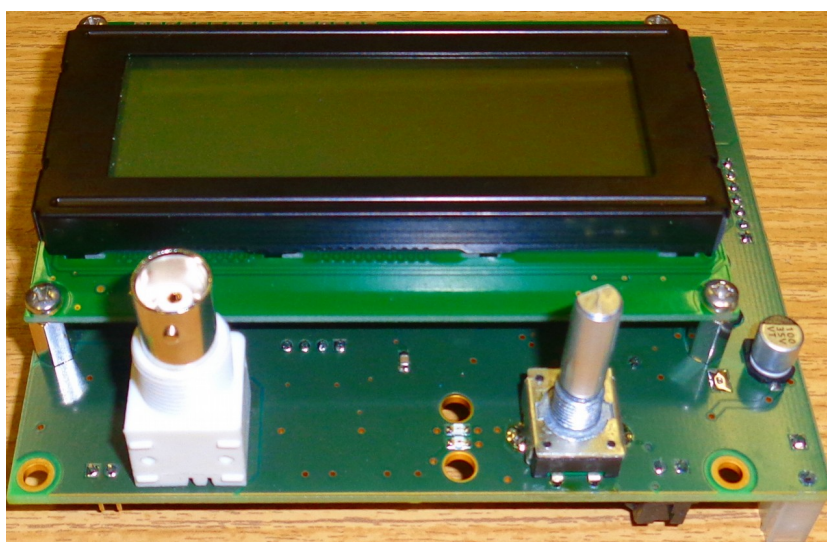
DPS je dvouvrstvá a všechny komponenty jsou ručně pájené. Většina komponent a konektorů je na horní straně (strana μC) a na spodní straně se nachází zejména blokovací kondenzátory a také konektory pro LCD, BNC konektor a enkodér. Deska je rozdělena na 3 oblasti: zem μC , izolovaná zem pro RS485 a další pro synchronizaci osciloskopu (BNC). Ze spodní a horní strany je rozlita měď, která je připojena na zem podle zmíněných oblastí.

V následujících kapitolách stručně popíšu důležitější obvody. Vynechám popis obvodů pro ovládací prvky, tzn. klávesnice, inkrementální enkodér a jiné spínače, kde se nachází dolní propust s Schmittovým klopným obvodem. Tyto obvody a funkci enkodéru jsem již popsal v [1]. Nezbytné obvody mikroprocesoru, jako jsou napájení, externí hodiny, reset a připojení programátoru jsou zapojeny podle datasheetu [13], v kapitole 2. Zmíněné obvody a také zapojení všech zdrojů na desce jsou uvedeny ve schématu v příloze C.

Na Obr. 20 a Obr. 21 je zobrazena deska z obou stran. Na obrázcích není deska ještě zcela umyta po připájení mechanických součástek. Vlevo nahoře na horní straně chybí dva odpory, kterými je nastavena intenzita LED, které jsou přes světlovod vyvedeny na přední panel. Tyto odpory se určí až ke generátorům budou dodány bedny, aby přes světlovod nedocházelo k oslnění.



Obr. 20 Horní strana procesorové DPS



Obr. 21 Spodní strana procesorové DPS s LCD

5.1. LCD displej

Použitý LCD displej je RC2004A-FHW-ESV. Deska displeje je umístěna pomocí distancí přímo na procesorovou DPS. Displej má dva konektory, jeden slouží k paralelní komunikaci a druhý je vyveden na LED displeje. Jmenovité napětí displeje je 3 V a horní hranice napájecího napětí je 3,3 V. Proto jsou pro snížení napětí použity překladače napětí TXB0108 (8 bitů – data) a SN74AVC4T245 (4 bity – výstupy pro ovládání displeje). Napětí 3 V je získáno napěťovým regulátorem. Jednodušší řešení by bylo snížit napětí 3,3 V pro celou DPS například na 3,15 V. Avšak při zvýšení napětí, z jakéhokoliv důvodu, by byla rezerva napětí pro displej pouze 0,15 V.

Oba zmíněné překladače musí mít při připojení napětí zablokované výstupy než se napětí dostane na stabilní hodnotu. K tomu slouží další výstup μC , který při inicializaci výstupy obou komponent

povolí. Vstup OE (Output Enable) je připnutý pull-down odporem na GND, u první součástky, a na 3,3 V pull-up odporem u druhé.

Podsvícení displeje je řešeno pomocí stejnosměrného měniče napětí (chopperu), kde je do série k LED připojena indukčnost 2,7 mH a přes BJT je pomocí PWM s frekvencí 50 kHz a s proměnou střídou spínaná LED. Při ladění hrozí nebezpečí, že při zastavení programu zůstane na výstupu Output Capture jednotky logická 1 a proud tekoucí LED bez omezení poroste tak, až ji zničí. Proto je napětí 15 V připojeno přes jumper, který je při ladění odstraněn.

Způsob komunikace, inicializace, časování a další informace k LCD jsou k nalezení v datasheetu [16].

5.2. Paměť EEPROM

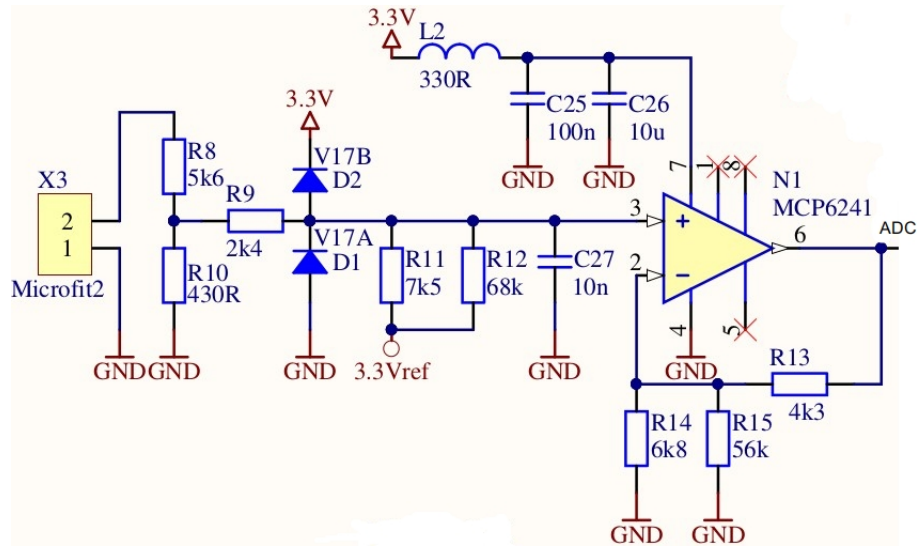
Jedná se o EEPROM 24LC02B s pamětí 2 Kbit. Sériová komunikace probíhá přes standard I²C s frekvencí 400 kHz. Při zapnutí generátoru se provádí čtení všech uložených hodnot nastavení. K zápisu dochází vždy při změně hodnot v menu nastavení. Tabulka s počátečními adresami a počtu bytů pro každou proměnnou nastavení je k nalezení v příloze D.

5.3. Synchronizace osciloskopu

Kvůli osciloskopům, které nemají trigger na síťové napětí, byla přidána do generátoru možnost externí synchronizace. Na DPS je umístěný BNC konektor, který je vyveden na přední panel generátoru. Aby nebyla zem μ C vyvedena ven z generátoru, má BNC vlastní izolovaný zdroj. Ten je složen z diodového můstku, vyhlazovacího 100 μ F kondenzátoru a Zenerovy diody na 3,3 V. Pulzy pro trigger jsou odděleny přes optočlen a signál je invertovaný. Samotný synchronizační signál a jeho možnosti nastavení jsou popsány v návodu k použití generátoru.

5.4. Synchronizace na síťové napětí

Napětí sítě 230 V je přivedeno na transformátor se jmenovitým napětí 400 V, který se nachází na DPS ochrany koncového obvodu. Vyšší jmenovité napětí bylo vybráno, protože s ním má transformátor nižší zkrácení napětí na sekundáru. Sekundární napětí je přivedeno na DPS pro μ C. Další úprava signálu lze vidět na Obr. 22. Na vstupu AD převodníku musí být napětí mezi 0 V a 3,3 V. Přivedené napětí je sníženo děličem napětí a je mu přidán offset, aby bylo v uvedených mezích. Zapojení s operačním zesilovačem a výpočty byly provedeny podle dokumentu [12].



Obr. 22 Synchronizační obvod

V návrhu obvodu je zohledněno zvýšení jmenovitého napětí sítě o 10% a napětí naprázdno na sekundáru transformátoru. Diody D1 a D2 zajišťují ochranu OZ před přepětím v síti, aby se na vstupu OZ nemohlo vyskytnout napětí nad 3,3 V nebo záporné napětí. Dělič napětí je vypočítán tak, aby napětí na R10 mělo maximální amplitudu 1,365 V. Zesílení OZ je

$$m = \frac{V_{outfs} - V_{outzs}}{V_{infs} - V_{inzs}} = \frac{3,3 - 0}{1,365 - (-1,365)} = 1,21 \quad (27)$$

tzn. rozsah výstupního napětí dělený rozsahem vstupního napětí. V_{outfs} a V_{outzs} jsou maximální a minimální napětí na výstupu, a V_{infs} a V_{inzs} jsou maximální a minimální napětí na vstupu.

Požadovaný offset napětí je

$$b = V_{outzs} - m \cdot V_{inzs} = 0 - 1,21 \cdot (-1,365) = 1,65 \text{ V} \quad (28)$$

což je přesně polovina rozsahu referenčního napětí AD převodníku.

Odpor R_1 (ve schématu $R_9 + R_8 \parallel R_{10}$) a R_2 ($R_{11} \parallel R_{12}$) se vypočítají podle vztahů

$$R_1 = R_{zv} + R_{dělič} = 2400 - 399,3 = 2799,3 \Omega \quad (29)$$

kde R_{zv} je zvolený odpor (R_9) a $R_{dělič}$ je vnitřní odpor děliče.

$$R_2 = \frac{V_{ref} \cdot R_1 \cdot m}{b} = \frac{3,3 \cdot 2799,3 \cdot 1,21}{1,65} = 6774,3 \Omega \quad (30)$$

Zpětnovazební odpor R_f je zvolený 4,3 k Ω a zemní odpor R_g ($R_{14} \parallel R_{15}$) je

$$R_g = \frac{R_2 \cdot R_f}{m(R_1 + R_2) - R_2} = \frac{6774,3 \cdot 4300}{1,21(2799,3 + 6774,3) - 6774,3} = 6056,3 \Omega \quad (31)$$

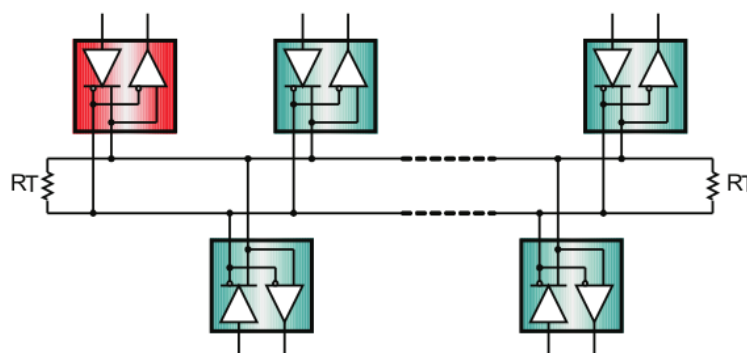
Úbytek na odporu R_9 způsobený proudem ze zdroje referenčního napětí způsobí offset napětí. Zesílení OZ je vyšší než 1 kvůli stabilitě. Nakonec zbývá kondenzátor na vstupu OZ (C_{27}), který zamezí průchodu rychlých špiček napětí, ale zároveň je jeho hodnota nízká, aby nedocházelo k většímu fázovému posunu napětí.

6. Komunikace mezi generátory

6.1. Standard RS485

6.1.1. Popis standardu

Signál pro komunikaci mezi generátory je přenášen diferenciálně podle standardu RS485, který má zvýšenou odolnost proti rušení. Jedná se o standard fyzické části komunikace a neudává tedy pravidla pro způsob komunikace, např. časování, struktura zpráv apod. Signálové vodiče jsou dva, neinvertující A a invertující B. Propojení mastera (dále M) a slave (dále S) je sběrnice. V tomto případě je zvolen poloviční duplex. Připojení na sběrnici s polovičním duplexem je zobrazeno na Obr. 23.



Obr. 23 Sběrniceová struktura RS485 [17]

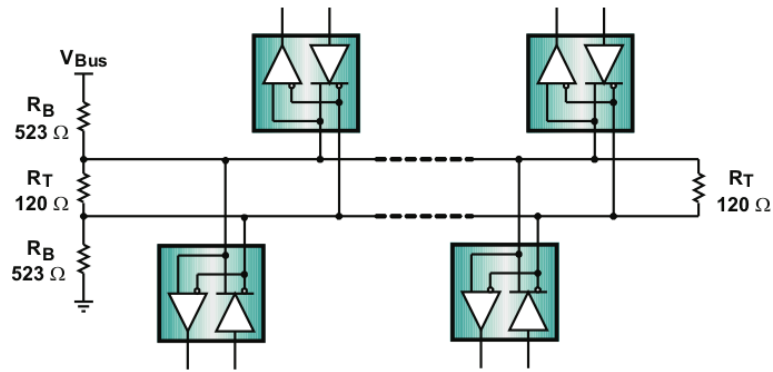
Červeně je vyznačen budič M. Maximální počet uzlů se často udává 32, ale může být až 255. Toto není udáno standardem a omezení je dáno počtem adres. Na obrázku je vyznačena signálová dvojice vodičů, která je zakončena zakončovacími odpory R_T . Ty mají impedanci, která se rovná charakteristické impedanci použitého kabelu – většinou mezi 100 Ω a 120 Ω [17].

Standard RS485 udává mnoho detailů k zapojení sběrnice, například maximální délku čel, zakončení pomocí RC filtrů či úpravu zapojení kvůli poruchovým stavům. Tyto úpravy jsou závislé na délce sběrnice a přenosové rychlosti. Kvůli krátké délce kabelů a nižší přenosové rychlosti mezi generátory je nutné řešit pouze poruchové stavy.

6.1.2. Poruchové stavy sběrnice

Při poruchovém stavu sběrnice musí být zajištěn definovaný vstupní signál pro všechny budiče. Diferenciální napětí musí být v každém případě vyšší než 200 mV. Poruchové stavy mohou být: rozpojení sběrnice, zkrat vodičů a nečinná sběrnice (bez aktivních budičů).

Zajištění definovaného stavu sběrnice se provádí přidáním upínacích odporů podle Obr. 24. Ty zajistí jasně dané diferenciální napětí sběrnice a tím se zamezí náhodným stavům na vstupu budičů [17].



Obr. 24 Zvýšení odolnosti sběrnice proti poruchám, RS485 [17]

Upínací odpory R_B v předchozím obrázku mohou být zapojeny v obou čelech sběrnice. Je nutné zvolit takovou hodnotu R_B , aby nebyl příliš zatěžovaný zdroj. Hodnota R_B musí zajistit, že na R_T bude vždy minimálně 200 mV. Výpočet hodnot upínacích odporů je podrobně popsán v dokumentu [19]. Použitím upínacích odporů se skutečná hodnota zakončovacího odporu $R_T = 120 \Omega$ sníží.

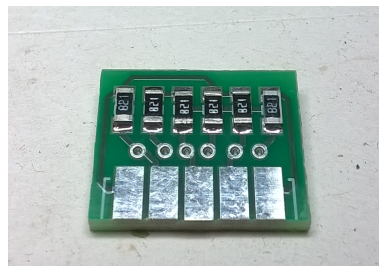
Podle návodu [19] se došlo k hodnotě $R_B = 820 \Omega$. Paralelní zapojení R_T a obou R_B tvoří ekvivalentní odpor $R_T || (2R_B) = 111,8 \Omega$, což je nový zakončovací odpor sběrnice. Hodnota je blízká charakteristické impedanci (většinou 100Ω) použitého kabelu typu cat. 5e (kroucený FTP kabel). Předchozí hodnota je stejná pro oba konce sběrnice a ekvivalentní odpor paralelního zapojení je tedy poloviční $R_{eq} = 55,9 \Omega$. Na tomto odporu musí být vždy minimálně 200 mV. Výsledné napětí U_{fsb} (fail-safe bias) při poruše na sběrnici bude vždy minimálně

$$U_{fsb} = U_{cc} \frac{R_{eq}}{R_{Beq} + R_{eq} + R_{Beq}} = 3,3 \frac{55,9}{410 + 55,9 + 410} = 0,211 V \quad (32)$$

kde U_{cc} je napájecí napětí sběrnice a R_{Beq} je ekvivalentní hodnota upínacího odporu. Ta je poloviční, protože se nachází na obou koncích sběrnice.

Na sběrnici tedy bude přesně definované napětí i při poruchovém stavu. Samozřejmě může dojít k poklesu napájecího napětí a výsledná hodnota U_{fsb} bude nižší. Nicméně hodnota R_B byla zvolena vyšší i kvůli nižšímu zatížení zdroje. Je nutné dodat, že maximální délka sběrnice pro propojení generátorů bude 10 m a pro takové vzdálenosti, a pro nízké rychlosti, se většinou žádné zakončovací nebo upínací odpory nepoužívají. Společně se stíněným kabelem, odporové zakončení zvyšuje spolehlivost sériové komunikace.

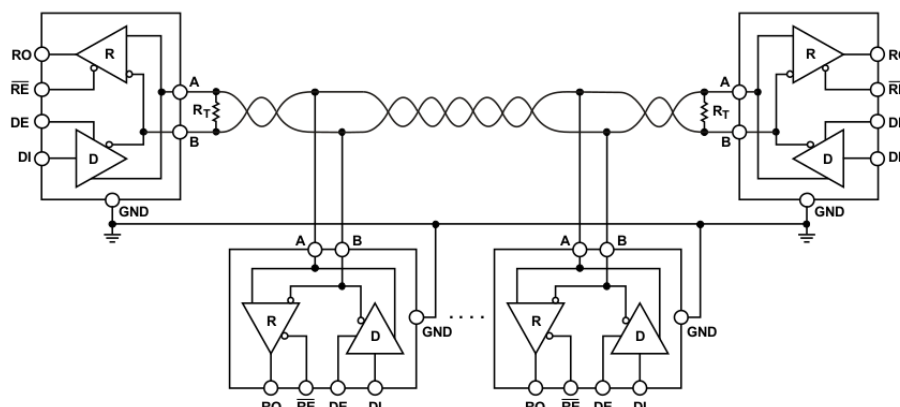
Skutečná realizace zakončovacích a upínacích odporů lze vidět na obrázku níže. Z jedné strany DPS jsou upínací odpory a z druhé zakončovací. Celá DPS je vložena do pouzdra D-sub konektoru. Plošky jsou zasunuty mezi kontakty konektoru a připájeny.



Obr. 25 DPS s upínacími a zakončovacími odpory pro RS485

6.1.3. Zapojení budičů pro RS485

Na Obr. 26 lze vidět zapojení vstupů a výstupů budičů na sběrnici. Na obrázku chybí výše zmíněné upínací odpory a další ochranné prvky. Ve skutečnosti jsou použity ochranné omezovací odpory a asymetrické TVS diody (SM712) pro každý vodič (A i B), které zajistí, že při přepětí na sběrnici bude na budičích napětí mezi -7 V a 12 V. Toto rozmezí napětí je dáno standardem RS485.



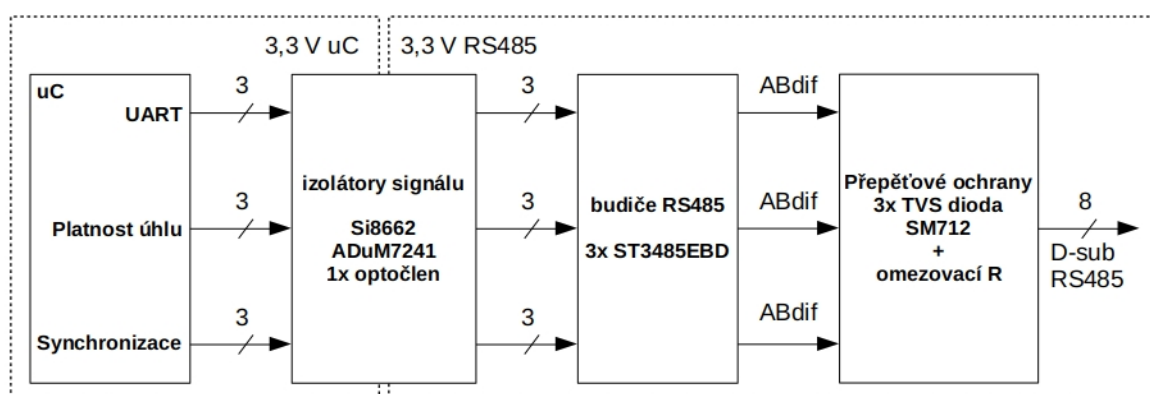
Obr. 26 Zapojení budičů na sběrnici pro RS485 [18]

Propojení uzlů sběrnice přes zem elektrické instalace není vhodné protože může dojít k rušení kvůli proudovým smyčkám. Izolování zemí uzlů může zase způsobit rozdíl potenciálů budičů na sběrnici. Řešením je galvanická izolace signálů a zdroje. Spolu s diferenciálními vodiči je vedena izolovaná zem, který je společná pro všechny připojené budiče [18].

Budič má signálový vstup DI a výstup RO. Jejich povolení je přes DE (na 1) a RE (na 0). Všechny tyto vstupy budiče jsou již galvanicky izolovány. V dalších kapitolách bude popsán již konkrétní způsob komunikace mezi generátory na sběrnici.

6.2. Zapojení na procesorové DPS

Sériová komunikace každého generátoru lze rozdělit na 3 bloky: komunikace pomocí UART, potvrzení změny řídicího úhlu a synchronizace připojených jednotek. Blokové schéma je na následujícím obrázku.



Obr. 27 Blokové zapojení sériové komunikace

Celkem 9 signálů je izolováno pomocí různých komponentů. Nejpomalejší z nich je optočlen, ke kterému bylo přiřazeno povolení vysílání synchronizačních impulzů. K povolení dojde vždy jednou

při sepnutí řízení měničů a proto není požadována rychlost. Ostatní použité izolátory používají modulovaný signál (OOK – On-Off Keying), který je přenášen přes kapacitní bariéru a dekódován.

Dále je uveden seznam signálů pro komunikaci, názvy odpovídají pinům v přílohách A a B.

- UART
 - U1TX - vysílání zprávy
 - U1RX - příjem zprávy
 - T/R U1 - změna směru budiče – vstupy DE a RE jsou spojeny
- Platnost řídicího úhlu
 - Uout – vysílání potvrzovacího impulzu pro potvrzení platnosti řídicího úhlu
 - Uin – příjem potvrzovacího impulzu pro potvrzení platnosti řídicího úhlu
 - T_EN U – povolení vysílání, příjem je povolen vždy – RE je připojen na GND
- Synchronizace
 - OC7 – vysílání synchronizačních impulzů – zajišťuje Output Compare 7
 - IC2 – příjem synchronizačních impulzů - zajišťuje Input Capture 2
 - T_EN S – povolení vysílání, příjem je povolen vždy – RE je připojen na GND

6.3. UART a obsah zprávy

Kvůli sběrníkové topologii, kde jeden M komunikuje s více S, je nutné, aby jednotlivé uzly byly rozlišeny adresou. Komunikaci vždy začíná M a pouze po tom, co je S vyzván, může odpovědět.

Adresa každé jednotky je nastavitelná pomocí tří jumperů na procesorové DPS. Rozsah adresy je tedy 0 až 7. Pro správnou funkci nesmí mít žádné dvě jednotky stejnou adresu.

UART použitého μC umí pracovat v 9 bitovém módu s automatickou detekcí adresy. Pokud je 9. bit nastaven na 1, jedná se o adresu. V opačném případě jsou obsahem bytu data. Pokud S detekuje svojí adresu, začne přijímat následující byty. Pokud přijme jinou adresu, vše následující ignoruje až do příjmu další adresy. Tento způsob komunikace snižuje časové vytížení μC .

Další nastavení UARTu je: žádná parita, 1 stop bit a rychlost přenosu 250000 bps. Samotná zpráva má pevnou šířku 5 bytů, z nichž 4 byty jsou data a 1 je adresa. V Tab. 1 lze vidět složení zprávy.

Význam bytu	Zkratka	9. bit	byte č.
Adresa S nebo M	ADDS/M	1	1
Význam zprávy	CMD	0	2
Data – MSB	DATA1	0	3
Data – LSB	DATA2	0	4
Kontrolní součet	SUMC	0	5

Tab. 1 Struktura zprávy sériové komunikace

Zpráva pro M a S má stejnou strukturu. Pro zvýšení spolehlivosti je do zprávy zařazen základní kontrolní součet. Ten je proveden jako 8 bitová suma prvních třech bytů dat (byte 2, 3 a 4). Zpráva není nijak ukončena kvůli pevné délce zprávy a nemůže tedy dojít k příjmu dalších dat. Tento stav je hlídán a detekován jako chyba.

Zjednodušený příklad vyslání zprávy u M je následující: povolení vysílání budiče → uložení bytů do bufferu Tx → čekání na dokončení přenosu UARTu → přerušení od Tx a změna směru zpět na příjem.

Podobně přijetí zprávy u S se dá shrnout jako: čekání na byte s log. 1 v 9. bitu a se svou adresou → po detekování správně adresy UART přijímá následující byty s 0 v 9. bitu → po zaplnění poloviny

bufferu Rx (4 byty) dojde k přerušení od Rx → kontrola součtu a dekodování zprávy → vyslání odpovědi pro M.

Popsané vyslání a přijetí zprávy je stejné i v opačném směru při odpovědi (od S k M). Do bufferu Rx se ukládají pouze byty s 0 v 9. bitu. K zavolání přerušení dojde jen jednou po příjmu celé zprávy, což urychluje komunikaci.

Součástí komunikace je také hlídání možných chyb jako jsou: počet přijatých bytů, timeout pro odpověď, přerušení komunikace, neprázdný buffer Rx při odesílání nové zprávy a mnoho dalších. Úplný seznam chyb je v příloze E.

V tabulce níže se nachází seznam příkazů CMD pro M a S. Příkazy nižší než 100 posílá M a čte S. Naopak ty, které jsou vyšší než 100 slouží k potvrzení přijetí zprávy od S pro M. Příkazy jsou číselně vzájemně dané, například na příkaz 5 musí S odpovědět příkazem 105. Ke každému příkazu je také uveden obsah zprávy.

Vysílá	Význam zprávy	CMD	DATA1	DATA2
MASTER	Skenování adres na sběrnici	1	Adresa M	Číslo S
	Spínací proces (CMD 2 až 5), posílání hodnot nastavení pro připojené S	2	Druh měniče	Šířka pulzu
		3	Fáze synchronizace	Zapojení transformátoru
		4	Max. řídicí úhel	Min. řídicí úhel
		5	Podmínka pro rev. měnič	Rev. měnič ANO/NE (1/0)
	Zastavení generování impulzů	10	0	0
	Odeslání řídicího úhlu	55	Řídicí úhel MSB	Řídicí úhel LSB
Periodická kontrola spojení – 20 ms	75	0	0	
SLAVE	Odpovědi na příkazy od M	101	Adresa S	0
		102	Adresa S	0
		103	Adresa S	0
		104	Adresa S	0
		105	Adresa S	0
		110	Adresa S	0
		155	Adresa S	Řídicí úhel (celá část)
		175	Adresa S	0

Tab. 2 Seznam příkazů a obsah zpráv sériové komunikace

6.4. Řídicí úhel

Řídicí úhel posílá M postupně jednotlivým S podle vybraného měniče, případně podle podmínky pro řízení reverzačního měniče. Nastavení úhlu pomocí enkodéru u jednotek S je blokováno. Pokud u M dojde ke změně úhlu a sériová komunikace je v klidovém stavu, je úhel poslán postupně všem S. Hned po přijetí úhlu každý S posílá potvrzení, které obsahuje jak adresu S, tak i celou část přijatého úhlu. Po tom, co M dostane všechna potvrzení, vyšle impuls pomocí dalšího bloku sériové komunikace (také přes RS485). Tento signál přijímají všechny připojené jednotky (včetně M). Náběžná hrana je u všech jednotek detekována externím přerušením, úhel je považován za platný a dojde tedy k jeho změně.

Tento proces se opakuje vždy pro poslední nastavený známý řídicí úhel, když není UART zanepřázdněný. Při otáčením enkodérem některé úhly, přes které se projde, jednotky S nezaznamenají. Je takto ale zamezeno přeplnění bufferu odesílání a také se úhel nastaví ve všech jednotkách v jeden okamžik. Druhý blok komunikace přes RS485 slouží tedy pouze k potvrzení úhlu pomocí impulsu a nemá jiné využití.

6.5. Synchronizace

Podobně jako v předchozím případě slouží signál synchronizace pouze k přenosu synchronizačních impulzů. Generátor, zvolený jako M, udává synchronizaci síťového napětí pro všechny připojené jednotky. Způsob generování a přenos synchronizačních impulzů funguje nezávisle na vybrané metodě synchronizace podle kapitoly 3.2. V jednotkách S je vlastní synchronizace vypnuta.

Stejně jako v předchozím případě, všechny jednotky (včetně M) přijímají a pouze M vysílá. Vysílání a příjem je zajištěn pomocí Output Compare a Input Capture. Při výpadku synchronizace u M nebo v přenosu všechny jednotky zablokují generování řídicích impulzů. Pulzy jsou znovu přenášeny přes RS485.

6.6. Proces zapnutí a vypnutí generátorů

Samotný proces zapínání a vypínání generátorů z hlediska uživatele je popsán v návodu k použití. Zde stručně uvedu jakým způsobem se zapínají a vypínají jednotky přes komunikaci.

Proces spínání lze částečně vidět v Tab. 2. Při startu řízení vybraného měniče u M dojde k detekování adres připojených jednotek. Jsou zde hlídány možné chyby jako jsou: nesprávný počet detekovaných S, stejné adresy a adresy mimo rozsah 0 až 7. Pokud je detekován druhý M, je automaticky přepnut na S a nedojde k chybě nebo zastavení procesu spínání.

Dále jsou odeslány některé hodnoty nastavení M, čímž je toto nastavení vnuceno všem jednotkám S během řízení měniče (CMD 2 až 5). Během spouštění zároveň M časuje odesílání jednotlivých zpráv tak, aby se všechny jednotky stihly synchronizovat na síťové napětí. Také je hlídáno spuštění všech jednotek najednou, v jedné periodě. Tento proces si řídí sám M a všechny S se mu přizpůsobují. Všichni S si ukládají hodnoty přijaté od M a následně potvrzují jejich přijetí. Synchronizace síťového napětí se nastavuje tak, aby se pouze detekovaly impulzy pomocí Input Capture.

Během chodu jsou pouze posílány zprávy s řídicím úhlem nebo s kontrolou spojení každých 20 ms. Vypnutí všech generátorů se provede vysláním příkazu od M. Po vypnutí se nastavení jednotek S vrátí do stavu před zapnutím.

7. Ochrana koncového obvodu

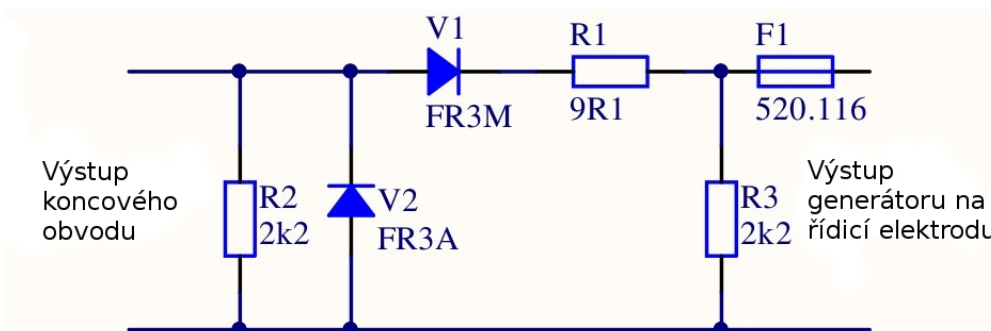
7.1. DPS ochrany

Koncový obvod pro generátor byl již vytvořen před touto prací a bylo nutné ho doplnit o ochranu výstupů na tyristory. I při správné funkci generátoru a koncového stupně může dojít ke dvěma situacím, kdy by došlo ke zničení koncového obvodu. Při proražení tyristoru je velká pravděpodobnost, že se na řídicí elektrodě objeví anodové napětí, které je mnohonásobně vyšší než napětí zdroje koncového obvodu.

Další nebezpečí hrozí, když student připojí výstup transformátoru na výstup generátoru. V obou případech dojde k nárůstu napětí na MOSFETech ve vypnutém stavu a k nárůstu proudu v sepnutém stavu, což by zničilo tranzistory koncového stupně.

Samotná ochrana se nachází na zvláštní DPS, na kterou jsou vyvedeny výstupy z koncového obvodu. Výstupy ochrany jsou vyvedeny na vnější svorky generátoru. Každý ze 6 výstupů má svoji ochranu podle následujícího zapojení.

Kromě ochrany se na této DPS také nachází synchronizační transformátor a transformátor se dvěma sekundáry pro izolované zdroje.



Obr. 28 Obvod ochrany koncového obvodu

Napětí zdroje koncového obvodu je 15 V. Při běžné funkci tranzistory koncového obvodu generují pulzy, které mají špičku 800 mA dlouhou 30 μ s a zbytek pulzu má 400 mA.

Návrh byl prováděn pro napětí mezi 36 V a 400 V efektivních, což odpovídá napětí transformátorů, které se ve cvičení používají. Výskyt zvýšeného střídavého napětí na výstupu je nebezpečný v obou polaritách. Při kladné se napětí rozloží mezi diody V1 a V2. Pokud bude napětí na V2 vyšší než napětí zdroje koncového obvodu 15 V, poteče do něj proud a může dojít k jeho zničení. Kvůli tomu je k V2 připojen paralelně odpor R2, kterým poteče proud a napětí bude dáno pouze úbytkem, který je malý. Bez ochrany by se napětí transformátoru přičetlo k napětí zdroje, což by byl pro MOSFETy nepřijatelný stav.

Při záporné polaritě se proud uzavře přes diody V1 a V2. Proud protéká velmi rychlou pojistkou s $I_N = 0,8$ A, která proud přeruší. V tomto případě je nejnebezpečnější stav při nízkém napětí, kdy může trvat delší dobu než pojistka vypne.

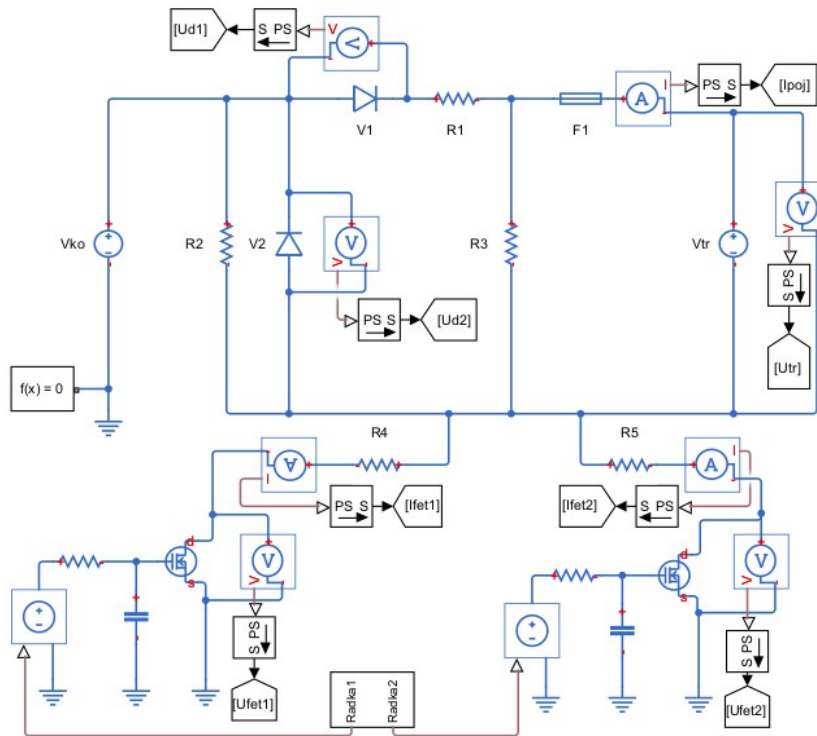
Odpor R1 omezuje proud při běžné funkci a R3 spojuje řídicí elektrodu s katodou.

7.2. Simulace

Ochrana byla simulována v Simulinku pomocí knihovny Simscape, kde se schéma ochrany doplnilo o zdroj a tranzistory koncového obvodu. Simulované schéma je na Obr. 29.

Kvůli změně schématu koncového obvodu bylo nutné změnit odpory R4 a R5, které jsou již na DPS koncového obvodu. Simulace se prováděla zejména kvůli ověření funkce zapojení a také bylo nutné získat efektivní hodnoty proudu protékající odpory R1, R4 a R5. Hodnota odporů je taková, že při běžné funkci je zajištěn proud 800 mA (špička) přes R4 a zbytek pulzu 400 mA přes R5. Avšak při připojeném napětí na výstupu jsou tyto proudy, i s ochranou, vyšší a než pojistka přeruší obvod, musí odpory vydržet ztrátový výkon. Odpor R4 je nejkritičtější, protože jako jediný má malé SMD pouzdro.

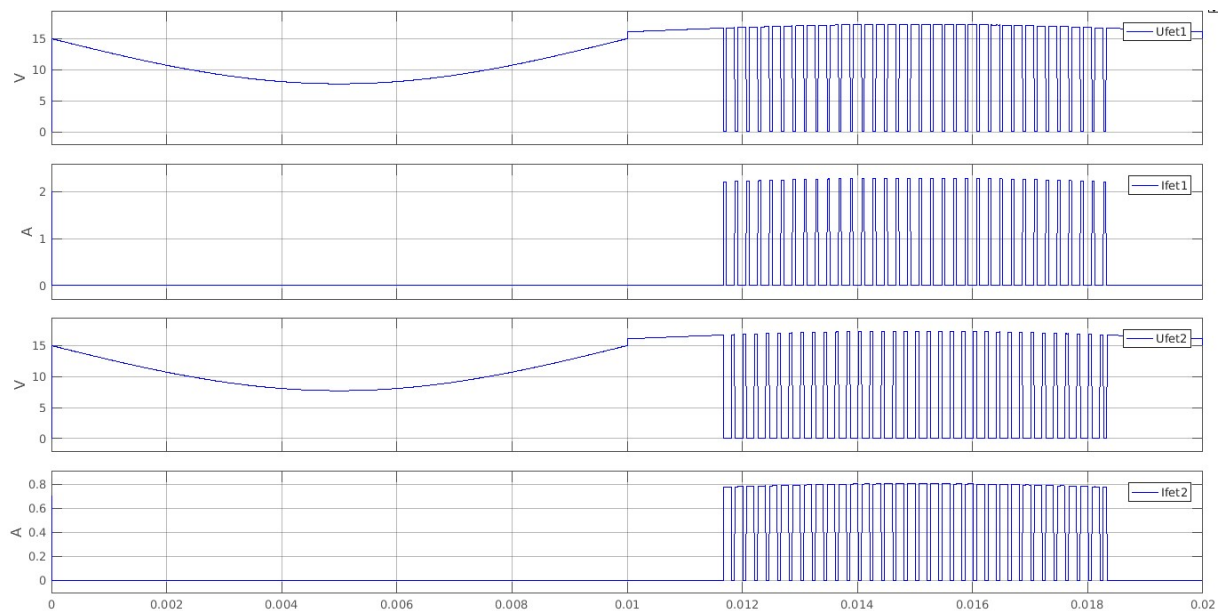
Nejméně příznivý stav je při nízkém napětí na výstupu, např. 36 V, kdy trvá déle, než pojistka proud přeruší. Na odporu R4 výkon roste se snižující se periodou řádky. Na R5 je naopak výkon nejvyšší při dlouhém impulzu. Podle výsledků simulace se určily hodnoty $R1 = 9,1 \Omega$, $R4 = 7,5 \Omega$ a $R5 = 21,5 \Omega$.



Obr. 29 Ochrana koncového obvodu - Simulink

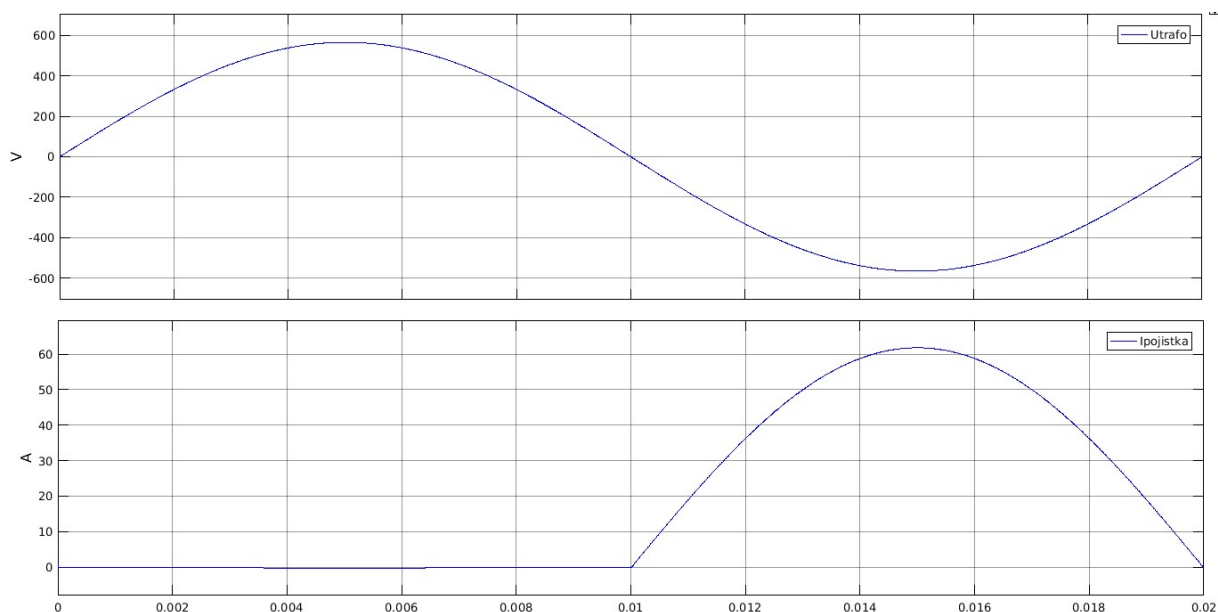
Kvůli velkému množství simulací přikládám pouze výsledek simulace jedné periody při napětí 400 V a při nejdelší možné řádce impulzů, která trvá 120°. Perioda řádky je 200 μ s.

Na následujících průbězích lze vidět, že napětí na tranzistorech (Ufet1 – špička 800 mA, Ufet2 – zbytek pulzu 400mA) je i při poruchovém stavu nízké. Proud tekoucí tranzistory je asi dvakrát vyšší než při správné funkci.



Obr. 30 Simulace při 400 V s řádkou impulzů - napětí a proud na tranzistorech

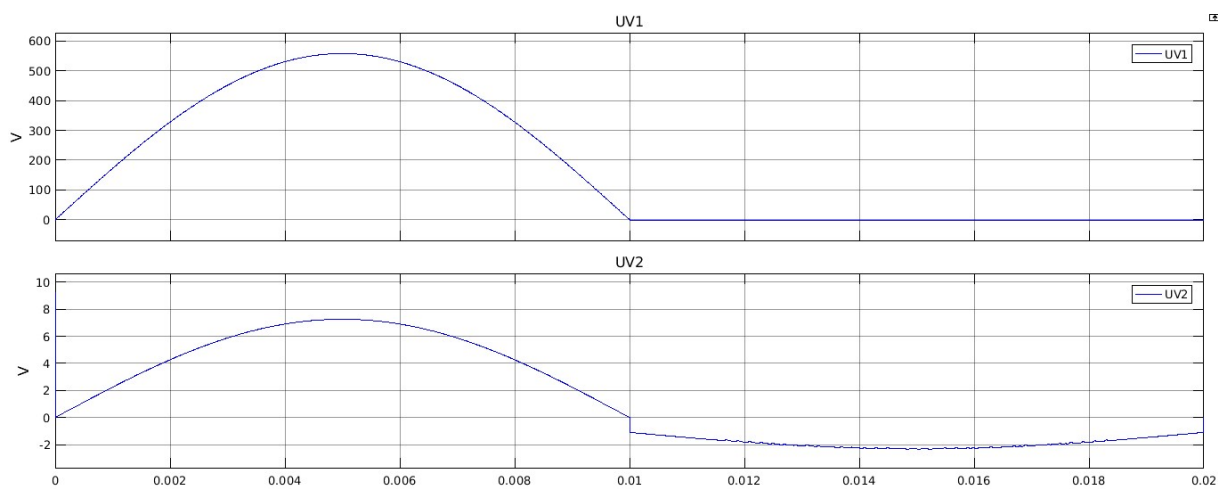
Efektivní hodnota proudu tekoucí pojistkou, na Obr. 31, je 31 A. Pro ochranu byla vybrána pojistka ESKA 520.116, která tento proud přeruší do 5 ms.



Obr. 31 Simulace při 400 V, s řádkou impulzů - výstupní napětí a proud

Při dolní mezi napětí 36 V je proud pojistkou několikanásobně nižší, ale trvá déle. Efektivní hodnota je 2,65 A a pojistka by se měla přepálit do 100 ms.

Následující dva průběhy ukazují rozložení napětí na diodách V1 a V2. Většina napětí, v kladné půlplně, je na sériové diodě V1, čímž je zdroj koncového obvodu ochráněn.



Obr. 32 Simulace při 400 V a s řádkou impulzů - rozložení napětí na diodách

7.3. Ověření funkce

Ochrana jednoho kanálu koncového obvodu se testovala připojením výstupu autotransformátoru na výstupní svorky generátoru přes nulový spínač. Takto je výstup transformátoru připojen v okamžik, kdy proud může protékat během celé následující záporné půlperiody. Při měření bylo sepnuté řízení střídavého měniče napětí s řádkou impulzů.

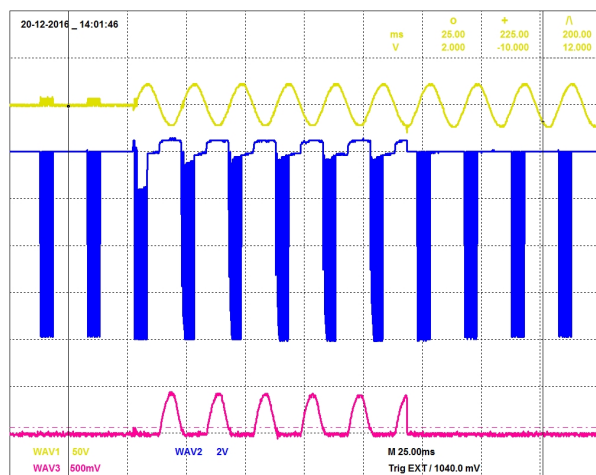
Záznamy, na Obr. 33 a Obr. 34, zobrazují působení ochrany při připojení efektivních hodnot napětí 35 V a 240 V. Snímané průběhy jsou následující:

CH1 – napětí na výstupu řídicích impulzů (napětí autotransformátoru)

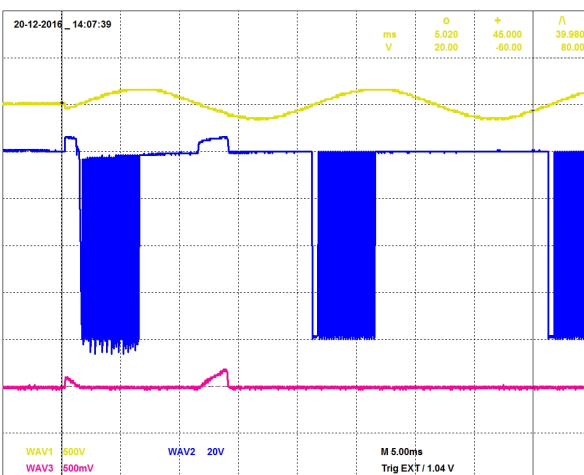
CH2 – napětí na MOSFETu

CH3 – výstupní proud

První případ je horší, protože kvůli malému proudu trvá odpojení pojistkou necelých 6 period. Efektivní hodnota proudu je menší než 3 A. V případě 240 V se připojení k transformátoru nestrefilo do průchodu nulou a obvod se přeruší pojistkou až v následující periodě. Maximální hodnota proudu je zde asi 14 A a přerušení pojistky je do 5 ms.



Obr. 33 Působení ochrany koncového obvodu po připojení napětí 35 V



Obr. 34 Působení ochrany koncového obvodu po připojení napětí 240 V

Dále je vidět, že tranzistory jsou chráněny také proti přepětí. Při průtoku zvýšeného proudu je zvýšení napětí tranzistoru dáno pouze úbytkem napětí na paralelní diodě. Pokles napětí na 0 V je dáno spínáním při řádce impulzů, která je kvůli vzorkování osciloskopu v některých místech nesprávně zobrazena.

8. Ověření funkce generátoru na měničích

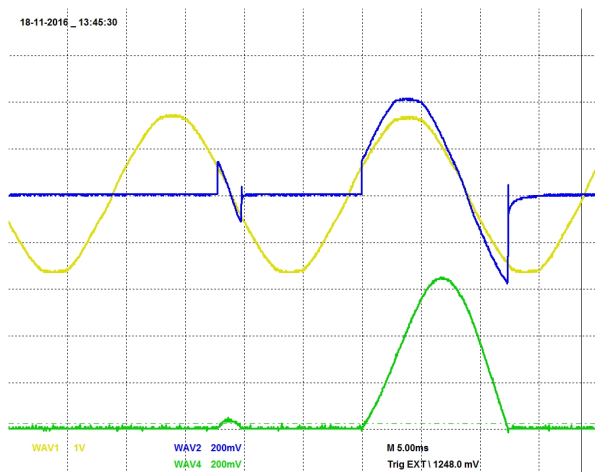
8.1. Základní měniče

Základní měniče, tzn. od jednopulzního usměrňovače až po třífázový můstek a jednofázový střídavý měnič napětí, byly již ověřeny v bakalářské práci [1]. Protože se ale jedná o úplně nový generátor s novým programovým vybavením, bylo také nutné ověřit správnou funkci řízení těchto měničů. Všechny tyto měniče lze řídit s jedním generátorem a není zde tedy ověřena funkce komunikace mezi více jednotkami.

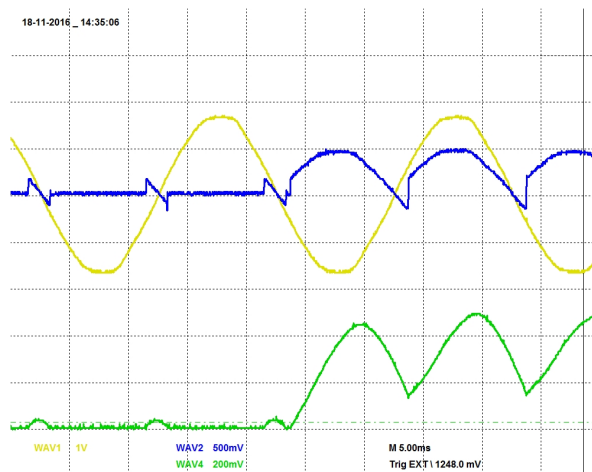
Následující snímky z osciloskopu ukazují průběhy na zátěži při skokových změnách řídicího úhlu. Všechny měniče byly napájeny 3f transformátorem s fázový napětím 60 V, kromě dvoupulzního, který byl připojen na transformátor s vyvedený středem s 60 V na polovině vinutí. Všechny měniče jsou zkoušeny na 50 Hz.

Zátěž je ve všech případech smíšená RL. Efektivní hodnota proudu byla vždy mezi 3 A a 4 A při plně otevřeném měniči. Chvilu zadání požadavku změny řídicího úhlu je vždy před posledním opakujícím se napětěvým impulzem, případně před posledním opakujícím se proudovým impulzem.

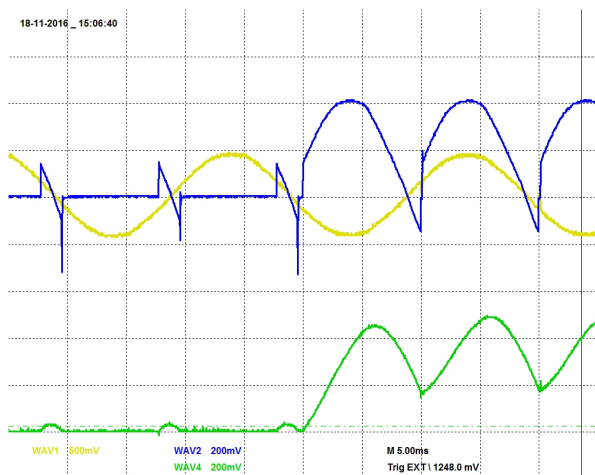
Měřené průběhy: **CH1** – vstupní fázové napětí, **CH2** – napětí na zátěži, **CH4** – proud v zátěži



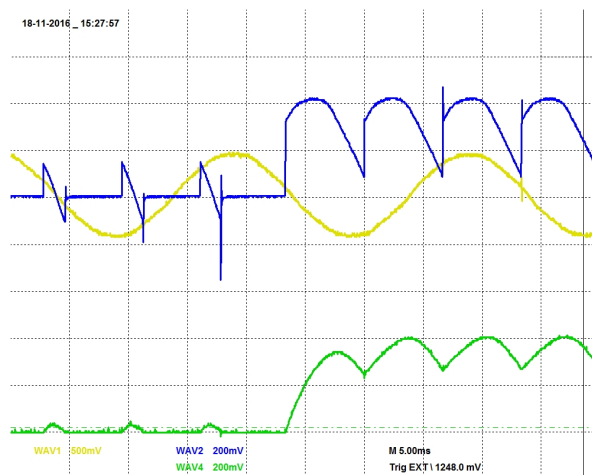
Obr. 35 Jednopolzní usměrňovač, skok úhlu α ze 160° na 20°



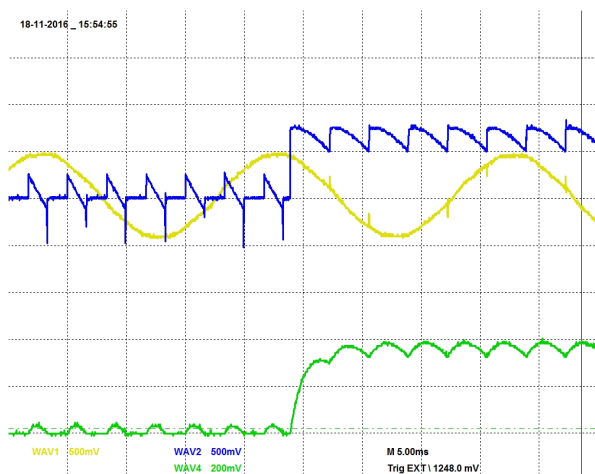
Obr. 36 Dvoupulzní uzlový usměrňovač, skok úhlu α ze 160° na 20°



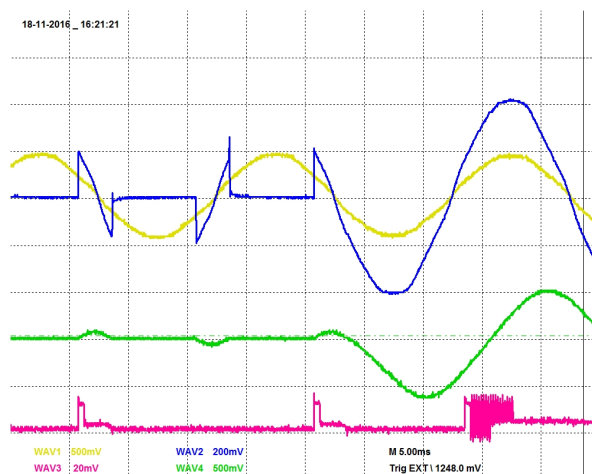
Obr. 37 Jednofázový můstkový usměrňovač, skok úhlu α ze 160° na 20°



Obr. 38 Třípulzní uzlový usměrňovač, skok úhlu α ze 130° na 20°



Obr. 39 Třífázový můstkový usměrňovač, skok úhlu α ze 100° na 20°



Obr. 40 Jednofázový střídavý měnič napětí, skok úhlu α ze 150° na 20°

Na Obr. 40 navíc: CH3 – napětí na tyristoru mezi G a K

Na snímku pro střídavý měnič napětí je průběh napětí na řídicí elektrodě jednoho tyristoru. V tomto případě je první impulz dlouhý 0,5 ms a zbytek řádky má frekvenci 5 kHz. Zbytek napětí je dán úbytkem mezi G a K, který je způsobený hlavním proudem mezi A a K.

8.2. Reverzační měniče

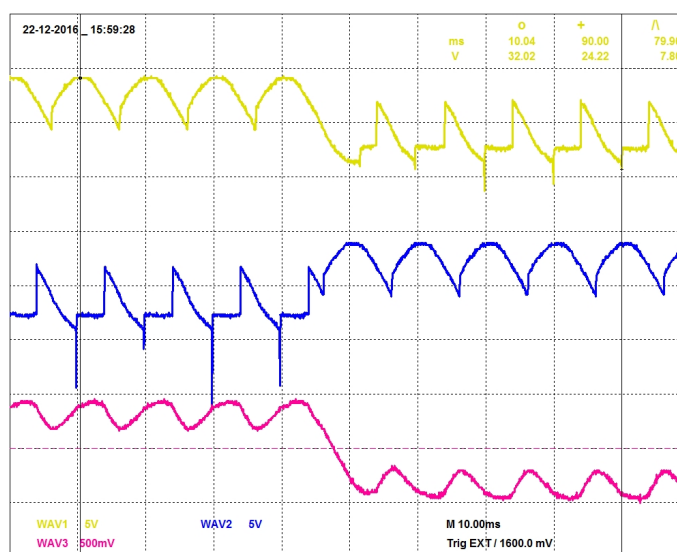
Z předchozích usměrňovačů umí generátor řídit reverzačně jednofázový můstek, trojpulzní usměrňovač a třífázový můstek. Pro řízení reverzačních usměrňovačů jsou propojeny dva generátory sériovou komunikací, kde Master řídí kladnou polaritu a Slave zápornou. Řízení těchto měničů je v generátoru zcela nové a výsledky budou popsány podrobněji. Záznamy jsou opět provedeny při skokových změnách úhlů, při kterých je nejlépe vidět správná funkce generátoru.

Všechny tyto měniče lze provozovat s jedním společným transformátorem (jako na Obr. 5), ale během měření se u všech reverzačních zapojení vyskytoval z nějakého důvodu mezifázový zkrat po dobu 1,5 ms, když byly alespoň trochu otevřeny oba měniče. Tento proud tekl mimo zátěž mezi oběma měniči a bylo možné ho utlumit zvýšením indukčnosti v okruhu. Reverzační měniče bylo pak možné řídit v celém rozsahu se zvýšeným úhlem součtu obou řídicích úhlu (například 190°). Nicméně takto by se měnič chovat neměl a přešlo se k zapojení, kde má každý měnič svůj transformátor. Kromě tlumivek byly v okruhu i vodní pojistky. V případě zapojení s jedním transformátorem se při větších skokových změnách téměř pokaždé přepálily kvůli velmi vysokému proudu v okruhu. Ve všech následujících případech je zátěž odporová.

První ověření bylo provedeno na jednofázovém můstku. Na Obr. 41 lze vidět přechod proudu zátěže z kladné do záporné polarity. Dále jsou zobrazeny napětí měniče kladné a záporné polarity. Podmínka součtu obou řídicích úhlů je zde 180°. Při změně řídicího úhlu kladného měniče z 20° na 160° dojde ke změně z 160° na 20° u záporného měniče.

Při skokových změnách mezi polaritami dochází u jednoho měniče k pozvolné změně napětí po sinusovce a u druhého skokově, což způsobuje dynamický okruhový proud, který bývá několikanásobně vyšší než statický. V záznamu je zachyceno více period.

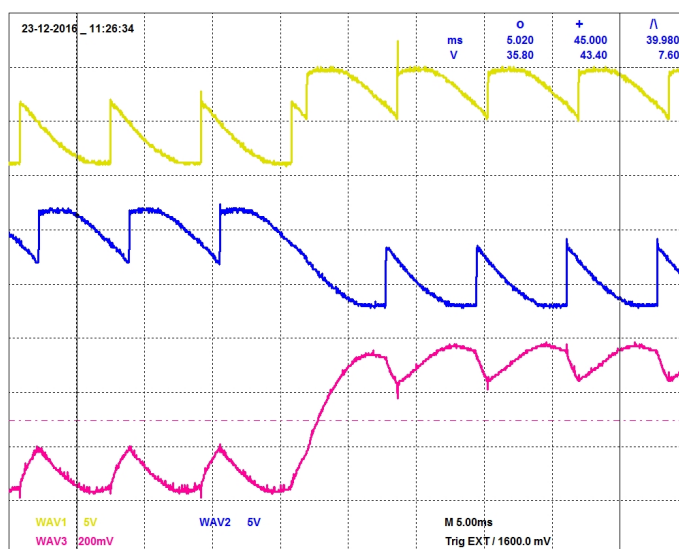
- CH1 – stejnosměrné napětí měniče kladné polarity,
- CH2 – stejnosměrné napětí měniče záporné polarity
- CH3 – proud v zátěži



Obr. 41 Reverzační jednofázový můstkový usměrňovač, skok řídicího úhlu z 20° na 160°

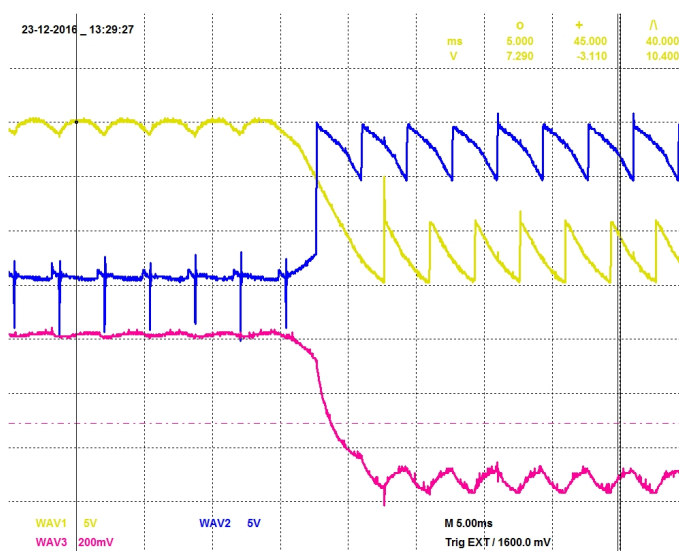
Trojpulzní uzlový usměrňovač v reverzačním zapojení byl testovaný znovu se dvěma transformátory. Zde je to ale nezbytné, protože měnič záporné polarity zde musí mít napětí posunuté o 180° . Druhý transformátor má proto uzel na opačném konci vinutí. Uzly obou transformátorů jsou propojeny a vyvedeny zátěž.

Skok je proveden ze záporné polarity na kladnou. Kvůli vysokému okružovému proudu při podmínce 180° , byl tento úhel zvýšen na 185° , čímž se okružový proud výrazně snížil. Skok na měnič záporné polarity je proto o 5° vyšší (ze 45° na 145°).



Obr. 42 Reverzační trojpulzní uzlový usměrňovač, skok řídicího úhlu ze 140° na 40°

Dále jsou uvedeny průběhy reverzačního třífázového můstku. U tohoto zapojení bylo nutné zvýšit podmínku součtu řídicích úhlu na 190° , jinak znovu docházelo k příliš vysokému okružovému proudu. Při změně z 10° na 140° u kladné polarity dojde ke změně ze 180° na 50° u záporné polarity.

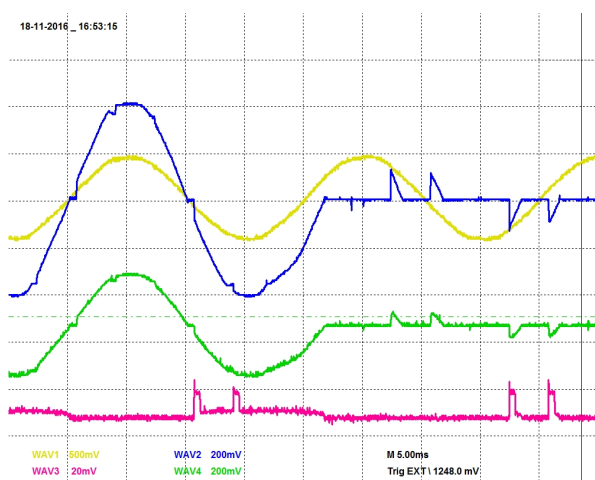


Obr. 43 Reverzační třífázový můstkový usměrňovač, skok řídicího úhlu z 10° na 140°

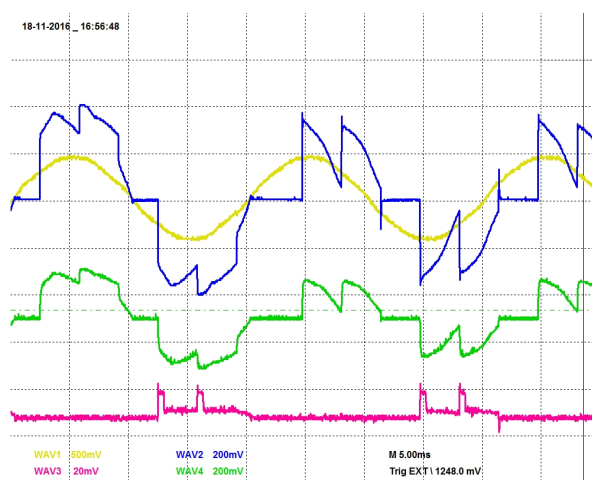
8.3. Třífázový střídavý měnič napětí

Tento měnič je řízený pouze jedním generátorem. Řízení tohoto měniče je v generátorů zcela nové a proto jsou výsledky znovu podrobnější. Nejdříve bylo řízení zkušeno pro odporovou zátěž. Jak bylo uvedeno v kapitole 2.2.4, řídicí signál je poměrně jednoduchý. Snímky z osciloskopu zobrazují náhlé změny řídicího úhlu α .

- CH1 – vstupní fázové napětí
- CH2 – napětí na zátěži jedné fáze
- CH3 – napětí na tyristoru mezi G a K
- CH4 – proud v zátěži jedné fáze



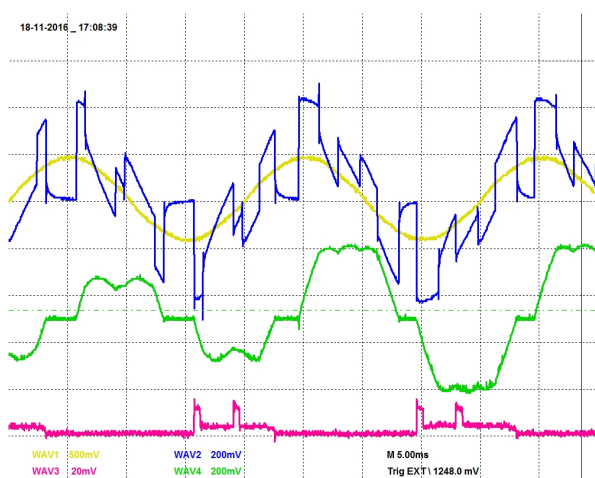
Obr. 44 Třífázový střídavý měnič napětí, R zátěž, skok úhlu α z 10° na 130°



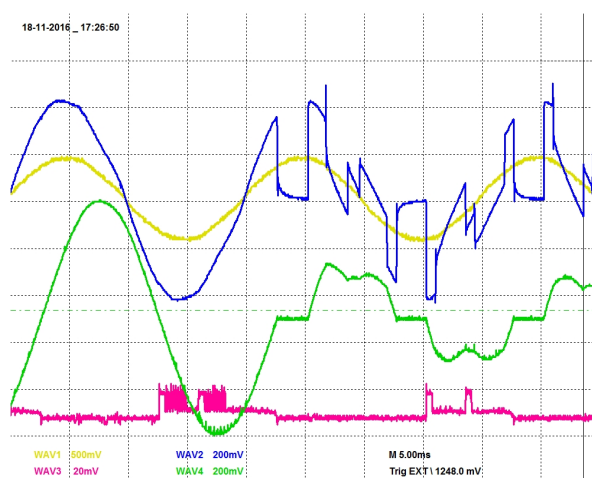
Obr. 45 Třífázový střídavý měnič napětí, R zátěž, skok úhlu α ze 40° na 80°

Na průběhu napětí při 40° lze vidět podobnost z teoretickým průběhem na Obr. 9, kde se střídá fázové napětí s polovinou sdruženého.

Další průběhy jsou pro RL zátěž. Přesné hodnoty odporu a indukčnosti nejsou známy. Bylo ale zjištěno, že hodnota kritického úhlu je 53° .

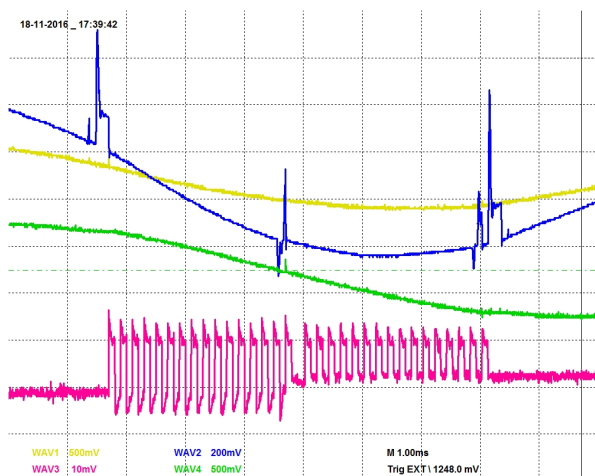


Obr. 46 Třífázový střídavý měnič napětí, RL zátěž, skok úhlu α ze 100° na 80°

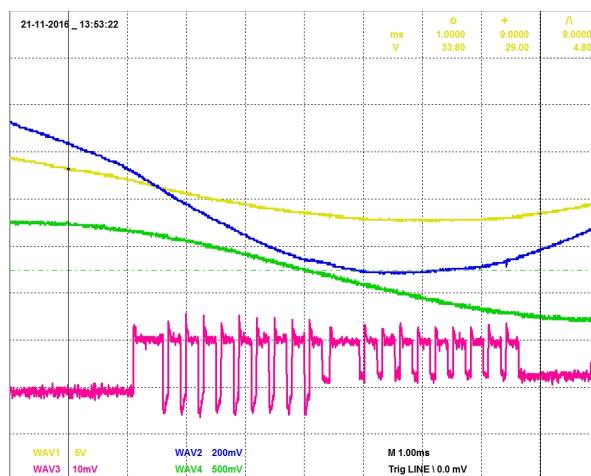


Obr. 47 Třífázový střídavý měnič napětí, RL zátěž, skok úhlu α z 50° na 100°

Průběhy se podobají teoretickým pro L zátěž z Obr. 11, avšak kvůli smíšené zátěži dochází k nesymetričnosti průběhu napětí. Při 80° jsou v průběhu proudu vidět 3 pulzy, které jsou typické po indukční zátěži. Při 50° lze již vidět generovanou řádku impulzů.



Obr. 48 Třífázový střídavý měnič napětí, detail řádky při $\alpha = 0^\circ$



Obr. 49 Třífázový střídavý měnič napětí, $\alpha = 0^\circ$, nižší frekvence a vyšší střída

Na Obr. 48 je přiblíženo napětí na tyristoru mezi G a K. Řídicí signál odpovídá tomu, který byl popsán v kapitole 2.2.4. Pro případ $\alpha = 0^\circ$ je celková délka obou částí řádky 120° . Řádka má frekvenci 5 kHz a kvůli krátkým pulzům se může stát, že některý tyristor nesepe během jednoho pulzu. To lze vidět na napětí zátěže v jedné fázi (modrý průběh). Kritický úhel je zde 53° , takže ke spínání dochází vždy u konce jedné části řádky. V tomto místě tedy vedou dva tyristory místo tří a napětí spadne na polovinu sdruženého napětí a po sepnutí se vrátí na fázovou hodnotu.

Spínání lze zlepšit zvýšením střidy řádky nebo lze problém úplně eliminovat nastavením dlouhého impulsu. Při správném spínání se v napětí nevyskytují propady. Na Obr. 47 se počáteční impuls přímo trefil do místa kritického úhlu. Na Obr. 49 je spínání zlepšeno zvýšením šířky prvního impulsu, snížením frekvence a zvýšením střidy řádky.

8.4. Dvanáctipulzní usměrňovač

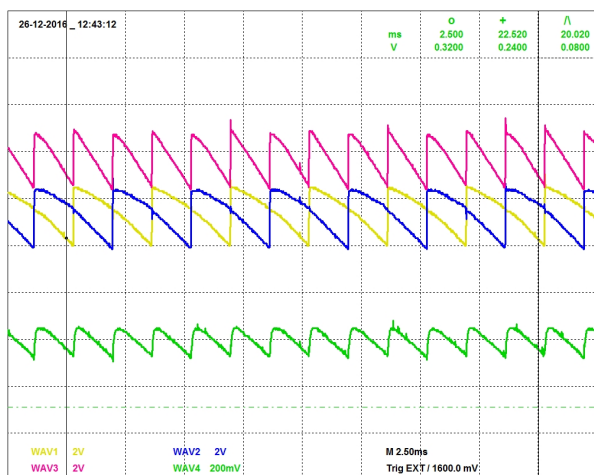
Jak bylo vysvětleno v kapitole 2.1, pro dvanáctipulzní usměrňovač byl použit transformátor, který při zapojení jednoho sekundáru do hvězdy a druhého do trojúhelníka má obě sdružené napětí shodné. Během měření byla vinutí zapojena jako Yy0 a Yd11. S tímto transformátorem byl vyzkoušen dvanáctipulzní usměrňovač v sériovém i paralelním zapojení. Nakonec byla ověřena funkce i na reverzačním zapojení, ale stejně jako v předchozích případech, i zde se vyskytoval problém se zapojením s jedním transformátorem.

8.4.1. Sériové zapojení

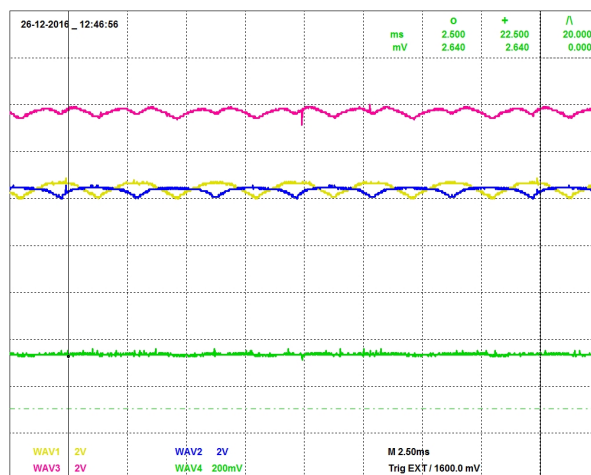
Snímky průběhů při sériovém zapojení jsou na Obr. 50 a Obr. 51. Jsou zde zobrazena napětí obou můstků a napětí na zátěži dané jejich součtem. Všechny tři průběhy napětí byly na osciloskopu srovnány tak, aby měly nulovou hodnotu na stejné hladině. Na snímcích je patrné, že i přesto, že je použitý transformátor navržen pro tento měnič, nejsou maxima napětí, ani tvary, zcela shodné. Výsledné napětí je proto trochu nesymetrické. Zvlnění napětí a proudu je, oproti předchozím

usměrňovačům, již velmi nízké. Jelikož je frekvence zvlnění napětí na zátěži 600 Hz, lze proud vyhladit poměrně nízkou hodnotou indukčnosti.

- CH1 – napětí na můstku - Yy0
- CH2 – napětí na můstku - Yd11
- CH3 – napětí na zátěži
- CH4 – proud v zátěži

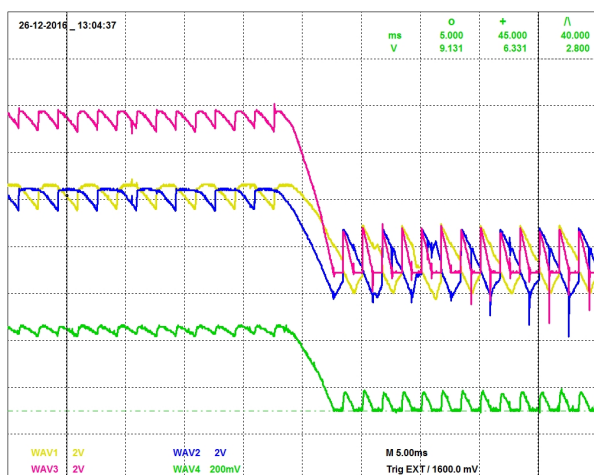


Obr. 50 Dvanáctipulzní usměrňovač, sériové zapojení, $\alpha = 50^\circ$, R zátěž

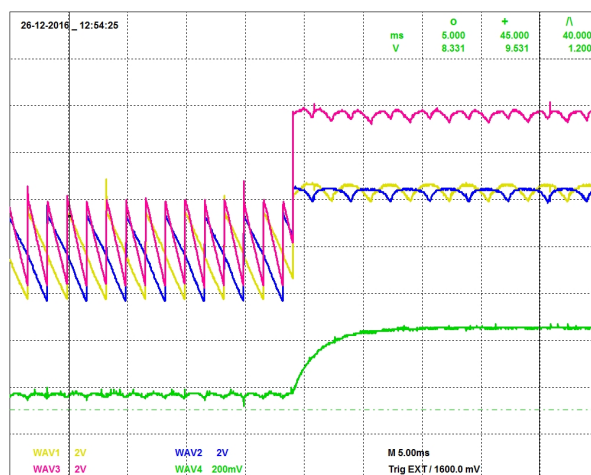


Obr. 51 Dvanáctipulzní usměrňovač, sériové zapojení, $\alpha = 0^\circ$, RL zátěž

Stejně jako u ostatních měničů, jsou také v tomto případě dále uvedeny náhlé změny řídicího úhlu. Před změnou i po ní, je na snímcích vidět alespoň jedna perioda. Při vyšším řídicím úhlu, kde je proud přerušovaný, je napětí obou můstků vzájemně ovlivňována v místech, kdy neteče proud. Proto je na Obr. 52 napětí v záporných hodnotách, aby byl výsledný součet napětí na zátěži nulový.



Obr. 52 Dvanáctipulzní usměrňovač, sériové zapojení, změna úhlu α z 20° na 95° , R zátěž



Obr. 53 Dvanáctipulzní usměrňovač, sériové zapojení, změna úhlu α z 85° na 10° , RL zátěž

8.4.2. Paralelní zapojení

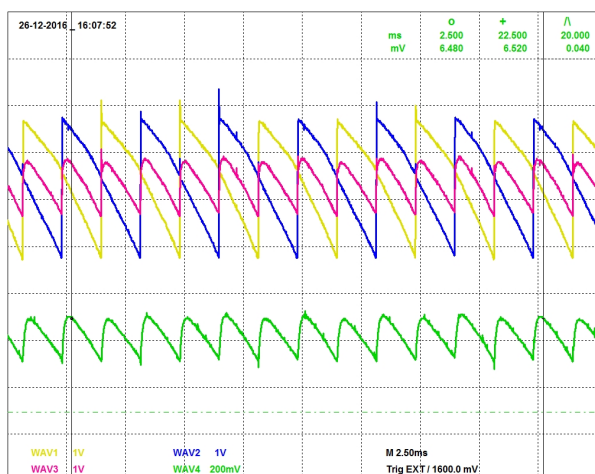
Měření na paralelním zapojení bylo komplikovanější kvůli nutnosti mezifázového transformátoru. Ten, jak bylo popsáno v kapitole 2.1.2, musí být navržen pro konkrétní měnič a zátěž. V laboratoři byly k dispozici tlumivky se společným jádrem pouze s několika hodnotami indukčnosti a proto nebylo možné oba můstky vyvážit. Rozdíl proudů byl při plném otevření asi 1,5 A, kdy můstkem připojeným na hvězdu teklo 3,5 A a můstkem připojeným na trojúhelník 2 A.

Nevyváženost proudů se projevila tím, že můstek, který byl méně zatížen, při nižším řídicím úhlu, kvůli vyšší indukčnosti, nespínal. Rozsah řídicího úhlu je při tomto měření značně omezen. Nicméně z hlediska průběhů napětí a proudu na zátěži nemá nevyváženost vliv. V paralelním zapojení je napětí na zátěži dáno průměrnou hodnotou napětí na obou můstcích.

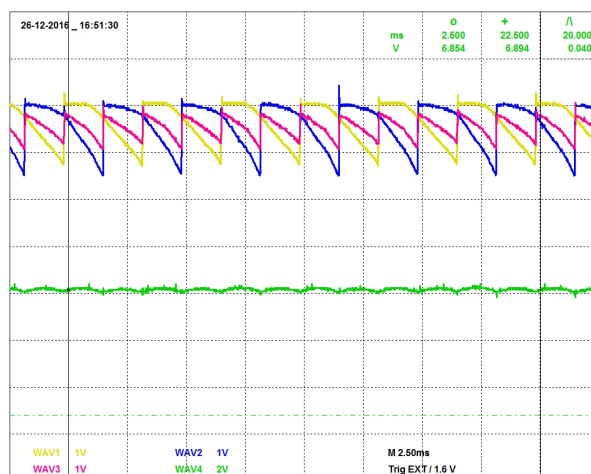
Na snímcích níže jsou zobrazeny průběhy všech napětí a proudu na zátěži pro jednu periodu. Nulová hodnota pro všechna napětí je znovu srovnána na stejnou hladinu. Výsledné napětí je dvanáctipulzní a celkový proud je dán součtem proudů z obou můstků. U tohoto měniče je více patrný rozdíl maxim sdružených napětí obou sekundárních vinutí, zejména při odporové zátěži. Pro úplnost, ještě uvádím průběhy při skokové změně řídicího úhlu.

CH1 – napětí na můstku – Yy0, CH2 – napětí na můstku – Yd11, CH3 – napětí na zátěži,

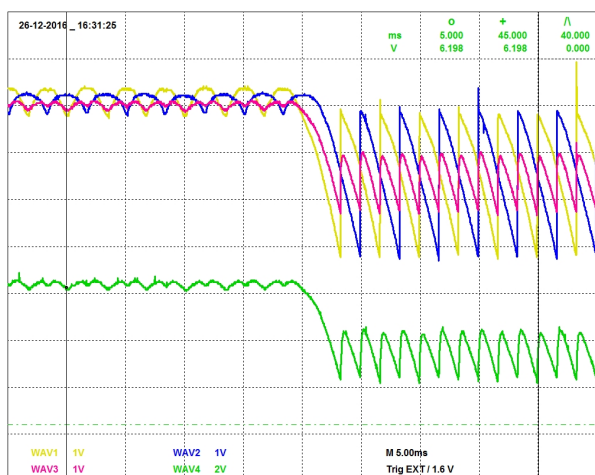
CH4 – proud v zátěži



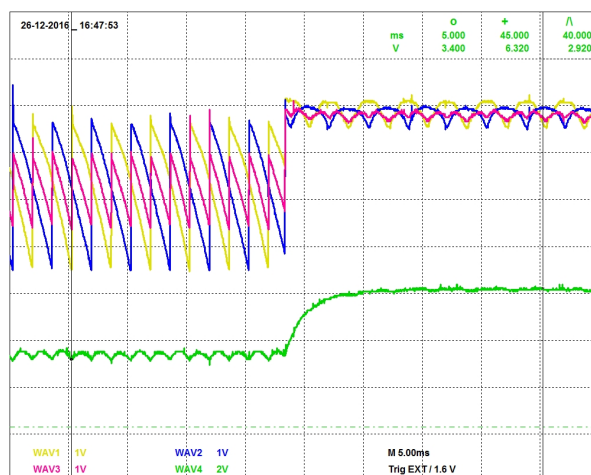
Obr. 54 Dvanáctipulzní usměrňovač, paralelní zapojení, $\alpha = 60^\circ$, R zátěž



Obr. 55 Dvanáctipulzní usměrňovač, paralelní zapojení, $\alpha = 30^\circ$, RL zátěž



Obr. 56 Dvanáctipulzní usměrňovač, paralelní zapojení, změna úhlu α z 5° na 65° , R zátěž



Obr. 57 Dvanáctipulzní usměrňovač, paralelní zapojení, změna úhlu α z 65° na 0° , RL zátěž

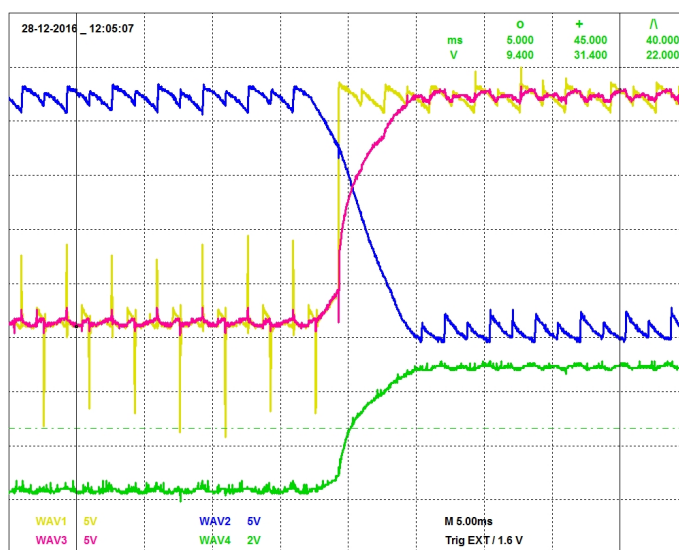
8.4.3. Reverzační zapojení

Toto zapojení je, jako jediné, řízeno čtyřmi generátory. Ani v tomto případě nebylo možné provozovat měnič s jedním transformátorem. Protože byl k dispozici pouze jeden transformátor pro dvanáctipulzní usměrňovač, musely se použít 4 stejné transformátory. Dva z nich se zapojily jako Yy0 a další dva jako Yd11. Sdružené napětí vinutí zapojené trojúhelníka je o $\sqrt{3}$ nižší, což se projevuje nesymetrií v napětí měničů obou polarit i v napětí na zátěži.

Všechna měření se prováděli s podmínkou řízení reverzačního měniče 190° pro snížení okružového proudu. Kvůli použitým transformátorům, zde bylo na zátěži při plném otevření 240 V. Při pozvolné změně řídicího úhlu byl statický okružový proud zanedbatelný, ale při vyšších skocích úhlu, i kvůli vysokému napětí, docházelo k vysokému dynamickému okružovému proudu. V okruhu byly zapojeny vodní pojistky. Při skocích přes 100° se téměř pokaždé přepálily, proto se musela zvýšit indukčnost v okruhu.

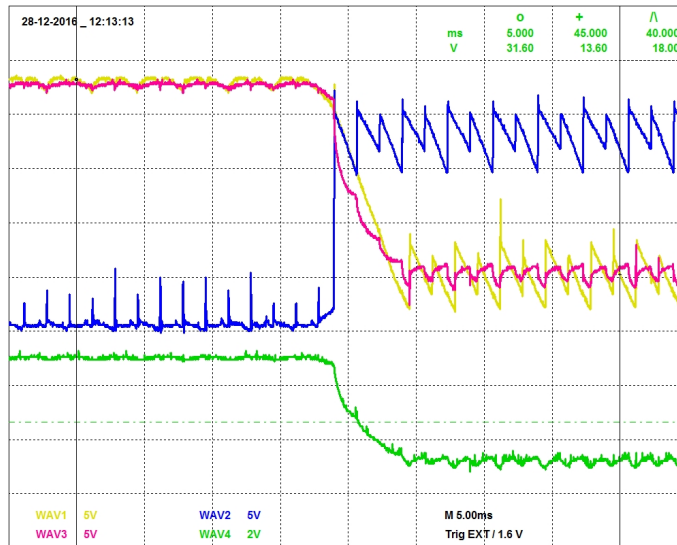
Na Obr. 58 je zachycen přechod ze záporné do kladné polarit. Při součtu úhlů 190° je přechod na měnič záporné polarit z 25° na 165° . V invertorovém chodu měniče kladné polarit se v napětí vyskytují špičky, které jsou pravděpodobně způsobeny horším spínáním tyristorů. Zde a i na dalších snímcích je vidět nesymetrie napěťových pulzů kvůli zmíněným rozdílům hodnot sdružených napětí.

- CH1 – napětí na měnič kladné polarit
- CH2 – napětí na měnič záporné polarit
- CH3 – napětí na zátěži
- CH4 – proud v zátěži



Obr. 58 Dvanáctipulzní usměrňovač, reverzační zapojení, změna úhlu α ze 165° na 25°

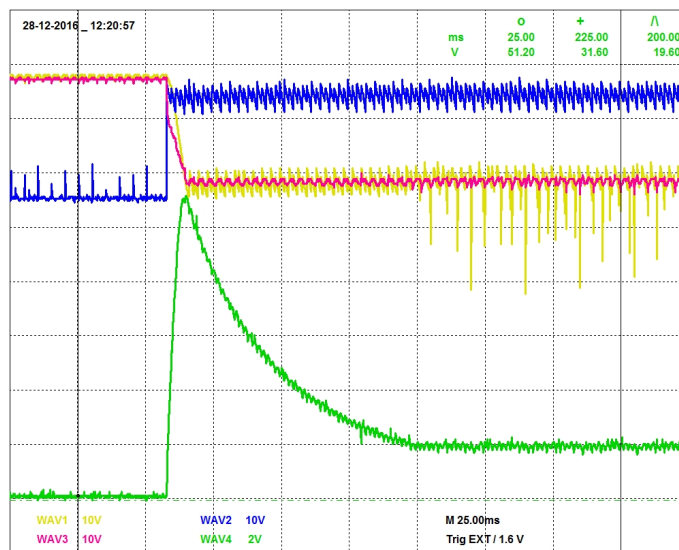
Přechod z kladné do záporné polarit je zobrazen dále. Podmínka řízení 190° je zachována a přechod záporné polarit je ze 180° na 60° .



Obr. 59 Dvanáctipulzní usměrňovač, reverzační zapojení, změna úhlu α z 10° na 130°

Nakonec je přiložen zachycený okruhový proudu při větší změně řídicího úhlu, z 10° na 140° . V tomto případě již byla výrazně zvýšena indukčnost v okruhu, ale i tak špička proudu dosahuje 11,5 A. Ustálení trvá téměř 100 ms. Takový proud byl, z hlediska zapůsobení vodních pojistek, již na hraně.

Na Obr. 60: CH4 – okruhový proud



Obr. 60 Dynamický okruhový proud při změně úhlu α z 10° na 140°

9. Kvalita synchronizace generátoru

9.1. Způsob porovnání kvality použitých metod synchronizace

Použité metody synchronizace, které byly vysvětleny v kapitole 3, nemají stejné vlastnosti a pro jejich porovnání je nutné zkoumat kvalitu výstupního napětí měniče. Při daném řídicím úhlu by napětí na zátěži mělo mít co nejkonstantnější střední hodnotu, u střídavých měničů napětí efektivní hodnotu. Napětí na zátěži je dáno řídicím úhlem a místo napětí lze tedy zkoumat rovnou řídicí impulsy. Ty by při daném úhlu α měly mít konstantní úhlovou „vzdálenost“ od průchodu synchronizačního napětí nulou.

Kvalitu synchronizací by bylo možné ověřit na osciloskopu, kde by se pomocí funkce persist zobrazil rozkmit řídicích impulsů při synchronizaci osciloskopu na síťové napětí. Problém je v tom, že samotné napětí, které má osciloskop jako referenci se deformuje a jeho nestálost by ovlivňovala trigger osciloskopu a tím i výsledky měření. Nepatrný vliv by mělo také vzorkování osciloskopu.

Přesnějšího měření lze dosáhnout velmi jednoduchou metodou přímo pomocí samotného generátoru. Při zvoleném způsobu synchronizace a nastaveném libovolném řídicím úhlu se v i -té periodě změří doba mezi průchodem synchronizačního napětí nulou a počátkem prvního řídicího pulzu v pořadí Δt_i . Tato hodnota nebude konstantní, protože se pulzy plánují na základě průchodu nulou předchozí periody. Změřená doba odpovídá skutečné hodnotě řídicího úhlu. Každou periodu se počítá průměr této hodnoty pomocí vztahu (26), kde n je v tomto případě rovno 32. Průměrná hodnota Δt_{AVi} je tedy za posledních 32 period a odpovídá nastavenému řídicímu úhlu. Odchylku skutečného od nastaveného řídicího úhlu v i -té periodě lze získat pomocí následujícího vztahu ve stupních

$$\Delta \alpha_i = \frac{\Delta t_{AVi} - \Delta t_i}{T} \cdot 360 \quad (33)$$

kde T je měřená perioda síťového napětí.

Tato hodnota udává stálost řídicích impulsů a je v kapitole 9.3 vyhodnocována pro jednotlivé způsoby synchronizace.

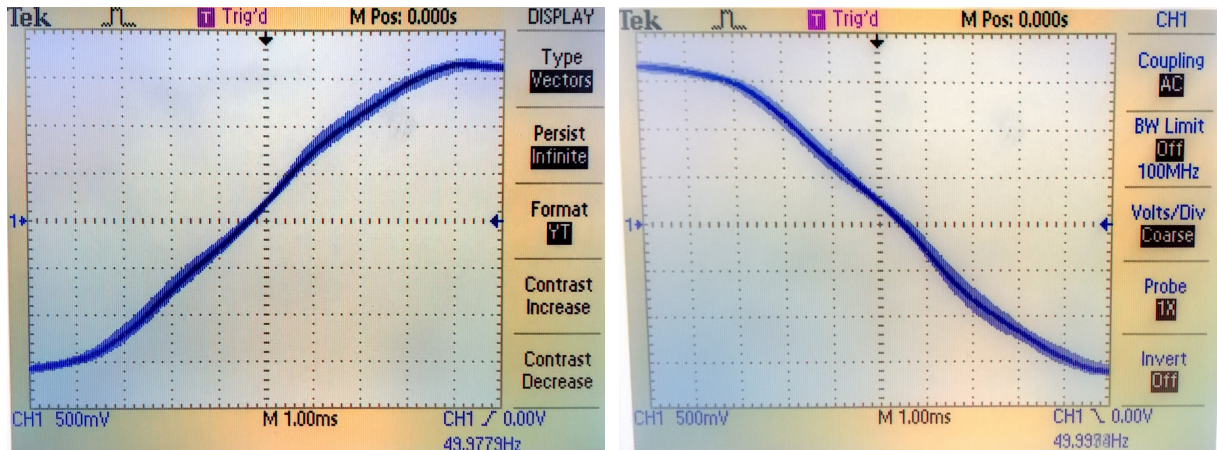
9.2. Rušení v síťovém napětí

Během návrhu synchronizace se vyskytl problém, který trval po celou dobu zpracovávání diplomové práce a je nutné ho zmínit.

Po zobrazení napětí sítě na osciloskopu jsou vidět poměrně velké zákmity v sinusovce. To lze vidět na následujícím snímku, kde je pomocí funkce persist vyznačen rozsah kmitání během doby 20 s.

Výskyt kmitání je nepravidelný, ale jakmile rušení začne, často se opakuje pravidelně. Příčina takového rušení by mohla být způsobena HDO nebo spouštěním veliké zátěže.

Takové zarušení napětí je pro synchronizaci nepříjemné, protože dochází k posuvu první harmonické. To je patrné z výsledků měření kvality synchronizace v následující kapitole. Nicméně, na tomto rušení je pozitivní, že je možné lépe porovnat jednotlivé způsoby synchronizace z hlediska odolnosti proti takovému rušení.



Obr. 61 Rozsah rušení v síťovém napětí po dobu 20 s

9.3. Výsledky

Ze všech říditelných měničů na tomto generátoru by největší zkreslení síťového napětí měl způsobovat třífázový střídavý měnič napětí s indukční zátěží, proto na tomto měnič byla synchronizace testována. Nicméně kvůli nízkému odebíranému proudu ze sítě a její tvrdosti nebylo žádné zkreslení viditelné.

Měřené hodnoty odchylky řídicího úhlu dané vztahem (33) se posílaly pomocí UARTu jednou za periodu síťového napětí do PC. Záznam se prováděl ve skutečném čase pro 2000 period (40 s) v případě rušení v síti a 1000 period (20 s) v klidovém stavu.

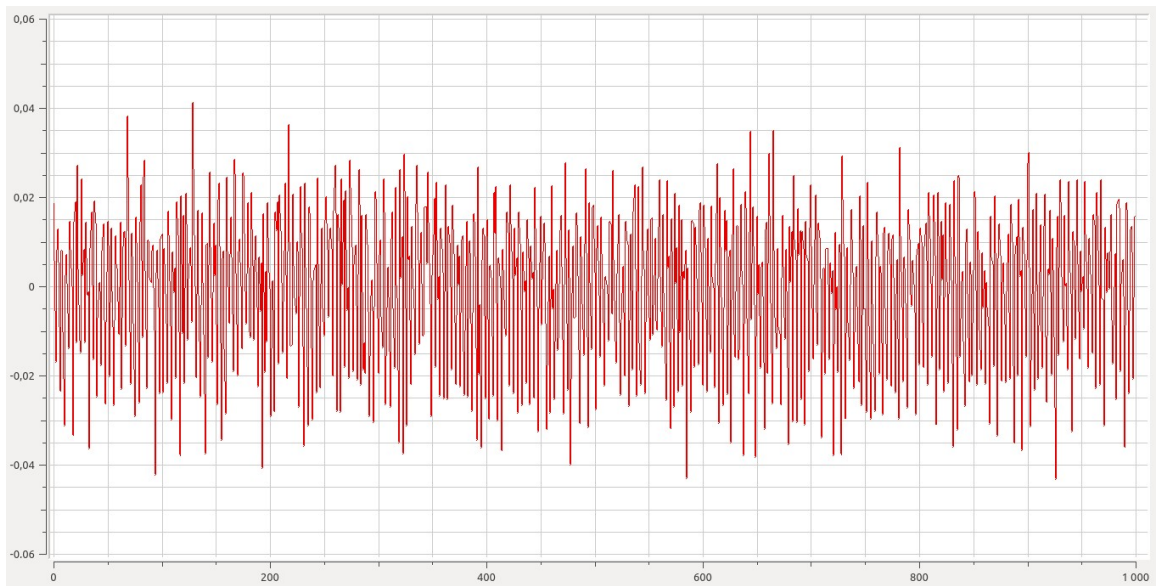
Dále se budou používat následující označení testovaných synchronizací:

- S1 – metoda diskretní rekurzivní Fourierovy transformace (RDFT) (kapitola 3.2.3)
- S2 – metoda výpočtu fázového posunu pomocí Fourierových koeficientů (kapitola 3.2.2)
- S3 – detekce průchodu nulou (kapitola 3.2.1)

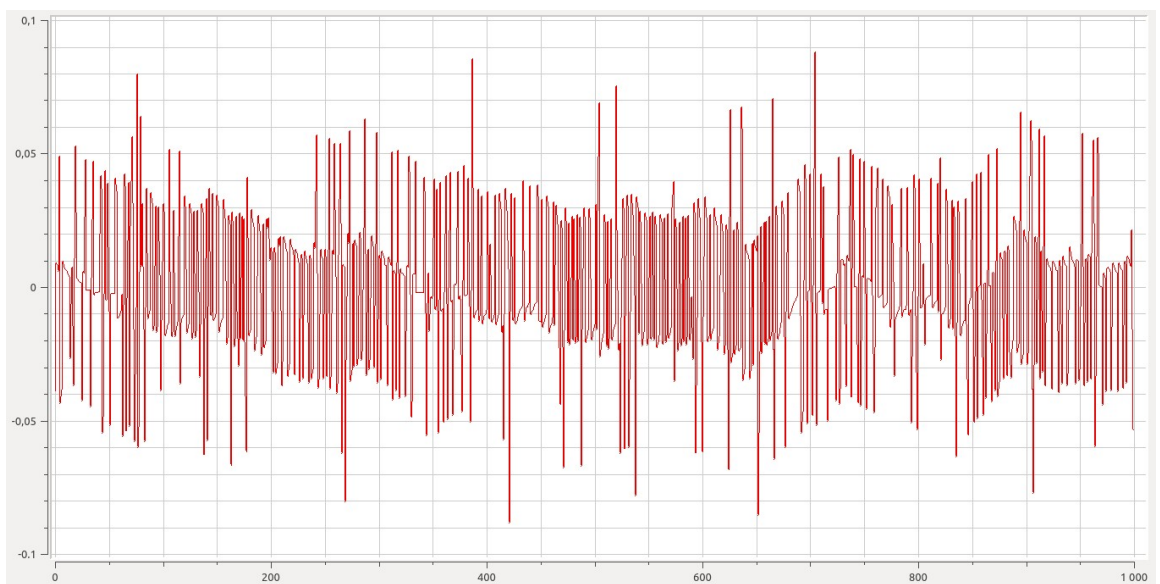
Během testování bylo zjištěno, že zařazení filtrování periody pomocí vztahu (26), s jakoukoliv časovou konstantou n , nemá na metody S1 a S2 žádný pozitivní vliv, ať už s nebo bez rušení v napětí sítě. Naopak v případě S3 se použitím filtru výrazně zlepšily vlastnosti této synchronizace. Bylo zjištěno, že pro tuto synchronizaci je optimální hodnota $n = 16$.

9.3.1. Bez rušení v síti

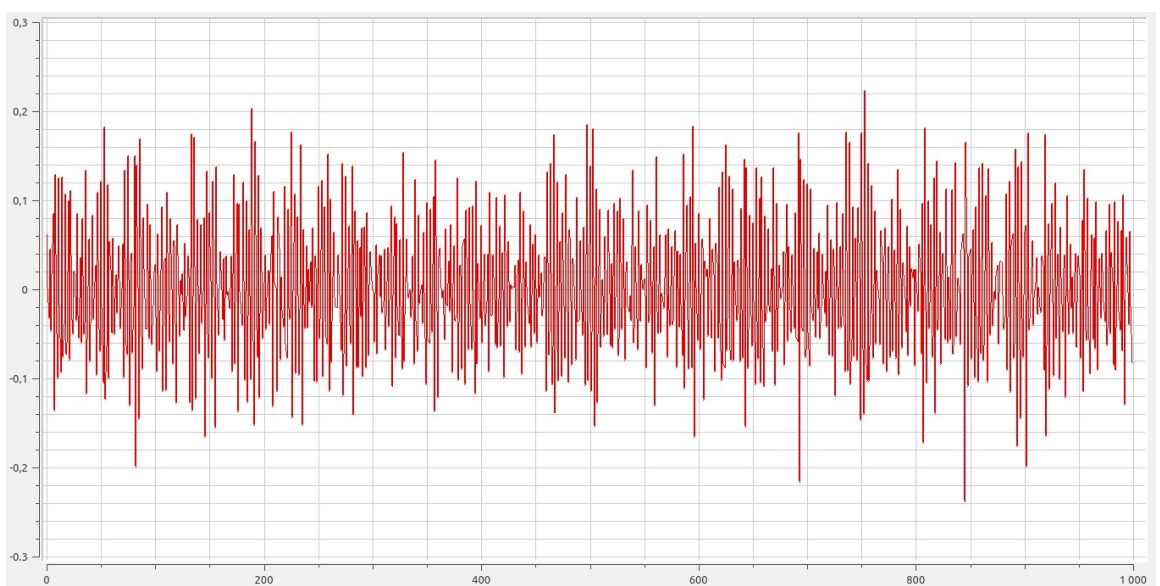
Na následujících záznamech je na vodorovné ose počet přijatých hodnot (počet period) a na svislé je odchylka řídicího úhlu od střední hodnoty ve stupních $\Delta\alpha_i$.



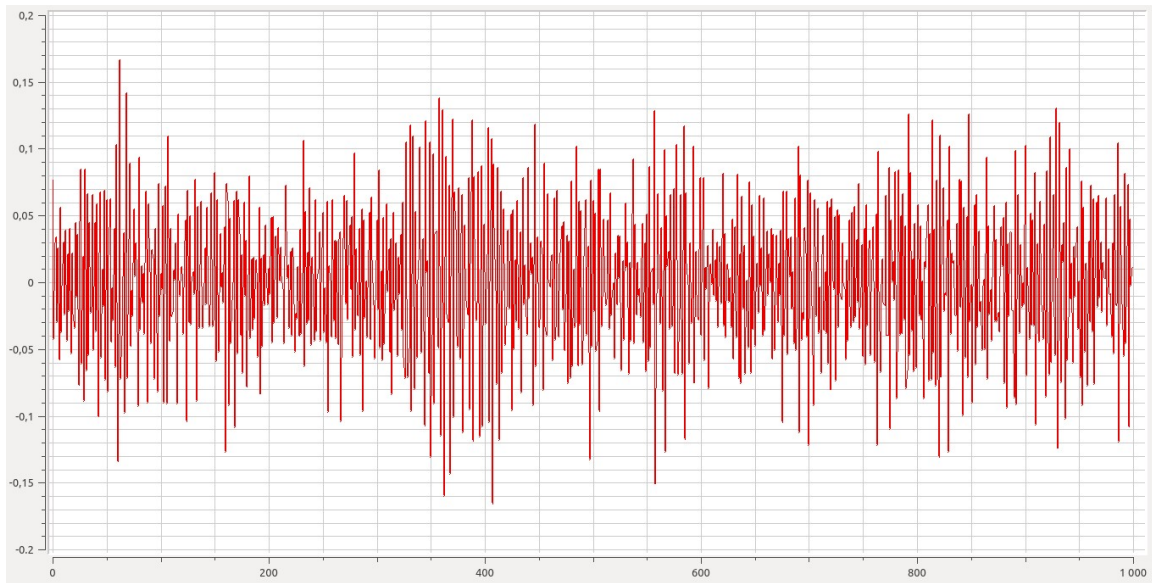
Obr. 62 Odchylka řídicího úhlu - S1, klidový stav



Obr. 63 Odchylka řídicího úhlu - S2, klidový stav



Obr. 64 Odchylka řídicího úhlu – S3, klidový stav, bez filtrace perrody



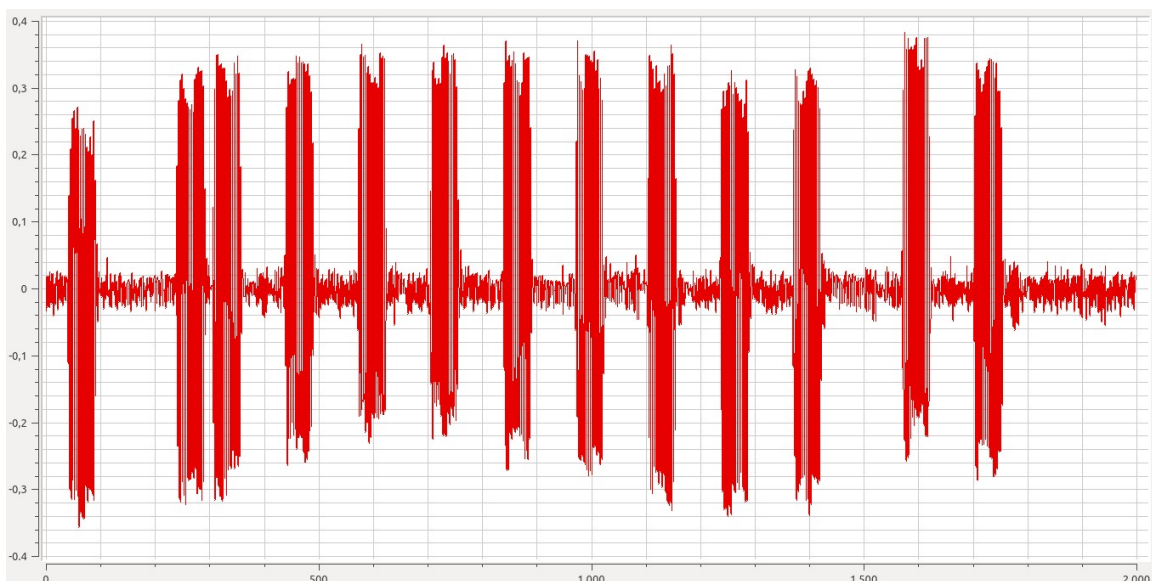
Obr. 65 Odchylka řídicího úhlu – S3, klidový stav, s filtrační periody

Z výsledků je patrné, že jednoznačně nejlepší je S1, kde je maximální rozkmit $\pm 0,04^\circ$. S2 má většinou maximální výchylku kolem $\pm 0,08^\circ$. U této synchronizace je výchylka velmi nepravidelná, na rozdíl od S1. Jednoznačně nejhorší je S3, při které maxima dosahují až $\pm 0,24^\circ$. Na poslední záznamu lze vidět, že zařazením filtru se maximální odchylka snížila na $\pm 0,17^\circ$.

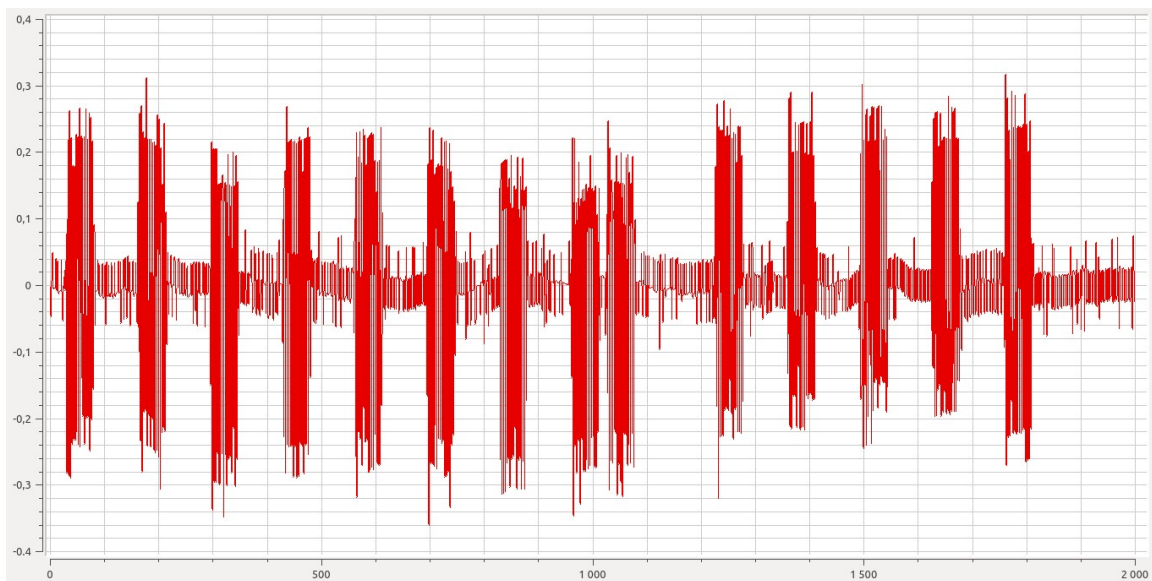
Je třeba zdůraznit, že S3 v tomto případě funguje díky tomu, že nedochází k vícenásobným průchodům napětí nulou. Výsledky je také nutné brát trochu s rezervou, protože odpovídají pouze aktuálnímu stavu síťového napětí během měření.

9.3.2. S rušením v síti

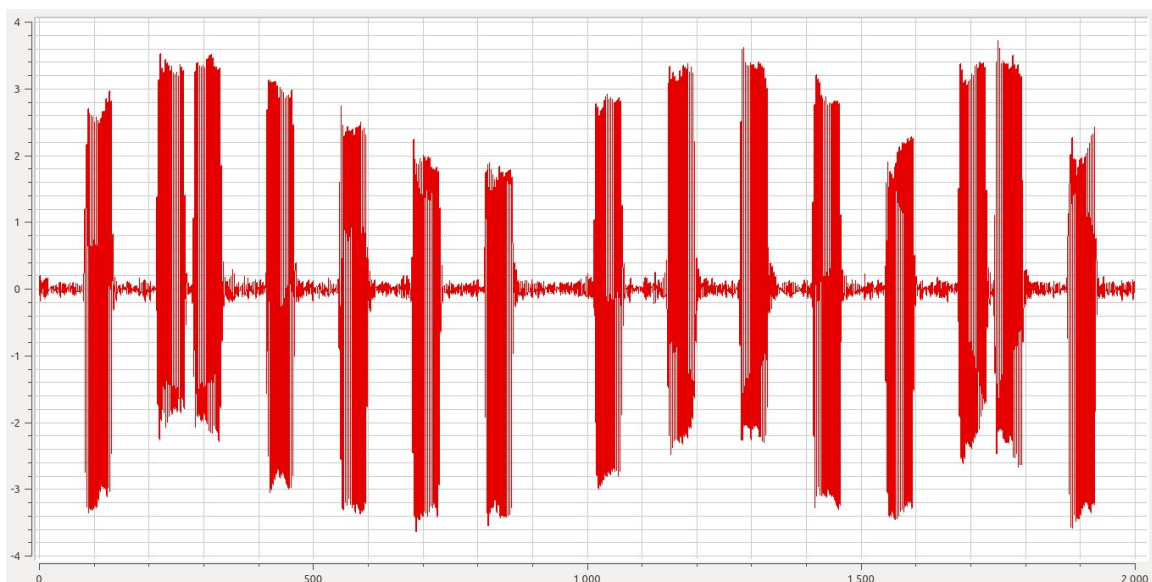
Následující záznamy byly pořízeny ve chvíli, kdy se síťové napětí chová podle Obr. 61. Délka záznamu je zde dvojnásobná oproti předchozím.



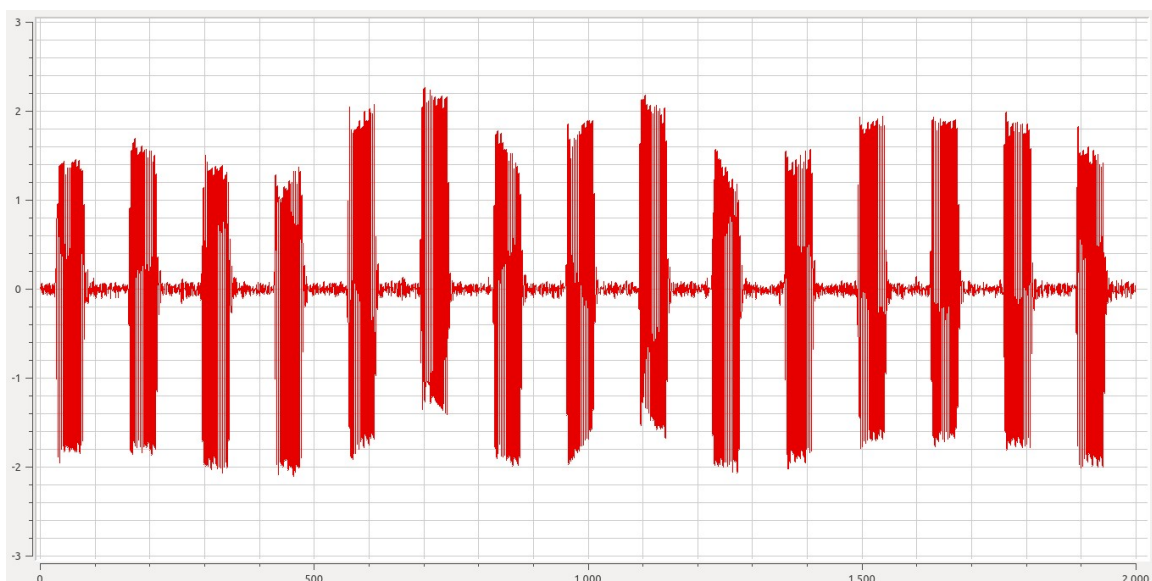
Obr. 66 Odchylka řídicího úhlu – S1, během rušení v síti



Obr. 67 Odchylka řídicího úhlu – S2, během rušení v síti



Obr. 68 Odchylka řídicího úhlu – S3, během rušení v síti, bez filtrace periody



Obr. 69 Odchylka řídicího úhlu – S3, během rušení v síti, s filtrací periody

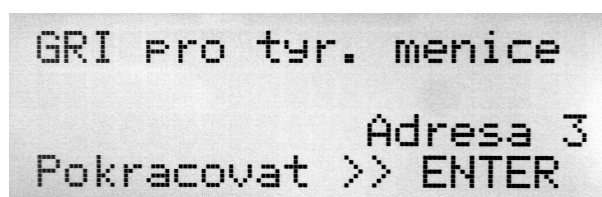
Na záznamech je vidět, že zákmity v napětí se projevují velikou změnou skutečného řídicího úhlu oproti střední hodnotě. Taková změna je již vidět i na osciloskopu při běžném měření na měničích, u kterých je i zřejmá změna výstupního napětí.

Zde je vidět velká výhoda prvních dvou synchronizací, které jsou schopny kmitání utlumit. Překvapivě zde S2 dopadla o něco lépe než S1. Maxima odchylek u S1 jsou kolem $\pm 0,35^\circ$ a u S2 to je $\pm 0,3^\circ$. Zdaleka nejhorší vlastnosti při rušení má S3, u které maxima dosahují $\pm 3,5^\circ$ bez filtru periody. Přidáním filtru se dosáhne zlepšení na $\pm 2^\circ$.

Závěr je takový, že v případě rušení v napětí sítě jsou téměř S1 a S2 srovnatelné. V klidovém stavu má nejlepší výsledky S1. Obě metody synchronizace by měly stejně tak odolávat i jiným druhům rušení, což ale nebylo možné ověřit. S3 je výhodná pouze kvůli své jednoduchosti. Pro měření na měničích S3 není vhodná a zde slouží spíše jen pro porovnání metod synchronizace. Filtrování periody popsané v kapitole 3.4 má smysl pouze pro S3. V případě S1 a S2 k žádnému zlepšení nedochází, kvůli tomu, že již samotné metody synchronizace, u kterých se pracuje s 1. harmonickou napětí, fungují jako filtry vstupního signálu.

10. Návod k použití

Po zapnutí generátoru se objeví úvodní obrazovka. Zobrazena je adresa generátoru pro sériovou komunikaci. Pokračovat lze klávesou ENTER, čímž se přejde k výběru měniče.



```
GRI pro tyr. menice
                               Adresa 3
Pokracovat >> ENTER
```

Obr. 70 Úvodní obrazovka

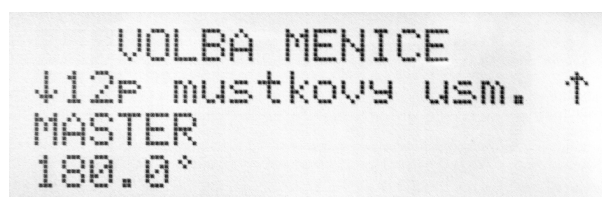
Menu je rozděleno na dvě sekce:

F1 – Výběr měniče

F2 – Nastavení generátoru

10.1. Výběr měniče

V menu výběru měniče lze pomocí šipek vybrat měnič. Tlačítkem START/STOP se spustí řízení. V levém dolním rohu se nachází řídicí úhel, se kterým se měnič spustí. Ten lze změnit nastavením maximálního řídicího úhlu. Na 3. řádce je označen MASTER pouze po jeho nastavení, v jiném případě je řádka prázdná. Seznam měničů a podmínky pro jejich spuštění jsou uvedeny v Tab. 3.



```
VOLBA MENICE
↓12P mustkovy usm. ↑
MASTER
180.0°
```

Obr. 71 Menu výběru měniče

Název měniče	Sériová komunikace	Počet jednotek Slave	Typ měniče při propojení
Jednopulzní usměřovač	NE	x	x
Dvoupulzní uzlový usměřovač	NE	x	x
Jednofázový můstkový usměřovač	ANO	1	reverzační
Trojpulzní uzlový usměřovač	ANO	1	reverzační
Třífázový můstkový usměřovač	ANO	1	reverzační
Dvanáctipulzní můstkový usměřovač	ANO	1 / 3	nereverzační / reverzační
Jednofázový střídavý měnič napětí	NE	x	x
Třífázový střídavý měnič napětí – zátěž R	NE	x	x
Třífázový střídavý měnič napětí – zátěž L	NE	x	x

Tab. 3 Možnosti volby měniče

10.2. Nastavení generátoru

Při sepnutí generátoru se automaticky obnoví poslední uložené nastavení generátoru z EEPROM. Každá změna v menu nastavení se po potvrzení okamžitě zapíše do EEPROM. Možnosti nastavení, výchozí hodnoty a jejich rozsah jsou shrnuty v Tab. 4.

Do nastavení generátoru se přechází klávesou F2. Nastavení se prochází šipkami a klávesou ENTER se přejde ke změně nastavení. Změna se provádí krátkým nebo dlouhým (pouze u většího rozsahu hodnot) stiskem šipek. Při potvrzení ENTERem je hodnota nastavena a zapsána do EEPROM a dojde k návratu do výběru nastavení.

Volba nastavení	Výchozí hodnota	Rozsah nastavení	Poznámka
Dolní mez α	0°	0° - α_{MAX}	vliv na všechny měniče
Horní mez α	180°	α_{MIN} - 180°	
Skoková změna α – nižší	0°	0° - α_{SMAX}	
Skoková změna α – vyšší	180°	α_{SMIN} - 180°	
Šířka spínacího pulzu	0,5 ms	0,05 ms – 0,5 ms	vliv na střídavé měniče napětí
Perioda řádky	0,2 ms	0,2 ms – 0,5 ms	
Střída řádky	0,5	0,3 – 0,7	
Řádka / Impuls - 3f stř. měnič. napětí	Impuls	Řádka / Impuls	pouze 3f střídavý měnič napětí (L zátěž)
Podmínka řízení - reverzační měniče	180°	180° - 210°	pouze reverzační měniče
Synchronizační fáze	Fáze A	A / B / C	posun: A 0° / B -120° / C +120°
Zapojení transformátoru	Hvězda	Hvězda / Trojúhelník	posun: Hvězda 0° / Trojúhelník -30°
Způsob synchronizace	1	1 / 2 / 3	x
Podsvícení LCD - intenzita	0%	0% - 100%	x
MASTER / SLAVE	SLAVE	MASTER / SLAVE	x
Výchozí nastavení	x	x	Po potvrzení se zapíše do EEPROM

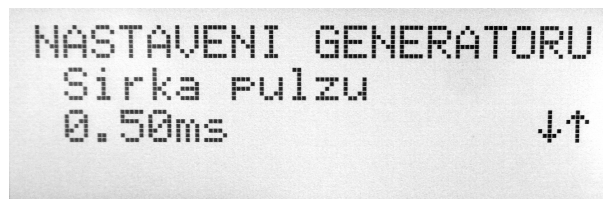
Tab. 4 Možnosti nastavení generátoru

Jako jediné nastavení se volba MASTER / SLAVE nezapisuje do EEPROM. Po zapnutí je generátor vždy nastaven jako SLAVE.

Při přepsání nastavení výchozími hodnotami je nutné potvrzení klávesou START. ENTER zde slouží pouze k návratu do nabídky nastavení.

Způsoby synchronizace jsou následující:

- Synchronizace 1 – Rozklad napětí na 1. harmonickou pomocí rekurzivní diskrétní Fourierovy transformace (RDFT)
- Synchronizace 2 – Výpočet fázového posunu 1. harmonické pomocí Fourierových koeficientů
- Synchronizace 3 – detekce průchodu napětí nulou – nedoporučuje se – nižší odolnost proti rušení v síti



Obr. 72 Menu nastavení generátoru

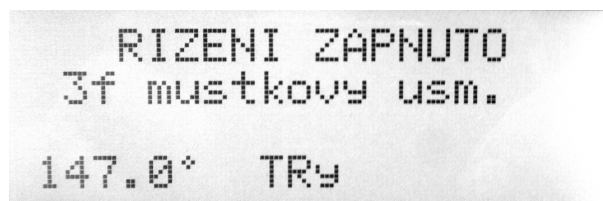
10.3. Spuštění řízení

Podle Tab. 3 lze rozlišovat 3 způsoby spuštění a chodu generátoru – samostatný generátor bez propojení, s komunikací jako MASTER (dále M) nebo jako SLAVE (dále S). Vypnuté řízení je signalizováno zelenou LED na předním panelu. Po zapnutí řízení se barva změní na červenou.

10.3.1. Bez sériové komunikace

Řízení měniče jedním generátorem je podmíněno nastavením SLAVE (výchozí po zapnutí generátoru) a výběrem měniče podle Tab. 3. Spustit lze vše kromě dvanáctipulzního usměrňovače. Po skončení řízení se opětovným stiskem START/STOP přejde zpět do menu F1.

Na displeji je zobrazen řízený měnič, nastavený řídicí úhel a zapojení sekundárního vinutí transformátoru TRy – hvězda nebo TRd – trojúhelník.



Obr. 73 Obrazovka řízení jedním generátorem

10.3.2. Se sériovou komunikací

Nejdříve je nutné určit počet generátorů pro řízení daného měniče podle Tab. 3, tzn. celkem 2 nebo 4 generátory. Dále se vytvoří sběrnice propojením jednotek přes zadní D-Sub konektory. Jednotky v koncích sběrnice musí být zakončeny konektorem se zakončovacími a upínacími odpory pro RS485.

Na sběrnici lze zvolit M na libovolném generátoru. Pokud je zvoleno více M, generátor, který spouští řízení (jako jeden z M), ostatní M automaticky přepne na S.

Pokud je při spuštění řízení daného měniče detekován u M nesprávný počet S na sběrnici, jedná se o chybový stav.

Pro sepnutí řízení měniče musí být všechny připojené jednotky v menu výběru měniče F1, jinak M na sběrnici nedetekuje připojený S a celkový počet S nebude odpovídat řízení zvoleného měniče, čímž dojde k chybě.

Pozice generátoru v celém zapojení je v případě 2 jednotek dána volbou M / S. Jednotky, v takovém případě, mají v měniči následující pozici.

Reverzační měniče, podle polaritu:

- M – kladná polarita
- S – záporná polarita

Dvanáctipulzní usměrňovač, podle zapojení sekundárního vinutí:

- M – Hvězda / Trojúhelník – zvolí se v nastavení M
- S – Trojúhelník / Hvězda (vždy naopak než u M) – nezáleží na nastavení S

V případě zapojení 4 jednotek (1 M a 3 S), lze řídit pouze reverzační dvanáctipulzní usměrňovač. V takovém případě je nutné rozmístit generátory podle adresy (na úvodní obrazovce). Jednotka M si při spuštění řízení seřadí jednotky S podle adresy vzestupně: S1, S2 a S3. Na adrese M nezáleží.

Pozice jednotek ve dvanáctipulzním reverzačním usměrňovači je následující

- M – kladná polarita; Hvězda / Trojúhelník – zvolí se v nastavení M
- S1 – záporná polarita; Hvězda / Trojúhelník (stejně jako u M)
- S2 - kladná polarita; Trojúhelník / Hvězda (naopak než u M)
- S3 - záporná polarita; Trojúhelník / Hvězda (naopak než u M)

Ostatní nastavení jednotek S během řízení, mimo zmíněných výše, jsou dána vždy nastavením jednotky M. Po vypnutí řízení se nastavení S vrátí do původního stavu. Nastavení přebrané připojenými S od M během spuštěného řízení je následující:

- Šířka řídicího pulzu
- Fáze pro synchronizaci
- Zapojení vinutí transformátoru
- Horní a dolní mez řídicího úhlu

Vypnutí řízení může provést pouze M stisknutím START/STOP. Ovládání u S je blokováno.

Na Obr. 74, jsou obrazovky všech generátorů při řízení reverzačního dvanáctipulzního usměrňovače. První dvě řádky jsou shodné s řízením jedním generátorem.

Na 3. řádku jsou následující informace:

- MASTER / SLAVE
- M: Počet připojených jednotek S – 1S / 3S
- S: Číslo jednotky S (1 až 3)
- Zapojení vinutí transformátoru - TRy / TRd (hvězda / trojúhelník)
- Polarita měniče v reverzačním zapojení – REV+ / REV-, pokud se řídí nereverzační měnič, není tato informace zobrazena



Obr. 74 Obrazovky MASTER a SLAVE při řízení se sériovou komunikací

Na obrazovce M jsou při řízení zobrazeny řídicí úhly měničů obou polarit – napravo kladná a nalevo záporná. Na obrazovce S je zobrazen pouze řídicí úhel odpovídající polaritě měniče, který S řídí.

10.4. Ovládání generátoru

10.4.1. Synchronizace osciloskopu

Na předním panelu generátoru se nachází BNC konektor, který slouží k synchronizaci osciloskopu. Synchronizační pulz se vyšle vždy na začátku každé periody. Nepřetržitá synchronizace funguje při vypnutém řízení i po jeho zapnutí. Stisknutím F2 se synchronizace zastaví a synchronizační pulz se vygeneruje při jakékoliv změně řídicího úhlu. Tato funkce umožňuje zachycení průběhů na osciloskopu při skokové změně řídicího úhlu. Pro správnou funkci musí mít osciloskop nastavený manuální trigger.

Po stisknutí F1 se synchronizace vrátí do původního stavu. Při zapnuté funkci F1 jsou šipky blokovány.

10.4.2. Řídicí úhel

Otáčením hřídele enkodéru dochází ke změně řídicího úhlu. Stisknutím tlačítka enkodéru se mění citlivost změny řídicího úhlu – po stupních nebo desetínách stupně. Změna je možná pouze v nastavených mezích řídicího úhlu.

10.4.3. MASTER a SLAVE

V případě sériové komunikace mají jednotky S blokováno veškeré ovládání. Ovládání všech jednotek najednou se provádí u M. Všechny jednotky mají aktivní trvalou synchronizaci osciloskopu (funkce F1). Avšak, funkci F2 je možné nastavit pouze u M.

V případě reverzačních měničů se na začátku řízení snižuje řídicí úhel měniče v kladné nebo záporné polaritě až do splnění podmínky součtu úhlů. Výchozí je nastavování úhlu u M. Přepínání mezi změnou řídicího úhlu u M nebo S se provádí klávesou ENTER. Po splnění podmínky řízení reverzačního měniče ENTER přestane reagovat a změnu řídicího úhlu všech jednotek přebere M.

10.5. Chybový stav generátoru

Během chodu generátoru se mohou vyskytnout různé chyby, které by mohly ohrozit bezpečný chod měniče. Důvody mohou být různé: chyba v software, náhodné chyby – Watchdog Timer, chyby v sériové komunikaci apod. Při takovém stavu přejde program do chybového režimu, při kterém se vypne většina částí generátoru: generování řídicích impulsů, synchronizace, sériová komunikace, podsvícení LCD a další.

V případě propojení více jednotek může dojít k chybě buď pouze u M (např. při detekci adres na sběrnici) nebo u všech jednotek (např. při přerušení komunikace).

Jediné možné řešení chybového stavu je restart generátoru. Jednotlivé chyby lze rozlišit podle čísla, které se objeví na displeji. Seznam možných chyb lze najít v příloze E.

11. Další informace o generátoru

11.1. Mechanická část

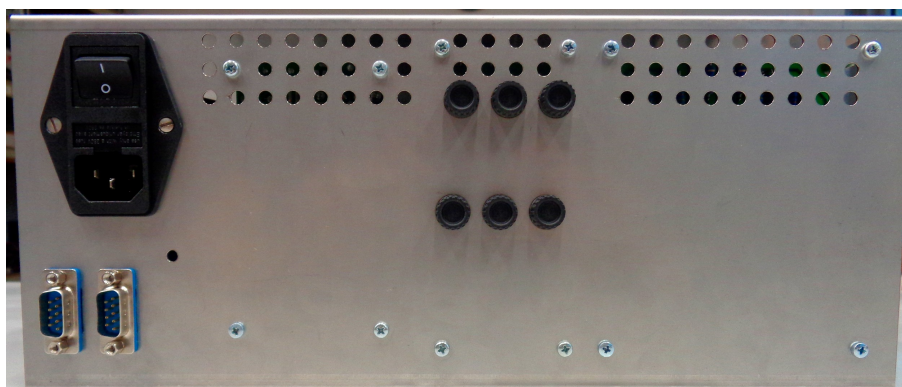
I když mechanické části, zejména bedna generátoru, nejsou součástí diplomové práce, pro úplnost vkládám fotky předního a zadního panelu, a také vnitřní uspořádání generátoru. V době dokončení diplomové práce byl hotový jeden prototyp bedny. Pro zbývající generátory byly vytvořeny provizorní panely, které jsou vidět na fotce pracoviště, na Obr. 78.

Na bedně chybí bočnice a spodní část generátoru. Dále chybí rámeček displeje a fólie s popisy kanálů výstupních svorek a pojistek. Připevnění klávesnice také bude vypadat jinak. Uvnitř bedny chybí ukostření stínění FTP kabelu.

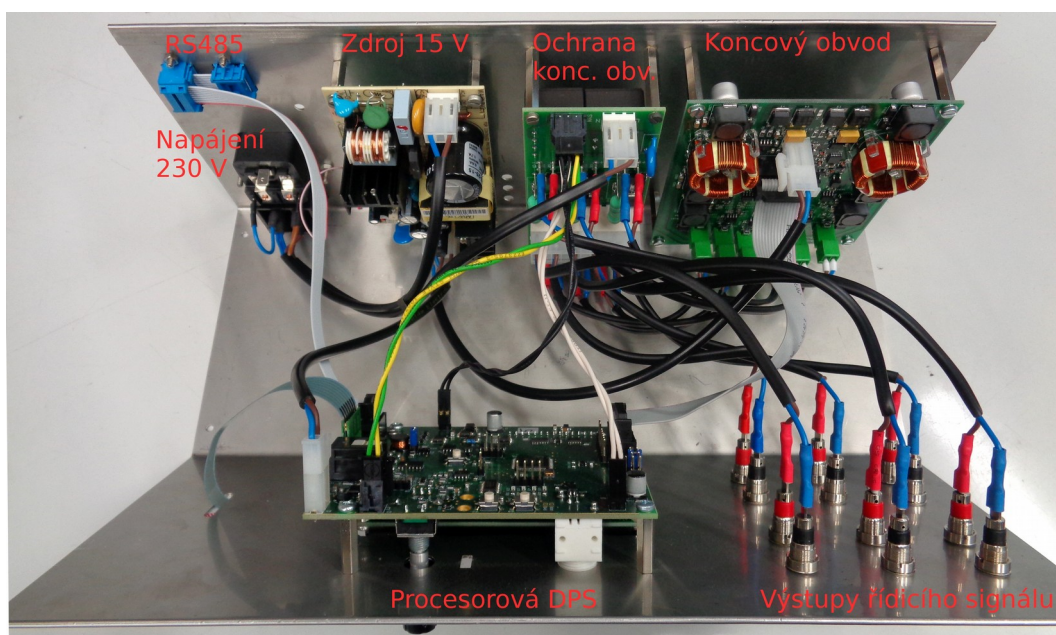
Na předním panelu se nachází výstupní svorky, displej, BNC konektor, hřídel enkodéru a fóliová klávesnice. Na zadním panelu je vanička pro připojení síťového napětí s pojistkami v obou pólech a vypínačem. Dále zde jsou dva D-sub konektory pro sériovou komunikaci a pojistková pouzdra. Na Obr. 77 je vidět vnitřek bedny generátoru s popisem všech DPS a konektorů.



Obr. 75 Přední panel generátoru



Obr. 76 Zadní panel generátoru



Obr. 77 Vnitřní uspořádání generátoru

11.2. Vnitřní a vnější propojení generátoru

Pro případ výroby dalšího generátoru je v příloze G tabulka se všemi použitými vodiči a kabely uvnitř i vně generátoru. Je uveden typ, délka a barva vodičů, čísla pinů v konektorech nebo jiná označení pro začátek a konec každého vodiče.

11.3. Seznam součástek a cena generátoru

V příloze F se nachází seznam, počet kusů a cena použitých komponent pro sestavení jednoho generátoru. Součástky jsou rozděleny podle umístění na jednotlivých DPS, a také mimo DPS, kde jsou zahrnuty kabely, konektory, mechanika a další. Zvlášť jsou uvedeny ceny za výrobu všech DPS.

Ceny některých komponent, které jsou typově stejné ale od různých výrobců a ve větším počtu, jsou odhadnuty podle průměrných cen. Jedná se zejména o pasivní součástky či spojovací materiál.

V Tab. 5 jsou rozepsané ceny za jednotlivé skupiny komponent a celková cena, 8444,8 Kč včetně DPH za jeden generátor včetně příslušenství.

Skupina	cena celkem v Kč s DPH
Komponenty na procesorové DPS	1714,4
Komponenty na DPS ochrany konc. obv.	592,7
Komponenty na DPS koncového obvodu	1205,9
Výroba DPS	2052,5
Ostatní komponenty mimo DPS	2879,3
Σ	8444,8

Tab. 5 Cena generátoru

12. Pracoviště



Obr. 78 Fotka pracoviště (měření na dvanáctipulzním reverzačním usměrňovači)

13. Závěr

Navržené a realizované generátory spínacích impulzů pro fázově řízené měniče splňují požadavky pro výuku v laboratoři. V celkovém počtu 5 (4 + 1 rezervní) již natrvalo nahradí současné analogové generátory. Oproti nim mají více funkcí a je možné řídit více druhů měničů. I přes větší možnosti generátorů zůstalo ovládání pro studenty nenáročné.

Pro měniče, které byly popsány v teoretické části, byly vytvořeny řídicí signály, jejichž průběh je takový, že zbytečně nezatežuje koncový obvod. Správná funkce řízení těchto měničů ve statickém a dynamickém režimu byla ověřena.

Důraz by kladen na kvalitní synchronizaci síťového napětí. Z navržených metod synchronizace jsou dvě, které zajišťují odolnost generátoru při rušení v síti. Ověřením funkce generátoru bylo dokázáno, že řízení měničů je spolehlivé i s rušením v síťovém napětí zmíněném v kapitole kvality synchronizace. Kvalita napětí na výstupu měniče je vyšší než u současných generátorů.

Generátory jsou také chráněny před neúmyslným propojením řídicích a silových obvodů. Tato ochrana byla úspěšně vyzkoušena. Kromě toho jsou generátory vybavené velmi odolnou sériovou komunikací podle standardu RS485. Kvůli zmíněným vlastnostem by generátory byly schopny práce v průmyslovém prostředí.

Protože je vytvořený program pro mikroprocesor poměrně rozsáhlý, nebylo možné během doby zpracování diplomové práce přijít na případné chyby v programu. Nicméně, během doby testování na měničích se nevyskytla ani jeden problém. Pro ověření bezchybné funkce všech kombinací nastavení bude nutná delší doba chodu generátorů přímo ve cvičeních.

Po nasazení generátorů do výuky se může stát, že se přijde na nějakou chybu v programu. Také je možné, že nějaká část ovládání generátoru nebude studentům vyhovovat. Předpokládá se tedy, že menší změny v programu se ještě budou provádět i po dokončení diplomové práce. Pro kompletní dokončení generátorů a jejich možné použití ve cvičeních zbývá ještě vyřešení věcí, které nebyly součástí této práce. Jedná se hlavně o mechanické části. Nasazení nových řídicích generátorů je naplánováno již na letní semestr akademického roku 2016/2017.

14. Seznam obrázků

Obr. 1 Dvanáctipulzní usměrňovač v sériovém zapojení.....	10
Obr. 2 Průběhy napětí dvanáctipulzního usměrňovače v sériovém zapojení, $\alpha > 0^\circ$	10
Obr. 3 Dvanáctipulzní usměrňovač v paralelním zapojení.....	11
Obr. 4 Průběhy napětí můstků, na zátěži a na mezifázovém transformátoru při změně řídicího úhlu od 0° na 180° [6].....	12
Obr. 5 Blokové zapojení dvanáctipulzního reverzačního usměrňovače.....	12
Obr. 6 Řídicí signál pro dvanáctipulzní usměrňovač.....	13
Obr. 7 Třífázový střídavý měnič napětí – zapojení a princip funkce [3].....	14
Obr. 8 Pracovní diagram pro odporovou zátěž [3].....	15
Obr. 9 Průběhy napětí na odporové zátěži a tyristoru [3].....	16
Obr. 10 Pracovní diagram pro čistě indukční zátěž [3].....	16
Obr. 11 Průběhy napětí a proudu na indukční zátěži a na tyristoru [3].....	17
Obr. 12 Řídicí signál pro odporovou a indukční zátěž, $\alpha = 150^\circ$	18
Obr. 13 Řídicí signál pro RL zátěž, $\alpha = 60^\circ$	19
Obr. 14 Řídicí signál pro RL zátěž, $\alpha = 0^\circ$	19
Obr. 15 Průběh síťového napětí pro šestipulzní usměrňovač.....	20
Obr. 16 Princip synchronizace pomocí výpočtů Fourierových koeficientů.....	22
Obr. 17 Diagram výpočtu n-té harmonické pomocí RDFT [8].....	23
Obr. 18 Korekce vlivu vzorkování na průchod napětí nulou.....	24
Obr. 19 Struktura generátoru spínacích impulsů.....	26
Obr. 20 Horní strana procesorové DPS.....	28
Obr. 21 Spodní strana procesorové DPS s LCD.....	28
Obr. 22 Synchronizační obvod.....	30
Obr. 23 Sběrníková struktura RS485 [17].....	31
Obr. 24 Zvýšení odolnosti sběrnice proti poruchám, RS485 [17].....	32
Obr. 25 DPS s upínacími a zakončovacími odpory pro RS485.....	32
Obr. 26 Zapojení budičů na sběrnici pro RS485 [18].....	33
Obr. 27 Blokové zapojení sériové komunikace.....	33
Obr. 28 Obvod ochrany koncového obvodu.....	37
Obr. 29 Ochrana koncového obvodu - Simulink.....	38
Obr. 30 Simulace při 400 V s řádkou impulsů - napětí a proud na tranzistorech.....	38
Obr. 31 Simulace při 400 V, s řádkou impulsů - výstupní napětí a proud.....	39
Obr. 32 Simulace při 400 V a s řádkou impulsů - rozložení napětí na diodách.....	39
Obr. 33 Působení ochrany koncového obvodu po připojení napětí 35 V.....	40
Obr. 34 Působení ochrany koncového obvodu po připojení napětí 240 V.....	40
Obr. 35 Jednopolzní usměrňovač, skok úhlu α ze 160° na 20°	41
Obr. 36 Dvoupulzní uzlový usměrňovač, skok úhlu α ze 160° na 20°	41
Obr. 37 Jednofázový můstkový usměrňovač, skok úhlu α ze 160° na 20°	41
Obr. 38 Třípulzní uzlový usměrňovač, skok úhlu α ze 130° na 20°	41
Obr. 39 Třífázový můstkový usměrňovač, skok úhlu α ze 100° na 20°	41
Obr. 40 Jednofázový střídavý měnič napětí, skok úhlu α ze 150° na 20°	41
Obr. 41 Reverzační jednofázový můstkový usměrňovač, skok řídicího úhlu z 20° na 160°	42
Obr. 42 Reverzační trojpulzní uzlový usměrňovač, skok řídicího úhlu ze 140° na 40°	43
Obr. 43 Reverzační třífázový můstkový usměrňovač, skok řídicího úhlu z 10° na 140°	43
Obr. 44 Třífázový střídavý měnič napětí, R zátěž, skok úhlu α z 10° na 130°	44
Obr. 45 Třífázový střídavý měnič napětí, R zátěž, skok úhlu α ze 40° na 80°	44
Obr. 46 Třífázový střídavý měnič napětí, RL zátěž, skok úhlu α ze 100° na 80°	44
Obr. 47 Třífázový střídavý měnič napětí, RL zátěž, skok úhlu α z 50° na 100°	44
Obr. 48 Třífázový střídavý měnič napětí, detail řádky při $\alpha = 0^\circ$	45
Obr. 49 Třífázový střídavý měnič napětí, $\alpha = 0^\circ$, nižší frekvence a vyšší střída.....	45
Obr. 50 Dvanáctipulzní usměrňovač, sériové zapojení, $\alpha = 50^\circ$, R zátěž.....	46

Obr. 51 Dvanáctipulzní usměrňovač, sériové zapojení, $\alpha = 0^\circ$, RL zátěž.....	46
Obr. 52 Dvanáctipulzní usměrňovač, sériové zapojení, změna úhlu α z 20° na 95° , R zátěž.....	46
Obr. 53 Dvanáctipulzní usměrňovač, sériové zapojení, změna úhlu α z 85° na 10° , RL zátěž.....	46
Obr. 54 Dvanáctipulzní usměrňovač, paralelní zapojení, $\alpha = 60^\circ$, R zátěž.....	47
Obr. 55 Dvanáctipulzní usměrňovač, paralelní zapojení, $\alpha = 30^\circ$, RL zátěž.....	47
Obr. 56 Dvanáctipulzní usměrňovač, paralelní zapojení, změna úhlu α z 5° na 65° , R zátěž.....	47
Obr. 57 Dvanáctipulzní usměrňovač, paralelní zapojení, změna úhlu α z 65° na 0° , RL zátěž.....	47
Obr. 58 Dvanáctipulzní usměrňovač, reverzační zapojení, změna úhlu α ze 165° na 25°	48
Obr. 59 Dvanáctipulzní usměrňovač, reverzační zapojení, změna úhlu α z 10° na 130°	49
Obr. 60 Dynamický okruhový proud při změně úhlu α z 10° na 140°	49
Obr. 61 Rozsah rušení v síťovém napětí po dobu 20 s.....	51
Obr. 62 Odchylka řídicího úhlu - S1, klidový stav.....	52
Obr. 63 Odchylka řídicího úhlu - S2, klidový stav.....	52
Obr. 64 Odchylka řídicího úhlu – S3, klidový stav, bez filtrace periody.....	52
Obr. 65 Odchylka řídicího úhlu – S3, klidový stav, s filtrací periody.....	53
Obr. 66 Odchylka řídicího úhlu – S1, během rušení v síti.....	53
Obr. 67 Odchylka řídicího úhlu – S2, během rušení v síti.....	54
Obr. 68 Odchylka řídicího úhlu – S3, během rušení v síti, bez filtrace periody.....	54
Obr. 69 Odchylka řídicího úhlu – S3, během rušení v síti, s filtrací periody.....	54
Obr. 70 Úvodní obrazovka.....	55
Obr. 71 Menu výběru měniče.....	55
Obr. 72 Menu nastavení generátoru.....	57
Obr. 73 Obrazovka řízení jedním generátorem.....	57
Obr. 74 Obrazovky MASTER a SLAVE při řízení se sériovou komunikací.....	58
Obr. 75 Přední panel generátoru.....	60
Obr. 76 Zadní panel generátoru.....	60
Obr. 77 Vnitřní uspořádání generátoru.....	61
Obr. 78 Fotka pracoviště (měření na dvanáctipulzním reverzačním usměrňovači).....	62

15. Seznam tabulek

Tab. 1 Struktura zprávy sériové komunikace.....	34
Tab. 2 Seznam příkazů a obsah zpráv sériové komunikace.....	35
Tab. 3 Možnosti volby měniče.....	56
Tab. 4 Možnosti nastavení generátoru.....	56
Tab. 5 Cena generátoru.....	61

16. Použité zkratky

μC	- Mikroprocesor
A	- Anoda
ADC	- Analog-to-Digital Converter
BJT	- Bipolar Junction Transistor
BOM	- Bill of Materials
CMD	- Command
DFT	- Diskrétní Fourierova Transformace
DPS	- Deska plošných spojů

DSP	- Digital Signal Processor
EEPROM	- Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
FTP	- Foil Twisted Pair
G	- Gate – řídicí elektroda
HDO	- Hromadné Dálkové Ovládání
I ² C	- Inter-Integrated Circuit
IC	- Input Capture
IDFT	- Inverzní Diskrétní Fourierova Transformace
ISR	- Interrupt Service Routine
K	- Katoda
LCD	- Liquid-Crystal Display
LED	- Light-Emitting Diode
LSB	- Least Significant Byte
M	- Master
MOSFET	- Metal-Oxid-Semiconductor Field-Effect Transistor
MSB	- Most Significant Byte
MT	- Meziřázový Transformátor
OC	- Output Compare
OOK	- On-Off Keying
PWM	- Pulse-Width Modulation
RDFT	- Rekurzivní Diskrétní Fourierova Transformace
RL	- smíšená zátěž s odporem a indukčností
RS485	- Standard sériové komunikace
S	- Slave
SMD	- Surface-Mount Device
UART	- Universal Asynchronous Receiver / Transmitter

17. Literatura

- [1] ČEDÍK, Jan. *Programové vybavení generátoru zapínacích impulzů*. ČVUT FEL, Katedra elektrických pohonů a trakce, Praha, 2014. Bakalářská práce.
- [2] PAVELKA, Jiří, Zdeněk ČEŘOVSKÝ a Jiří LETTL. *Výkonová elektronika*. 3. přeprac. vyd. Praha: ČVUT, 2007
- [3] ŽÁČEK, Jaroslav. *Výkonová elektronika*. Praha, 1990. Skripta. ČVUT.
- [4] OETTER, Juraj. *Výkonová elektronika pre elektrické pohony*. Bratislava: Alfa, 1988.
- [5] VONDRÁŠEK, František. *Výkonová elektronika*. Plzeň: Západočeská univerzita, 1994. ISBN 80-7082-137-X.
- [6] MOHAN, Ned., Tore M. UNDELAND a William P. ROBBINS. *Power electronics: converters, applications, and design*. 2nd ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 1995. ISBN 0-471-30576-6.

- [7] GUANGYANG, Zhou. *Analysis of the Working Principle of 12 Pulse Inverter Bridge*. School of Electrical and Electric Engineering, North China Electric Power University: Atlantis Press, 2016.
- [8] TEODORESCU, Remus, Marco LISERRE a Pedro RODRIGUEZ. *Grid converters for photovoltaic and wind power systems*. Hoboken, N.J.: Wiley, 2011. ISBN 978-0-470-05751-3
- [9] ĐURIĆ, Milenko B. a Željko R. ĐURIŠIĆ. *Combined Fourier and Zero Crossing Technique for Frequency Measurement in Power Networks in the Presence of Harmonics*. University of Belgrade, Faculty of Electrical Engineering, 2005.
- [10] TLUSTÝ, Josef. *Energetická rušení v distribučních a průmyslových sítích* [Přednáška z předmětu Elektrické zdroje a soustavy]. Katedra elektroenergetiky, ČVUT FEL, 2010.
- [11] ACEDO, Rafael Reina. *Filtro paso bajo* [Dokument z cvičení předmětu Microprocesadores]. Universidad Carlos III de Madrid, Escuela Politécnica Superior, 2015.
- [12] CARTER, Bruce. *Designing Gain and Offset in Thirty Seconds*. 2002. Texas Instruments.
- [13] *PIC32MZ Embedded Connectivity with Floating Point Unit (EF) Family*. DS60001320D. Microchip, 2015.
- [14] *MPLAB® XC32 C/C++ Compiler User's Guide*. DS50001686J. Microchip, 2012.
- [15] *32-Bit Language Tools Libraries*. DS51685E. Microchip, 2012.
- [16] RAYSTAR. RC2004A-FHW-ESV datasheet. 2008.
- [17] KUGELSTADT, Thomas. *The RS-485 Design Guide, SLLA272B* [online]. Texas Instruments, 2008.
- [18] MARAIS, Hein. *RS-485/RS-422 Circuit Implementation Guide, AN-960* [online]. Analog Devices, 2008.
- [19] GOLDIE, John. *Application Note 847 FAILSAFE Biasing of Differential Buses, SNLA031*. Texas Instruments, 1992.

18. Seznam použitého SW

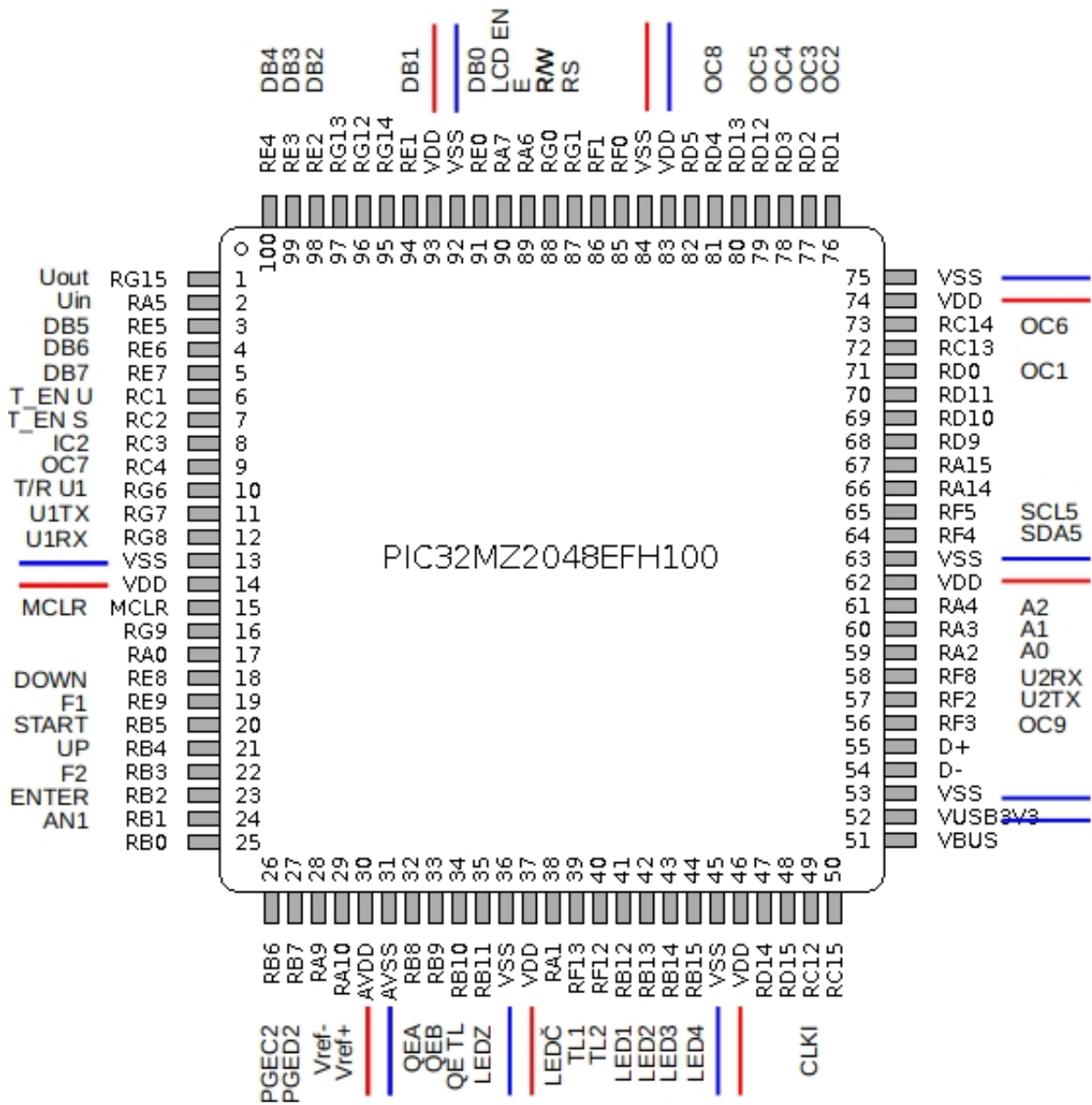
MPLAB X IDE v3.40
 Altium Designer 16.1.12
 Gerbv 2.6.1
 MATLAB 2016a
 SerialPlot 0.8.0
 CuteCom 0.30.3
 Saleae Logic 1.2.9
 ScopeXP

19. Přílohy

A. Seznam použitých I/O mikroprocesoru

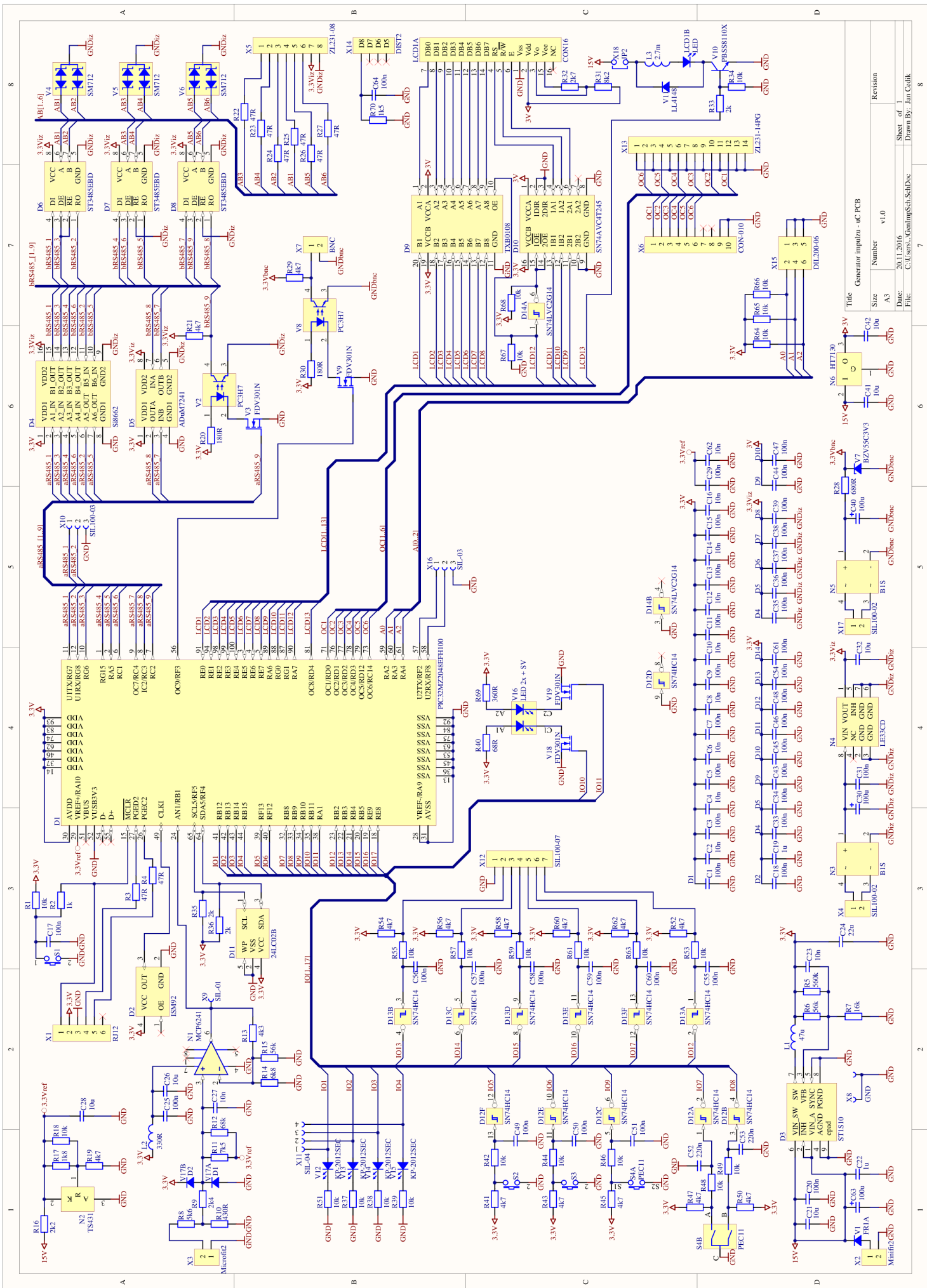
	Název pinu periferie	Název pinu PORTu uC	Číslo pinu uC	I/O	A – analogový / M – mapovaný
Impulzy – Output Compare	OC1	RD0	71	O	M
	OC2	RD1	76	O	M
	OC3	RD2	77	O	M
	OC4	RD3	78	O	M
	OC5	RD12	79	O	M
	OC6	RC14	73	O	M
Trigger osciloskopu	OC9	RF3	56	O	M
Komunikace s LCD displejem	DB7	RE7	5	I/O	
	DB6	RE6	4	I/O	
	DB5	RE5	3	I/O	
	DB4	RE4	100	I/O	
	DB3	RE3	99	I/O	
	DB2	RE2	98	I/O	
	DB1	RE1	94	I/O	
	DB0	RE0	91	I/O	
	RS	RG1	87	O	
	R/W	RG0	88	O	
E	RA6	89	O		
Povolení překladačů 3,3 V – 3 V pro LCD	LCD EN	RA7	90	O	
Podsvícení LCD	OC8	RD4	81	O	M
Klávesnice	ENTER	RB2	23	I	
	F2	RB3	22	I	
	UP	RB4	21	I	
	START	RB5	20	I	
	F1	RE9	19	I	
	DOWN	RE8	18	I	
Enkodér	QEA	RB8	32	I	
	QEB	RB9	33	I	
	QE TL	RB10	34	I	
Indikace pulzů na výstupu – LED	LEDČ	RB11	35	O	
	LEDZ	RA10	38	O	
ICD3	PGEC2	RB6	26	I/O	
	PGED2	RB7	27	I/O	
ADC1	AN1	RB1	24	I	A
Ref. napětí pro ADC	Vref-	RA9	28	I	A
	Vref+	RA10	29	I	A
UART2 – testovací	U2TX	RF2	57	O	M
	U2RX	RF8	58	I	M
UART1 – RS485	U1TX	RG7	11	O	M
	U1RX	RG8	12	I	M
	T/R U1	RG6	10	O	
Platnost úhlu – RS485	Uout	RG15	1	O	
	Uin	RA5	2	I	
	T_EN U	RC12	6	O	
Synchronizace – RS485	OC7	RC4	9	O	M
	IC2	RC3	8	I	M
	T_EN S	RC2	7	O	
Externí hodiny	CLKI	RC12	49	I	
MCLR	MCLR	MCLR	15	I	
I2C5 – EEPROM	SDA5	RF4	64	I/O	M (automatické)
	SCL5	RF5	65	O	M (automatické)
Testovací LED	LED1	RB12	41	O	
	LED2	RB13	42	O	
	LED3	RB14	43	O	
	LED4	RB15	44	O	
Testovací tlačítka	TL1	RF13	39	I	
	TL2	RF12	40	I	
Adresa pro komunikaci	A0	RA2	59	I	
	A1	RA3	60	I	
	A2	RA4	61	I	

B. Grafické rozložení použitých I/O na mikroprocesoru



C. Schématické zapojení procesorové DPS

Na další straně



Title	Generator inverter - c-PCB
Date:	20.11.2016
File:	C:\Users\...GentImp\Sub\SchDoc
Size	v1.0
Number	
Revision	
Sheet of	8
Drawn By:	Jan Ceilik

D. Adresy EEPROM

Proměnná	Počáteční adresa EEPROM	typ proměnné	počet bytů
Dolní mez úhlu	0	short	2
Horní mez úhlu	2	short	2
Skok – nižší úhel	4	short	2
Skok – vyšší úhel	6	short	2
Šířka pulzu	8	short	2
Perioda řádky	10	short	2
Střída řádky	12	char	1
Synchronizační fáze	13	char	1
Zapojení transformátoru	14	char	1
Výběr synchronizace	15	char	1
Radka/impuls SMN3	16	char	1
Podsvícení LCD	17	char	1
Úhel pro rev. měnič	18	uchar	1

E. Chybová hlášení

Číslo chyby	Význam chyby	Umístění v programu
1	Výpadek synchronizačního napětí	ADC0FLTRInterrupt()
2	Čtení z EEPROM	I2C_readByte()
3	Zápis do EEPROM	I2C_writeByte()
4	Inicializace LCD	LCD_Init()
5	Zápis do instrukčního registru LCD	lcd_cmd()
6	Zápis do datového registru LCD	lcd_data()
7	Menu – nejvyšší úroveň F1/F2/START	disp_menu()
8	Menu – výběr měniče	menu_menic()
9	Menu – výběr nastavení	menu_nastaveni()
10	Menu – změna nastavení	menu_nastaveni()
11	Menu – Volba/Potvrzení nastavení	menu_nastaveni()
12	Výpadek referenčního napětí	ADC_init()
13	WDT timeout	SYSRST
14	UART1 Rx buffer overflow	U1FInterrupt()
15	UART1 Framing error	U1FInterrupt()
16	UART1 Timeout M ↔ S – přerušení spojení	ComSend(), U1RXInterrupt()
17	UART1 Neprázdný Receive Buffer před odesláním nové zprávy	ComSend()
18	UART1 Přijato více než 4 byty	U1RXInterrupt()
19	UART1 Chyba v kontrolním součtu přijaté zprávy	U1RXInterrupt()
20	UART1 Přijat neznámý příkaz	U1RXInterrupt()
21	UART1 Přijata neznámá adresa S při potvrzení pro M	U1RXInterrupt()
22	UART1 Probíhající přenos při změně směru	U1TXInterrupt()
23	Přijatý nesprávný příkaz od S pro M	com_master.c
24	Nesprávný počet připojených S (0 nebo 2)	AddComM()
25	Nesprávný počet připojených S pro daný měnič (3 místo 1)	startGenComM()
26	Detekována adresa 0	AddComM()
27	M přijal příkaz pro S (zapojen více než 1 M)	U1RXInterrupt()
28	S přijal příkaz pro M	U1RXInterrupt()
29	Přijatý nesprávný příkaz od M pro S	com_slave.c
30	S přijal neříditelný měnič přes komunikaci	startGenComS()
31	S – přijatý úhel je mimo meze dané M	PORTA_CNInterrupt()
32	UART1 – přerušení spojení – detekce u S	disp_startS(), U1RXInterrupt()
98	Nesprávný stav synchronizace	ADC0FLTRInterrupt()
99	Podsvícení LCD – ochrana před dlouhým impulzem – timeout	podsviceniLCD(), T1Interrupt()

F. Seznam součástek, cena generátoru

Komponenty na DPS procesorové jednotky					
Komponenta	Označení výrobce	ks	kč/ks s DPH	kč celkem s DPH	
LCD displej	RC2004A-FHW-ESV	1	447	447	
Dutinková lišta	ZL305-20	1	28,7	28,7	
EEPROM	24LC02BT-I/OT	1	9,2	9,2	
Izolátor 2-bit	ADuM7241	1	70,4	70,4	
2x dioda	BAV199E6327	1	0,8	0,8	
BJT NPN	PBSS8110X135	1	2,7	2,7	
mikrospínač	B3FS-1012	3	8,8	26,4	
diodový můstek	B1S	2	4	8	
Minifit 2x1	MX-5566-02A	1	3,1	3,1	
Microfit 2x1	MX-43045-0212	1	19,3	19,3	
BNC konektor	1-1337541-0	1	40	40	
RJ12 konektor	RJ12GLP-AMP	1	18,7	18,7	
MLW8 konektor	MLW08G	1	2,9	2,9	
MLW14 konektor	ZL231-14PG	1	3,8	3,8	
dioda	FR1A	1	1,7	1,7	
dioda	1N4148	1	0,5	0,5	
Zenerova dioda	BZV55C3V3	1	0,9	0,9	
Lin. regulátor napětí	HT7130	1	4,3	4,3	
Oscilátor	ISM92-3351AH24.00	1	38,8	38,8	
Indukčnost 47 uH	SRU5011-470Y	1	20,2	20,2	
R+L – 330 Ω (korálek)	BLM21PG331SN1D	1	0,9	0,9	
Indukčnost 2,7 mH	SDR0805-272KL	1	17,7	17,7	
LDO	LE33CD	1	12,3	12,3	
LED – oranžová, 0805	KP-2012SEC	4	3,1	12,4	
LED – červená, 0805	OF-SMD2012HR	1	4	4	
LED – zelená, 0805	OF-SMD2012G	1	1,9	1,9	
Dig. MOSFET	FDV301N	4	0,9	3,6	
Op. zesilovač	MCP6241-E/SN	1	9,5	9,5	
Optočlen	PC3H7DJ0000F	2	13,6	27,2	
Inkrementální enkodér	PEC11R-4025F-S0024	1	47,1	47,1	
Mikroprocesor	PIC32MZ2048EFH100	1	401,2	401,2	
Izolátor 6-bit	SI8662AB-B-IS1	1	77,8	77,8	
Asym. TVS dioda na RS485	SM712.TCT	3	20	60	
Překladač napětí 4-bit	SN74AVC4T245PWT	1	22,4	22,4	
Schmitt inverter 6-bit	SN74HC14D	2	3,6	7,2	
Schmitt inverter 2-bit	SN74LVC2G14DBVT	1	20	20	
DC/DC snižovací měnič	ST1S10PHR	1	40,9	40,9	
Budič RS485	ST3485EBD	3	18,5	55,5	
Napěťová reference	TS431BCX RF	1	3,2	3,2	
Překladač napětí 8-bit	TXB0108PWR	1	50,7	50,7	
C 100 uF, 35 V	MCVVT035M101EA6L	3	4,1	12,3	
C 0,1 uF, 500 V, 1210	C1210V104KCRCTU	1	8,5	8,5	
C 1 uF, 1206	různé	6	0,6	3,6	
C 22 uF, 1210	různé	1	3	3	
ostatní C, 0603 a 0805	různé	54	0,2	10,8	
R 1k5 THT 5W	MOF5WS-1K5	1	2,8	2,8	
ostatní R, 0805 a 1206; E24, 5%	různé	70	0,2	14	
Kolíková lišta 1x40 2,54 mm	S1G40	2	7,9	15,8	
Kolíková lišta 2x20 2,54 mm	S2G80	1	15	15	
Dutinková lišta 1x10 2,54 mm	ZL262-10SG	1	2,1	2,1	
Jumper 2,54 mm	JUMPER-BL	4	0,9	3,6	
		Σ		1714,4	

Komponenty na DPS ochrany koncového obvodu				
Komponenta	Označení výrobce	ks	Kč/ks s DPH	Kč celkem s DPH
pojistka 800 mA, velmi rychlá	ZKSS-0.8A	6	13,2	79,2
Varistor	VCR10D431KAR	1	5,1	5,1
9R1 THT	KNP05WS-9R1	6	3,8	22,8
transformátor 400 V	BV2020167	1	109,9	109,9
transformátor 230 V	BV2020155	1	58,2	58,2
Dioda 1 kV	FR3M-DIO	12	3,9	46,8
R 2k, 2010	SMD2010-2K	12	0,7	8,4
Minifit 2x11 zásuvka	N42GP-22	1	25	25
FASTON 4.8x0.8 mm do DPS	61-1560-11/0031	12	1,4	16,8
Microfit 2x3	MX-43045-0612	1	17,6	17,6
MOLEX 3 pin, 3,96 mm	MX-26-60-4030	1	4,9	4,9
Pojistkové pouzdro 5x20mm	SCHURTER 3101.0045	6	33	198
		Σ		592,7

Komponenty na DPS koncového obvodu				
Komponenta	Označení výrobce	ks	Kč/ks s DPH	Kč celkem s DPH
15R 1210	ERJ14YJ150U	12	4	48
43R THT	PMR2S-43R	12	2,6	31,2
šroubová svorka na kabel	PTR AK1550/2-3,5	6	20	120
svorka do DPS	PTR STL 1550/2G-3,5V	6	6,9	41,4
C, 50 V, 0805	různé	32	0,3	9,6
C, 25 V, 10u, 1206, X5R	různé	14	1,3	18,2
C, 50 V, 100n, 1206, X7R	různé	6	1,3	7,8
CE, 22u, 25V	SC1E226M05005VR	2	1,2	2,4
CE, 470u, 25V	SC1C477M08010VR	7	4,4	30,8
Schmitt Inverter 6-bit	CD40106BPWR	1	4,5	4,5
Klopný obvod D	CD4013BM	1	5,8	5,8
L, 560uH	DE1207-560	6	11,3	67,8
budič MOSFET 2-bit	TC4427	2	26,2	52,4
budič MOSFET 2-bit	TC4426	6	28,1	168,6
R, 0805, E24, 5%	různé	34	0,2	6,8
R, 1206, E24, 5%	různé	22	0,3	6,6
jádro transformátoru – toroid		2	102,85	205,7
P-MOSFET	FDD4141	2	18	36
N-MOSFET	STD20NF06	2	8,7	17,4
Dioda	LL4148	8	0,6	4,8
Zenerova dioda	BZM55C3V6	6	1,6	9,6
Digitální BJT NPN	MMUN2211LT1G	6	0,7	4,2
Dioda Schottky	10MQ040N	24	2,8	67,2
Optočlen	PC457L0NIP0F	6	22,3	133,8
N-MOSFET	IRF7341	6	16,4	98,4
Minifit 2x1	MX-5566-02A	1	3,1	3,1
MLW14 konektor	ZL231-14PG	1	3,8	3,8
		Σ		1205,9

Výroba DPS	
název	cena v Kč s DPH
DPS procesorová jednotka	786,5
DPS ochrana konc. obv.	500
DPS koncový obvod	766
Σ	2052,5

Ostatní komponenty mimo DPS				
Komponenta	Označení výrobce	ks	Kč/ks s DPH	Kč celkem s DPH
bedna generátoru – nerezová ocel		1	771,8	771,8
fóliová klávesnice	TS 523 6159	1	314,6	314,6
BNC vidlice na kabel - přímá	BNC-C 50 V	1	24	24
BNC vidlice na kabel – úhlová	BNC-102	1	20	20
Faston na kabel FZK 4,8x0,8 mm	ST1870802-30C	24	1,3	31,2
Minifit 2x11 – zástrčka	MX-5557-22R	1	15,7	15,7
EURO konektor, vypínač, pojistka	4304.6087	1	202,6	202,6
Minifit 2x1 – zástrčka	MX-5557-02R	2	1,6	3,2
MLW8 zásuvka samořezná	PFL08	1	9,5	9,5
MLW14 zásuvka samořezná	PFL14	2	9,1	18,2
zdroj 15V, na DPS	PS-25-15	1	354,5	354,5
D-sub 9 pinů – vidlice	DSF09LC	2	26,5	53
D-sub 9 pinů – zásuvka	DSC-109	2	3,8	7,6
D-sub sada šroubů	SV U	2	7,5	15
D-sub plastový kryt	DSC-209	2	4,5	9
DPS zakončovací R		1	50	50
R, 5%, 1206	různé	9	0,4	3,6
knoflík 15mm D-SHAFT	450-AA150	1	28,6	28,6
MOLEX 3,96mm, 4 piny	MX-2139-4A	1	3,2	3,2
MOLEX 3,96mm, 3 piny	MX-2139-3A	2	3,1	6,2
Microfit 2x1 zástrčka	MX-43025-0200	1	8	8
Microfit 2x3 zástrčka	MX-43025-0600	1	7,5	7,5
dutinka 2,54 mm, 2x1 na kabel	NSR-02	2	0,9	1,8
kontakt krimpovací, 3,96mm	MX-08-50-0108	8	1,6	12,8
kontakt krimpovací, minifit	MX-5556-T3L	16	2,4	38,4
kontakt krimpovací, microfit	MX-43030-0008	8	2,3	18,4
kontakt krimpovací, 2,54 mm hřebínek	MX-90119-2121	4	1,5	6
svorka červená	BS-244L-R	6	23,1	138,6
svorka černá	BS-244L-B	6	23,1	138,6
pojistka 2,5 A	ZKS-2.5A	2	2,5	5
kolejnice 1m	GB 9 1000 ME	2/3	194,2	129,5
CYLY 2x0,5mm černý, lanko	H03VVH2-F	2,8	9	25,2
Plochý kabel 10 žil	AWG28-09H	0,2	13	2,6
Plochý kabel 14 žil	AWG28-14H-152M	0,2	14	2,8
Koaxiální kabel 50 Ω, lanko	RG58A/U	1	9	9
FTP Cat.5, 8x(7x0.18mm), lanko	4*2*(7x0.18)BC+0.9mmHDPE+ALP+5	2	16	32
lanko, 0,2 mm	různé	0,9	7	6,3
smršťovací bužírka – červená, 4 mm	RT4.0-BR	1	12,2	12,2
smršťovací bužírka – modrá, 4 mm	RT4.0-BL	1	12,2	12,2
smršťovací bužírka – černá, 4 mm	RT4.0-BK	1	11,6	11,6
síťový kabel	různé	1	95	95
distance M2,5, 10 mm	TFF-M2.5X10/DR112	4	2,5	10
distance M3, 10 mm	TFF-M3X10/DR113	4	2,5	10
distance M3, 15 mm	TFF-M3X15/DR113	4	3,9	15,6
distance M3, 18 mm	TFF-M3X18/DR113	4	4,3	17,2
distance M3, 25 mm	TFF-M3X25/DR113	4	6,7	26,8
distance M3, 30 mm	TFF-M3X30/DR113	4	6,3	25,2
šroub M3x6 mm	různé	40	1	40
šroub M2,5x6 mm	různé	8	1	8
šroub M3x10 mm, zapuštěný	různé	2	1,3	2,6
podložka po šroub M3	různé	40	1,2	48
podložka po šroub M2,5	různé	8	1,2	9,6
zakončovací očko, 4mm, červená	různé	1	4,1	4,1
gumová podložka	KM-NOGA-GUMA/J	4	1,8	7,2
		Σ		2879,3

G. Propojení vodičů

typ kabelu	počátek (konektor)	označení, číslo pinu	konec (konektor)	označení, číslo pinu	délka [mm]	barva vodiče
dvojlinka	vanička 230 V (faston)	L / N	zdroj 15V (MOLEX 3,96 mm)	L / N (1 / 3)	200	hnědá / modrá
			DPS ochrana (MOLEX 3,96 mm)		260	
lanko 0,5 mm		PE	kostra (očko 4 mm)	PE	60	žlutozelená
dvojlinka	zdroj 15 V (MOLEX 3,96 mm)	+ / - (1 / 3)	DPS uC (Minifit)	+ / - (1 / 2)	185	hnědá / modrá
		+ / - (2 / 4)	Koncový obvod (Minifit)		260	
	Koncový obvod (šroubová svorka AK1550/2-3.5)	1 + / - (1 / 2)	DPS ochrana (faston do DPS)	1 (+ / -)	90	hnědá / modrá
		2 + / - (1 / 2)			110	
		3 + / - (1 / 2)			135	
		4 + / - (1 / 2)			144	
		5 + / - (1 / 2)			166	
		6 + / - (1 / 2)			188	
	DPS ochrana (Minifit)	1 + / - (12 / 1)	Výstupní svorky generátoru (faston → svorka banánek)	1 (+ / -)	160	hnědá / modrá
		2 + / - (16 / 5)			150	
		3 + / - (20 / 9)			138	
		4 + / - (14 / 3)			210	
		5 + / - (18 / 7)			210	
		6 + / - (22 / 11)			180	
lanko 0,2 mm	DPS ochrana (Microfit)	1	DPS uC (2,54 mm dutinka 2x1 – 2x)	1	177	černá
		2		1	125	bílá
		3		2	177	černá
		4	2	125	bílá	
		5	DPS uC (Microfit)	1	162	žlutá
		6		2	162	zelená
Plochý kabel - 14 žil	DPS uC (MLW14)	1-14	Koncový obvod (MLW14)	1-14	170	šedá (1 – červená)
Plochý kabel – 9 žil	kostra (očko)	x	D-sub 9 pin, samořezný, zástrčka - 2x	1 (stínění)	214	šedá
		1 (A2)		6 (A2)		
	2 (B2)	2 (B2)				
	3 (B1)	7 (B1)				
	4 (A1)	3 (A1)				
	5 (A3)	8 (A3)				
	6 (B3)	4 (B3)				
	7 (3,3 V)	9 (3,3 V)				
	8 (GND)	5 (GND)				
FTP kabel, kroucený, lanko	D-sub 9 pin, zásuvka	1 (stínění)	D-sub 9 pin, zásuvka	1 (stínění)	2000 / 6000	bez izolace
		2 (B2)		2 (B2)		modrobílá
		3 (A1)		3 (A1)		oranžová
		4 (B3)		4 (B3)		hnědobílá
		5 (GND)		5 (GND)		zelená a bílá (2 vodiče)
		6 (A2)		6 (A2)		modrá
		7 (B1)		7 (B1)		oranžovobílá
		8 (A3)		8 (A3)		hnědá
		9 (3,3 V) nezapojeno		9 (3,3 V) nezapojeno		x

H. Obsah elektronické přílohy

/DP	- text diplomové práce ve formátu PDF
/Navod	- návod k použití, verze pro tisk ve formátu PDF
/Altium/GenImp	- projekt v Altium Designer pro procesorovou DPS
/Altium/GenImp_prototyp	- projekt v Altium Designer pro procesorovou DPS – prototyp
/MPLABX/GRI_v1.1	- projekt v MPLABX – program pro μC
/Simulink	- simulace ochrany koncového obvodu v Simulink