

UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

MĚNIČ PRO FÁZOVÉ ŘÍZENÍ EFEKTIVNÍ HODNOTY
STŘÍDAVÉHO NAPĚTÍ

Jakub Helcl

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2010

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jakub HELCL**
Osobní číslo: **D07636**
Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**
Studijní obor: **Dopravní infrastruktura-Elektrotechnická zařízení v dopravě**
Název tématu: **Měnič pro fázové řízení efektivní hodnoty střídavého napětí**
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

- 1) Provedte rozbor možných přístupů k řešení střídavého fázově řízeného měniče napětí
- 2) Navrhněte a specifikujte použité součástky
- 3) Realizujte navržený systém a ověřte jeho vlastnosti

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

- 1) Katalogové listy výkonových tyristorů a řídících prvků pro tyristory
- 2) www stránky výrobců výkonové a řídící elektroniky
- 3) Pavelka, Čeřovský, Lettl - Výkonová elektronika, ČVUT

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Jaroslav Novák, CSc.

Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací
techniky v dopravě

Datum zadání bakalářské práce: **17. prosince 2009**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31. května 2010**

prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.
děkan

L.S.

prof. Ing. Vladimír Schejbal, CSc.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 8. března 2010

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 20. 05. 2010

Jakub Helcl

NÁZEV

Měnič pro fázové řízení efektivní hodnoty střídavého napětí

SOUHRN

Práce se zabývá rozbořem fázového řízení a realizací měniče střídavého napětí. V práci je podrobný popis a rozbor funkce jednotlivých součástek potřebných k fungování měniče. Součástí práce jsou i naměřené hodnoty, průběhy sledovaných veličin a celkové hodnocení práce

KLÍČOVÁ SLOVA

Střídavý měnič, fázové řízení, triak

TITLE

Converter for phase control of root-mean-square alternating voltage

ABSTRACT

My bachelor work consider with phase control and realization converter of alternating voltage. My work inculdes detailed description of used components which are necessary for operation of converter. Part of work are also measured valuables and process of monitored valuables

KEYWORDS

AC converter, phase control, triac

OBSAH

OBSAH.....	- 6 -
ÚVOD.....	- 8 -
1. FÁZOVÉ ŘÍZENÍ.....	- 10 -
1.1. JEDNOFÁZOVÝ STŘÍDAVÝ MĚNIČ NAPĚTÍ	- 10 -
1.1.1. ODPOROVÁ ZÁTĚŽ.....	- 13 -
1.1.2. INDUKTIVNÍ ZÁTĚŽ.....	- 14 -
1.1.3. ODPOROVĚ – INDUKTIVNÍ ZÁTĚŽ	- 14 -
1.2. TŘÍFÁZOVÝ STŘÍDAVÝ MĚNIČ NAPĚTÍ	- 16 -
1.2.1. ODPOROVÁ ZÁTĚŽ.....	- 17 -
1.2.2. INDUKTIVNÍ ZÁTĚŽ.....	- 19 -
2. VÝROBEK	- 20 -
2.1. ŘÍDÍCÍ OBVOD	- 20 -
2.2. TRIAK	- 24 -
2.2.1. POUŽITÝ TRIAK	- 27 -
2.3. OPTOČLEN	- 28 -
2.4. REALIZACE	- 29 -
2.4.1. SCHÉMA ZAPOJENÍ	- 31 -
2.4.2. VNITŘNÍ USPOŘÁDÁNÍ.....	- 33 -
3. MĚŘENÍ.....	- 36 -
3.1. MĚŘENÍ JEDNOFÁZOVÉHO STŘÍDAVÉHO MĚNIČE NAPĚTÍ.....	- 36 -
3.1.1. ODPOROVÁ ZÁTĚŽ.....	- 36 -
3.1.2. ODPOROVĚ – INDUKTIVNÍ ZÁTĚŽ	- 37 -
3.1.3. ZHODNOCENÍ.....	- 39 -
3.2. MĚŘENÍ TŘÍFÁZOVÉHO STŘÍDAVÉHO MĚNIČE NAPĚTÍ.....	- 39 -
3.2.1. ODPOROVÁ ZÁTĚŽ.....	- 39 -
3.2.2. ODPOROVĚ - INDUKTIVNÍ ZÁTĚŽ.....	- 41 -
3.2.3. ZHODNOCENÍ.....	- 43 -

<u>ZÁVĚR.....</u>	<u>- 44 -</u>
<u>SEZNAM OBRÁZKŮ</u>	<u>- 45 -</u>
<u>SEZNAM TABULEK.....</u>	<u>- 47 -</u>
<u>POUŽITÁ LITERATURA.....</u>	<u>- 48 -</u>

ÚVOD

Z názvu práce plyne, čím se práce zabývá. Jde o měnič, který mění výstupní efektivní hodnotu střídavého napětí. Jde o nejjednodušší model měniče střídavého napětí.

Elektrická energie je nezbytná pro fungování dnešní společnosti, tak jak jí známe. Možnost využití elektrické energie se značně rozšiřuje s možnostmi snadné změny jejích parametrů. Ať je to proud, napětí, frekvence, nebo počet fází. Rozeznáváme dva základní typy měničů elektrické energie. První skupinou jsou měniče pracující na základě Faradayova zákona. Do této skupiny měničů řadíme rotační soustrojí a transformátory. Druhá, mladší a v současnosti více využívaná skupina měničů je založena na řízeném spínání a rozepínání obvodu. Rozvoj této skupiny měničů započal již začátkem 20. století kdy se pro tyto aplikace využívaly selenové popř. rtuťové usměrňovače. Další rozvoj této skupiny měničů spadá do 50. let 20. století kdy byly objeveny nelineární vlastnosti P-N přechodu. Nejprve byly diody a tranzistory využívány pro slaboproudou elektrotechniku. S dalším rozvojem technologií vznikaly výkonové diody a tranzistory, jejichž využití už bylo možné ve výkonové elektrotechnice. V 90. letech 20. století došlo k rychlému rozvoji vypínatelných výkonových součástek jako jsou GTO tyristory a IGBT tranzistory.

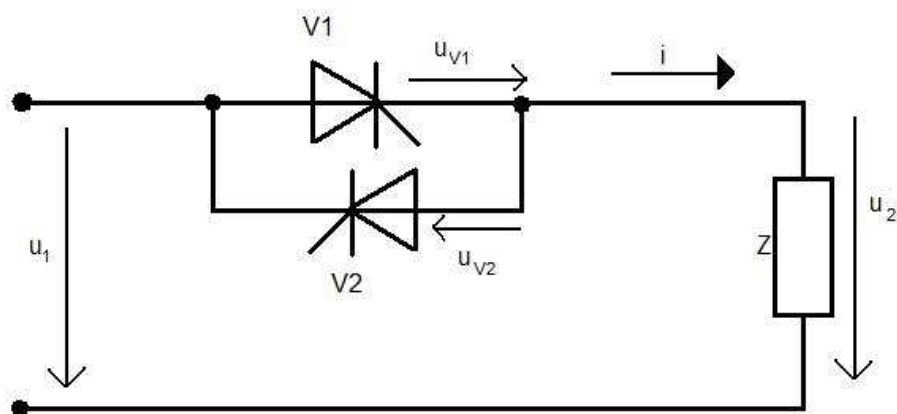
Měniče parametrů elektrické energie rozdělujeme do čtyřech skupin dle charakteru vstupní a výstupní energie. První skupinou jsou usměrňovače – mění vstupní střídavé napětí a proud na stejnosměrné. Druhou skupinou jsou střídače – mění vstupní stejnosměrné napětí a proud na střídavé. Třetí skupinou jsou stejnosměrné měniče – mění vstupní stejnosměrné napětí a proud na stejnosměrné, ale s jinými parametry. Čtvrtou skupinou jsou střídavé měniče – mění vstupní střídavé napětí a proud na střídavé, ale s jinými parametry. V rámci čtvrté skupiny měničů rozeznáváme další podskupiny měničů. Měniče, které mění efektivní hodnotu výstupního napětí, ale nemění jeho frekvenci či počet fází. Další skupinou jsou měniče které zachovávají počet fází, ale další parametry jako napětí, proud, nebo frekvence jsou už proměnné. Předposlední skupinou měničů jsou měniče, které mění počet fází a všechny další parametry. A nakonec měniče, které se chovají jako proměnná impedance jejichž využití spočívá v řízení velikosti jalového výkonu.

Moje práce se zabývá nejjednodušší formou měniče střídavé elektrické energie. Tou je fázové řízení efektivní hodnoty výstupního napětí. Cílem práce je sestavit přípravek, který mění efektivní hodnotu výstupního napětí. Přípravek má být schopen pracovat jak v jednofázovém provozu (řízení jedné fáze) tak i v třífázovém provozu (řízení všech tří fází).

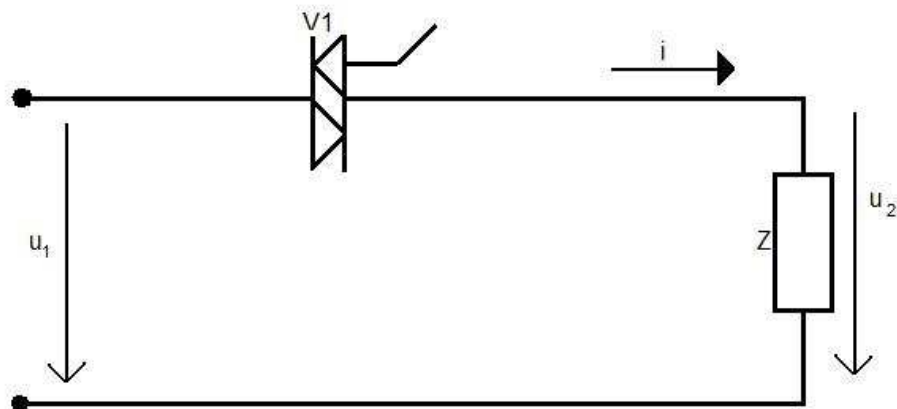
1. FÁZOVÉ ŘÍZENÍ

1.1. Jednofázový střídavý měnič napětí

Jedná se o polovodičový měnič, který mění výstupní efektivní hodnotu střídavého napětí. Může být realizován pomocí dvou antiparalelně zapojených tyristorů, nebo jednoho triaku.



Obr. 1 - schéma jednofázového střídavého měniče napětí s antiparalelně zapojenými tyristory



Obr. 2 - schéma jednofázového střídavého měniče s triakem

Střídavé měniče napětí se používají pro řízení odporových spotřebičů elektrické energie. Mohou být použity i pro řízení rychlosti asynchronních motorů. Vstup měniče je napájen střídavým napětím. Vlastní měnič pracuje na principu otevírání polovodičových součástek v námi požadovaném úhlu sepnutí a tím regulujeme výstupní hodnotu napětí. Tyristory nebo triak jsou řízeny z generátoru impulsů. Spínání u tyristorů probíhá tak, že v kladné půl periodě přivedeme řídicí

impuls na tyristor označený V1, který je v blokovacím stavu. Tyristor V1 sepne a vede po zbytek půl periody elektrický proud. Po průchodu střídavého napětí nulou se tyristor V1 vypne. Pro následující půlperiodu je nutné vyslat řídicí impuls do tyristoru V2, který je nyní v blokovacím stavu. Tyristor V2 vede elektrický proud po zbytek záporné půlperiody. Takto se celý děj opakuje každou periodu.

U měniče realizovaného pomocí triaku platí výše uvedené s výjimkou toho, že na řídicí elektrodu triaku přivádíme řídicí impulsy jak v kladné, tak i záporné půlperiodě střídavého napětí.

Generátor impulsů řídí moment otevření polovodičových součástek. Velikost řídicího úhlu α se pohybuje v rozmezí od 0° do 180° . Řídicí úhel se měří od průchodu blokovacího napětí nulou.

Předpokládáme, že oba dva tyristory jsou nevodivé ($i_z = 0$). Od začátku kladné půlperiody u_v je kladný pól tohoto napětí na anodě tyristoru V1 a na katodě tyristoru V2. Impulsem z generátoru impulsů je možno zapnout tyristor, který je v blokovacím stavu, tedy tyristor V1. Tyristor V2 je v závěrném stavu. Proto se na tyristor V1 při $u_v > 0$ přivádějí impulsy z generátoru impulsů podle nastaveného řídicího úhlu α . V záporné půl periodě u_v je v blokovacím stavu tyristor V2, proto dostává impulsy právě tento tyristor v závislosti na nastaveném úhlu α . Oba dva řídicí úhly musí být shodné velikosti. Tyristor V1 při zapnutí pomocí impulsu do řídicí elektrody propustí na zátěž zbytek kladné půlperiody. Pokud je v zátěži přítomna indukčnost dojde k tomu, že i v momentě kdy napětí projde nulou je kladný proud zátěže ještě nenulový. Proto se na zátěž dostane přes tyristor V1 i začátek záporné půl periody napájecího napětí. Vypnutí tyristoru V1 nastane až v momentě kdy $\alpha > \pi$.

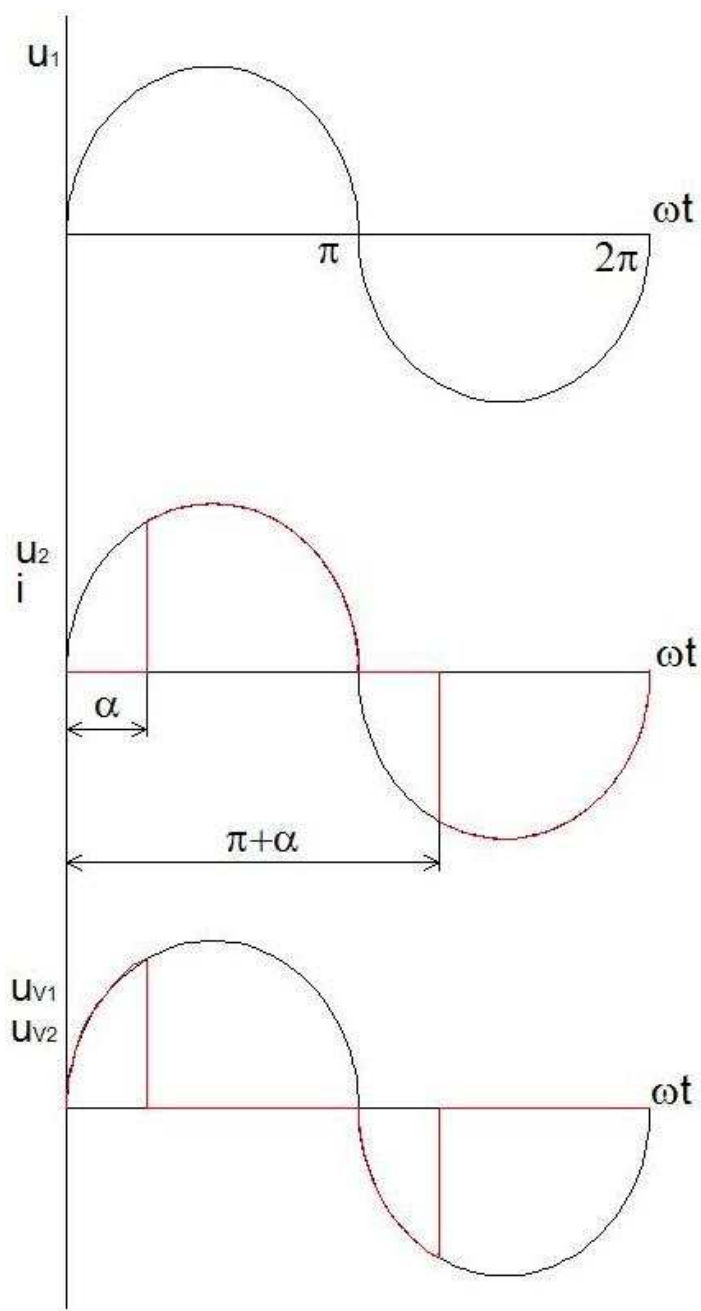
Po úseku přerušení proudu se v záporné půlperiodě napětí u_v zapíná (pomocí impulsů) tyristor V2. Na zátěži nyní působí napětí ze záporné půlperiody u_v . Pokud je zátěž induktivního charakteru, tak tyristor V2 vypne až v úseku kladné půlperiody napětí.

Střední hodnota proudu i_z , podobně jako střední hodnota napětí u_z jsou nulové. Řízením střídavého měniče napětí, tedy změnou úhlu fázového řízení α se dosáhne změn efektivních hodnot. Při maximálním úhlu $\alpha = \pi$ je měnič zablokovaný. Napětí na zátěži je nulové.

Zmenšením řídicího úhlu α se zmenšuje úsek s nulovým napětím mezi intervaly vedení tyristorů V1 a V2. Zmenšuje se tedy také úsek nulového proudu. Pokud α klesne na svoji minimální možnou hodnotu, zredukuje se úsečka s proudem zátěže rovným nule jen na přechod proudu přes nulu při změně jeho znaménka. Tehdy ale už bude proud zátěže sinusový a bude za sinusovým napětím u_v zaostávat o úhel fázového posunu φ . Úhlem φ měřeným od začátku kladné, případně záporné půlperiody napětí u_v po začátek kladné případně záporné půl periody proudu je daný minimální řídicí úhel α . Menší úhel řízení není možno nastavit, protože při krátkých pulsech se příslušný tyristor nezapne a nastává poruchový stav střídavého měniče napětí. Neřízený střídavý měnič napětí tj. při $\alpha = \varphi$ představuje přímé připojení napětí u_v na zátěž.

Činnost jednofázového střídavého měniče napětí je možno rozložit na činnost dvou samostatně pracujících jednofázových jednoimpulsových síťových měničů. Oba dva jednoimpulsové usměrňovače v střídavém měniči pracují se vzájemným zpožděním o půl periody napájecího napětí, tedy s úhlem posunu π . Z hlediska zátěže pracuje tyristor V2 jako jednoimpulsový usměrňovač s opačnou polaritou usměrněného napětí a proudu.

1.1.1. Odporová zátěž



Obr. 3 – časové závislosti napětí a proudu při odporové zátěži

Na obrázku vidíme ideální průběhy napětí a proudu při odporové zátěži. První osa zobrazuje průběh napětí na vstupu měniče. Druhý průběh zobrazuje průběhy napětí a proudu na zátěži. Vidíme, že průběhy napětí i proudu se kryjí. Zároveň je z obrázku poznat řídicí úhel. Na posledním průběhu vidíme napětí na jednotlivých tyristorech. Napětí na tyristoru narůstá stejně jako narůstá napětí na vstupu měniče. V momentě kdy přijde řídicí impuls tyristor sepne a napětí klesne na nulu. Pro

hodnoty napětí a proudu na střídavém jednofázovém měniči platí následující vztahy. Hodnotu efektivního napětí získáme integrací v mezích α až 180° .

$$U_{2e} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} u_2^2 d(\omega t)} \quad (1)$$

Střední hodnota proudu jedním tyristorem bude:

$$I_{T(AV)} = \frac{2}{\pi} \frac{U_1}{R} \int_{\alpha}^{\pi} \sin \omega t \cdot d(\omega t) \quad (2)$$

1.1.2. Induktivní zátěž

Pro čistě induktivní zátěž platí následující vztahy. Pro proud zátěží.

$$i = \sqrt{2} \frac{U_1}{\omega L} \int_{\alpha}^{\omega t} \sin \omega t \cdot d(\omega t) \quad (3)$$

Efektivní hodnota napětí na zátěži.

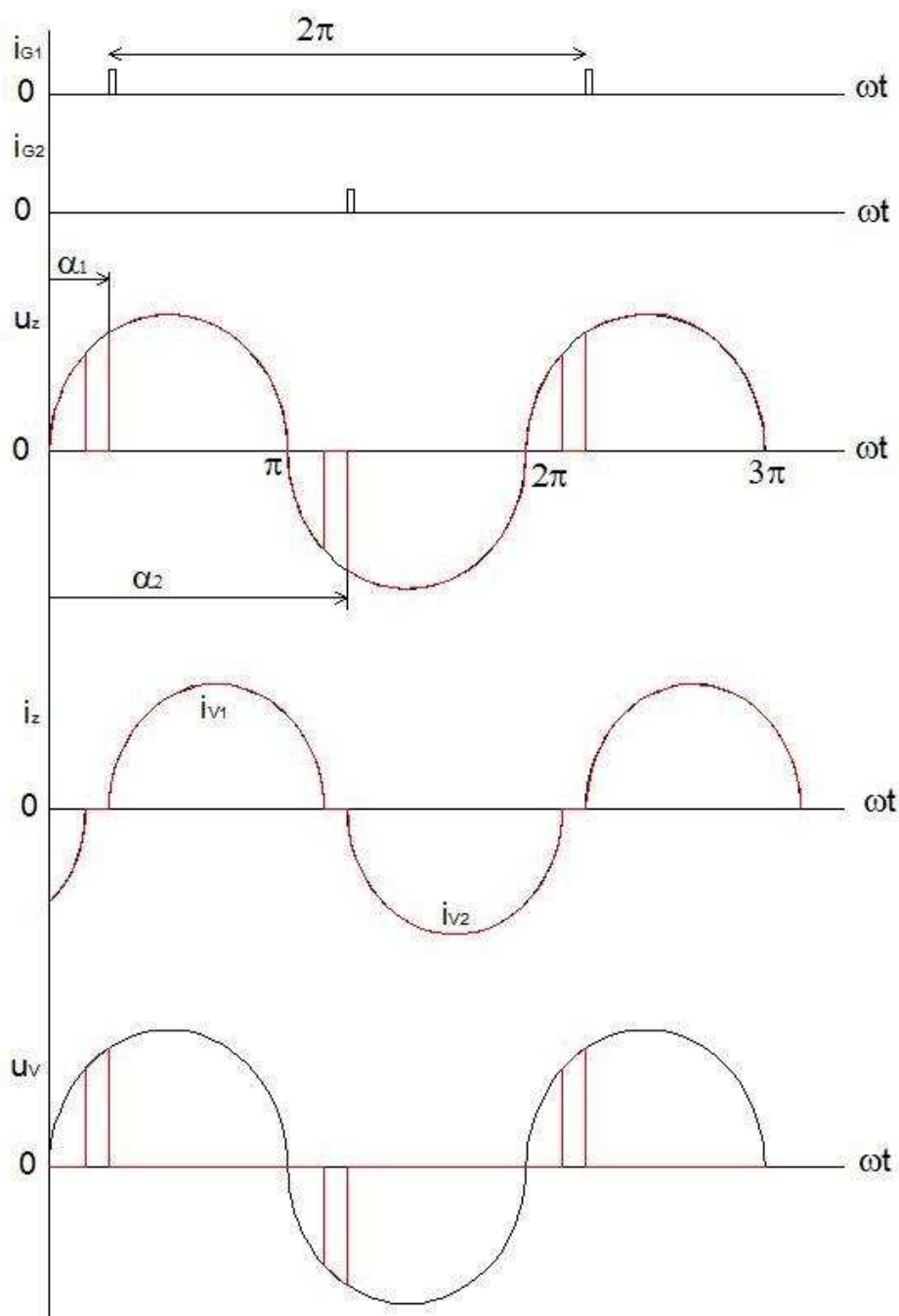
$$U_{2e} = U_1 \sqrt{\frac{2}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right)} \quad (4)$$

Tyristor se uzavře až v okamžiku, kdy jeho proud klesne na nulu. Napětí na zátěži je derivací proudu. Pokud budeme řídicí úhel zmenšovat bude se prodleva proudu rovněž zmenšovat. Pro $\alpha = \pi/2$ prodleva proudu vymizí a proud tyristorem V1 bude protékat celou půlperiodu, tyristorem V2 druhou půlperiodu. V případě, že řídicí úhel se bude dále zmenšovat pod hodnotu $\pi/2$, bude doba vedení tyristoru V1 delší než doba půlperiody. Tyristor V2 přestane spínat. V extrémním případě by tyristorem V1 protékal proud celou dobu periody a zátěží proud jedné polarity. Střídavý měnič napětí by přešel na jednopulsní usměrňovač. Proto se v regulačních obvodech zajišťuje, aby řídicí úhel nemohl být menší než $\pi/2$. Řídicí úhel $\pi/2$ jest úhlem kritickým pro řízení střídavého měniče s čistě induktivní zátěží.

1.1.3. Odporově – induktivní zátěž

Výsledný proud se skládá ze dvou složek. První složkou je ustálený sinusový proud posunutý proti napájecímu napětí o ϕ . Druhou částí je přechodná složka, která exponenciálně klesá s časovou konstantou τ . Při řídicím úhlu $\alpha = \phi$ zmizí přechodná složka proudu. Měnič je plně otevřen a to znamená že na zátěži je napájecí napětí a

na tyristorech je napětí nulové. Úhel φ je pro měnič úhlem kritickým a stejně jako u induktivní zátěže je potřeba jej omezit. Pro $\alpha < \varphi$ je měnič stále otevřen. Pro dimenzování polovodičových prvků v jednofázovém měniči napětí jsou rozhodující maximální hodnota blokovacího a závěrného napětí a maximální hodnota proudového zatížení.



Obr. 4 - časové závislosti napětí a proudu jednofázového střídavého měniče

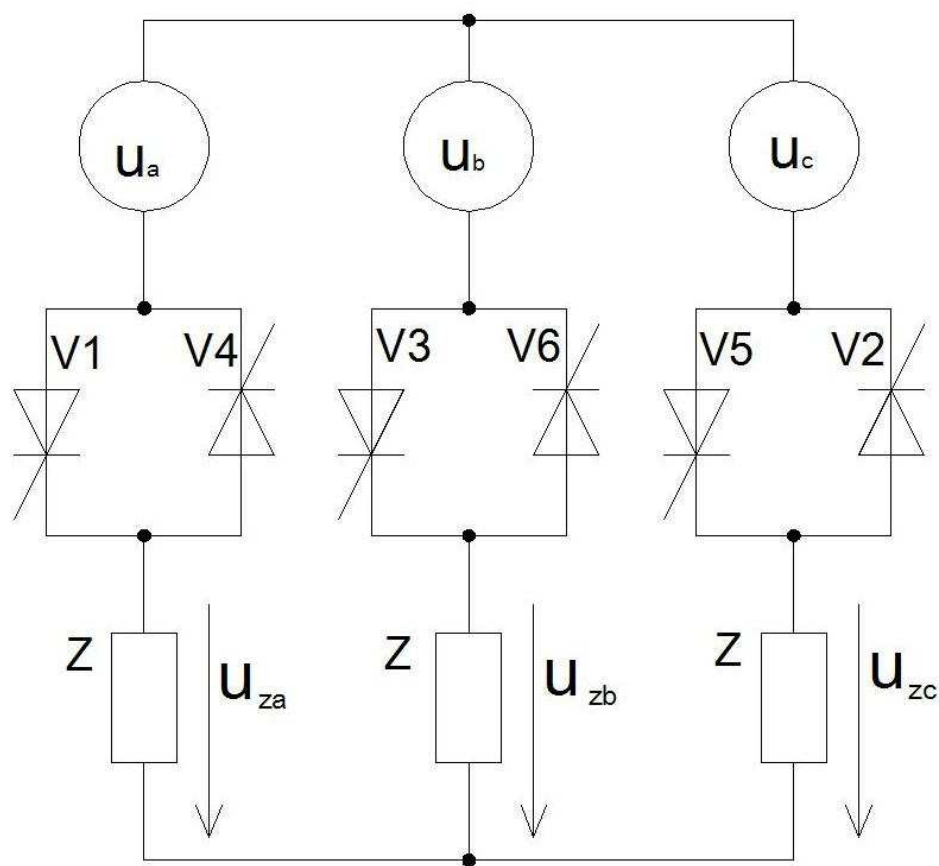
Na obrázku je průběh proudu a napětí při RL zátěži na jednofázovém střídavém měniči napětí. Na prvních dvou osách jsou průběhy řídicích impulsů pro

tyristory. Vidíme, že jsou vzájemně zpožděny o půlperiody. V některých případech se místo jednoho pulsu používá řádka impulsů. Neboť generování dlouhých impulsů je pro řídicí obvody nevhodné (vede to k nutnosti předimenzovat impulsní transformátorky). Používají se generátory impulsů, které generují řádku impulsů. Impulsy jsou velmi krátké a opakují se s kmitočtem 10 až 20 kHz. Třetím průběhem je napětí na zátěži. Po průchodu nulou vidíme, že na zátěži máme stále napětí, to je způsobeno indukčností v zátěži. Neboť proud ještě neprošel nulou a vede tyristor sepnutý v minulé půlperiodě. Čtvrtým průběhem je proud zátěží. Je zřejmé, že proud zátěží projde nulou až s fázovým zpožděním φ . Posledním průběhem je napětí na tyristorech. Vzhledem k tomu, že při průchodu napětí nulou tyristor ještě stále vede, je na něm nulové napětí. Až projde proud zátěže nulou, tak uzavře tyristor a na něm ihned narůstá napětí dle průběhu vstupního napětí. Sepnutím tyristoru napětí klesá na nulu.

1.2. Třífázový střídavý měnič napětí

Napájecím napětím třífázového střídavého měniče je třífázová napěťová soustava jejichž jednotlivá napětí jsou vzájemně posunuta o $2\pi/3$. V případě zapojení zátěže do hvězdy s vyvedenou nulou se měnič chová jako tři jednofázové fázové měniče. Pro další úvahy počítáme se symetrickou zátěží.

Proud zátěže se může uzavírat jedině tehdy, kdy jsou zapnuté alespoň dva tyristory (v případě s nevyvedenou nulou). Jeden pro proud tekoucí do zátěže a druhý pro proud tekoucí ze zátěže. K dispozici jsou tři tyristory V1, V3 a V5 pro kladný směr proudu a tyristory V2, V4 a V6 pro záporný směr proudu. Pokud je zapnutý jeden z tyristorů V1, V3, nebo V5 existují k němu vždy dva tyristory ze skupiny V2, V4, nebo V6 přes které se může uzavírat zpětný proud. Vyloučena je spolupráce dvojice tyristorů zapojených v jedné fázi tj. zapojených antiparalelně. Proto všech možných kombinací přes které může téci proud do zátěže a vytékat ven je 6. Mohou spolupracovat jak dvojice tyristorů, tak i trojice. Podmínkou je, aby každý z trojice tyristorů byl v jiné fázi a zároveň nesmí být všechny zapojené stejným směrem.



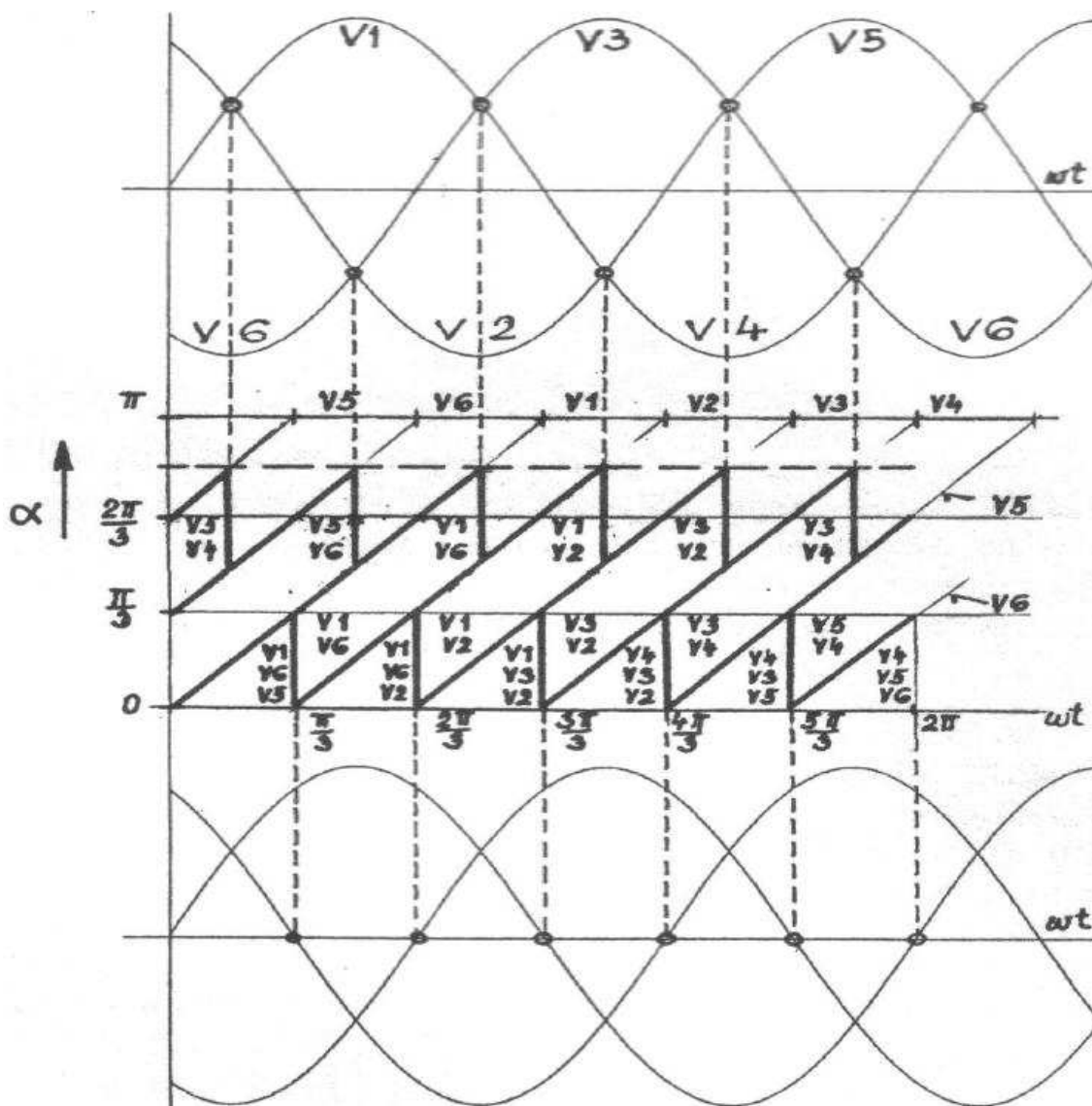
Obr. 5 - schéma zapojení třífázového střídavého měniče napětí

Uvedené podmínky respektují všechny znaménkové kombinace okamžitých fázových napětí třífázové soustavy u_{vu} , u_{uw} , u_{vw} . Ani zde se nemůže stát, aby všechna tři napětí v některém okamžiku měla shodné znaménko. Celkový počet znaménkových kombinací třífázové soustavy napětí je shodný s počtem trojic tyristorů, které mohou spolupracovat, počet je 6.

1.2.1. Odporová zátěž

Tyristory jsou řízeny spínacími impulsy. Vždy dvojící impulsů pro jeden tyristor posunutých o $\pi/3$ a tyto dvojice jsou pro různé tyristory posunuty rovněž o $\pi/3$. Při řídicím úhlu $\alpha = 0^\circ$ a symetrické odporové zátěži má každý tyristor v době kdy dostává impuls na sobě blokovací napětí. Proud daného tyristoru zaniká s průchodem napětí nulou a je úměrný příslušnému fázovému napětí. Při nulovém proudu však v okamžiku kdy dochází k uzavření jednoho tyristoru spíná antiparalelní tyristor. Na zátěži nedochází k přerušení toku proudu.

Pokud dojde ke zvětšení řídicího úhlu na $0 < \alpha < \pi/3$ zpozdí se postupně sepnutí všech tyristorů o úhel α . V intervalu od 0 do α nesepte tyristor V1 protože nemá řídicí impuls. Ve vedení zůstávají tyristory V5 a V6. V rozmezí od α do $\pi/3$ vedou proud všechny tři tyristory V1, V5 a V6. Práce měniče se tedy skládá ze dvou režimů. V jednom režimu vedou dva tyristory, v druhém vedou tři.



Obr. 6 - pracovní diagram třífázového střídavého měniče napětí při odporové zátěži

Pro vyjádření střídání taktů vedení jednotlivých tyristorů použijeme pracovní diagram. V diagramu jsou zakresleny intervaly vedení jednotlivých tyristorů v závislosti na průběhu napětí a nastaveném řídicím úhlu. Pro řídicí úhly $\pi/2 < \alpha < 5\pi/6$ se objevují takty se dvěma a žádným tyristorem ve vedení. K vypnutí dvojice tyristorů měniče dochází při každém průchodu sdruženého napětí nulou. Každý tyristor vede v jedné periodě ve dvou intervalech oddělených dobou vypnutí

všech tyristorů. Proto nestačí přivést jeden impuls, ale musí být přivedeny dva impulsy během periody. Dvojice impulsů má vzájemný odstup 60° . Tento požadavek splňují všechny generátory řídicích impulsů pro dané aplikace. Pro řídicí úhly $\alpha > 2\pi/3$ je měnič trvale vypnut.

1.2.2. Induktivní zátěž

Princip zpožděného zapínání tyristorů vlivem řídicího úhlu α je naprosto stejný jako v případě s odporovou zátěží. Rozdíl je ve vypínání tyristorů. Vzhledem k tomu, že se jedná o induktivní zátěž je první harmonická fázového proudu posunuta o 90° proti fázovému napětí. Proudový puls fázového proudu je tedy symetricky rozložen kolem průchodu fázového napětí nulou. Řídicí úhel musí být větší než 90° . Tyristor který zapíná v úhlu α musí vypínat v úhlu $2\pi - \alpha$. Protože doba ukládání energie do indukčnosti kladnou částí půlvlny sinusového napětí se musí rovnat době jejího vybíjení během záporné části půlvlny sinusového napětí.

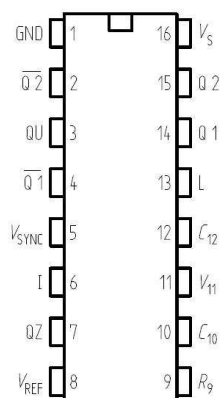
Pro řídicí úhel $\alpha < \pi/2$ je měnič trvale otevřen. Pro řízení v rozsahu $\pi/2$ až $2\pi/3$ se střídají ve vedení tři nebo dva tyristory. V rozsahu $2\pi/3$ až $5\pi/6$ tyristory dva, nebo žádný. Pro úspěšné sepnutí měniče je nutné, aby současně byly vodivé alespoň dva tyristory. Dále je nezbytné, aby délka impulsu byla dostatečná pro sepnutí následujícího tyristoru.

2. VÝROBEK

2.1. Řídící obvod

Pro řízení triaku jsem vybral specializovaný integrovaný obvod TCA 785. Tento obvod se vyznačuje univerzálností svého využití. Lze s ním řídit triaky, tranzistory i tyristory. Dalším kritériem výběru byla dostupnost na trhu. Ve výrobku jsou použity 3 integrované obvody výše uvedeného typu. Každý pro jednu fázi. Pro výrobek jsem použil doporučené zapojení, které bylo uvedeno v datasheetu k daném integrovanému obvodu s několika úpravami, aby mohl přípravek pracovat v třífázovém režimu se zátěží zapojenou do hvězdy s nevyvedenou nulou, či do trojúhelníku. Změny se odehrály v přivedení řídicích pulsů na řídicí elektrodu triaku. Dle doporučeného zapojení je řídicí elektroda připojena k specifikovaným pinům obvodu. V mém případě je přenos řídicích pulsů do řídicí elektrody realizován pomocí optočlenu. Dioda v optočlenu je zapojena na výstup integrovaného obvodu. Dioda spíná tranzistor a ten propouští pulsy do řídicí elektrody triaku. Z tohoto důvodu bylo nutné dodat do obvodu trafo a usměrňovač které napájí obvod řídicí elektrody triaku a tranzistoru optočlenu. Nastavování řídicího úhlu α je individuální pro každou fázi. Nastavování řídicího úhlu probíhá lineárním potenciometrem. Obvod je napájen ze vstupního napětí, z toho plyne, že nepotřebuje externí zdroj napájení. Napájecí napětí obvodu je sníženo výkonovým odporem, usměrněno diodou a vyhlazeno kondenzátorem. Doporučené napájecí napětí obvodu je 18 V maximálně.

Na následujícím obrázku je rozvržení jednotlivých pinů na integrovaném obvodu. Jedná se o 16- ti pinový integrovaný obvod v pouzdře P-DIP-16-1.



Obr. 7 - rozvržení pinů obvodu TCA 785

Ačkoliv integrovaný obvod obsahuje 16 pinů, při dané aplikaci nejsou využity všechny piny.

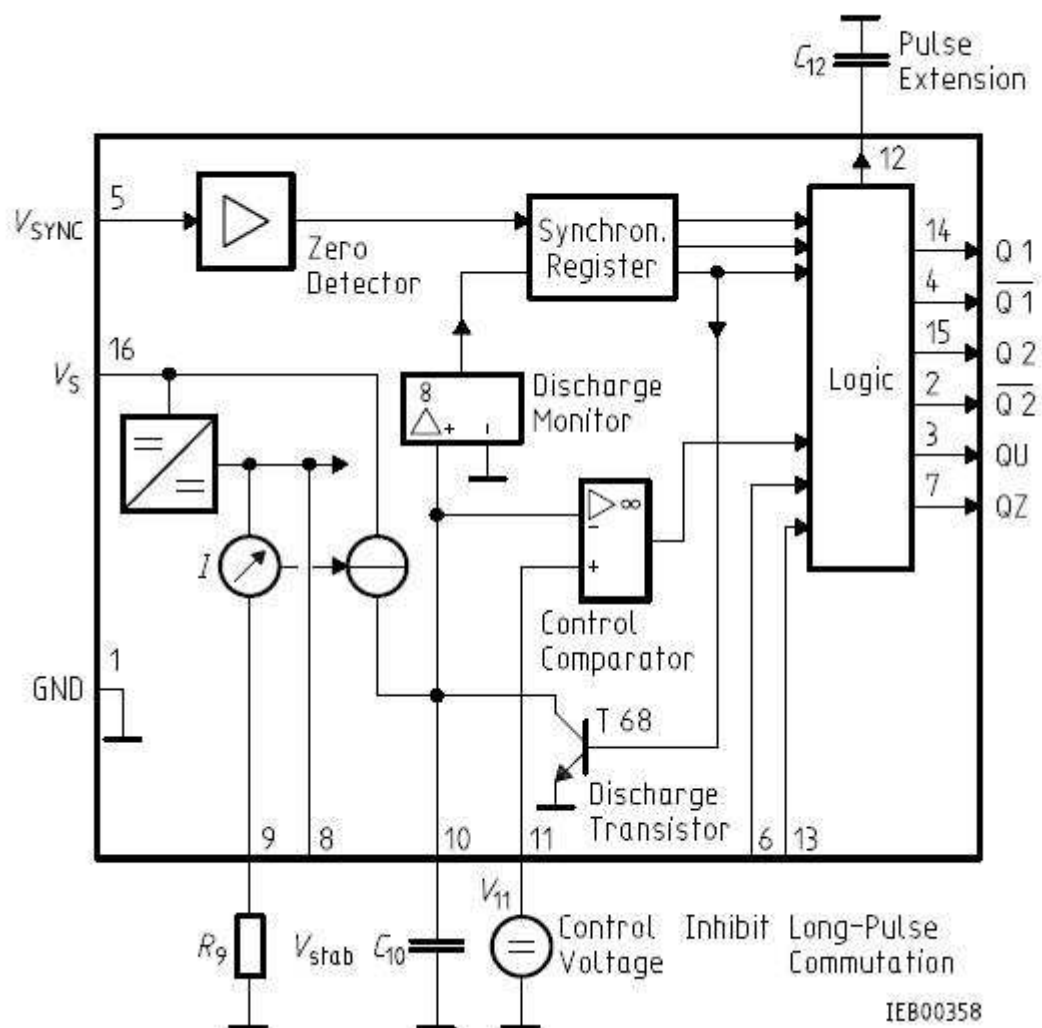
Pin	Symbol	Funkce
1	GND	Uzemnění
2	$\overline{Q_2}$	Výstup 2 invertovaný
3	QU	Výstup U
4	$\overline{Q_1}$	Výstup 1 invertovaný
5	V_{SYNC}	Synchronizační napětí
6	I	Přerušení
7	QZ	Výstup Z
8	V_{REF}	Stabilizované napětí
9	R_9	Odpor rampy
10	C_{10}	Kapacita rampy
11	V_{11}	Řídící napětí
12	C_{12}	Délka pulsu
13	L	Dlouhý puls
14	$Q1$	Výstup 1
15	$Q2$	Výstup 2
16	V_s	Napájecí napětí

Tab. 1 – přehled pinů a jejich funkce

Synchronizační napětí je přivedeno přes velký odpor z fáze na pin 5 (V_{SYNC}). Detektor nulového signálu vyhodnotí průchod střídavého napětí nulou a převede je do synchronizačního registru. Tento synchronizační registr řídí generátor rampy, kondenzátor C_{10} je nabíjen konstantním proudem, který je ovlivněn odporem R_9 . Pokud napětí rampy (V_{10}) převýší řídicí napětí V_{11} (odpovídá nastavenému úhlu α), je signál zpracován v logice. V závislosti na velikosti řídicího napětí (V_{11}) jsou generovány pulsy s fázovým posuvem v rozsahu 0° až 180° vzhledem k průchodu napětí nulou.

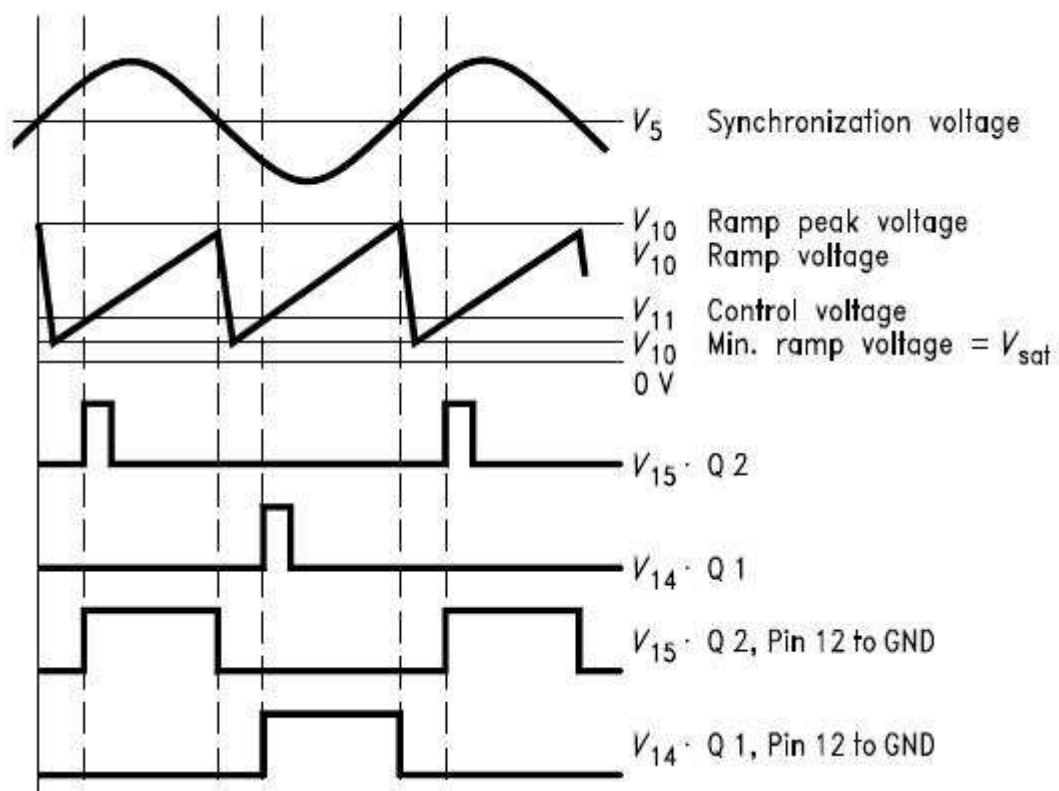
Pro každou půl periodu je generován kladný impuls o délce zhruba $30 \mu\text{s}$. V jedné půl periodě se puls objeví na výstupu Q1 (pin 14) a v druhé půl periodě na výstupu Q2 (pin 15). Délka pulsu může být prodloužena až na dobu půl periody díky kapacitoru C_{12} (pin 12). Pokud pin 12 připojíme přímo na zem budou pulsy trvat do konce půl periody.

Na výstupech $\overline{Q1}$ (pin 4) a $\overline{Q2}$ (pin 2) jsou inverzní signály k Q1 a Q2. Signál s posunem $\varphi + 180^\circ$ který může být použit k ovládání externí logiky je na pinu 3. Signál odpovídající logické funkci NOR Q1 a Q2 je k dispozici na pinu 7 (QZ). Vstupní signál na pin 6 může vést k přerušení výstupů Q1, Q2, $\overline{Q1}$ a $\overline{Q2}$. Pin 13 může být využit k prodloužení výstupu na pinech 2 a 4 na plnou délku pulsu.



Obr. 8 - vnitřní struktura integrovaného obvodu

Pro kontrolu správných funkcí obvodu je nutné zkontrolovat signály na specifických místech osciloskopem.



Obr. 9 - vybrané průběhy signálů integrovaného obvodu

Na vodorovné ose je fáze. První průběh zobrazuje napětí sítě, které zde má funkci synchronizačního napětí. Dle jeho průběhu je zaznamenán průchod nulou, tedy začátek další půlperrody. Druhý průběh je pilovité napětí na rampě. Přítomnost toho napětí je naprosto nezbytná pro funkci obvodu. Toto napětí změříme osciloskopem na pinu 10. Následující dva průběhy zobrazují impulsy pro otevření součástek. Jejich délka se pohybuje kolem 100 μ s. Poslední dva průběhy opět zobrazují impulsy pro řízení součástek, nyní ovšem s plnou délkou. Od úhlu sepnutí ϕ až po konec půlperrody.

2.2. Triak

Triak je speciální spínací řízená polovodičová součástka s třemi vyvedenými elektrodami. Jedna elektroda je řídící další dvě jsou pracovní. Triak je vlastně až šestivrstvá struktura, protože v dolní oblasti P jsou vytvořené dvě oblasti N. Přes řídící elektrodu může protékat proud oběma směry (na rozdíl od tyristoru). Triak se nemůže nacházet v závěrném stavu. V-A charakteristiky jsou shodné v 1. a 3. kvadrantu. Triak se může zapnout při obou polaritách napětí U_{21} , proto je propustná charakteristika v 1. i 3. kvadrantu. Propustné charakteristiky mají 2 významné

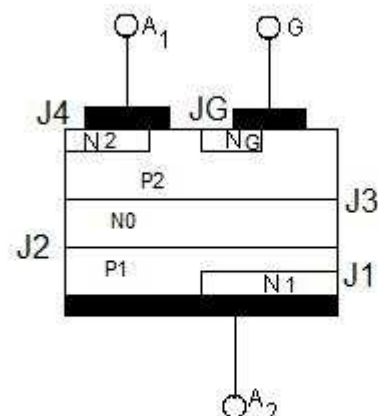
proudy. Spínací přídržný proud tj. minimální proud při kterém triak zůstane po přerušení proudu do řídící elektrody trvale zapnutý. Vratný přídržný proud při kterém se triak vypíná. Na zapnutí triaku je možné použít kladný i záporný proud řídící elektrody. Existují čtyři kombinace polarit napětí a směru hradlového proudu.

První kombinací je pokud $U > 0$ a $I_G > 0$. Přechody J_1 , J_4 a J_G jsou zkratovány, přechod J_2 je pólován propustně a přechod J_3 závěrně. V počátku nárůstu napětí U se struktura chová jako diak. Přivedením $I_G > 0$ začne protékat vrstvou P_2 podélný proud I_G , který vyvolá úbytek napětí na objemovém odporu vrstvy P_2 takový úbytek napětí, že se přechod otevře a sepne se tyristorová struktura $P_1 - N_0 - P_2 - N_2$. Triak se chová jako tyristor se zkratovaným emitorem.

Druhou kombinací je $U > 0$ a $I_G < 0$. Proud tekoucí vrstvou P_2 vyvolá úbytek napětí na odporu. A tím se sepne polovodičová struktura.

Třetí kombinací je pokud $U < 0$ a $I_G > 0$ sepnutí v tomto případě probíhá obdobně jako u tyristoru s nepřímou řídící elektrodou. Přechod J_G se neuplatní, protože proudem I_G je uzavírán a naopak přechod J_4 se otevírá. Injekce elektronů způsobí snížení potenciálové bariéry přechodu J_3 , což se projeví zvýšením proudu minoritních děr do oblasti kolektorového přechodu J_2 , kde vzroste nárazová generace. Zvýšený proud tohoto přechodu protéká vrstvou P_1 podél přechodu J_1 , který se otevře kladným úbytkem napětí. Proud elektronů injikovaný do vrstvy P_1 přispívá k nárazové generaci v přechodu J_2 tak, že zvýšený proud otevře celý přechod J_1 , který převezme funkci řídícího přechodu. Velký proud I ruší vliv proudu I_G na otevření přechodu J_4 , ten se uzavře a přestane pracovat jako řídící přechod. Posléze je v činnosti tyristorová struktura $P_2 - N_0 - P_1 - N_1$.

Čtvrtou kombinací je možnost kdy $U < 0$ a $I_G < 0$. Tento případ je podobný předchozímu případu pouze s tím rozdílem, že funkci prvotního řídícího přechodu přebírá přechod J_G . Přechod J_4 se vůbec neuplatní.



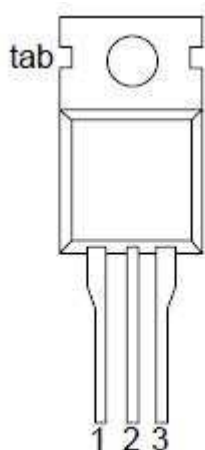
Obr. 10 - vnitřní struktura triaku

Z hlediska výkonového obvodu je mezi anodami triak ekvivalentní k antiparalelní kombinaci dvou tyristorů. Pokud bychom zkoumali řídicí obvody tak zde už se vyskytuje odlišnost. Triak má jediný řídicí obvod ve kterém může téci proud oběma směry. Dvojice tyristorů má dva řídicí obvody a tím vyžaduje dva proudy které mohou protékat jedním směrem. Značnou nevýhodou je to, že řídicí obvody tyristorů nemají společný potenciál, protože ani jejich řídicí obvody ani katody nejsou spojené do uzlu.

V porovnání s tyristorem má triak zhoršené dynamické parametry. Týká se to hlavně kritického růstu strmosti napětí. Výrazné snížení tohoto parametru nastane pouze tehdy, pokud po přerušení propustného proudu v jednom směru začne na triaku narůstat napětí opačné polarity. Tyristor je v tomto případě v závěrném stavu, který na triaku neexistuje. Může tak snadno dojít k falešnému zapnutí triaku. Aby se triak dal spolehlivě vypnout musí propustný proud předtím pomalu poklesnout a strmost růstu blokovacího napětí nesmí být velká. V případě kdy jsou dynamické parametry triaku nedostatečné je vhodné použít antiparalelní kombinaci dvou tyristorů.

2.2.1. Použitý triak

Při výběru vhodného triaku pro danou aplikaci jsem vystřídal mnoho typů. Jeden typ triaku jsem musel vyřadit z důvodu ukončení prodeje. Nakonec jsem vybral triak od společnosti Philips Semiconductors typ BT 137/800



Obr. 11 - rozvržení pinů

Pin	Popis
1	hlavní vývod 1
2	hlavní vývod 2
3	řídící elektroda
tab	hlavní vývod 2

Tab. 2 – popis pinů

Z obrázku i popisu je patrné, že destička triaku je v kontaktu s hlavním vývodem 2. Z toho důvodu je nebezpečné se triaku dotýkat. Je možný úraz elektrickým proudem, neboť zde je přítomno napájecí napětí.

Triak je schopen propustit proud o velikosti 8 A a odolá napětí o velikosti 800 V. Další velmi důležitou veličinou je řídící proud nutný pro otevření triaku. Typicky se tyto hodnoty pohybují v okruhu kolem 10 mA, maximálně 35 mA. Triak je opatřen malým pasivním chladičem pro lepší odvod tepla. Triak vydrží fungovat do teploty 100°C. Další informace o triaku jsou v data sheetu k příslušnému modelu, který je přílohou práce.

2.3. Optočlen

Pro realizaci přenosu řídicích impulsů z obvodu TCA 785 na řídicí elektrodu triaku jsem využil optočlen PC 817 C. Optočlen slouží ke galvanickému oddělení dvou obvodů. Je složen z LED a fototranzistoru v různém provedení (PNP, NPN, nebo i v Darlingtonově zapojení). Když přivedeme na vstup optočlenu malý proud potřebný na rozsvícení LED, začne se fototranzistor otevírat podle proudu procházejícího diodou – čím větší proud, tím více světla a tím se i více otevře tranzistor. Otevřený přechod tranzistoru mezi emitorem a kolektorem způsobí sepnutí obvodu na výstupu. Díky galvanickému oddělení lze ovládat obvody, které se mezi sebou liší napětovou úrovní v řádech stovek voltů. Toto použití je časté tam, kde potřebujeme mít úplně oddělená zařízení – včetně zemních (nulových) propojení.

Parametr	Velikost
Proud diodou	50 mA
Závěrné napětí	6 V
Ztrátový výkon na diodě	70 mW
Napětí kolektor - emitor	35 V
Napětí emitor - kolektor	6 V
Proud kolektorem	50 mA
Ztrátový výkon na kolektoru	150 mW
Celkový ztrátový výkon	200 mW
Doba náběhu	4 μ s
Doba sestupu	3 μ s

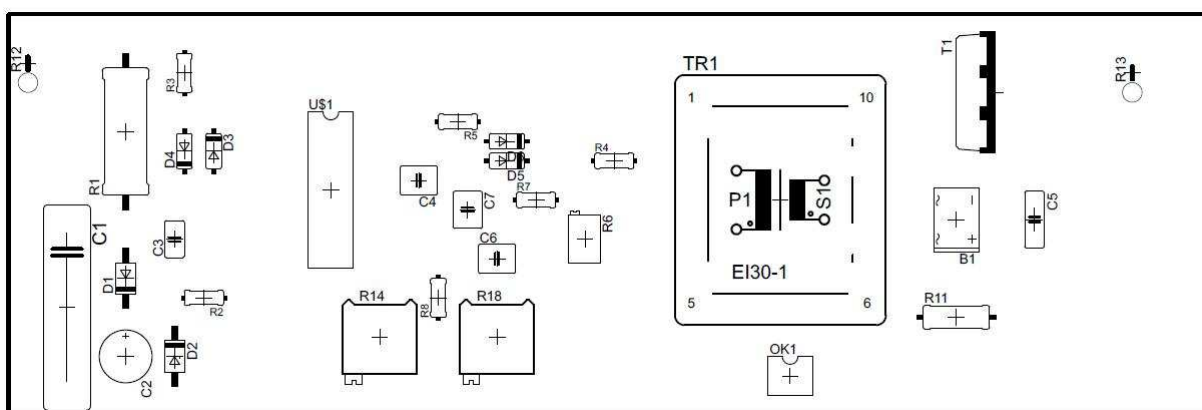
Tab. 3 – přehled důležitých parametrů optočlenu

V tabulce jsou vybrané hodnoty z katalogového listu optočlenu. Další informace jsou v katalogovém listu, který je součástí přílohy práce. Výstupní pulsy z přípravku jsou vyvedeny přes diody a odpor o hodnotě 1 k Ω na anodu diody. Katoda diody je připojena na pracovní nulu přípravku. Odpor byl zvolen vzhledem k parametrům optočlenu, aby nedošlo k jeho zničení. Výstupní napětí na výstupu z integrovaného obvodu je shodné s napájecím napětím obvodu, tj. 16 V.

2.4. Realizace

Zapojení přípravku vychází z doporučeného zapojení k ovládacímu integrovanému obvodu. Pro tuto konkrétní aplikaci bylo ovšem nutno udělat několik změn. Doporučené zapojení je v datasheetu k obvodu TCA 785, který je součástí přílohy práce.

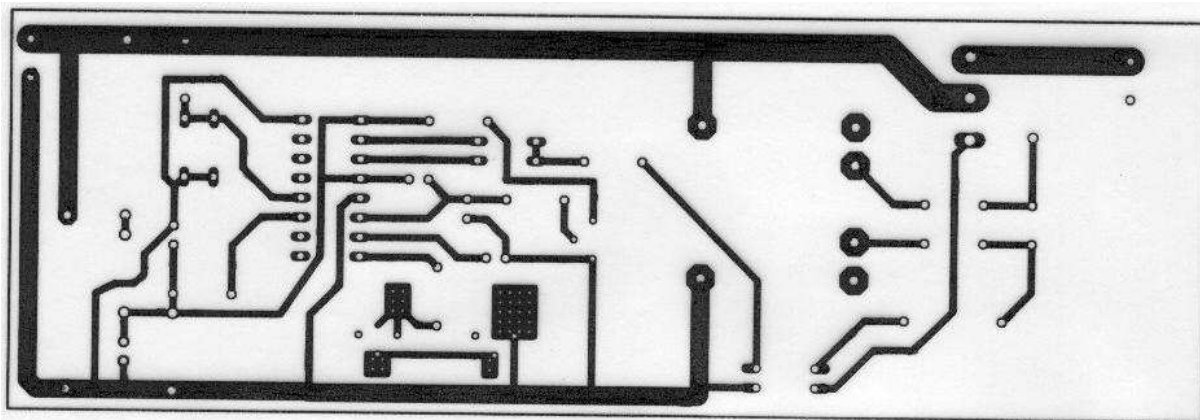
Mnou realizované zapojení je na desce o rozměrech 160 x 50 mm. Na jedné desce je realizován jednofázový střídavý měnič napětí. Výrobek obsahuje tři identické desky, každá pro obsluhu jedné fáze.



Obr. 12 - rozvržení desky

Na obrázku vidíme rozvržení součástek na desce. Pro vstup i výstup jsou využity svorky pro případnou snadnější demontáž z krabičky. Stejným způsobem je řešeno připojení triaku. Triak je ve svorkách z důvodu snadné výměny v případě poruchy součástky. Na obrázku není vidět, že každá fáze je odjištěna svojí vlastní pojistkou. Neboť pojistky nejsou součástí desky. Jsou v boční stěně krabičky. Je odjištěn vstup napájecího napětí na desku. Použil jsem pomalé pojistky pro maximální proud 5 A.

Desku jsem navrhl v programu EAGLE. Seznam všech použitých součástek na výrobu desky je součástí přílohy práce.



Obr. 13 - návrh plošného spoje

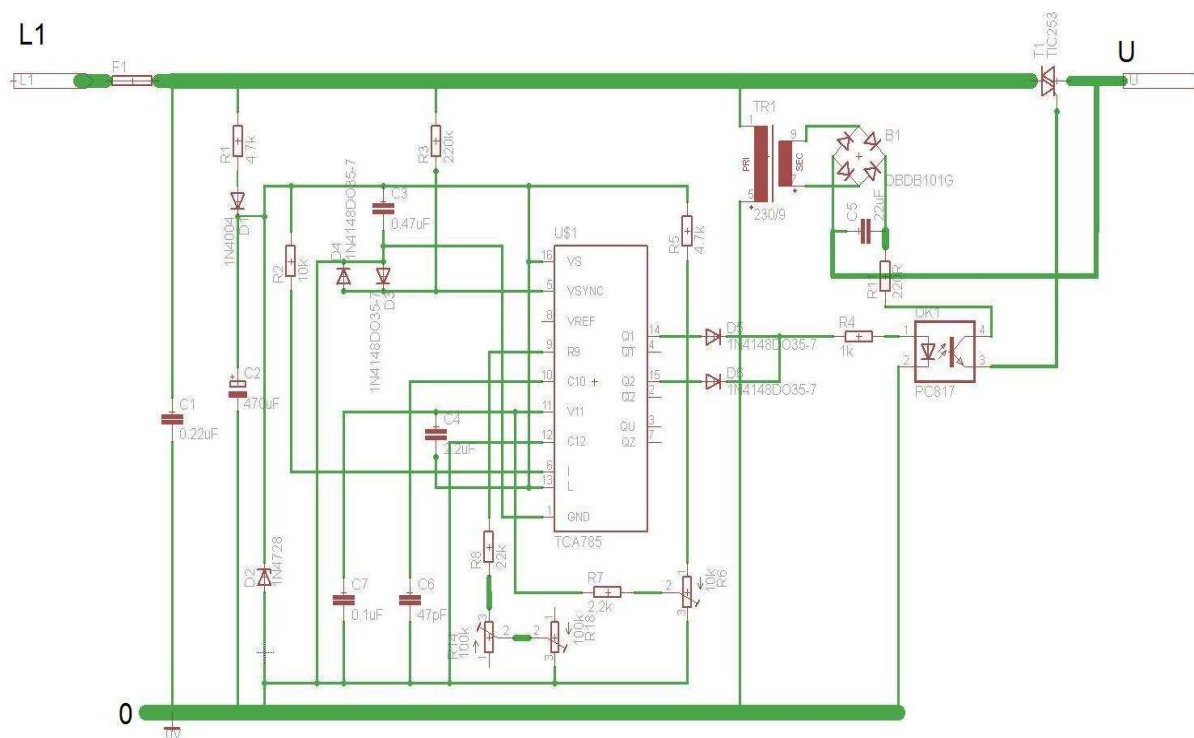
Kondenzátor C1 má odrušovací funkci. Vstupní napětí je sníženo výkonovým odporem R1 o hodnotě $4k7\ \Omega$ a ztrátovém výkonu 10 W, toto napětí je usměrněno diodou D1 a vyhlazeno kondenzátorem C2 o hodnotě $470\ \mu F$. Výstupní napětí z diody je zároveň stabilizováno zenerovou diodou D2 na hodnotu 15 V. Toto napětí je pak použito k napájení obvodu TCA 785.

Nastavování řídicího úhlu probíhá pomocí lineárního potenciometru R6 o hodnotě $10\ k\Omega$.

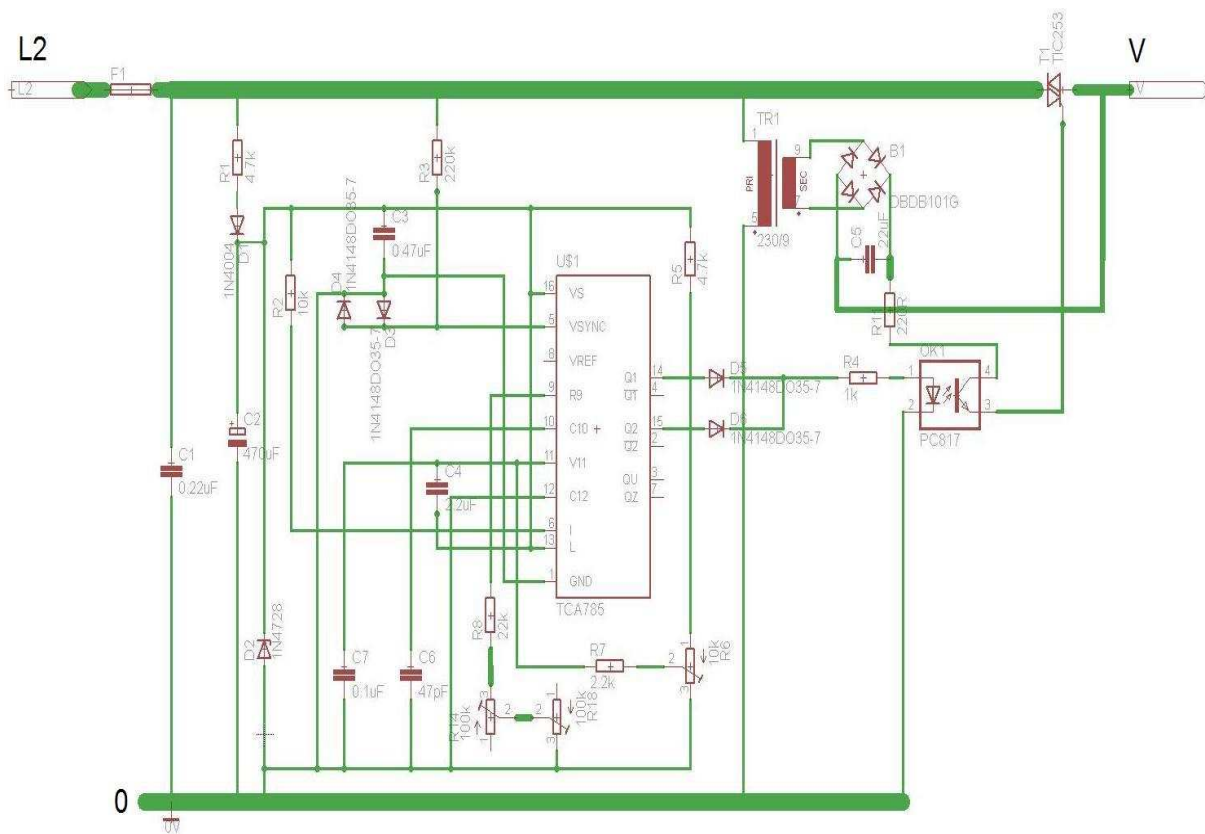
Oproti doporučenému zapojení zde jsou nějaké změny. Nejmarkantnější změnou je použití transformátoru TR1. Transformátor snižuje fázové napětí z 230 V na 9 V. Za transformátorem je můstkový usměrňovač, který usměrňuje střídavé napětí na stejnosměrné. Z důvodu vyhlazení je za usměrňovačem kondenzátor C5 o kapacitě $22\ \mu F$. Vyhlazené a usměrněné napětí je přes odpor R11 o hodnotě $220\ \Omega$ přivedeno na kolektor optočlenu OK1. Optočlen spíná napětí v závislosti na vstupním napětí diody. Z emitoru optočlenu je napětí vyvedeno na řídicí elektrodu triaku. Záporný pól usměrněného napětí je přiveden na výstup z triaku (pin1) z důvodu uzavření proudového okruhu.

2.4.1. Schéma zapojení

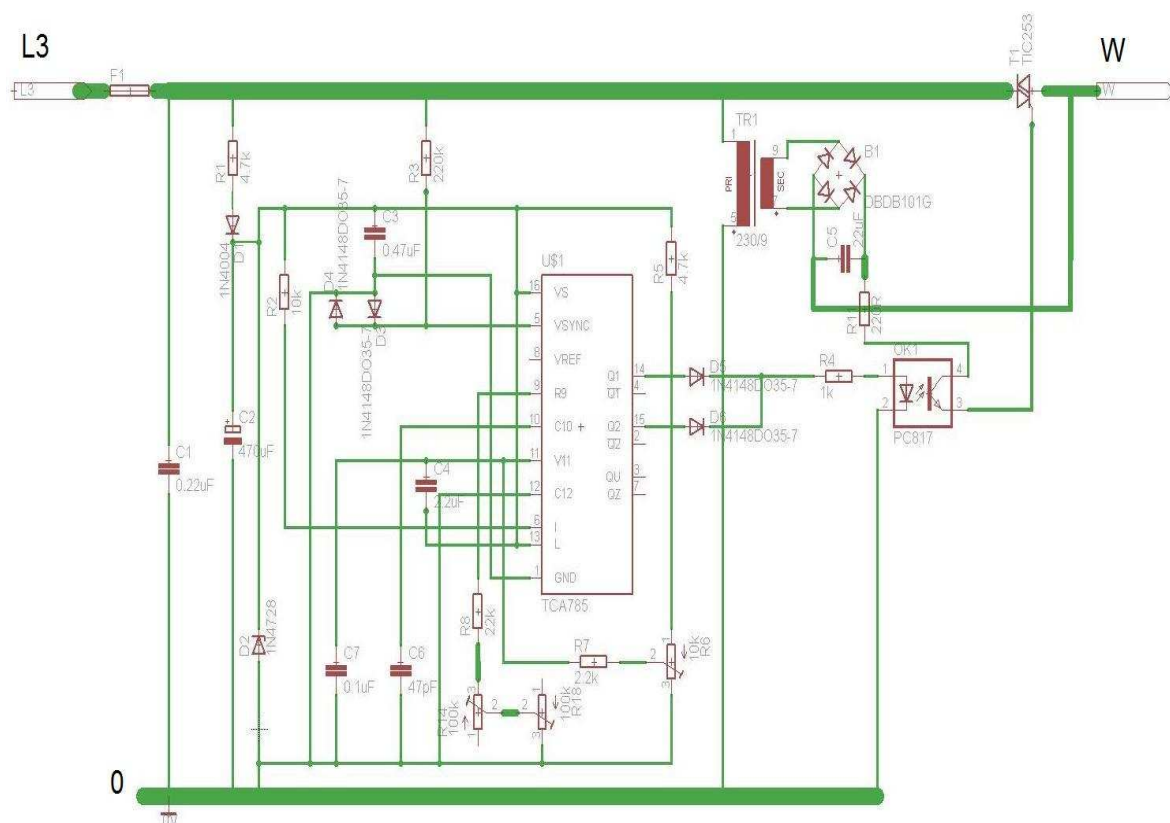
Na následujících obrázcích jsou schémata zapojení jednotlivých fází v přípravku.



Obr. 14- zapojení první fáze

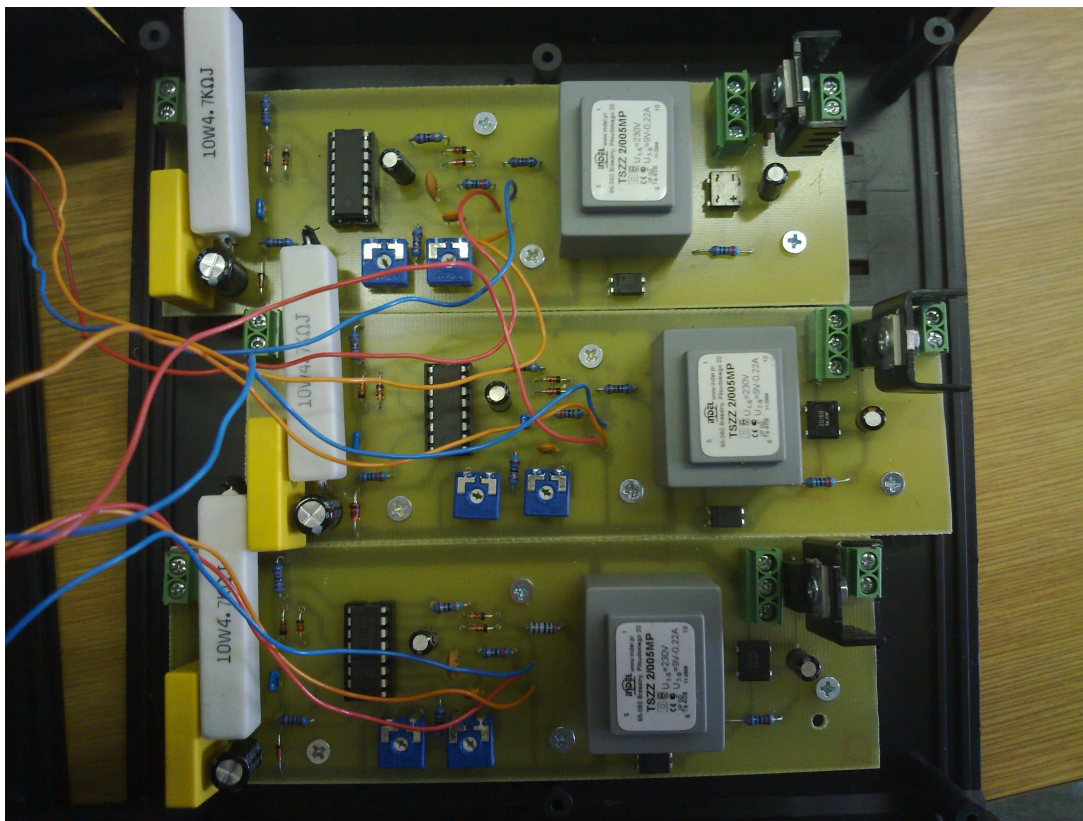


Obr. 15 - zapojení druhé fáze



Obr. 16 - zapojení třetí fáze

2.4.2. Vnitřní uspořádání



Obr. 17 - pohled na uspořádání desek v krabičce

Na obrázku vidíme již finální uspořádání desek v krabičce výrobku. Desky jsem musel zkrátit asi o centimetr, aby se do krabičky vůbec vešly. Problém ovšem nebyl jenom s jejich délkou, ale i šířkou. Krabička má rozměry 188x197x70 mm. Z obrázku je patrné, že výkonové rezistory desku přesahují, ovšem jejich funkčnosti to nijak neubírá. Barevné drátky jsou vývody k potenciometru, který je umístěn na víku krabičky. U všech desek je shodná kombinace barvy drátu a jeho účelu. Modrý drát přivádí napájecí napětí do potenciometru. Červený drát je jezdec potenciometru s jehož pomocí je nastavován řídicí úhel. Oranžový drát je připojený na pracovní nulu přípravku. Zároveň jsou zřejmé pasivní chladiče na triacích. Osobně si myslím, že mnohem více tepla budou produkovat výkonové odpory.



Obr. 18 - výrobek, pohled na krabičku

Na obrázku vidíme finální výrobek. Ve předu vidíme pojistková pouzdra. Každá fáze má vstupní zdířku označenou L1, L2, nebo L3 a výstupní zdířku jejichž značení je U, V a W. Zdířky pro připojení fáze a připojení výstupu mají červenou barvu. Černou barvu mají zdířky pracovní nuly přípravku. Stačí připojit pouze jeden nulovaný vodič. Zdířky jsou mezi sebou propojeny. Zdířky jsou dimenzovány na 25 A.

Dále vidíme potenciometry s nimiž se nastavuje řídicí úhel. Stupnice je cejchována od 0° do 180° po 30°. Tento způsob umožňuje ovládání každé fáze individuálně. Tím lze simulovat např. některé druhy softstartérů, kdy jedna fáze je připojena na síť a v dalších dvou jsou antiparalelně zapojené tyristory. Řízením tyristorů ve zbylých dvou fázích roztáčíme motor.

Cejchování potenciometrů proběhlo pro každou fázi zvlášť na odporové zátěži. Na zátěž jsem připojil osciloskop a sledoval průběhy na stínítku při otáčení potenciometrem. Při dosažení požadovaného průběhu jsem označil úhel na přípravku. Je zřejmé, že každá deska reprezentující jednu fázi má trochu odlišné

pozice pro jednotlivé hodnoty. Z tohoto důvodu je rovněž vhodné individuální nastavování.

Krabička obsahuje ventilační otvory pro lepší odvod tepla od výkonových součástek.

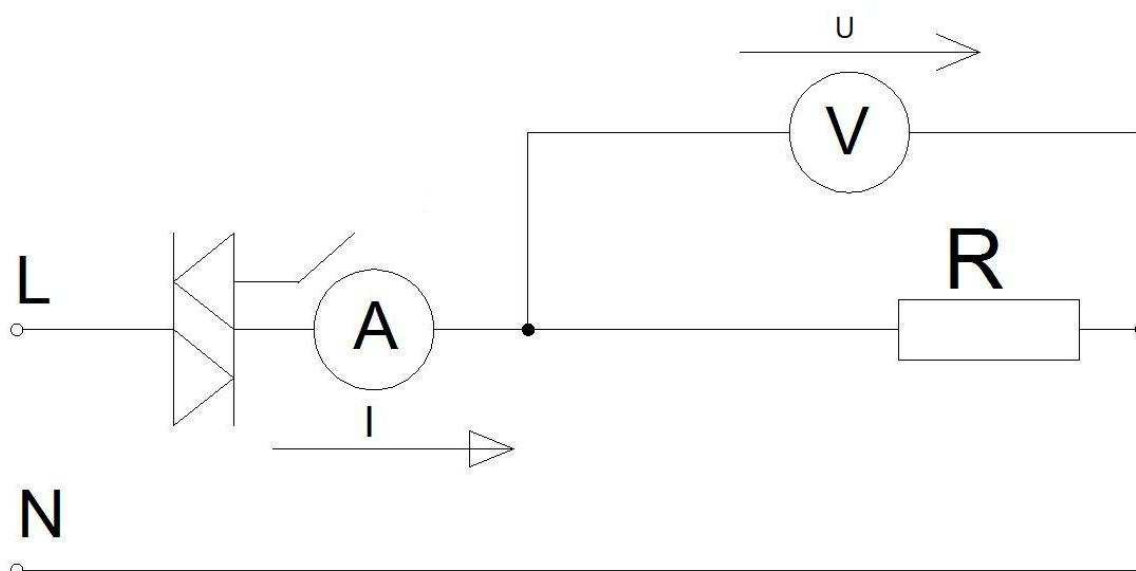
Přípravek je schopný pracovat od napětí 150 V fázových do 250 V fázových. Při napájecím napětí 150 V je potřeba přípravek nechat chvíli ustálit, než dojde k vyhlazení průběhů napětí. Při napájecím napětí od 180 V je přípravek ihned připraven regulovat v plném rozsahu. Pojistky jsou dimenzovány na 5 A, ačkoliv triak zvládne 8 A. To je z důvodu životnosti triaků a zároveň omezení ztrát na desce.

3. MĚŘENÍ

3.1. Měření jednofázového střídavého měniče napětí

3.1.1. Odporová zátěž

Pro čistě odporovou zátěž jsem změřil závislosti proudu a napětí na nastaveném úhlu α . Zde uvedené závislosti jsou vyneseny zde do grafu. U stejného typu zátěže jsem zároveň sejmul z osciloskopu průběhy proudu a napětí pro dva různé úhly α . Obrázky z osciloskopu jsou v příloze vypracované práce. Měření proběhlo při napětí 172 V. Zatěžovací odpor měl hodnotu 250 Ω . Použité měřicí přístroje byly ručkové s feromagnetickým systémem.



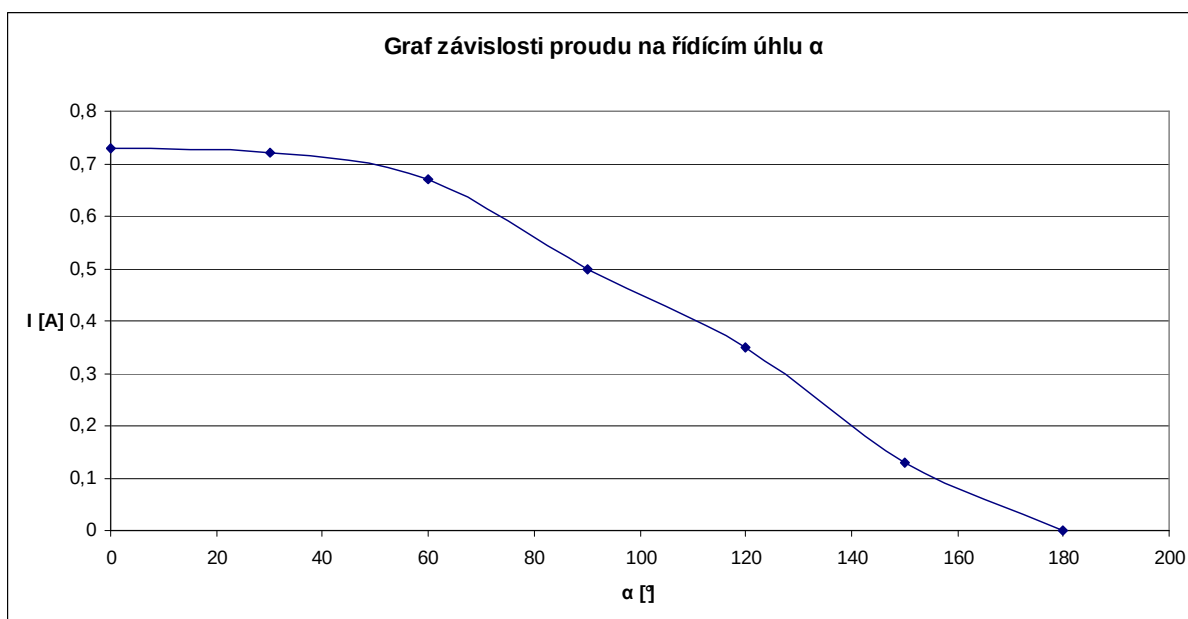
Obr. 19 - schéma zapojení pro měření na odporové zátěži

α [°]	0	30	60	90	120	150	180
U [V]	172	170	158	116	78	20	0
I [A]	0,73	0,72	0,67	0,5	0,35	0,13	0

Tab. 4 – naměřené hodnoty pro odporovou zátěž



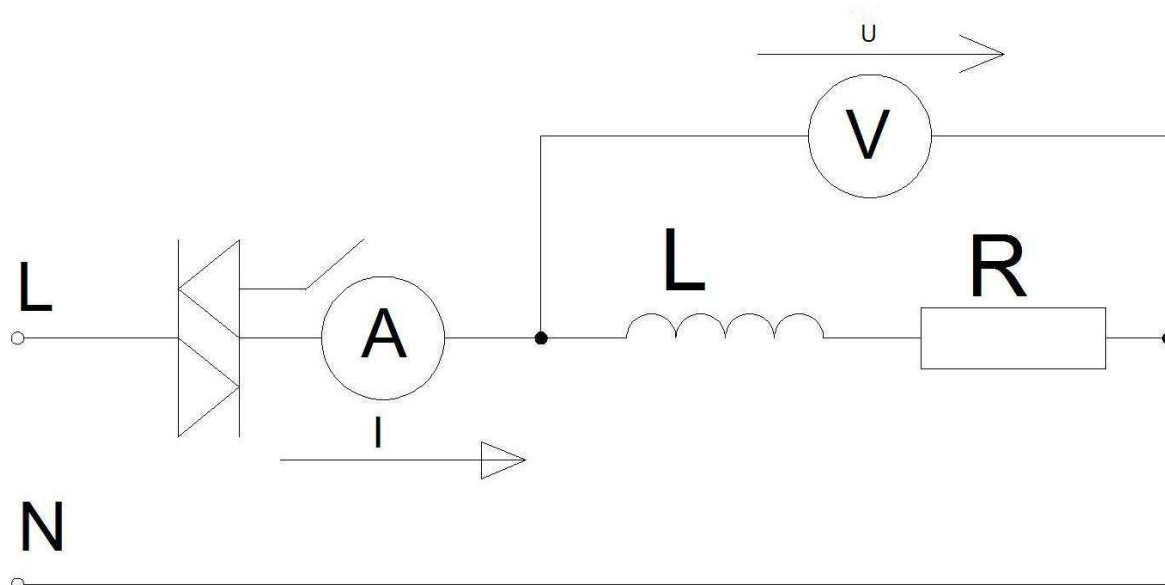
Obr. 20 - graf závislosti napětí na úhlu α



Obr. 21 - graf závislosti proudu na úhlu α

3.1.2. Odporově – induktivní zátěž

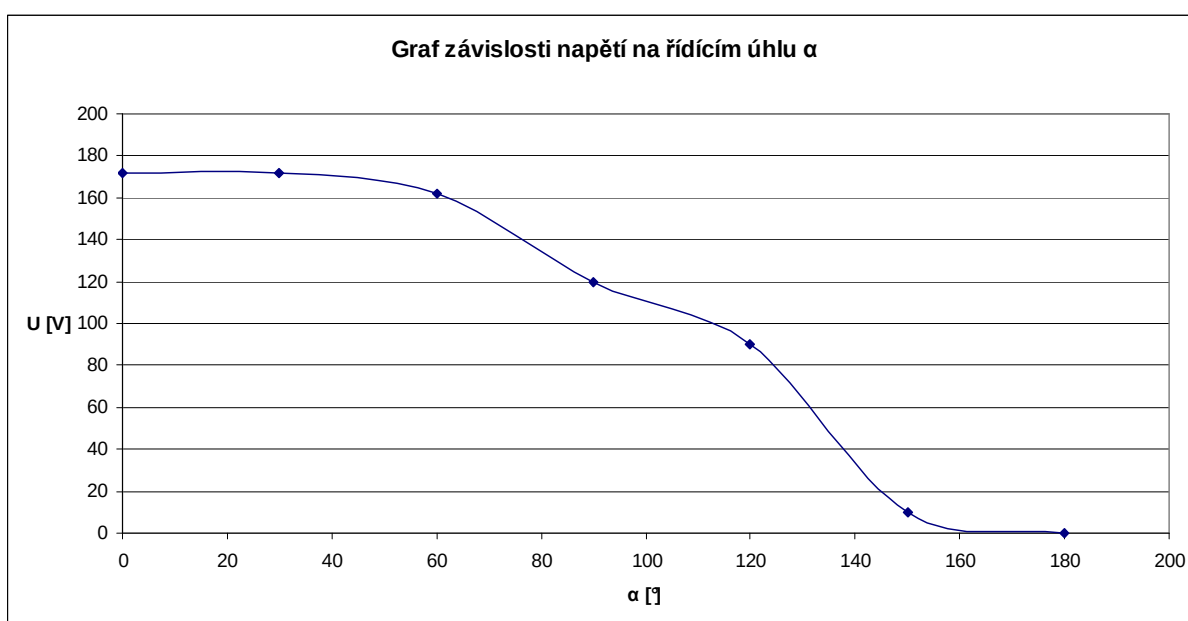
Pro RL zátěž jsem změřil závislosti proudu a napětí na řídícím úhlu α . Měření proběhlo při napětí 172 V. Zatěžovací odpor měl hodnotu 250 Ω , indukčnost byla realizována tlumivkou. Použité měřicí přístroje byly ručkové s feromagnetickým systémem. Zátěž byla realizována sériovým zapojením indukčnosti a odporu.



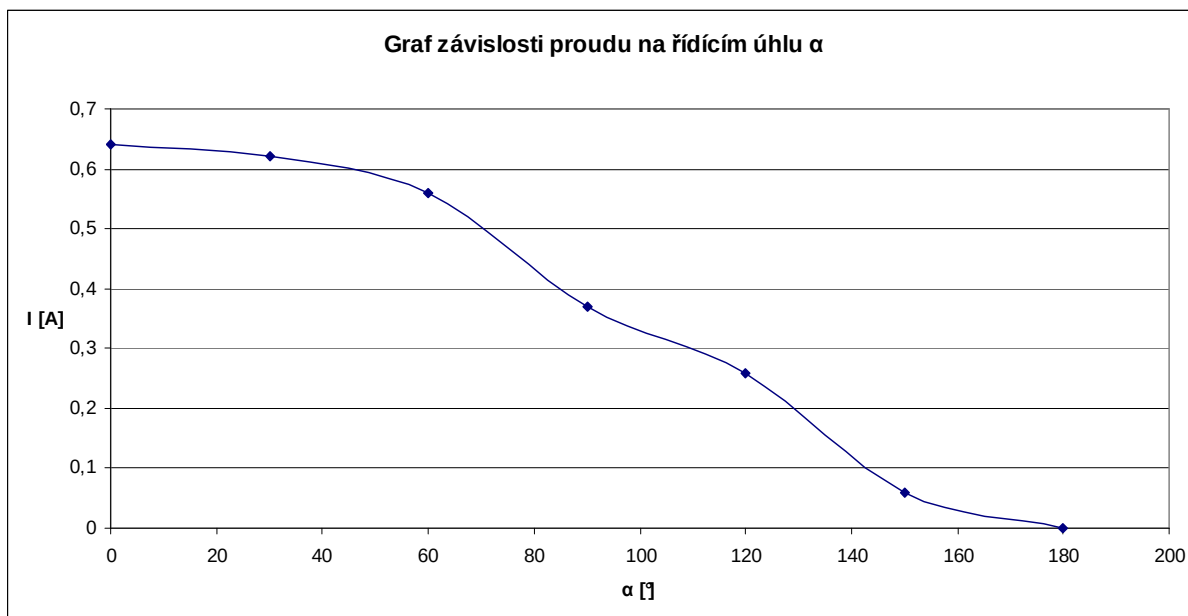
Obr. 22 - schéma zapojení pro měření na RL zátěži

α [°]	0	30	60	90	120	150	180
U [V]	172	172	162	120	90	10	0
I [A]	0,64	0,62	0,56	0,37	0,26	0,06	0

Tab. 5 – naměřené hodnoty pro RL zátěž



Obr. 23 - graf závislosti napětí na řídicím úhlu α



Obr. 24 - graf závislosti proudu na řídícím úhlu α

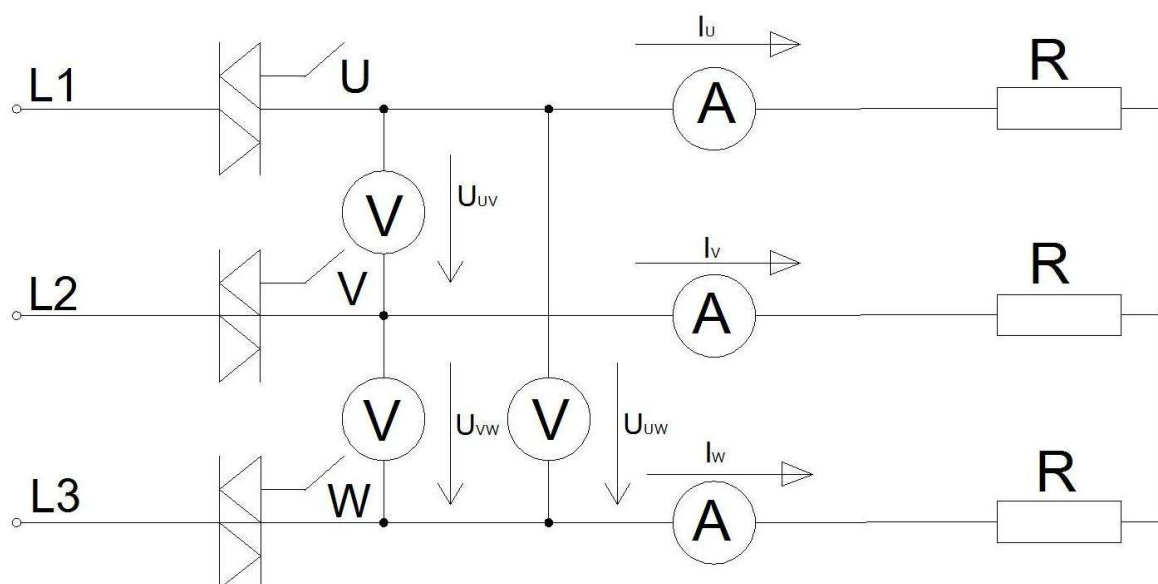
3.1.3. Zhodnocení

Z grafů je znatelný průběh nárůstu proudu a napětí v závislosti na nastaveném řídícím úhlu α . Zároveň lze vysledovat že po překročení úhlu 150° se hodnoty proudu i napětí zvyšují pouze nepatrně. Z toho lze usoudit že už při řídícím úhlu 150° je triak téměř plně otevřen. Při porovnání naměřených průběhů zjišťuji, že v případě s RL zátěží dosahujeme nižšího maximálního proudu. Napětí naopak narůstá s větší strmostí než v případě s odporovou zátěží.

3.2. Měření třífázového střídavého měniče napětí

3.2.1. Odporová zátěž

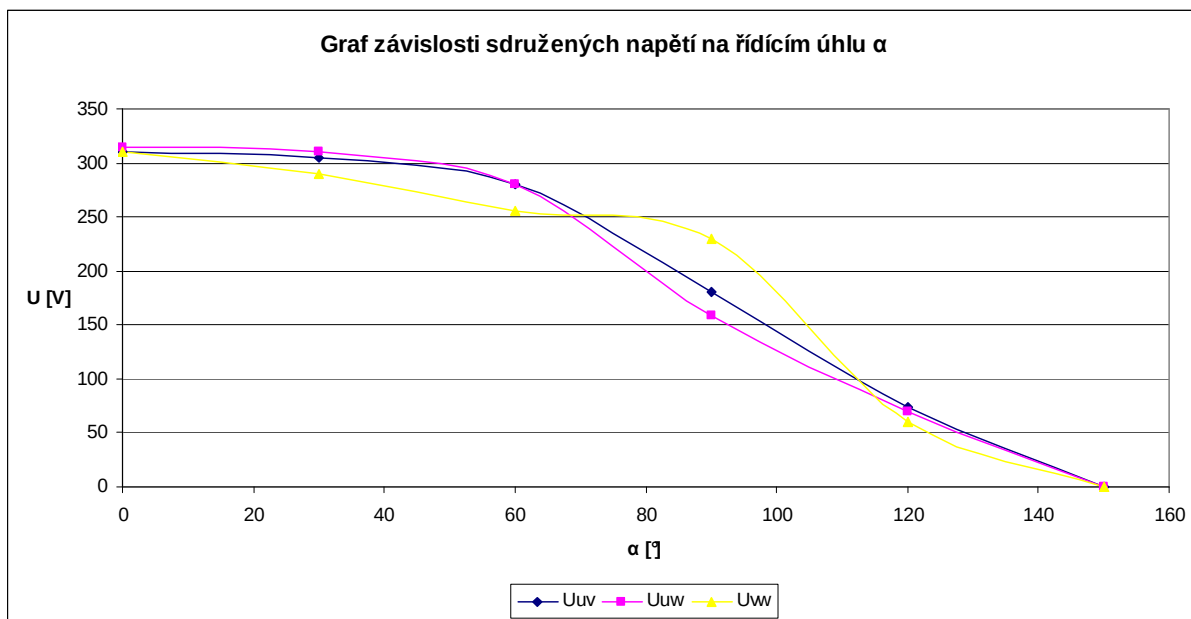
Odporovou zátěž jsem měřil v zapojení do hvězdy bez vyvedeného nulového vodiče. Zátěžné rezistory měly hodnotu $250\ \Omega$. První částí měření bylo měření sdružených napětí a fázových proudů v závislosti na nastaveném řídícím úhlu α . Zároveň jsem z osciloskopu sejmul průběhy napětí na zátěži a zároveň proud jedné fáze. Obrázky z osciloskopu jsou v příloze vypracované práce. Měření proběhlo při fázovém napětí 178 V. Použité měřicí přístroje byly ručkové s feromagnetickým systémem.



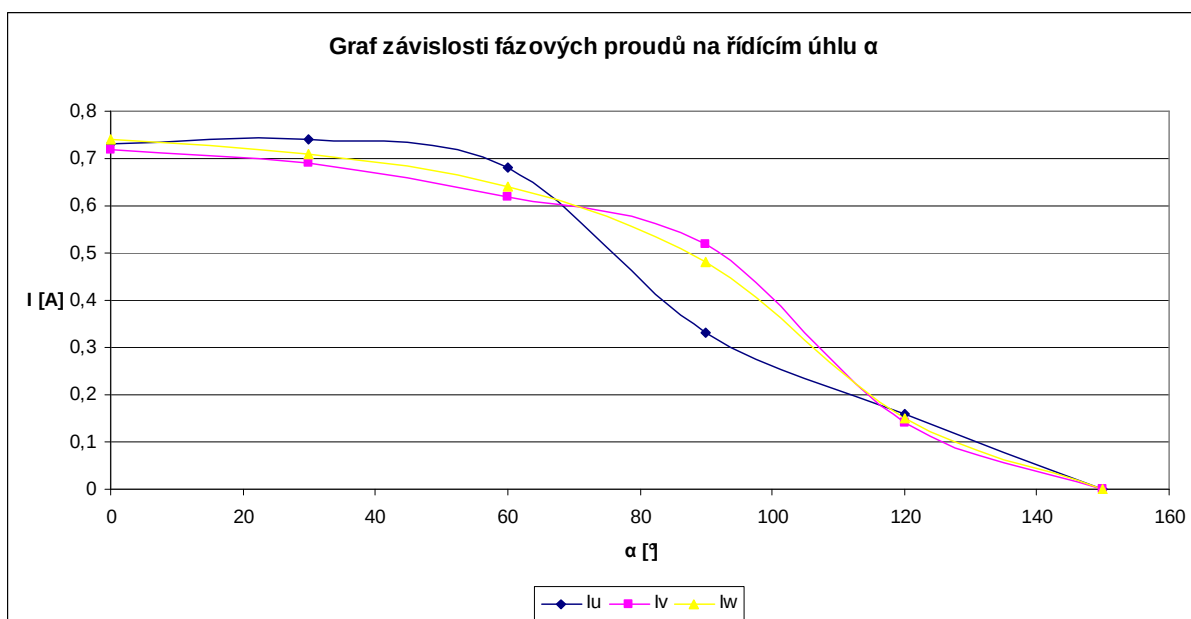
Obr. 25 – schéma zapojení pro měření na 3 fázové odporové zátěži

α [°]	0	30	60	90	120	150	180
I_u [A]	0,73	0,74	0,68	0,33	0,16	0	0
I_v [A]	0,72	0,69	0,62	0,52	0,14	0	0
I_w [A]	0,74	0,71	0,64	0,48	0,15	0	0
U_{uv} [V]	310	305	280	180	74	0	0
U_{uw} [V]	315	310	280	158	70	0	0
U_{vw} [V]	310	290	255	230	60	0	0

Tab. 6 – naměřené hodnoty pro odporovou zátěž



Obr. 26 - graf závislosti sdružených napětí na řídicím úhlu α

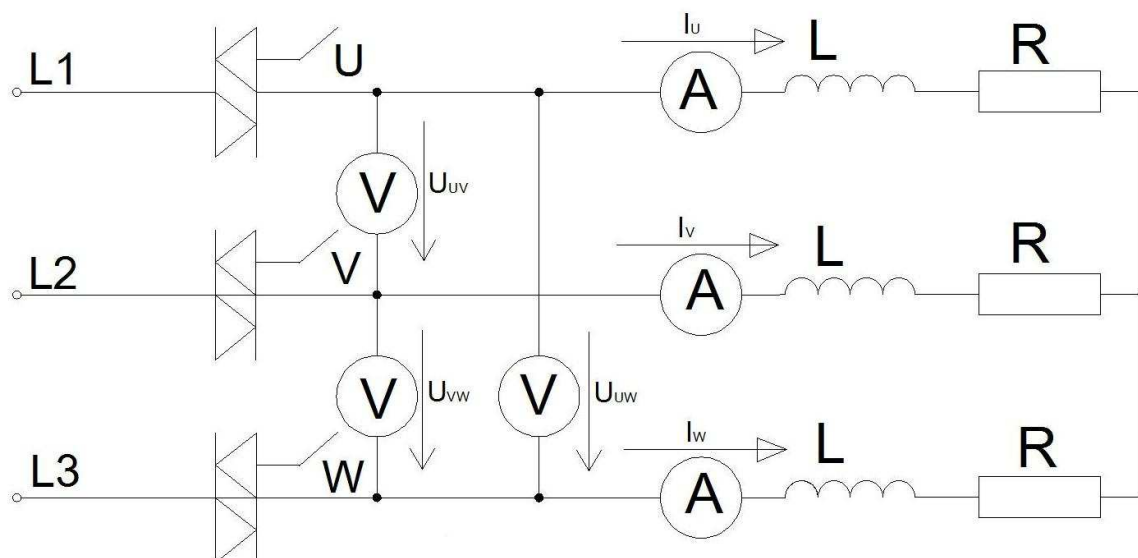


Obr. 27 - graf závislosti fázových proudů na řídicím úhlu α

3.2.2. Odporově - induktivní zátěž

RL zátěž jsem měřil při zapojení zátěže do hvězdy s nevyvedenou nulou. RL zátěž byla realizována sériovým zapojením rezistoru a indukčnosti. Zátěžný rezistor měl hodnotu $250\ \Omega$, indukčnost byla realizována tlumivkou. Změřil jsem závislosti fázových proudů a sdružených napětí v závislosti na nastaveném řídicím úhlu α .

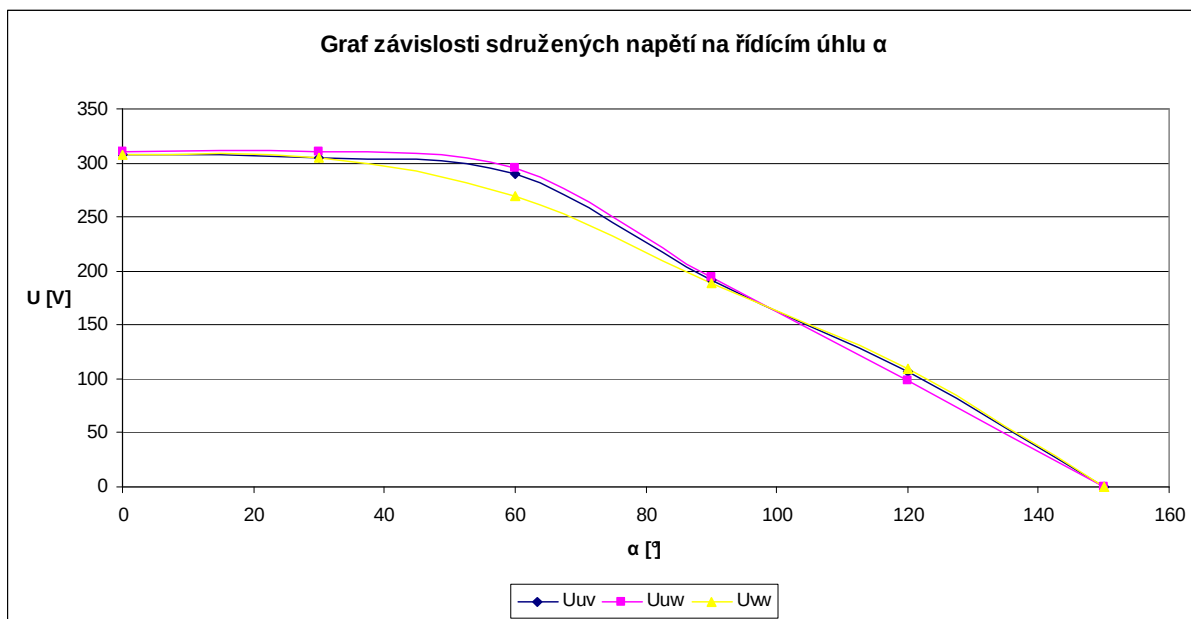
Použité měřicí přístroje byly ručkové s feromagnetickým systémem. Měření proběhlo při fázovém napětí 177 V.



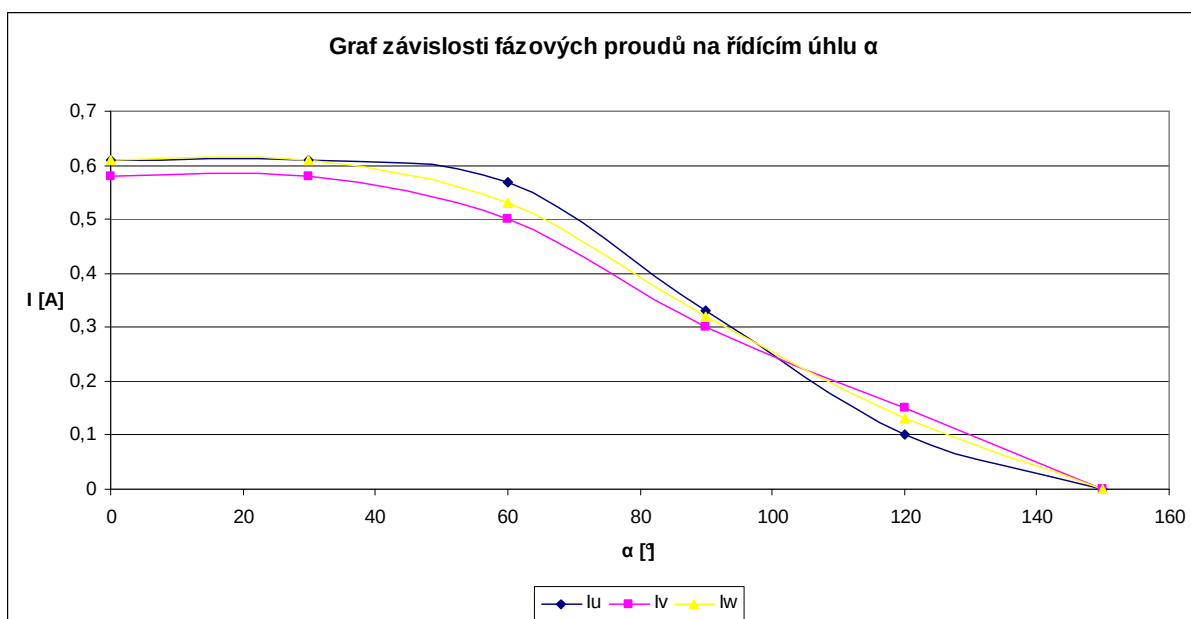
Obr. 28 - schéma zapojení pro měření na 3 fázové RL zátěži

α [°]	0	30	60	90	120	150	180
I_U [A]	0,61	0,61	0,57	0,33	0,1	0	0
I_V [A]	0,58	0,58	0,5	0,3	0,15	0	0
I_W [A]	0,61	0,61	0,53	0,32	0,13	0	0
U_{UV} [V]	307	305	290	192	107	0	0
U_{UW} [V]	310	310	295	194	98	0	0
U_{VW} [V]	307	305	270	188	110	0	0

Tab. 7 – naměřené hodnoty pro RL zátěž



Obr. 29 - graf závislosti fázových napětí na řídícím úhlu α



Obr. 30 - graf závislosti fázových proudů na řídícím úhlu α

3.2.3. Zhodnocení

Z naměřených průběhů lze vyčíst následující. Pro odporovou zátěž vidíme větší rozptyl mezi naměřenými hodnotami, než u RL zátěže. Hodnoty proudu při čisté odporové zátěži dosahují o jednu desetinu ampéry větších hodnot než u RL zátěži. Celkově můžu říci, že naměřené průběhy se shodují s předpoklady

ZÁVĚR

Výsledkem práce je funkční přípravek, jehož využití bude v laboratořích KEEZ jako učební pomůcka.

Přípravek je schopný pracovat jako jednofázový střídavý měnič napětí s odporovou a odporově – induktivní zátěží. Zároveň zvládá třífázové zapojení odporové a odporově – induktivní zátěže a to s vyvedenou nulou i bez vyvedené nuly.

Práce je koncipována jako technická dokumentace k výrobku. Jako každý projekt, který se rodí úplně od počátku i mojí práci provázely problémy. Všechny se nakonec podařilo vyřešit a zhotovit fungující zařízení. Oživování probíhalo nejprve na pokusné desce, která byla zapojena přesně dle doporučeného zapojení. Dlouho se mi nedařilo zprovoznit regulaci výstupních řídicích pulsů pomocí potenciometru. Problém byl, že v doporučeném zapojení je pro nabíjení rampy uveden kondenzátor o kapacitě 47 pF. S tímto kapacitorem napětí na rampě nedosahovalo pilovitého průběhu. Na jiném zapojení uvedeném v katalogovém listu byla uvedena kapacita rampového kondenzátoru 47 nF. S kondenzátorem o kapacitě 47 nF už vše fungovalo jak mělo. Po připojení zátěže a zkoušce regulace bylo nutno na trimrech nastavit odpor tak, aby regulace probíhala po celé délce půlperrody. Při špatném nastavení odporu rampy se může stát, že triaky nepůjde úplně otevřít, či úplně zavřít.

Dalším problémem bylo zprovoznění triaku. Předpokládal jsem, že když je střední pin v kontaktu s chladičem triaku, tak že na tomto pinu nebude fázové napětí. To jsem se ovšem spletl. Po přehození dvou hlavních pinů vše fungovalo jak mělo.

Měření na přípravku potvrdilo jeho funkčnost a schopnost regulace v plném rozsahu.

Závěrem bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Doc., Ing. Jaroslavu Novákovi CSc, za ochotu a pomoc při návrhu a realizaci výrobku.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 - schéma jednofázového střídavého měniče napětí s antiparalelně zapojenými tyristory.....	- 10 -
Obr. 2 - schéma jednofázového střídavého měniče s triakem.....	- 10 -
Obr. 3 – časové závislosti napětí a proudu při odporové zátěži	- 13 -
Obr. 4 - časové závislosti napětí a proudu jednofázového střídavého měniče	- 15 -
Obr. 5 - schéma zapojení třífázového střídavého měniče napětí	- 17 -
Obr. 6 - pracovní diagram třífázového střídavého měniče napětí při odporové zátěži. -	18 -
Obr. 7 - rozvržení pinů obvodu TCA 785.....	- 20 -
Obr. 8 - vnitřní struktura integrovaného obvodu	- 23 -
Obr. 9 - vybrané průběhy signálů integrovaného obvodu.....	- 24 -
Obr. 10 - vnitřní struktura triaku.....	- 26 -
Obr. 11 - rozvržení pinů.....	- 27 -
Obr. 12 - rozvržení desky	- 29 -
Obr. 13 - návrh plošného spoje	- 30 -
Obr. 14- zapojení první fáze.....	- 31 -
Obr. 15 - zapojení druhé fáze.....	- 32 -
Obr. 16 - zapojení třetí fáze.....	- 32 -
Obr. 17 - pohled na uspořádání desek v krabičce	- 33 -
Obr. 18 - výrobek, pohled na krabičku.....	- 34 -
Obr. 19 - schéma zapojení pro měření na odporové zátěži.....	- 36 -
Obr. 20 - graf závislosti napětí na úhlu α	- 37 -
Obr. 21 - graf závislosti proudu na úhlu α	- 37 -
Obr. 22 - schéma zapojení pro měření na RL zátěži	- 38 -
Obr. 23 - graf závislosti napětí na řídicím úhlu α	- 38 -

Obr. 24 - graf závislosti proudu na řídícím úhlu α	- 39 -
Obr. 25 – schéma zapojení pro měření na 3 fázové odporové zátěži	- 40 -
Obr. 26 - graf závislosti sdružených napětí na řídícím úhlu α	- 41 -
Obr. 27 - graf závislosti fázových proudů na řídícím úhlu α	- 41 -
Obr. 28 - schéma zapojení pro měření na 3 fázové RL zátěži.....	- 42 -
Obr. 29 - graf závislostí fázových napětí na řídícím úhlu α	- 43 -
Obr. 30 - graf závislosti fázových proudů na řídícím úhlu α	- 43 -

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - přehled pinů a jejich funkce	21
Tabulka 2 – popis pinů	27
Tabulka 3 - přehled důležitých parametrů optočlenu	28
Tabulka 4 - naměřené hodnoty pro odporovou zátěž	36
Tabulka 5 – naměřené hodnoty pro RL zátěž.....	38
Tabulka 6 – naměřené hodnoty pro odporovou zátěž	40
Tabulka 7 – naměřené hodnoty pro RL zátěž.....	42

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] PAVELKA, Jiří. ČEŘOVSKÝ, Zdeněk. LETTL, Josef. Výkonová elektronika. Praha: Nakladatelství ČVUT v Praze. 2007. 227 s. ISBN 978-80-01-03626-6
- [2] OETTER, Juraj. Výkonová elektronika pre elektrické pohony. 1. vydání. Bratislava: ALFA, vydavateľstvá technické a ekonomické literatúry. 1988. 408 s. MDT 621.382 (075.8)
- [3] VOBECKÝ, Jan. ZÁHLAVA, Vít. Elektronika součástky a obvody, principy a příklady. 3. vydání. Praha: Grada publishing. 2005. 220 s. ISBN 80-247-1241-5
- [4] Datasheet TCA 785, [online] c2010, aktualizováno 23.4.2010.
Dostupné z: < <http://www.ges.cz/sheets/t/tca785.pdf>>
- [5] Datasheet BT 137/800, [online] c2010, aktualizováno 15.5.2010.
Dostupné z: < <http://www.ges.cz/sheets/b/bt137xx.pdf>>
- [6] Datasheet PC 817 C, [online] c2010, aktualizováno 1.5. 2010.
Dostupné z: < <http://www.ges.cz/sheets/k/kb8k7.pdf>>
- [7] Optočlen, [online], c2010, aktualizováno 22.2.2010.
Dostupné z: < <http://cs.wikipedia.org/wiki/Optočlen>>
- [8] Fázové řízení, [online], c2010, aktualizováno 22.1.2010
Dostupné z: < http://motor.feld.cvut.cz/www/materialy/AD1M14SP2/N_vod-Obvod_TCA785_pro_f_zov_zen_triaku.pdf>

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č.1 – Seznam použitých součástek na výrobu tří desek

Příloha č.2 – Sejmuté průběhy ze stínítka osciloskopu

Příloha č.3 – datasheet k obvodu TCA 785

Příloha č.4 – datasheet k triaku BT 137/800

Příloha č.5 – datasheet k optočlenu PC 817 C

Příloha č.1

Seznam použitých součástek

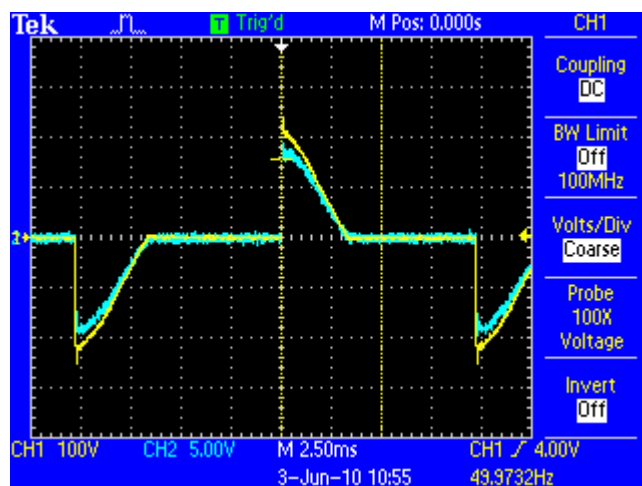
Pozice	Hodnota	Počet
Kondenzátory		
C1	0,22 μ F	3
C2	470 μ F/16 V	3
C3	0,47 μ F	3
C4	2,2 μ F	3
C5	22 μ F	3
C6	47 nF	3
C7	0,1 μ F	3
Rezistory		
R1	4,7 k Ω / 9 W	3
R2	10 k Ω	3
R3	220 k Ω	3
R4	1 k Ω	3
R5	4,7 k Ω	3
R6	10 k Ω potenciometr lineární	3
R7	2,2 k Ω	3
R8	22 k Ω	3
R11	220 Ω	3
R14, R18	100 k Ω trimr	6
Diody		
D1	1N4008	3
D2	Zenerova dioda 15 V	3
D3, D4, D5, D6	1N4148	12

U\$1	TCA 785	3
TR1	trafo EI 30-1	3
OK1	PC 817	3
B1	DB 102	3
T1	BT 137/800	3

Příloha č. 2

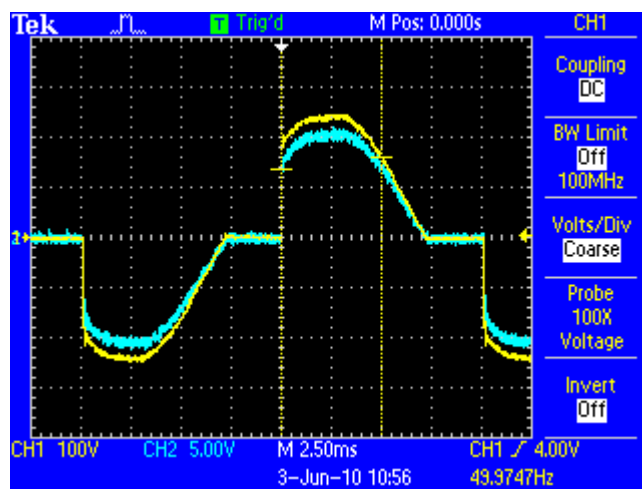
Sejmuté průběhy ze stínítka osciloskopu

Odporová zátěž, úhel 60° , 1f



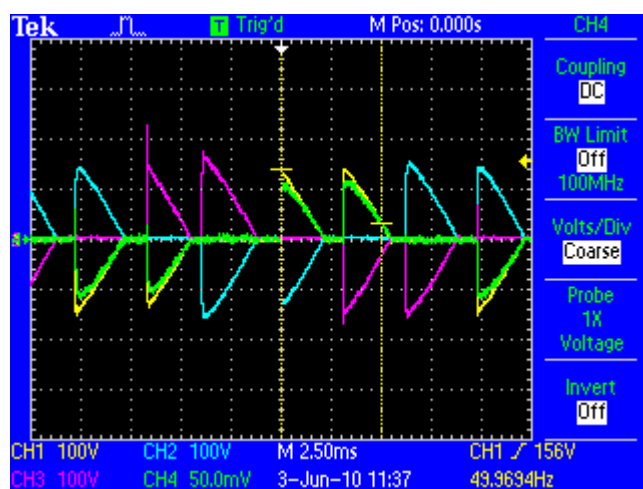
Na obrázku vidíme průběh napětí (žlutá) a proudu (modrý). Napětí je zobrazeno v rozlišení 100 V/dílek, pro zjištění proudu musíme použít přepočít. 5 V je 0,5 A. Vidíme, že proud dosahuje hodnot kolem 0,7 A.

Odporová zátěž, úhel 120° , 1f



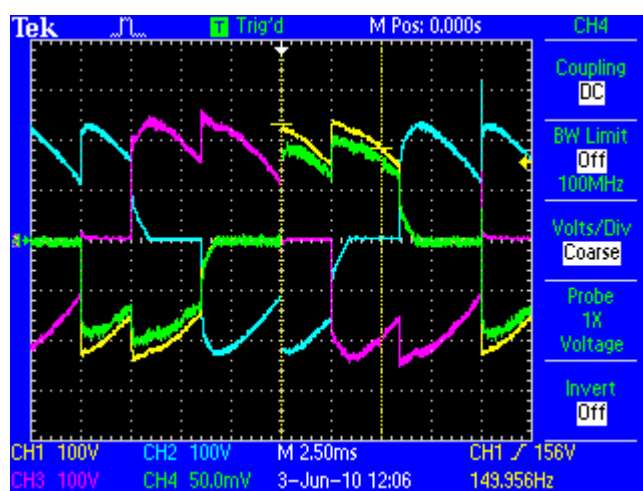
Na obrázku vidíme průběh napětí (žlutá) a proudu (modrý). Napětí je zobrazeno v rozlišení 100 V/dílek, pro zjištění proudu musíme použít přepočít. 5 V je 0,5 A. Vidíme, že proud dosahuje hodnot kolem 1 A.

Odporová zátěž, úhel 60° , 3f



Na obrázku vidíme průběh napětí na třech fázích a průběh proudu na jedné fázi. Průběh proudu koresponduje s fází na prvním kanálu. Převod pro určení proudu je $50 \text{ mV} = 0,5 \text{ A}$.

Odporová zátěž, úhel 120° , 3f



Na obrázku vidíme průběh napětí na třech fázích a průběh proudu na jedné fázi. Průběh proudu koresponduje s fází na prvním kanálu. Převod pro určení proudu je $50 \text{ mV} = 0,5 \text{ A}$.

SIEMENS

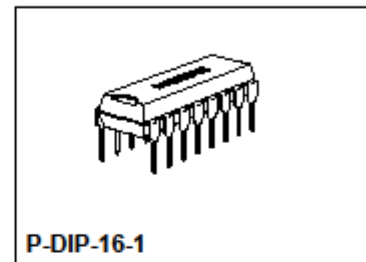
Phase Control IC

TCA 785

Bipolar IC

Features

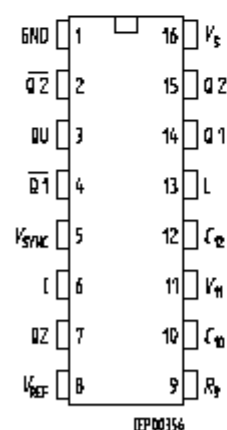
- Reliable recognition of zero passage
- Large application scope
- May be used as zero point switch
- LSL compatible
- Three-phase operation possible (3 ICs)
- Output current 250 mA
- Large ramp current range
- Wide temperature range



Type	Ordering Code	Package
TCA 785	Q67000-A2321	P-DIP-16-1

This phase control IC is intended to control thyristors, triacs, and transistors. The trigger pulses can be shifted within a phase angle between 0 ° and 180 °. Typical applications include converter circuits, AC controllers and three-phase current controllers.

This IC replaces the previous types TCA 780 and TCA 780 D.



Pin Configuration
(top view)

Pin Definitions and Functions

Pin	Symbol	Function
1	GND	Ground
2	$\overline{Q2}$	Output 2 inverted
3	QU	Output U
4	$\overline{Q2}$	Output 1 inverted
5	V_{SYNC}	Synchronous voltage
6	I	Inhibit
7	QZ	Output Z
8	V_{REF}	Stabilized voltage
9	R_9	Ramp resistance
10	C_{10}	Ramp capacitance
11	V_{11}	Control voltage
12	C_{12}	Pulse extension
13	L	Long pulse
14	Q1	Output 1
15	Q2	Output 2
16	V_s	Supply voltage

Triacs

BT137 series

GENERAL DESCRIPTION

Passivated triacs in a plastic envelope, intended for use in applications requiring high bidirectional transient and blocking voltage capability and high thermal cycling performance. Typical applications include motor control, industrial and domestic lighting, heating and static switching.

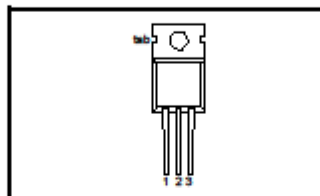
QUICK REFERENCE DATA

SYMBOL	PARAMETER	MAX.	MAX.	UNIT
V_{DRM}	Repetitive peak off-state voltages	600 BT137- 600F BT137- 600G 800	800	V
$I_{T(RMS)}$	RMS on-state current	8	8	A
I_{TSM}	Non-repetitive peak on-state current	65	65	A

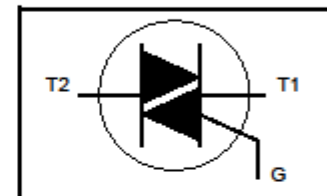
PINNING - TO220AB

PIN	DESCRIPTION
1	main terminal 1
2	main terminal 2
3	gate
tab	main terminal 2

PIN CONFIGURATION



SYMBOL



LIMITING VALUES

Limiting values in accordance with the Absolute Maximum System (IEC 134).

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
V_{DRM}	Repetitive peak off-state voltages		-	-600 800 ¹	V
$I_{T(RMS)}$	RMS on-state current	full sine wave; $T_{mb} \leq 102^\circ\text{C}$	-	8	A
I_{TSM}	Non-repetitive peak on-state current	full sine wave; $T_j = 25^\circ\text{C}$ prior to surge $t = 20\text{ ms}$	-	65	A
I^2t	I^2t for fusing	$t = 18.7\text{ ms}$	-	71	A ² s
dI_T/dt	Repetitive rate of rise of on-state current after triggering	$t = 10\text{ ms}$ $I_{TW} = 12\text{ A}$; $I_G = 0.2\text{ A}$; $dI_G/dt = 0.2\text{ A}/\mu\text{s}$	-	21	A/ μs
I_{GM}	Peak gate current	T2+ G+ T2+ G- T2- G- T2- G+	-	50 50 50 10	A/ μs A/ μs A/ μs A/ μs
V_{GM}	Peak gate voltage		-	2	A
P_{GM}	Peak gate power		-	5	V
$P_{G(AV)}$	Average gate power		-	5	W
T_{stg}	Storage temperature	over any 20 ms period	-	0.5	W
T_j	Operating junction temperature		-40	150	$^\circ\text{C}$
			-	125	$^\circ\text{C}$

¹ Although not recommended, off-state voltages up to 800V may be applied without damage, but the triac may switch to the on-state. The rate of rise of current should not exceed 6 A/ μs .

Kingbright

PHOTOCOUPLER

KB817 Series

GENERAL PURPOSE
HIGH ISOLATION VOLTAGE
SINGLE TRANSISTOR TYPE
PHOTOCOUPLER SERIES

FEATURES

- 1.High isolation voltage between input and output (Viso=5000 Vr.m.s)
- 2.Compact dual-in-line package
 - KB817:1-channel type
 - KB827:2-channel type
 - KB837:3-channel type
 - KB847:4-channel type
- 3.Recognized by UL and CUL, file NO. E225308

DESCRIPTION

- 1.The KB817 series are optically coupled isolators containing a GaAs light emitting diode and an NPN silicon phototransistor.
- 2.The lead pitch is 2.54mm

APPLICATIONS

- 1.Computer terminals
- 2.Registers, copiers, automatic vending machines
- 3.System appliances, measuring instruments
- 4.Programmable logic controller
- 5.Signal transmission between circuits of different potentials and impedances