



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

STŘÍDAVÝ MĚNIČ NAPĚTÍ

AC VOLTAGE CONVERTER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Erik Bérceš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marek Toman

BRNO 2016

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Erik Bérceš

ID: 168627

Ročník: 3

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Střídavý měnič napětí

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Navrhněte konkrétní zapojení měniče napětí určeného pro laboratorní výuku v předmětu Výkonová elektronika. Parametry měniče jsou: vstupní napětí $U_{in} = 50V$, maximální výstupní proud $I_{out} = 5 A$.
2. Vytvořte software pro řízení střídavého měniče napětí.
3. Realizujte navržený měnič a otestujte vytvořený software.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Patočka M., Vybrané stati z výkonové elektroniky, Svazek II., Vydání 3., skriptum FEKT VUT Brno, 2004
- [2] Patočka M., Výkonová elektronika BVEL, 1. část - usměrňovače, střídavé měniče napětí., skriptum FEKT VUT Brno, 2010

Termín zadání: 21.9.2015

Termín odevzdání: 31.5.2016

Vedoucí práce: Ing. Marek Toman

Konzultant bakalářské práce:

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

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Bakalárska práca sa zaoberá striedavým meničom napätia so vstupným napätím $U_{in} = 50 \text{ V}$ a výstupným prúdom $I_{out} = 5 \text{ A}$ riadeným pomocou procesoru Arduino. V práci sú obsiahnuté teoretické poznatky o striedavom meniči napätia, fázovom riadení triaku a o polovodičových súčiastkach, ktoré sú jeho hlavnými komponentmi. Hlavnou úlohou práce je návrh a realizácia zapojenia striedavého meniča napätia, ktorý bude použitý pre laboratórnu výuku v predmete Výkonová elektronika. Práca obsahuje software na riadenie meniča a overenie jeho funkčnosti.

Kľúčové slová

Striedavý menič napätia, Arduino, triak.

Abstract

The bachelor's thesis deals with an AC voltage converter with an input voltage $U_{in} = 50 \text{ V}$ and output current $I_{out} = 5 \text{ A}$ controlled by the processor Arduino. The assignment concentrates on theoretical knowledge of the AC voltage converter, phase control of triac and on the semiconductor devices which are its main components. The main task of the thesis is proposition and realization of an AC voltage converter which will be used for the laboratory work in the Power Electronics course. The thesis contains software which enables controlling the converter as well as verifying its functionality.

Keywords

AC voltage converter, Arduino, Triac

Bibliografická citácia

BÉRCEŠ, E. *Střídavý měnič napětí řízený pomocí procesoru ARDUINO*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 48 s. Vedoucí bakalařské práce Ing. Marek Toman.

Prehlásenie

Prehlasujem, že svoju bakalársku prácu na tému *Střídavý měnič napětí řízený pomocí procesoru ARDUINO* som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej bakalárskej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto bakalárskej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, hlavne som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomí následkov porušenia ustanovenia § 11 a nesledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Zb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovení § 152 trestného zákona č. 140/1961 Zb.

V Brne dňa

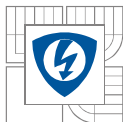
Podpis autora

PodĎakovanie

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce Ing. Markovi Tomanovi za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej bakalárskej práce.

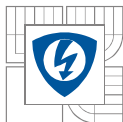
V Brne dňa

Podpis autora

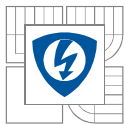


Obsah

ÚVOD	8
1 STRIEDAVÝ MENIČ NAPÄTIA	9
1.1 VÝKONOVÉ POLOVODIČOVÉ SÚČIASTKY PRE MENIČE NAPÄTIA	9
1.1.1 TYRISTORY	9
1.1.2 TRIAKY	10
1.2 JEDNOFÁZOVÝ STRIEDAVÝ MENIČ NAPÄTIA	11
1.2.1 VYUŽITIE JEDNOFÁZOVÉHO STRIEDAVÉHO MENIČA NAPÄTIA	12
1.3 TROJFÁZOVÝ STRIEDAVÝ MENIČ NAPÄTIA	12
1.3.1 VYUŽITIE TROJFÁZOVÉHO STRIEDAVÉHO MENIČA NAPÄTIA	12
1.4 RIADIACE CHARAKTERISTIKY STRIEDAVÉHO MENIČA NAPÄTIA	12
1.4.1 RIADIACE CHARAKTERISTIKY PRE ODPOROVÚ (R) ZÁŤAŽ	13
1.4.2 RIADIACE CHARAKTERISTIKY PRE INDUKČNÚ (L) ZÁŤAŽ	14
1.4.3 RIADIACE CHARAKTERISTIKY PRE ODPOROVO-INDUKČNÚ (RL) ZÁŤAŽ	15
2 PROCESOR ARDUINO A JEHO PROGRAMOVANIE	17
2.1 TYPY DOSIEK	17
2.2 POPIS DOSKY ARDUINO MICRO	17
2.3 VÝVOJOVÉ PROSTREDIE ARDUINA	18
2.4 PROGRAMOVANIE V ARDUINE	19
2.4.1 ZÁKLADNÉ BLOKY	19
2.4.2 KOMENTÁRE	19
3 NÁVRH JEDNOFÁZOVÉHO STRIEDAVÉHO MENIČA NAPÄTIA.....	20
3.1 BLOKOVÁ SCHÉMA STRIEDAVÉHO MENIČA NAPÄTIA.....	20
3.2 NÁVRH STRIEDAVÉHO MENIČA NAPÄTIA	20
3.2.1 DETEKCIA PRECHODU NAPÄTIA NULOU	20
3.2.2 RIADENIE FÁZOVÉHO UHLA	21
3.2.3 BUDENIE TRIAKU	22
3.2.4 TRIAK A VÝKONOVÝ OBVOD MENIČA.....	22
3.2.5 NÁVRH ZAPOJENIA STRIEDAVÉHO MENIČA NAPÄTIA	24
4 ZHOTOVENIE STRIEDAVÉHO MENIČA NAPÄTIA	25
4.1 ÚPRAVY NAVRHOVANÉHO ZAPOJENIA STRIEDAVÉHO MENIČA NAPÄTIA	25
4.2 NÁVRH PASÍVNYCH A POMOCNÝCH POLOVODIČOVÝCH SÚČIASTOK.....	26
4.3 REALIZÁCIA STRIEDAVÉHO MENIČA NAPÄTIA	26
4.4 TVORBA PROGRAMU PRE RIADENIE STRIEDAVÉHO MENIČA NAPÄTIA.....	28
4.4.1 FUNKCIE POUŽITÉ V ZDROJOVOM KÓDE	28
4.4.2 ZDROJOVÝ KÓD PRE RIADENIE STRIEDAVÉHO MENIČA NAPÄTIA	29
4.4.3 POPIS ZDROJOVÉHO KÓDU	30



5 OVERENIE FUNKČNOSTI REALIZOVANÉHO STRIEDAVÉHO MENIČA NAPÄTIA.....	31
5.1 ZADANIE LABORATÓRNEJ ÚLOHY.....	31
5.2 SCHÉMA ZAPOJENIA LABORATÓRNEJ ÚLOHY.....	31
5.3 NAMERANÉ A SPRACOVANÉ HODNOTY.....	32
5.4 VYHODNOTENIE LABORATÓRNEJ ÚLOHY	35
ZÁVER.....	36
LITERATÚRA	37
ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK.....	38
ZOZNAM OBRÁZKOV	40
ZOZNAM TABULIEK.....	42
PRÍLOHY	43



ÚVOD

Témou bakalárskej práce bolo navrhnuť striedavý menič napätia riadený pomocou procesoru Arduino pre laboratórnu výuku so vstupným napätím $U_{in} = 50 \text{ V}$ a výstupným prúdom $I_{out} = 5 \text{ A}$, a software pre jeho riadenie. V priebehu práce sme sa zoznámili so štruktúrou a riadením striedavých meničov napätia, aby sme mohli správne navrhnuť súčiastky a časti zapojenia meniča týchto parametrov. Keďže výstupný prúd nie je veľký použijeme triak namiesto antiparalelne zapojených tyristorov, ktoré sa používajú pri väčších výkonoch.

Striedavý menič napätia sa používa hlavne na plynulé zvyšovanie a znižovanie napätia, preto sa môže použiť ako tlmič svetiel, elektrický ohrev alebo mäkký rozbeh motorov. Na riadenie otáčok motorov sa používa striedavý menič frekvencie, s výnimkou sériovo budeného komutátorového motoru, u ktorého dokáže regulovať otáčky striedavý menič napätia.

Práca sa bude deliť na päť častí.

Prvá časť obsahuje teoretické poznatky týkajúce sa striedavého meniča napätia. V tejto kapitole sú popísané polovodičové súčiastky, ktoré sú hlavnou súčasťou meniča. Ďalej je tu vypísané využitie jednofázových a trojfázových striedavých meničov napätia. V poslednej rade sú tu opísané riadiace charakteristiky triakov pre rôzne záťaže.

Druhá časť obsahuje teoretické poznatky o procesore Arduino. Táto časť zahŕňa stručný opis typov dosiek Arduina a technické parametre dosky Arduino Micro. Ďalej je tu zoznámenie s vývojovým prostredím a úvod do programovania v Arduino.

Tretia časť obsahuje návrh konkrétneho zapojenia striedavého meniča napätia, ktorý bude použitý na laboratórnu výuku v predmete Výkonová elektronika. V tejto časti, sa práca zaoberá jednotlivými časťami obvodu a ich funkciou. Sú tu obsiahnuté skutočné súčiastky, ktoré boli navrhnuté pre správnu funkciu striedavého meniča napätia.

Štvrtá časť pozmenený návrh, realizované zapojenie, zoznam všetkých súčiastok a rozloženie súčiastok na plošnom spoji. Zároveň je tu aj opísaný postup pri vytváraní programu a použitý zdrojový kód pre ovládanie striedavého meniča napätia.

Posledná piata časť obsahuje overenie funkčnosti striedavého meniča napätia. Jeho funkčnosť bola overovaná vykonaním laboratórnej úlohy, pre ktorú bol menič navrhnutý. Z merania laboratórnej úlohy boli zapísané hodnoty do tabuliek a z týchto hodnôt boli následne zhotovené grafické závislosti. Na konci tejto kapitoly je vyhodnotenie.

1 STRIEDAVÝ MENIČ NAPÄTIA

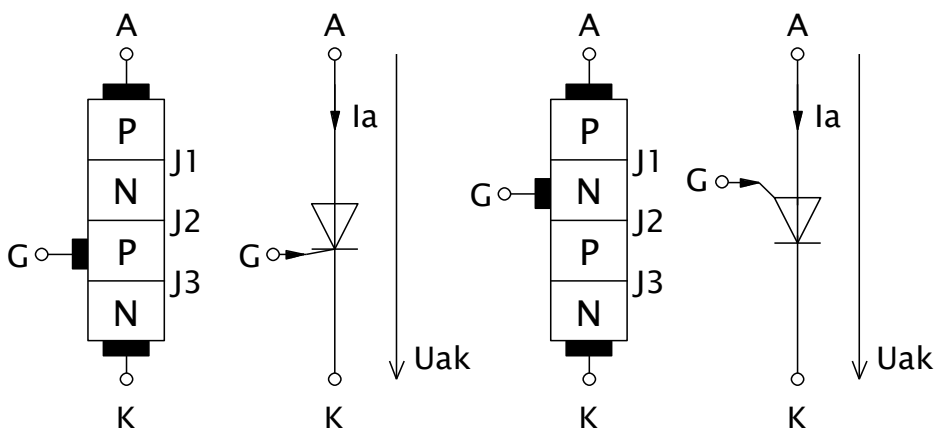
Striedavý menič napätia je menič z výkonových polovodičových súčiastok, ktorý slúži k zmene efektívnej hodnoty striedavého napätia na vstupe U_1 , na striedavé napätie U_2 inej hodnoty, pri stálej hodnote frekvencie f . Dosiahne to zmenou jeho neharmonického priebehu.

Striedavý menič napätia je tvorený triakom, ktorý je nahradzovaný dvoma tyristorami zapojenými antiparalelne pri väčších hodnotách menovitého prúdu nad 50 A. [1] [3]

1.1 Výkonové polovodičové súčiastky pre meniče napätia

V tejto časti sú ďalej popísané základné vlastnosti obidvoch spomínaných typov polovodičových prvkov používaných pre striedavé meniče napätia (tyristor a triak).

1.1.1 Tyristory



Obr. 1-1 Principiálne štruktúry a schématické značky obidvoch typov tyristorov [3]

1.1.1.1 Princíp činnosti tyristora

Tyristor patrí medzi tzv. poloriaditeľné polovodičové súčiastky. Má štvorvrstvovú polovodičovú štruktúru. Principiálne štruktúrne usporiadane možných typov tyristorov je na obr. 1-1. Obidve štruktúry sa líšia iba umiestnením hradla G, ktoré pri tyristore PNPN je na polovodiči P v blízkosti katódy K a pri tyristore NPNP je na polovodiči N v blízkosti anódy A. V štvorvrstvovej štruktúre sú tri prechody PN - J1, J2 a J3.

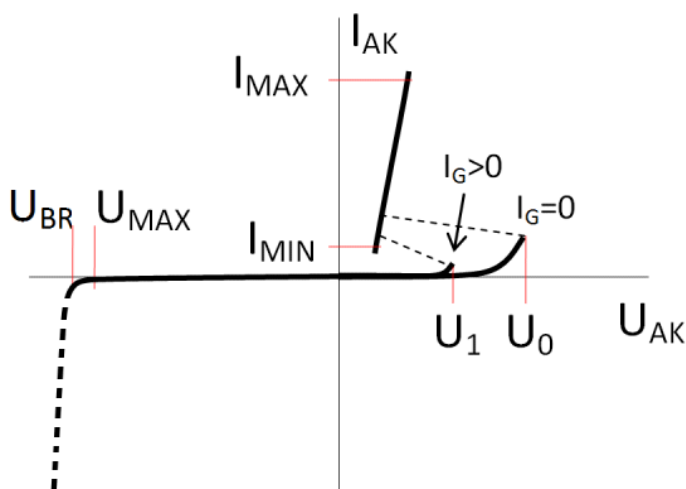
Po pripojení napätia $U_{ak} < 0$ sú krajné PN prechody J1 a J3 polarizované záverne. Tyristor je v tzv. závernom stave a prechádza ním záverný prúd I_R . Pri kladnom napätí $U_{ak} > 0$ sú krajné PN prechody J1 a J3 polarizované priepustne a iba stredný PN prechod J2 je polarizovaný záverne. Teraz je tyristor v tzv. blokovacom stave a preteká ním blokovací prúd I_A . Do pomocnej elektródy t.j. hradla G možno priviesť hradlový prúd I_G . Keď hradlový prúd dosiahne určitú kritickú hodnotu tzv. spínací prúd hradla (I_{GT}), nastáva prepólovanie stredného PN prechodu (J2) do priepustného

stavu. Štvorvrstvová štruktúra tyristora sa stane vodivou. Tomuto javu hovoríme zapnutie tyristora.

Tyristor je v priepustnom stave a správa sa ako polovodičová dióda polarizovaná priepustne. Tyristorom tečie prúd daný parametrami silového obvodu. [3] [4]

1.1.1.2 Charakteristiky tyristora

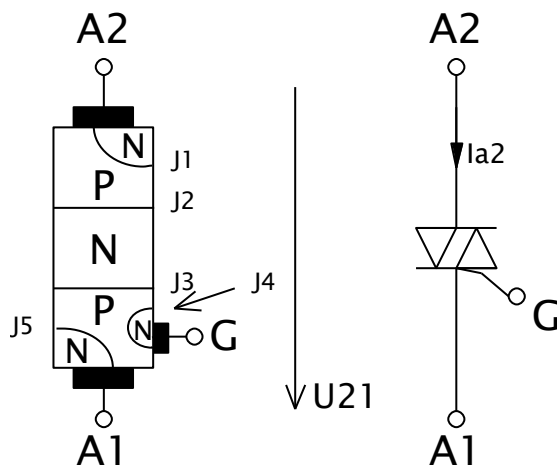
Vlastnosti tyristora najlepšie vystihujú tzv. jednosmerné resp. statické voltampérové charakteristiky (obr. 1-2).



Obr. 1-2 Voltampérové charakteristiky tyristoru

Zobrazujú dvojkvadrantovú závislosť anódového prúdu tyristora I_{AK} od napätia medzi anódou A a katódou K tyristora U_{AK} . V prvom kvadrante sú zobrazené blokovacie charakteristiky tyristora. V treťom kvadrante sú záverné charakteristiky, ktoré zodpovedajú závernému stavu tyristora. [3] [4]

1.1.2 Triaky



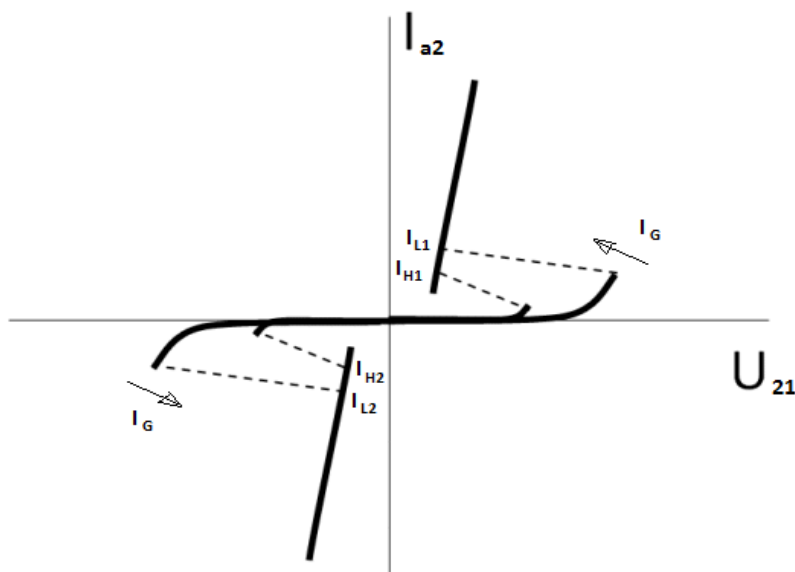
Obr. 1-3 Principiálna štruktúra a schématická značka triaku [3]

1.1.2.1 Štruktúra a princíp činnosti triaka

Triak je podobne ako tyristor riadená polovodičová súčiastka s tromi vonkajšími elektródami. Jeho štruktúra je však až šesťvrstvová s piatimi PN prechodmi J1 až J5 (obr.1-3).

Štruktúra triaku je pre obidve polarizácie napätia U_{21} medzi silovými elektródami A1 a A2 nepriepustná ak nenastane jej zapnutie pri kladnom alebo zápornom hradlovom prúde I_G . [3]

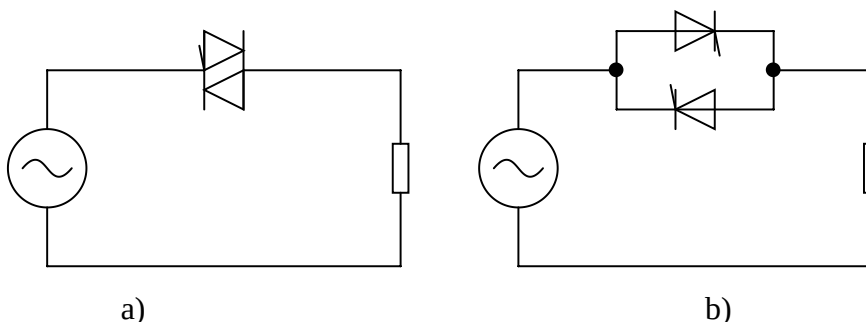
1.1.2.2 Charakteristiky triaka



Obr. 1-4 Voltampérové charakteristiky triaku

V porovnaní s tyristorom sa triak nemôže nachádzať v závernom stave. Preto v treťom kvadrante nie sú záverné ale opäť blokujúce charakteristiky obdobné ako v prvom kvadrante (obr.1-4). Triak sa môže zapnúť pri obidvoch polaritách napätia U_{21} medzi silovými elektródami A1 a A2. Preto je aj priepustná charakteristika taktiež v prvom aj treťom kvadrante pri ktorej už nie je parametrom hradlový prúd I_G . [3]

1.2 Jednofázový striedavý menič napätia



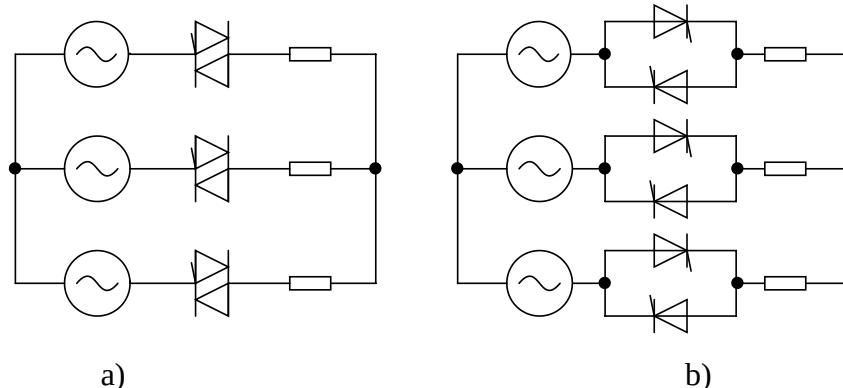
Obr. 1-5 Jednofázový striedavý menič napätia a) s triakom, b) s tyristormi

1.2.1 Využitie jednofázového striedavého meniča napätia

Jednofázový napäťový menič sa používa na:

- reguláciu teploty
- tlmenie žiaroviek
- plynulú reguláciu rýchlosti sériovo budeného komutátorového motoru [2]

1.3 Trojfázový striedavý menič napätia



Obr. 1-6 Trojfázový striedavý menič napätia a) s triakom, b) s tyristormi

1.3.1 Využitie trojfázového striedavého meniča napätia

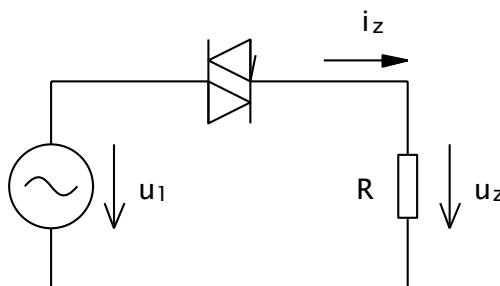
Trojfázový napäťový menič sa používa na:

- reguláciu teploty
- regulácia rýchlosti trojfázového asynchrónneho motoru
- mäkký rozbeh asynchrónneho motoru [2]

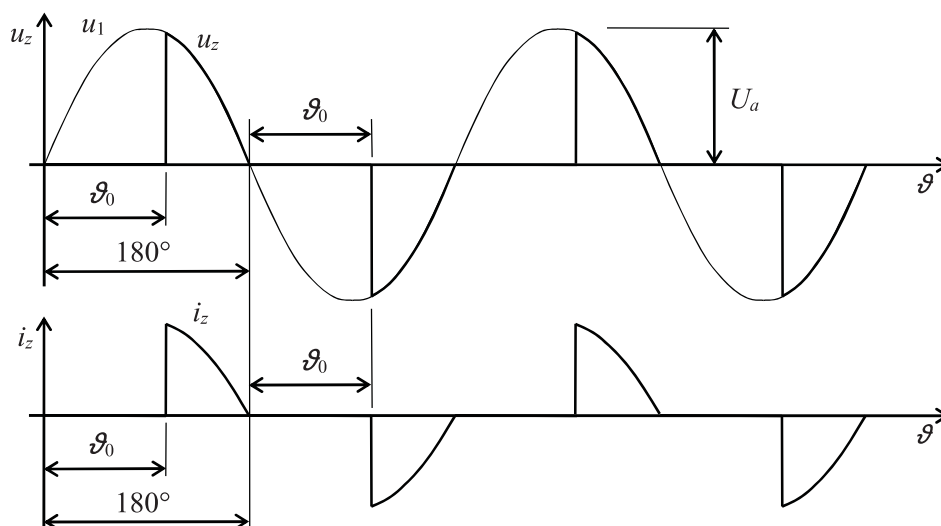
1.4 Riadiace charakteristiky striedavého meniča napätia

Riadiaca charakteristika striedavého napäťového meniča s fázovým riadením určuje závislosť efektívnej hodnoty výstupného napätia meniča (resp. efektívnej hodnoty napätia na samotnej záťaži pripojenej k meniču) od veľkosti fázového uhla θ_0 zadávaným v rámci fázového riadenia výkonového polovodičového prvku meniča (v tomto prípade triaka). Efektívna hodnota výstupného napätia meniča U_{ef} sa však mení aj so zmenou charakteru záťaže a preto pri skúmaní riadiacej charakteristiky meniča je treba definovať danú záťaž. [2]

1.4.1 Riadiace charakteristiky pre odporovú (R) zát'až



Obr. 1-7 Principiálna schéma striedavého meniča napätia s odporovou záťažou



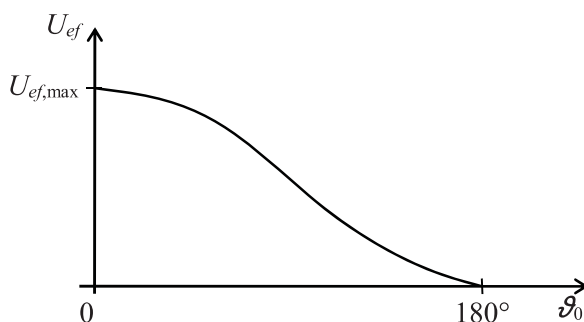
Obr. 1-8 Priebeh napätia a prúdu na odporovej záťaži striedavého meniča napätia [2]

Z priebehov napätia na R – záťaži (obr. 1-8) je možné odvodiť nasledovný vzťah medzi efektívnou hodnotou výstupného napätia meniča U_{ef} a fázovým uhlom riadenia triaku ϑ_0 :

$$U_{ef} = U_{ef,max} \sqrt{1 - \frac{\vartheta_0}{\pi} + \frac{1}{2\pi} \sin 2\vartheta_0} \quad (1.1)$$

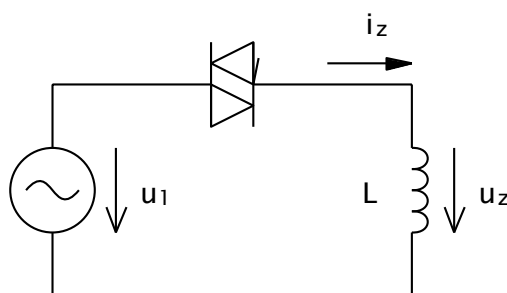
Fázový uhol má rozsah riadenia 0° až 180° s tým že fázovému uhlu 0° zodpovedá maximálna efektívna hodnota výstupného napätia meniča (menič je plne otvorený a na záťaži je plné napájacie napätie) a fázovému uhlu 180° zodpovedá nulová hodnota výstupného napätia meniča. [2]

Celá riadiaca charakteristika má nasledovný priebeh (obr.1-9):

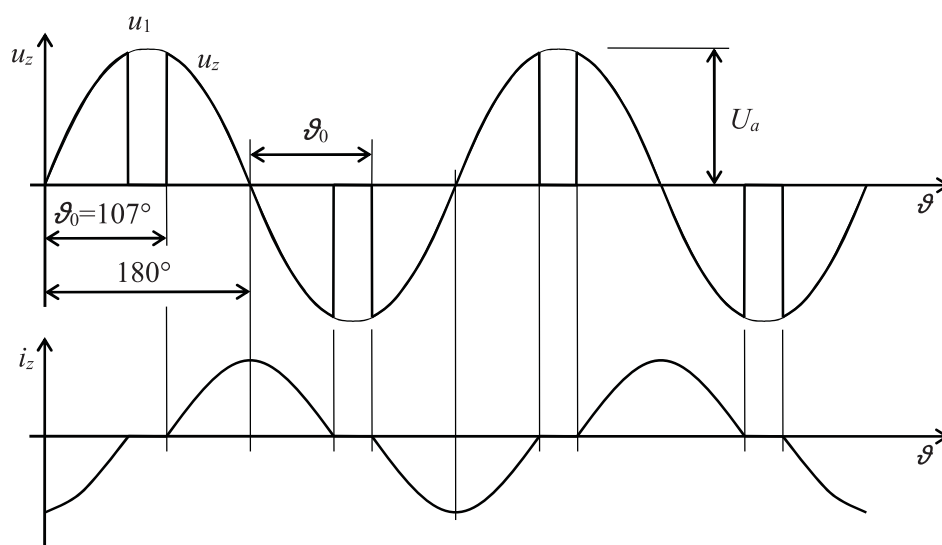


Obr. 1-9 Riadiaca charakteristika napäťového meniča pre R-zátťaž [2]

1.4.2 Riadiace charakteristiky pre indukčnú (L) zátťaž



Obr. 1-10 Principiálna schéma striedavého meniča napätia s indukčnou zátťažou [2]



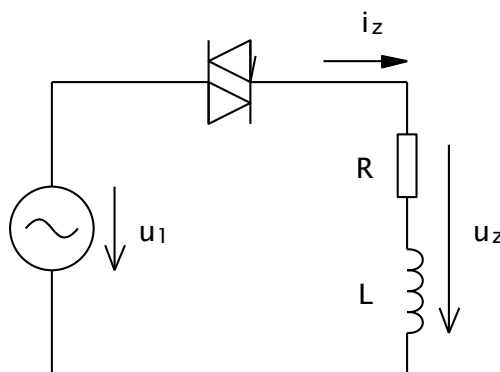
Obr. 1-11 Priebeh napätia a prúdu na indukčnej zátťaži striedavého meniča napätia [2]

Z priebehov napätia na L – záťaži (obr.1-11) je možné odvodiť nasledovný vzťah medzi efektívnou hodnotou výstupného napätia meniča U_{ef} a fázovým uhlom riadenia triaku ϑ_0 :

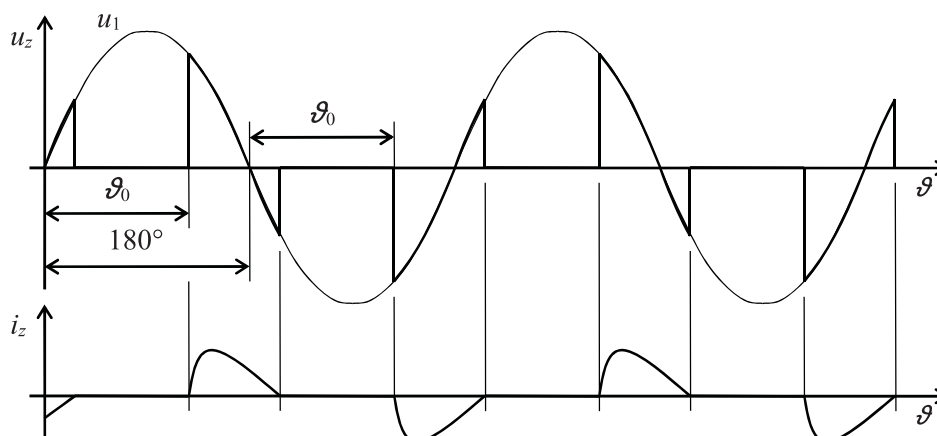
$$U_{ef} = U_{ef,max} \sqrt{2 \left(1 - \frac{\vartheta_0}{\pi} + \frac{1}{2\pi} \sin 2\vartheta_0 \right)} \quad (1.2)$$

Čistá indukčnosť v záťaži meniča posúva priebeh výstupného prúdu meniča o 90° za priebeh efektívna hodnota výstupného napätia (prúd je v oneskorení za napätím o štvrt' periódy) a keďže triak zatvára až pri prechode prúdu nulou dochádza (na rozdiel od čiste odporovej záťaže) k tomu, že plný rozsah efektívnej hodnoty výstupného napätia (0 až $U_{ef,max}$) zodpovedá polovičnému rozsahu fázového uhla a to 90° až 180° t.j. fázový uhol v rozsahu 0° až 90° je nepotrebný. [2]

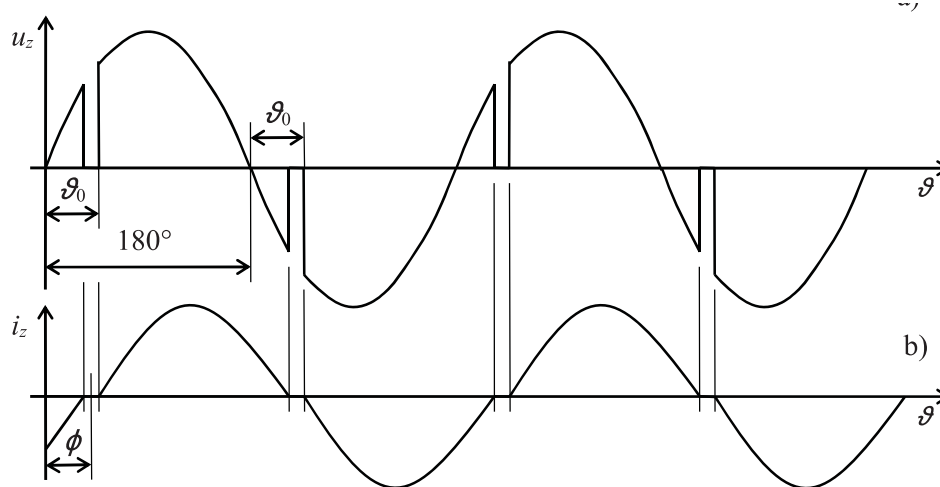
1.4.3 Riadiace charakteristiky pre odporovo-indukčnú (RL) záťaž



Obr. 1-12 Principiálna schéma striedavého meniča napätia s odporovo - indukčnou záťažou



Obr. 1-13 Priebeh napätia a prúdu na odporovo - indukčnej záťaži striedavého meniča napätia ($\vartheta_0 > 90^\circ$) [2]

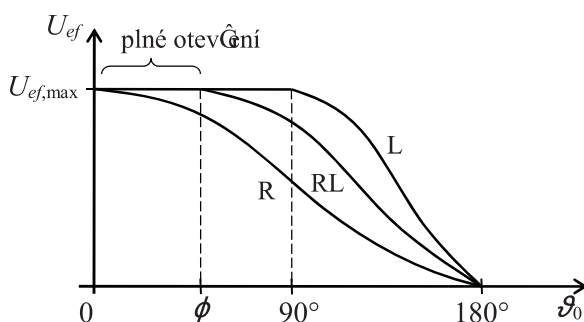


Obr. 1-14 Priebeh napätia a prúdu na odporovo - indukčnej záťaži striedavého meniča napätia ($\vartheta_0 < 90^\circ$) [2]

Matematické vyjadrenie riadiacej charakteristiky striedavého napäťového meniča pre RL – záťaž by bolo veľmi zložitá ale z uvedených priebehov napätia (obr. 1-13, 1-14) je možné jednoznačne usúdiť že tieto budú ležať vždy medzi riadiacimi charakteristikami pre čisto odporovú a čisto indukčnú záťaž (obr. 1-15).

Podobne ako u čiste indukčnej záťaži aj v prípade RL – záťaže (na rozdiel od R – záťaže) nezodpovedá plný rozsah efektívnej hodnoty výstupného napätia meniča plnému fázovému rozsahu možného riadenia triaku t.j. 0° až 180° ale skrátenému intervalu využiteľného fázového riadenia a to z dôvodu obmedzeným prirodzeným fázovým uhlom RL – záťaže Φ . V závislosti od sériového alebo paralelného zapojenia R a L zložky záťaže je možné určiť najmenší fázový uhol riadenia triaku Φ (zodpovedajúci maximálnej veľkosti efektívnej hodnoty výstupného napätia – menič je plne otvorený a na záťaži je plné napájacie napätie) nasledovne: [2]

$$\vartheta_0 = \arctan \frac{R}{\omega L} = \arctan \frac{1}{\omega \tau} \quad (1.3)$$



Obr. 1-15 Riadiaca charakteristika napäťového meniča pre R, L a RL záťaž [2]

2 PROCESOR ARDUINO A JEHO PROGRAMOVANIE

Arduino je „open-source“ fyzická počítačová platforma založená na jednoduchej vstupno/výstupnej doske a vývojovom prostredí, ktorá implementuje jazyk „Processing“. Arduino môže byť použité na vývoj samostatne interaktívnych objektov, alebo môže byť pripojený k softvéru na počítači. [5]

2.1 Typy dosiek

Existujú rôzne typy dosiek Arduino. Súčasťou každej dosky je procesor od firmy Atmel, mimo neho dosky obsahujú ďalšie elektronické komponenty. Na väčšine dosiek je prevodník, pomocou ktorého môže počítač komunikovať s čipom. Niektoré dosky majú prevodník zabudovaný v čipe. Ak doska neobsahuje prevodník a ani nie je zabudovaný v čipe, je potreba použiť externý prevodník. [5] [6]

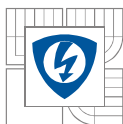
Najčastejšie používanou doskou je Arduino Uno, ktorá je všestranná. Nepotrebujeme všetky funkcie, ktoré táto doska poskytuje a preto použijeme dosku Arduino Micro, ktorá je síce menej výkonná, ale finančne menej náročná a dostačujúca pre naše potreby. [5] [6]

2.2 Popis dosky Arduino Micro

Micro je mikrokontrolérová doska (obr. 2-1), ktorá obsahuje čip ATmega32U4. V tomto čipe je zabudovaný prevodník pre komunikáciu s počítačom (micro USB). Doska má 20 digitálnych vstupov/výstupov, 16 MHz kryštálový oscilátor, 2x3 pinovú ICSP hlavičku a reset tlačidlo. [8]



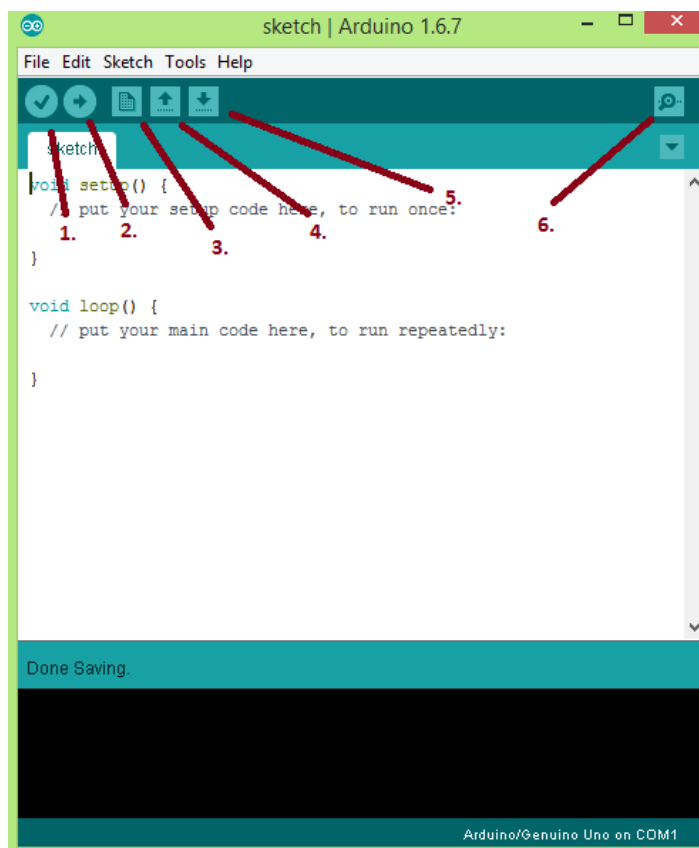
Obr. 2-1 Arduino Micro



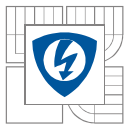
Tab. 2-1 Technické parametre mikrokontroléra Arduino Micro [8]

Mikrokontrolér	ATmega32U4
Prevádzkové napätie	5 V
Vstupné napätie	7-12 V
PWM kanály	7
Vstupné analógové kanály	12
DC prúd na I/O Pin	20 mA
DC prúd pre 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 kB
SRAM	2.5 kB
EEPROM	1 kB
Dĺžka	48 mm
Šírka	18 mm
Hmotnosť	13 g

2.3 Vývojové prostredie Arduina



Obr. 2-2 Integrované vývojové prostredie (IDE)



Vývojové prostredie Arduina (obr. 2-2) je vytvorené v jazyku Java. Z prvého riadku sa používa hlavne „Tools“, v ktorom nájdeme nastavenia pre pripojenie a programovanie dosky. V ďalšom riadku je obsiahnutých 6 tlačítok:

1. Verify - Kontrola kódu a skompilovanie sketchu
2. Upload - Nahratie sketchu do procesoru
3. New - Vytvorenie nového sketchu
4. Open - Otvorenie sketchu
5. Save - Uloženie sketchu
6. Serial Monitor - Monitor sériového portu

Okrem týchto tlačidiel je tu veľká biela plocha na zapisovanie kódu. [6]

2.4 Programovanie v Arduine

Arduino sa dá programovať buď v jazyku C/C++ alebo pomocou knihovni „Wiring“. Knihovne „Wiring“ obsahujú hotové programy, ktoré sa potom dajú použiť alebo zmeniť podľa potrieb. Keďže Arduino dnes používajú ľudia z celého sveta je „Wiring“ dosť rozšírený. Kvôli jeho komplexnosti sa o ňom hovorí ako o samostatnom programovacom jazyku.

2.4.1 Základné bloky

Základ programovacieho prostredia tvorí kód „BareMinimum“, ktoré je zložené z bloku void setup() a bloku void loop() (obr. 2-3). Do bloku void setup() sa píše inicializácia a kód, ktorý sa vykoná len jeden krát napr. stlačenie tlačítka restart, pripojenie napájania. Do bloku void loop() sa píše kód, ktorý sa opakuje neustále (slučka). Bez týchto dvoch blokov by program nefungoval a vypisoval by chybu pri kompilovaní. [6]

```
void setup() {  
    // put your setup code here, to run once:  
  
}  
  
void loop() {  
    // put your main code here, to run repeatedly:  
  
}
```

Obr. 2-3 Základné bloky kódu v Arduine

2.4.2 Komentáre

Komentáre sa píše za dve lomítka (//) alebo za lomítko a hviezdičku(*), táto voľba ale musí byť ukončená hviezdičkou a lomítkom (*). [6]

```
//Komentár  
/* Komentár */
```

Obr. 2-4 Vzor komentáru v programovacom prostredí Arduina

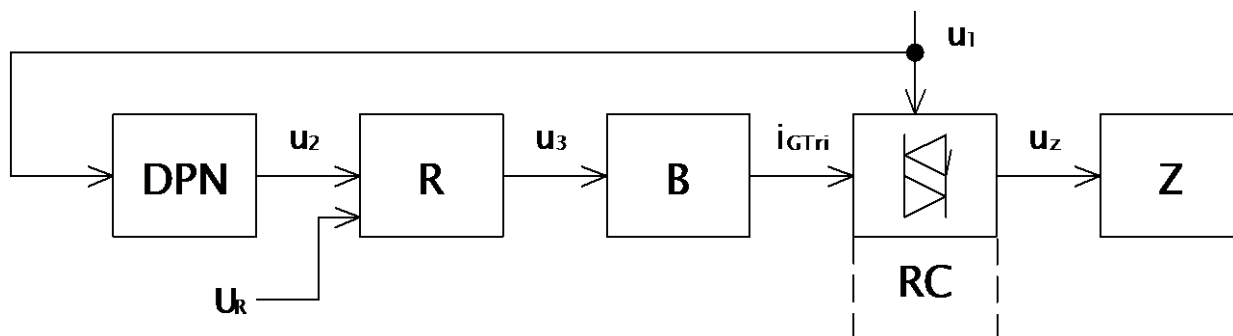
3 NÁVRH JEDNOFÁZOVÉHO STRIEDAVÉHO MENIČA NAPÄTIA

3.1 Bloková schéma striedavého meniča napätia

Vzhľadom na malý požadovaný výkon je jednofázový menič striedavého napätia navrhnutý v zapojení s triakom tvoriacim jeho výkonovú časť. Ďalšími časťami napäťového meniča sú:

- Detektor prechodu striedavého napájacieho napätia nulou (DPN)
- Riadiaci obvod triaku (R)
- Budiaci obvod triaku (B)
- RC ochrana triaku (RC)

Princíp zapojenia je zrejmý z nasledovnej blokovej schémy meniča (obr.3-1).

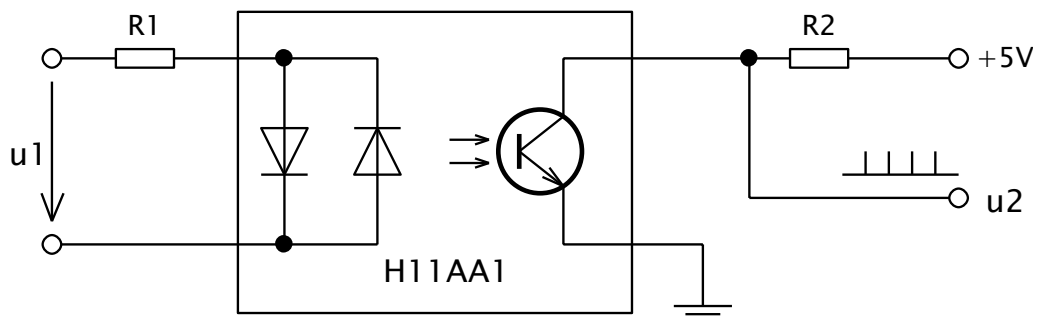


Obr. 3-1 Bloková schéma striedavého meniča napätia

3.2 Návrh striedavého meniča napätia

3.2.1 Detekcia prechodu napätia nulou

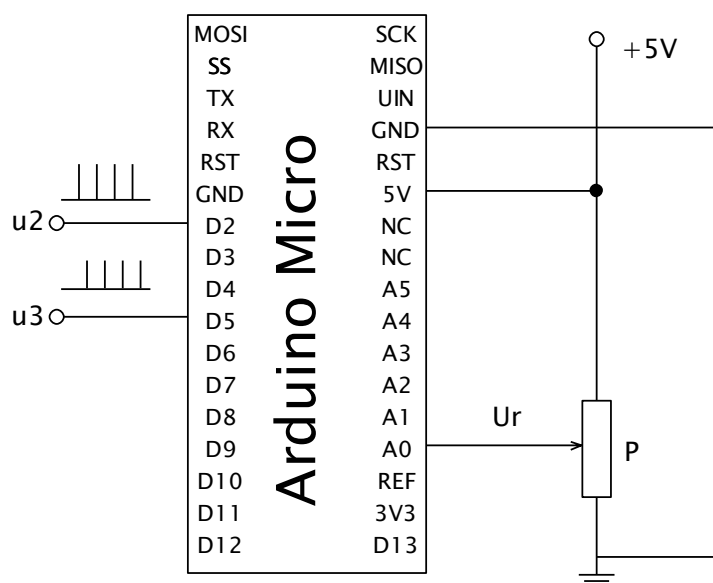
Pre detekciu prechodu napájacieho napätia u_1 nulou je navrhnuté zapojenie (obr.3-2) s optickým oddeľovačom H11AA1. Výstupom optického oddeľovača je napätie na kolektore fototranzistora u_2 budeného svetlom antiparalelnej dvojice LED diód na jeho vstupe. Toto zapojenie umožňuje sledovať obidve pol periódy striedavého napájacieho napätia. Okamžitá hodnota striedavého napájacieho napätia je väčšinu času väčšia ako nula. V tomto prípade je na výstupe detektora takmer nulové napätie (fototranzistor je otvorený). V prípadoch kedy je striedavé napätie blízke nule (pri prechodoch nulou) je fototranzistor detektora zavretý takže na jeho výstupe sa objavuje plné napätie definované pomocným napájacím napätím (5V DC). Takto vzniknuté napäťové impulzy na výstupe detektora u_2 určujú okamžiky prechodu striedavého napájacieho napätia nulou. [7] [10]



Obr. 3-2 Detektor prechodu striedavého napätia nulou H11AA1 [10]

3.2.2 Riadenie fázového uhla

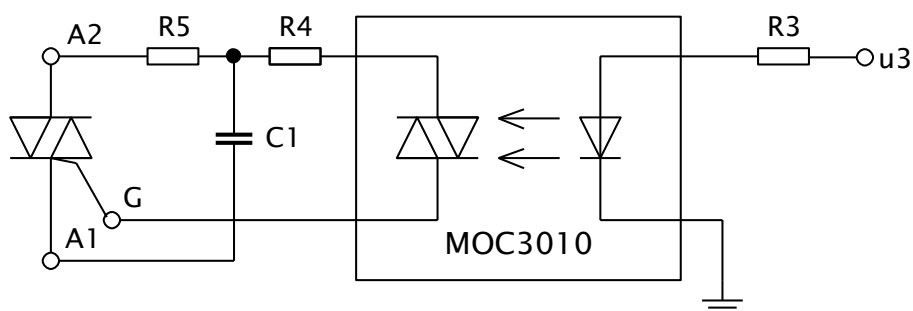
Riadenie triaku je zabezpečené prostredníctvom mikrokontroléra ARDUINO (bližší popis v kapitole č.3). Ide o tzv. uhlové alebo fázové riadenie triaku založené na sledovaní prechodu striedavého napájacieho napätia nulou. Informácie o prechode nulou striedavého napájacieho napätia sú v podobe napät'ových impulzov u_2 privedených z vyššie spomínaného detektora prechodu nulou do digitálneho vstupu 2 kontroléra (obr.3-3). Požadovaná hodnota fázového uhla ϑ_0 (0° až 180°) je zadávaná veľkosťou referenčného napätia U_r z potenciometra P a je privedená do analógového vstupu A0 kontroléra. Výstupom kontroléra sú napät'ové impulzy u_3 na svorke D5 posunuté o požadovaný uhol resp. oneskorený o zodpovedajúci čas oproti impulzu u_2 na jeho vstupe prichádzajúceho z detektora prechodu striedavého napájacieho napätia nulou. [2] [7]



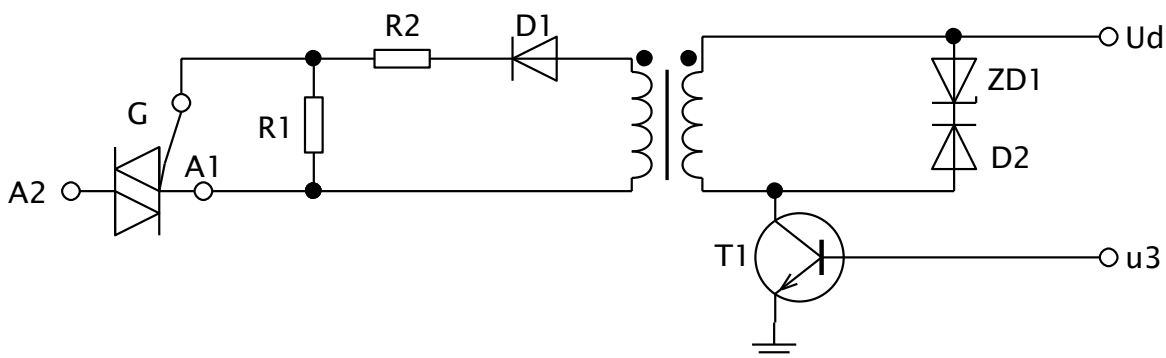
Obr. 3-3 Zapojenie riadiaceho mikrokontroléra triaku

3.2.3 Budenie triaku

Budiací obvod triaku zabezpečuje požadované parametre riadiaceho impulzu pre daný triak podľa katalógových údajov výrobcu triaku a zároveň zabezpečuje galvanické oddelenie riadenia triaku od silového obvodu triaku. Galvanické oddelenie môže byť variantne riešené oddeľovacím transformátorom (obr.3-5) alebo oddeľovacím optočlenom (obr.3-4). V tejto variante je zvolený optotriak typovej rady MOC3010 v doporučenom zapojení od výrobcu . [2]



Obr. 3-4 Zapojenie budiaceho obvodu triaku s optotriakom [11]



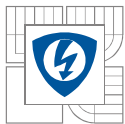
Obr. 3-5 Zapojenie budiaceho obvodu triaku s oddeľovacím transformátorom

3.2.4 Triak a výkonový obvod meniča

Výkonový obvod meniča tvorí zdroj napájacieho napätia (u_1), poistka (Po), triak (Tri) a záťaž (Z) (pozri obr. 3-6). Pre zadaný napäťový menič (50VAC, 6A) je navrhnutý triak typovej rady BTA06 nasledovných základných parametrov:

$$I_{Tri(RMS)} = 6A, U_{(DRM)} = 600V, I_{GT} = 5 \text{ až } 50mA, \text{ púzdro TO-220}$$

Ostatné parametre a vlastnosti sú obsiahnuté v katalógovom liste výrobcu (príloha D). [12]



Nadprúdové istenie striedavého meniča (hlavne triaka) zabezpečuje ultrarýchla prístrojová poistka (Po) pre istenie polovodičových prvkov FF 6,3A. Aj keď výrobca poistky neudáva hodnotu tepelného integrálu (I^2t) jej prúdová veľkosť (6,3A) blízka menovitej hodnote prúdu triaka (6A) nepriamo zabezpečuje to, že bude dostatočne nízko pod hodnotou tepelného integrálu navrhovaného triaku ($21A^2s$) čo je základnou podmienkou správneho nadprúdového istenia polovodičových prvkov.

Stratové teplo z triaku je odvedené chladičom typovej rady V7477X s hodnotou tepelného odporu $11^\circ C/W$ (resp. $11K/W$), ktorý bol vybratý na základe nasledovného výpočtu:

Potrebný tepelný odpor chladiča triaka $R_{\theta H}$ je možné určiť z Fourierovho zákona v tvare:

$$R_{\theta H} = \frac{\Delta T}{P_{ztr}} - R_{\theta JC} - R_{\theta CH} \quad (2.1)$$

kde

$R_{\theta JC}$ – tepelný odpor medzi polovodičom (čipom) a púzdom súčiastky

$R_{\theta CH}$ – tepelný odpor medzi púzdom súčiastky a chladičom

ΔT – rozdiel maximálnej prípustnej teploty polovodiča a okolitej teploty

P_{ztr} – stratový výkon polovodičovej súčiastky

Všetky vyššie uvedené potrebné parametre sú obsiahnuté v katalógovom liste zvoleného triaku BTA06 (príloha D) a sú nasledovné:

$R_{\theta JC} = 2,7^\circ C/W$

$R_{\theta CH} = 0,3^\circ C/W$

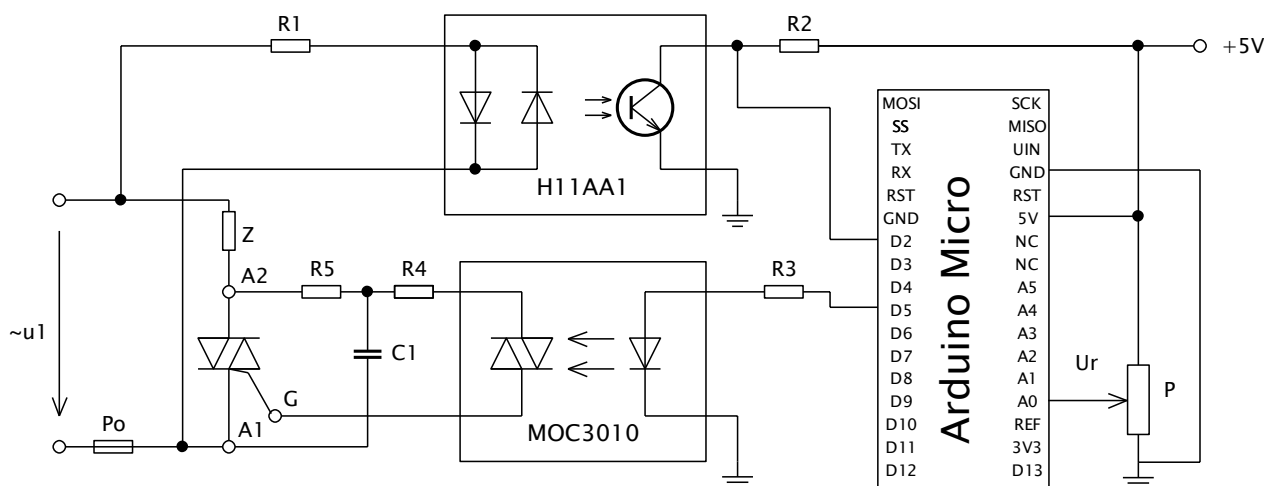
$\Delta T = 100^\circ C$ (maximálna teplota polovodiča je $125^\circ C$, teplotu okolia uvažujeme laboratórnu t.j. $25^\circ C$)

P_{ztr} – cca 7W (hodnota odčítaná z charakteristiky v katalógovom listu triaka BTA06 (príloha D))

Po dosadení získaných parametrov triaka do vzťahu 2.1 vychádza tepelný odpor chladiča cca $11,3^\circ C/W$. Najbližšia nižšia hodnota tepelného odporu sériovo vyrábaných chladičov konštrukčne vhodných pre triak BTA06 t.j s púzdom typu TO-220 je napr. už vyššie uvedený chladič typovej rady V7477X (bližšie informácie sú obsiahnuté v jeho katalógovom liste v prílohe D). [13]

3.2.5 Návrh zapojenia striedavého meniča napätia

Návrh zapojenia meniča vychádza z jej blokovej schémy podľa bodu 2.1. a teda je zlúčením všetkých častí meniča popísanými k bodoch 3.2.1 až 3.2.4 (vid'. obr. 3-6).



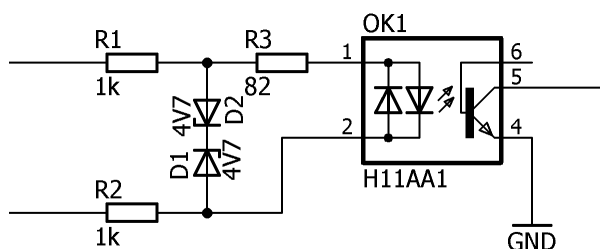
Obr. 3-6 Návrhnuté zapojenie striedavého meniča napätia

4 ZHOTOVENIE STRIEDAVÉHO MENIČA NAPÄTIA

4.1 Úpravy navrhovaného zapojenia striedavého meniča napätia

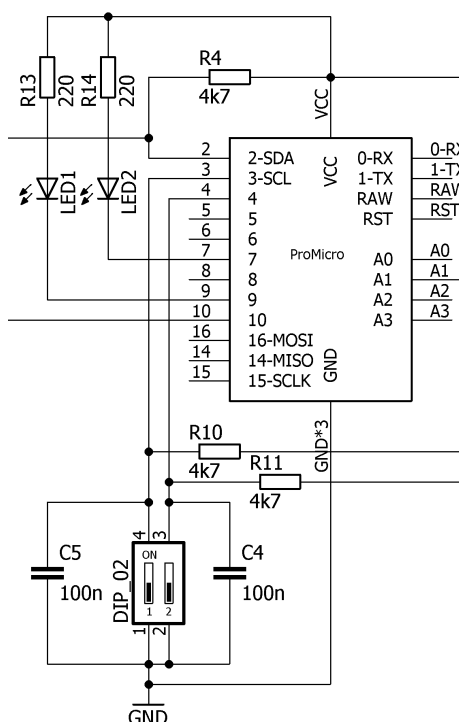
Pri vyhotovovaní striedavého meniča napätia boli pridané alebo zmenené niektoré časti obvodu, či už kvôli lepšej funkčnosti, praktickosti alebo robustnosti.

Na vstup optotriaka H11AA1 boli paralelne pripojené dve zenerové diódy D1 a D2 otočené proti sebe (*obr.4-1*) za účelom eliminovania možných prepätí prichádzajúcich zo silového obvodu (prepät'ová ochrana LED diód v optotriaku H11AA1).



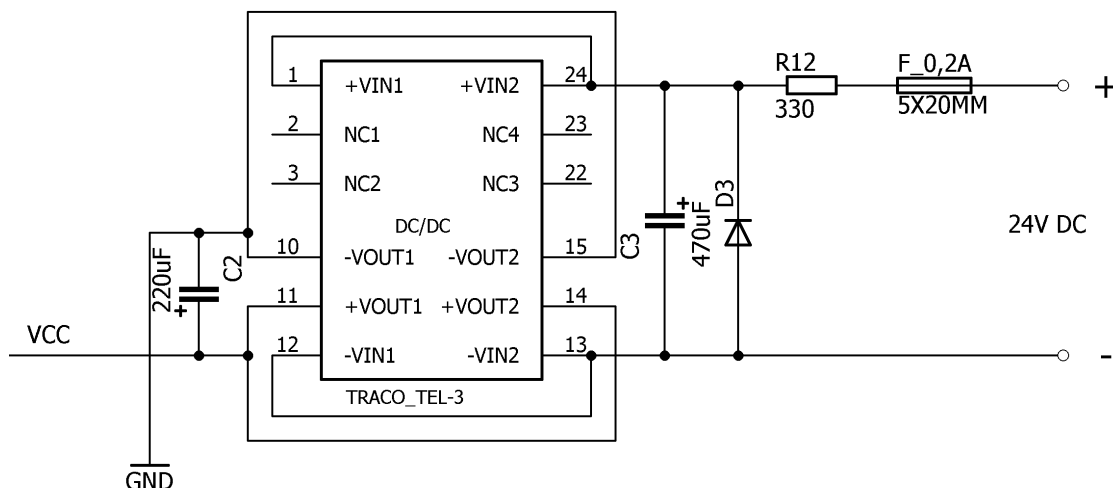
Obr. 4-1 Realizované zapojenie detekcie prechodu napätia nulou

Do schémy boli pridané dve LED diódy LED1, LED2 a spínač DIP 02 (*obr. 4-2*). Tieto súčiastky majú iba pomocný charakter a teda nemenia funkčnosť meniča. LED diódy boli pridané kvôli signalizačným alebo kontrolným účelom (napr. signalizácia zvoleného programu). Spínač DIP 02 momentálne neplní žiadnu úlohu, ale v budúcnosti môže prepínať medzi programami nahranými v mikropočítači.



Obr. 4-2 Prepínanie a signalizácia programov mikroprocesora

Procesor Arduino na svoju funkčnosť jednosmerné napájanie o hodnote 5V. Keďže zo stola v laboratórnej miestnosti je možné napájať 24V bol pridaný do schémy DC/DC menič TRACOPOWER Tel 3-2411. Tento menič dokáže meniť napätie z 24V na 5V. Napájanie procesoru bude teda nezávislé. [14]



Obr. 4-3 Napájanie procesoru Arduino pomocou DC/DC meniča 24/5V DC [14]

4.2 Návrh pasívnych a pomocných polovodičových súčiastok

Odpory (R1 až R17) boli navrhnuté na základe doporučených typových zapojení súvisiacich aktívnych polovodičových súčiastok a ich prúdová zaťažiteľnosť bola skontrolovaná výpočtom maximálnych prúdov v danom obvode.

Kondenzátory (C1 až C6) boli taktiež navrhnuté na základe doporučených typových zapojení súvisiacich aktívnych polovodičových súčiastok a ich napäťová zaťažiteľnosť bola skontrolovaná výpočtom maximálnych napätí v danom obvode.

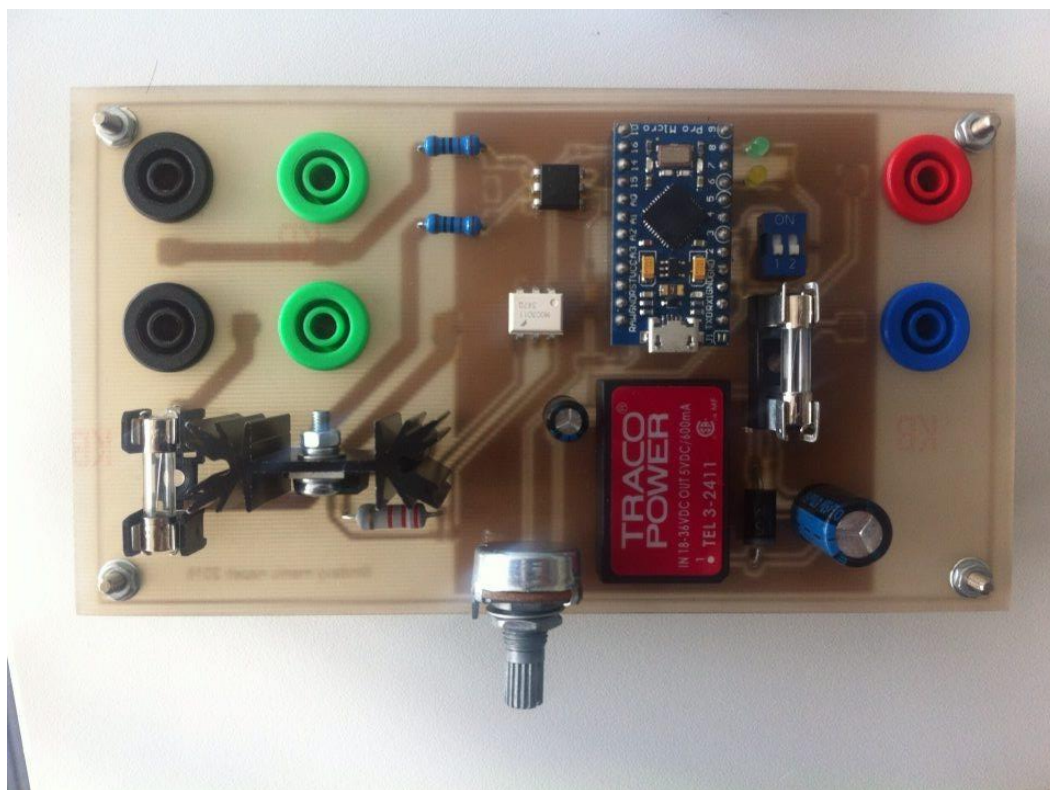
Zenerové diody (D1 a D2) slúžia ako napäťový stabilizátor na vstupe detektora prechodu striedavého napätia na záťaž nulou (H11AA1) a definujú zvolenú maximálnu hodnotu tohto napätia (cca 5V). Dióda (D3) chráni DC/DC menič pri prepólovaní napájania bola zvolená vzhľadom na zistený prúdový odber a napäťovú úroveň spomínaného vstupu DC/DC meniča.

4.3 Realizácia striedavého meniča napätia

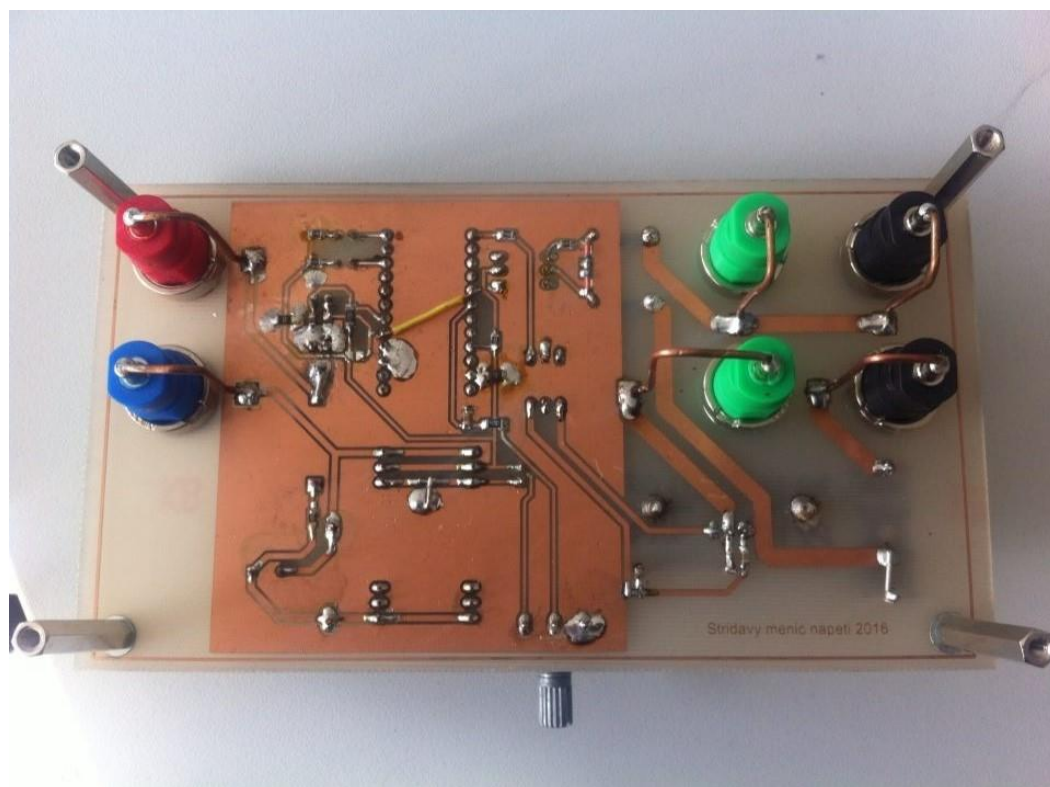
Realizované zapojenie striedavého meniča napätia vychádza z návrhu zapojenia podľa bodu 3.2.5 (obr. 3-6), z úprav popísaných v bode 4.1 (obr. 4-1, 4-2, 4-3) a návrhu pasívnych a pomocných polovodičových súčiastok popísaných v bode 4.2. Zapojenie je v prílohe A.

Zoznam použitých súčiastok je obsiahnutý v prílohe B.

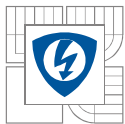
Návrh plošného spoja a rozloženie súčiastok na plošnom spoji bolo realizované pomocou programu Eagle a nachádza sa v prílohe C.



Obr. 4-4: Fotka realizovaného meniča z vrchu



Obr. 4-5: Fotka realizovaného meniča zo spodu



4.4 Tvorba programu pre riadenie striedavého meniča napätia

4.4.1 Funkcie použité v zdrojovom kóde

int, byte, long - tieto funkcie slúžia k ukladaniu celočíselných hodnôt. Funkcia int dokáže uchovať 16 bitové hodnoty (-32 768 až 32 767), byte 8 bitové hodnoty (0 až 255) a long 32 bitové hodnoty (-2147483648 až 2147483647). Príklad: [6]

```
int val = 650;           //do premennej 'val' zapiše hodnotu 650
byte Val = 200;          //do premennej 'Val' zapiše hodnotu 200
long VAL = 60000;        //do premennej 'VAL' zapiše hodnotu 60000
```

pinMode() - slúži k nastaveniu pinu na vstup alebo výstup. Pre jeho funkciu je potreba zadať číslo pinu a nastavenie pinu (INPUT = vstup a OUTPUT = výstup). Príklad: [6]

```
pinMode(2, INPUT); //nastaví pin 2 ako vstup
```

analogRead() - slúži k načítaniu analógových hodnôt z analógových vstupných pinov. Hodnoty môžu nadobúdať hodnoty 0 až 1024, ktoré predstavujú napätie 0-5V. Príklad: [6]

```
val = analogRead(A0); //načíta analógovú hodnotu z pinu A0 do premennej 'val'
```

analogWrite() - slúži k nastaveniu analógovej hodnoty na pine v rozsahu 0 až 255. Touto hodnotou nastavíme triedu PWM signálu. Príklad: [6]

```
analogWrite(3, 128) //vytvorí na pine 3 PWM signal so striedov 0,5
```

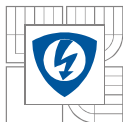
digitalWrite() - nastavuje digitálnemu pinu hodnotu HIGH alebo LOW. Hodnota HIGH zodpovedá napätiu 5V a hodnota LOW zodpovedá napätiu 0V. Príklad: [6]

```
digitalWrite(3, HIGH); //nastaví pinu 3 hodnotu HIGH.
```

micros() - táto funkcia uchováva informáciu o dĺžke programu. Vracia počet mikrosekúnd od začiatku programu. Po 71,5 minútach sa vynuluje a začína odznova. [6]

attachInterrupt() - funkcia pozastaví program pri určitej zmene (LOW, CHANGE, RISING alebo FALLING) a vykoná funkcie, ktoré sú predom nastavené.. Príklad: [9]

[illegible]



Serial.begin() - pomocou tejto funkcie sa zahájí sériová komunikácia. Hodnota v zátvorkách určuje rýchlosť komunikácie. Príklad: [6]

`Serial.begin(9600);` *//zahájí sériovú komunikáciu s rýchlosťou 9600 baudov za sekundu*

map() - slúži k úprave rozsahu premennej. Pomocou tejto funkcie je možné rovnomerne rozťahnuť alebo zúžiť rozsah. Príklad: [6]

`map(val, 0, 1023, 0, 255);` *//rovnomerne prenastaví hodnoty 0 až 1023 na 0 až 255*

4.4.2 Zdrojový kód pre riadenie striedavého meniča napätia

```
int Posun = 0;
unsigned long Nula = 0;

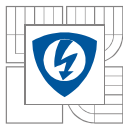
const int ZapalPulz = 10;          //Zapalovací pulz pre triak
const byte interruptPin = 2;       //Detekcia prechodu nulou
const byte Poten = A1;             //Hodnota z potenciometra

void setup() {
    Serial.begin(57000);
    TCCR1B = TCCR1B & B11111000 | B00000010; //Nastavenie frekvencie zapalovacieho pulzu
    pinMode(Poten, INPUT);
    pinMode(ZapalPulz, OUTPUT);
    pinMode(interruptPin, INPUT_PULLUP);
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(interruptPin), DetekceNuly, RISING);
}

void loop(){
    // Načítanie hodnoty z potenciometra
    int val = analogRead(Poten);
    int newval = map(val, 0, 1023, 1023, 0);
    Posun= (newval * 9.77);
    // Posun a začiatok pulzovania
    if(((micros()-Nula) >= Posun)){
        analogWrite(ZapalPulz, 102);
    }
}

// Detekcia prechodu nulou
void DetekceNuly(void){
    Nula = micros();
    digitalWrite(ZapalPulz, LOW); //
}
```

Obr. 4-6 Zdrojový kód pre riadenie striedavého meniča napätia



4.4.3 Popis zdrojového kódu

Na začiatku kódu je vykonaná deklarácia premenných, do ktorých budú zapisované hodnoty. Premennej *Nula* bol priradený typ *long*, pretože sa do nej bude načítavať čas, *integer* alebo *byte* by nemuseli stačiť. Pomocou prídavnej funkcie *const* sú priradené názvy pinom, ktoré bude program používať a to digitálny pin 2 (*interruptPin*) pre detekciu prechodu napätia nulou, digitálny pin 10 (*ZapalPulz*) pre otvorenie triaku a analógový pin A1 (*Poten*) pre nastavenie riadiaceho uhlu pomocou potenciometra.

V bloku *setup()*, ktorý prebehne len raz, sa nastaví frekvencia pinov 9 a 10 na hodnotu 3921,16 Hz. Pomocou funkcie *pinmode()* sa nastaví piny na vstupy alebo výstupy. Ďalej je tu obsiahnutá funkcia *attachInterrupt()*, vďaka ktorej je program schopný, po zdetekovaní prechodu napätia nulou a to pri zmene hodnoty pinu *interruptPin* z low na high (*RISING*), prerušiť blok *loop()* a spustiť blok *DetekceNuly*.

V bloku *loop()*, ktorý sa opakuje dookola, sa nahrá hodnota potenciometra do premennej *newval* a túto hodnotu prepočíta pomocou vypočítanej konštanty na rozsah 0 až 10000 μ s a nahrá ju do novej premennej *Posun*. Ak od posledného prechodu nulou (tento čas je zapísaný v premennej *Nula*) prebehne doba, ktorá sa nastavila pomocou potenciometra do premennej *Posun* spustí PWM signál na výstupe *ZapalPulz* so striedov $s = 0,4$ až pokiaľ ho nezastaví pri ďalšom prechode napätia nulou.

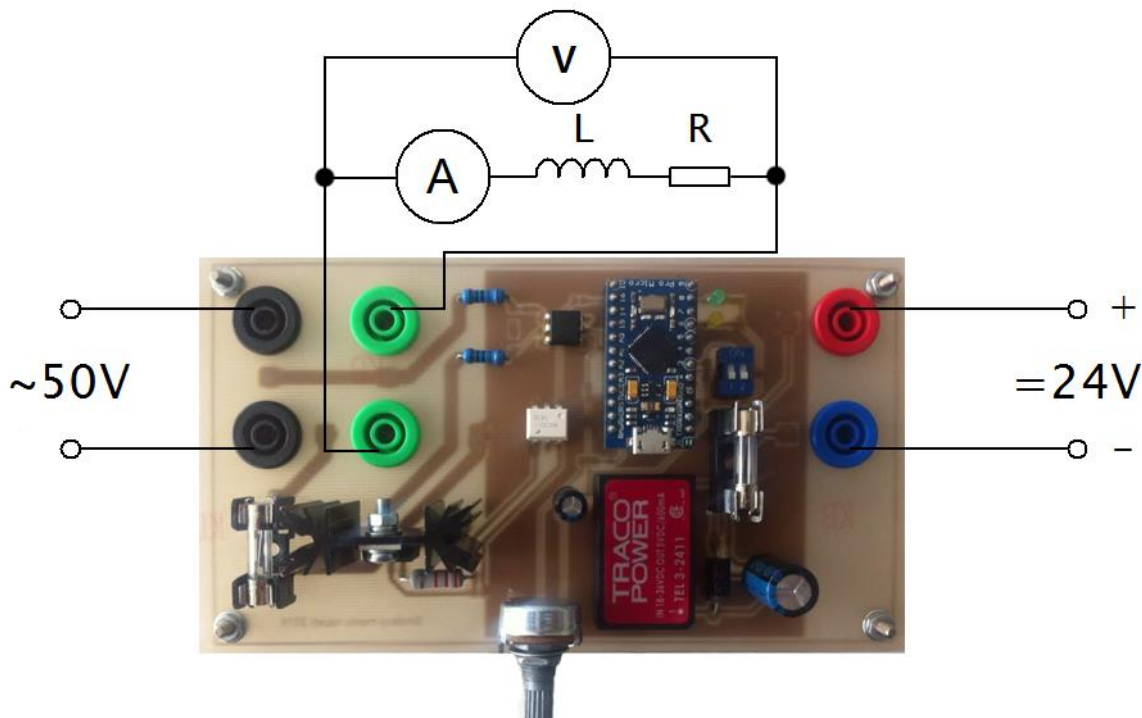
5 OVERENIE FUNKČNOSTI REALIZOVANÉHO STRIEDAVÉHO MENIČA NAPÄTIA

Na overenie funkčnosti realizovaného striedavého meniča napätia a vytvoreného softwaru bola zrealizovaná laboratórna úloha z predmetu Výkonová Elektronika, pre ktorú bol menič navrhnutý a vyrobený.

5.1 Zadanie laboratórnej úlohy

1. Pre záťaž R odmerajte riadiacu charakteristiku meniča $U_z = f(\vartheta)$, $I_z = f(\vartheta)$. Pomocou osciloskopu sledujte a nakreslite priebehy okamžitých hodnôt záťaží i_z a napätia na záťaži u_z .
2. Pre záťaž RL odmerajte riadiacu charakteristiku meniča $U_z = f(\vartheta)$. Pomocou osciloskopu sledujte a nakreslite priebehy okamžitých hodnôt záťaží i_z a napätia na záťaži u_z .

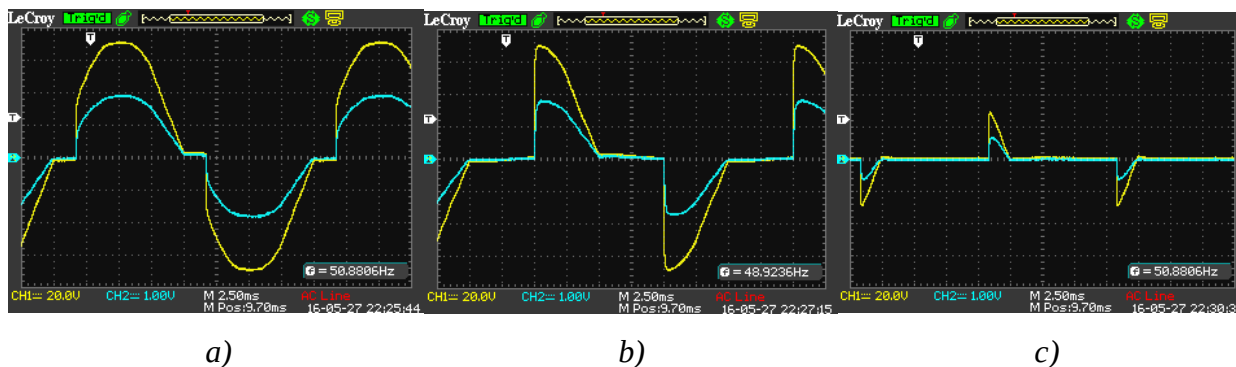
5.2 Schéma zapojenia laboratórnej úlohy



Obr. 5-1 Schéma zapojenia laboratórnej úlohy

5.3 Namerané a spracované hodnoty

Prvou úlohou je odmerať závislosť napätia a prúdu R záťaže na riadiacom uhle. Potenciometrom je nastavovaný riadiaci uhol. Zmenou riadiaceho uhla sa menia priebehy napätia a prúdu ako je možné vidieť na obr. 5-2.



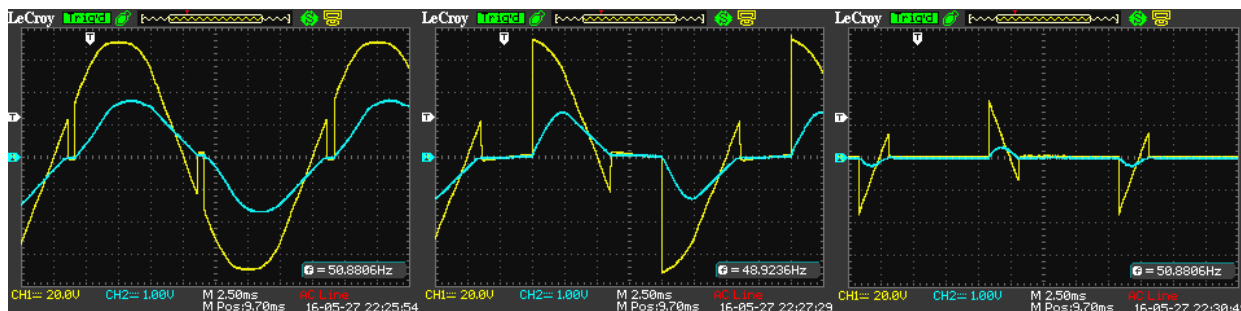
Obr. 5-2 Priebehy napätia a prúdu na R záťaži pri riadiacom uhle: a) 30° , b) 90° , c) 150°

Riadiaci uhol bol nastavovaný od 0° až po 180° . Bolo nameraných 19 hodnôt prúdu a napätia, hodnoty boli zapísané do tab. 5-1.

Tab. 5-1: Hodnoty napätia a prúdu na R záťaži

Por. číslo	ϑ	U_z	I_z
	$[\circ]$	$[V]$	$[A]$
1	0	50,0	1,175
2	10	49,5	1,150
3	20	48,5	1,150
4	30	47,2	1,100
5	40	45,6	1,100
6	50	43,0	1,050
7	60	40,0	0,950
8	70	36,8	0,875
9	80	32,8	0,775
10	90	27,6	0,650
11	100	24,8	0,575
12	110	19,2	0,450
13	120	15,2	0,350
14	130	11,2	0,240
15	140	7,2	0,120
16	150	3,2	0,075
17	160	1,6	0,025
18	170	1	0,025
19	180	0	0

Ďalšou úlohou je odmerať závislosť napätia a prúdu RL záťaže na riadiacom uhle. Priebiehy sú zobrazené na obr. 5-3 a namerané hodnoty od 0 až do 180° boli zapísané do tab. 5-2.



a)

b)

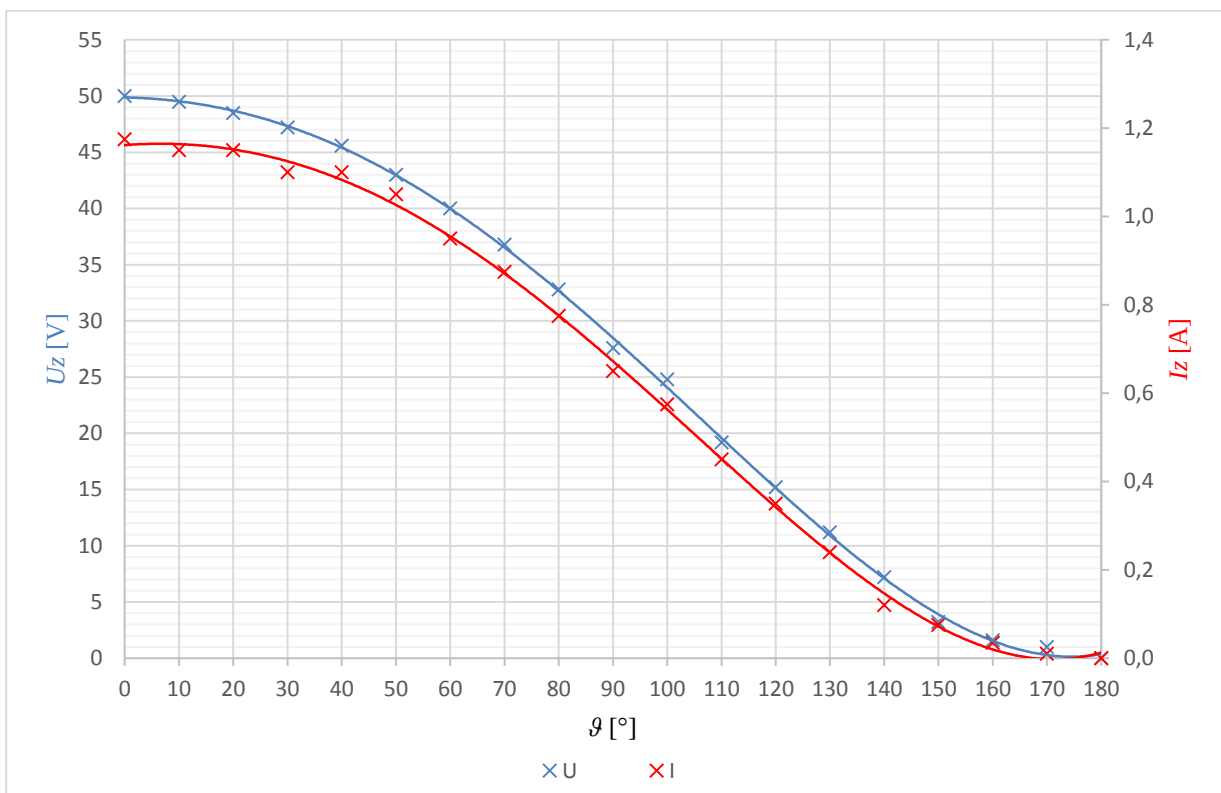
c)

Obr. 5-3 Priebiehy napätia a prúdu na RL záťaži pri riadiacom uhle: a) 30°, b) 90°, c) 150°

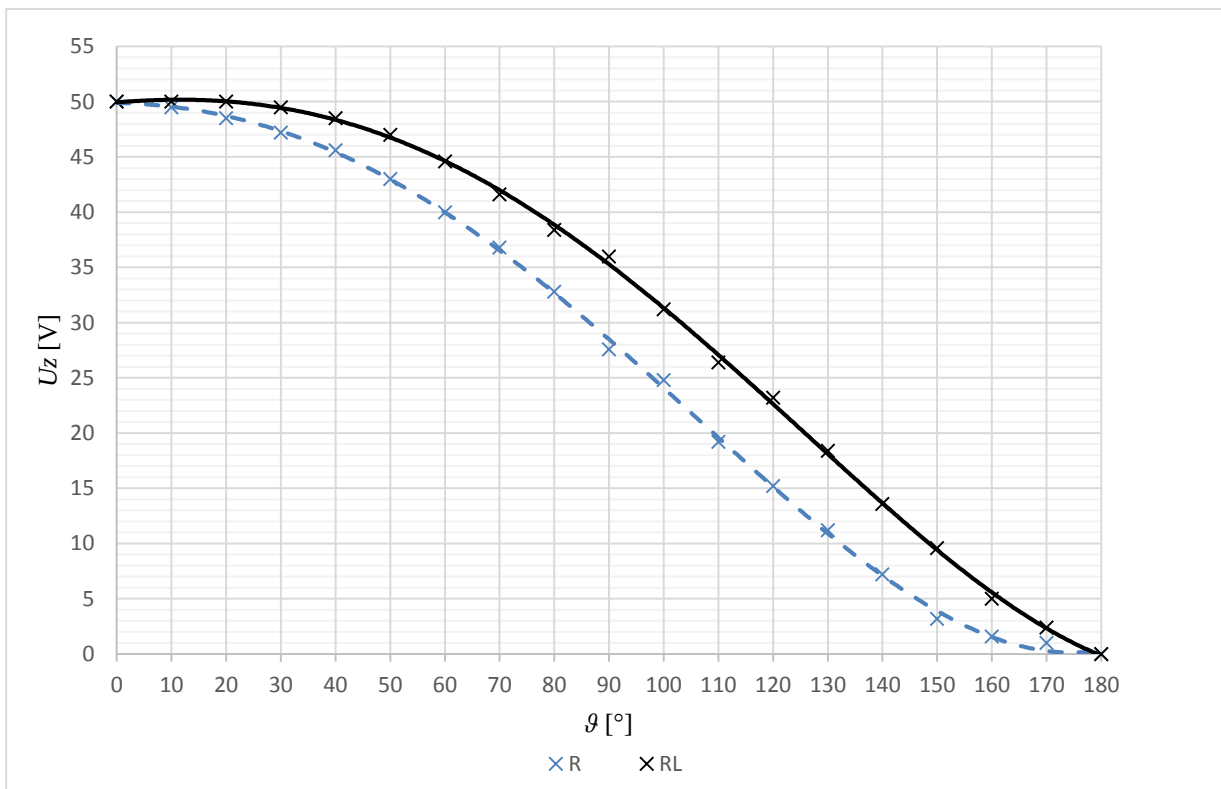
Tab. 5-2: Hodnoty napätia a prúdu na RL záťaži

Por. číslo	ϑ [°]	U_z [V]	I_z [A]
1	0	50,0	1,030
2	10	50,0	1,030
3	20	50,0	1,030
4	30	49,5	1,000
5	40	48,5	0,950
6	50	47,0	0,900
7	60	44,6	0,850
8	70	41,6	0,800
9	80	38,4	0,725
10	90	36,0	0,625
11	100	31,2	0,525
12	110	26,4	0,400
13	120	23,2	0,350
14	130	18,4	0,240
15	140	13,6	0,150
16	150	9,6	0,125
17	160	4,0	0,050
18	170	2,4	0,025
19	180	0	0

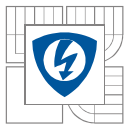
Namerané hodnoty v tab. 5-1 a tab. 5-2 boli vynesené do grafov obr. 5-4, obr. 5-5. V obr. 5-4 je zobrazené napätie a prúd R záťaže. V obr. 5-5 je zobrazené napätie RL záťaže a na porovnanie bolo prerušovanou čiarou zobrazené napätie R záťaže.



Obr. 5-3 Závislost' napětí a proudu R zátěže na radiacím uhle



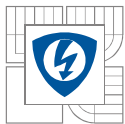
Obr. 5-4 Závislost' napětí R a RL zátěže na radiacím uhle



5.4 Vyhodnotenie laboratórnej úlohy

Cieľom laboratórnej úlohy bolo zistiť či funguje zhotovený striedavý menič napätia správne. Boli odmerané hodnoty prúdu a napätia R a RL záťaže pri riadiacom uhle 0° až 180° . Hodnoty boli zapísané do tabuliek a vynesene do grafov. V prvom grafe (*obr. 5-3*) je zobrazené aj napätie aj prúd na R záťaži ($R = 40 \Omega$). Skonštruovaný graf sa zhoduje s teoretickým. V druhom grafe (*obr. 5-4*) je zobrazené napätie na záťaži RL ($R = 40 \Omega$, $L = 20 \text{ mH}$) a pre porovnanie je tu prerušovaná čiara zobrazené napätie na R záťaži. Riadiaca charakteristika RL záťaže je posunutá od riadiacej charakteristiky R záťaže do prava, čo bolo očakávané a pri väčšej indukčnosti by bol tento posun výraznejší.

Zo skonštruovaných grafov a grafov z osciloskopu je možné povedať, že navrhnutý striedavý menič napätia pracuje správne.



ZÁVER

Táto práca bola zameraná na návrh a realizáciu striedavého meniča napätia riadeného pomocou procesoru Arduino. Podľa pokynoch pre vypracovanie bakalárskej práce bolo treba splniť nasledovné pokyny a to navrhnuť konkrétne zapojenie striedavého meniča napätia určeného pre laboratórnu výuku v predmete Výkonová elektronika ($U_{in} = 50 \text{ V}$, $I_{out} = 5 \text{ A}$), vytvoriť software pre riadenie tohto meniča, zrealizovať a overiť funkčnosť navrhnutého meniča. Zadané pokyny boli do tejto bakalárskej práce zapracované.

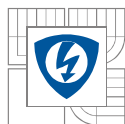
Návrhom sa zaoberá 3. kapitola, kde je technická špecifikácia hlavných komponentov meniča. Pre detekciu prechodu striedavého napätia nulou je navrhnutý optotriak H11AA1. Pre riadenie fázového uhla bol vybraný procesor Arduino Micro. Na budenie triaka bol navrhnutý optotriak MOC3011. Pre zadané vstupné a výstupné hodnoty bol navrhnutý výkonový prvok triak typu BTA06. Na chladenie bol vybraný chladič typovej rady V7477X. Na istenie triaka bola vybratá ultrarýchla poistka typu FF 6,3A.

Samotnou realizáciou meniča sa zaoberá 4. kapitola, v ktorej bolo zdokonalené navrhované zapojenie meniča, bola upresnená špecifikácia súčiastok, bol zrealizovaný plošný spoj a osadenie špecifikovaných súčiastok a bol vytvorený program pre riadiaci procesor. Skonštruovaný menič bol oživený a program riadenia meniča bol odladený.

Overením správnej funkčnosti sa zaoberá 5. kapitola. Overenie bolo realizované prostredníctvom laboratórnej úlohy, pre ktorú bol menič napätia navrhnutý a zrealizovaný. Meraním a spracovaním hodnôt z laboratórnej úlohy bola dokázaná správna funkčnosť meniča napätia v plnom rozsahu (t.j. po hardvérovej aj softvérovej stránke).

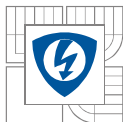
Vyššie uvedenými kapitolami boli pokyny bakalárskej práce splnené v plnom rozsahu.

V ďalšom období bude zrealizovaný menič slúžiť pre laboratórne účely v rámci výučby Výkonovej elektroniky.



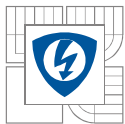
LITERATÚRA

- [1] PATOČKA, M. *Vybrané statě z výkonové elektroniky, Svazek I.* Brno: FEKT VUT, 61 s.
- [2] PATOČKA, M. *Vybrané statě z výkonové elektroniky, Svazek III.* Brno: FEKT VUT, 178 s.
- [3] OETTER, J. *Výkonová elektronika pre elektrické pohony.* 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1988, 405 s.
- [4] DUDRIK, J. *Výkonové polovodičové súčiastky.* ,2015, 61 s.
- [5] BANZI, M. *Getting Started with Arduino.* 2nd edition O'Reilly Media, 2011, 130p.
- [6] VODA, Z. *Průvodce světem Arduina.* HW Kitchen, 2014, 280s.
- [7] *Zero crossing detectors curcuits and applications*, [online]. [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: http://www.bristolwatch.com/ele2/zero_crossing.htm
- [8] *Arduino Micro & Genuino Micro* [online]. [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMicro>
- [9] *attachInterrupt()* [online]. [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/Reference/AttachInterrupt>
- [10] *6-Pin DIP Optoisolators AC Input-Transistor Output: H11AA1* [online]. [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/motorola/H11AA2.pdf>
- [11] *6-Pin DIP Random-phase Optoisolators Triac Driver Output: MOC3011M* [online]. [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/fairchild/MOC3011-M.pdf>
- [12] *BTA/BTB06 Series: BTA06* [online]. [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet2/3/06pykdr39sxl7rj6gt2c8a7r13y.pdf>
- [13] *V7477X Datasheet* [online]. [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <http://html.alldatasheet.com/html-pdf/678030/ASSMANN/V7477X/293/1/V7477X.html>
- [14] *DC/DC Converter: Tel 3-2411* [online]. [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <http://www.tracopower.com/products/tel3.pdf>

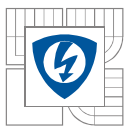


ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

Veličina	Popis
I_A	blokovací prúd
I_G	hradlový prúd
I_{GT}	spínací hradlový prúd
i_{GTri}	hradlový prúd triaka
I_R	záverný prúd tyristora
$I_{Tri(RMS)}$	efektívna hodnota menovitého prúdu triaka
i_z	okamžitá hodnota záťažového prúdu
I_z	hodnota prúdu na záťaži
L	indukčnosť
P_{ztr}	stratový výkon polovodičovej súčiastky
R	odpor
$R_{\theta CH}$	tepelný odpor medzi púzdom súčiastky a chladičom
$R_{\theta JC}$	tepelný odpor medzi polovodičom (čipom) a púzdom súčiastky
ΔT	rozdiel maximálnej prípustnej teploty polovodiča a okolitej teploty
$U_{(DRM)}$	maximálna opakovateľná hodnota blokovacieho napätia triaka
U_1	efektívna hodnota striedavého napätia (na vstupe)
U_{21}	napätie medzi anódami triaka
U_a	maximálna hodnota striedavého napätia (amplitúda)
U_{ak}	napätie medzi anódou a katódou tyristora
U_{ef}	efektívna hodnota napätia
$U_{ef, max}$	maximálna hodnota efektívneho napätia
$u1$	okamžitá hodnota striedavého napájacieho napätia
$u2$	výstupné napätie z detektoru striedavého napätia prechodu nulou
$u3$	výstupné napätie z kontroléra (Arduino)
u_z	okamžitá hodnota napätia na záťaži
U_z	hodnota napätia na záťaži
Z	záťaž
ϑ	radiaci uhol
Φ	fázový uhol
ω	uhlová rýchlosť

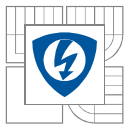


Skratka	Popis
A	anóda
AC	striedavý
B	budiaci obvod triaka
C	kondenzátor
D	dióda
DC	jednosmerný
DPN	detektor prechodu striedavého napätia nulou
G	hradlo
GND	nulový potenciál
J	rozhranie prechodu PN
K	katóda
P	potenciometer
PN	polovodičový prechod PN, rozhranie polovodičov P a N
Po	poistka
PWM	pulzne šírková modulácia
R	rezistor
SRAM	pevná operačná pamäť

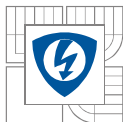


ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1-1 Principiálne štruktúry a schématické značky obidvoch typov tyristorov [3]	9
Obr. 1-2 Voltampérové charakteristiky tyristoru	10
Obr. 1-3 Principiálna štruktúra a schématická značka triaku [3]	10
Obr. 1-4 Voltampérové charakteristiky triaku	11
Obr. 1-5 Jednofázový striedavý menič napätia a) s triakom, b) s tyristormi	11
Obr. 1-6 Trojfázový striedavý menič napätia a) s triakom, b) s tyristormi.....	12
Obr. 1-7 Principiálna schéma striedavého meniča napätia s odporovou záťažou	13
Obr. 1-8 Priebeh napätia a prúdu na odporovej záťaži striedavého meniča napätia [2]	13
Obr. 1-9 Riadiaca charakteristika napäťového meniča pre R-záťaž [2]	14
Obr. 1-10 Principiálna schéma striedavého meniča napätia s indukčnou záťažou [2]	14
Obr. 1-11 Priebeh napätia a prúdu na indukčnej záťaži striedavého meniča napätia [2]	14
Obr. 1-12 Principiálna schéma striedavého meniča napätia s odporovo - indukčnou záťažou	15
Obr. 1-13 Priebeh napätia a prúdu na odporovo - indukčnej záťaži striedavého meniča napätia ($\varphi_0 > 90^\circ$) [2]	15
Obr. 1-14 Priebeh napätia a prúdu na odporovo - indukčnej záťaži striedavého meniča napätia ($\varphi_0 < 90^\circ$) [2]	16
Obr. 1-15 Riadiaca charakteristika napäťového meniča pre R, L a RL záťaž [2]	16
Obr. 2-1 Arduino Micro	17
Obr. 2-2 Integrované vývojové prostredie (IDE)	18
Obr. 2-3 Základné bloky kódu v Arduine	19
Obr. 2-4 Vzor komentáru v programovacom prostredí Arduina.....	19
Obr. 3-1 Blokovaná schéma striedavého meniča napätia.....	20
Obr. 3-2 Detektor prechodu striedavého napätia nulou H11AA1 [10]	21
Obr. 3-3 Zapojenie riadiaceho mikrokontroléra triaku	21
Obr. 3-4 Zapojenie budiaceho obvodu triaku s optotriakom [11]	22
Obr. 3-5 Zapojenie budiaceho obvodu triaku s oddelovacím transformátorom.....	22
Obr. 3-6 Návrhnuté zapojenie striedavého meniča napätia.....	24
Obr. 4-1 Realizované zapojenie detekcie prechodu napätia nulou.....	25
Obr. 4-2 Prepínanie a signalizácia programov mikroprocesora.....	25
Obr. 4-3 Napájanie procesoru Arduino pomocou DC/DC meniča 24/5V DC [14].....	26

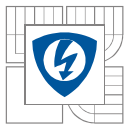


<i>Obr. 4-4: Fotka realizovaného meniča z vrchu.....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 4-5: Fotka realizovaného meniča zo spodu</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 4-6 Zdrojový kód pre riadenie striedavého meniča napätia</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 5-1 Schéma zapojenia laboratórnej úlohy</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 5-2 Priebehy napätia a prúdu na R záťaži pri riadiacom uhle: a) 30°, b) 90°, c) 150°</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 5-3 Závislosť napätia a prúdu R záťaže na riadiacom uhle.....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 5-4 Závislosť napätia R a RL záťaže na riadiacom uhle</i>	<i>34</i>
<i>Obr. A.1 Realizované zapojenie striedavého meniča napätia.....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. C.2 Rozloženie súčiastok na plošnom spoji striedavého meniča napätia</i>	<i>46</i>
<i>Obr. C.3 Cesty na plošnom spoji striedavého meniča napätia</i>	<i>47</i>



ZOZNAM TABULIEK

<i>Tab. 2-1 Technické parametre mikrokontroléra Arduino Micro [8]</i>	<i>18</i>
<i>Tab. 5-1: Hodnoty napätia a prúdu na R záťaži</i>	<i>32</i>
<i>Tab. 5-2: Hodnoty napätia a prúdu na RL záťaži</i>	<i>33</i>
<i>Tab. B.1: Zoznam súčiastok</i>	<i>45</i>



PRÍLOHY

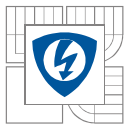
A REALIZOVANÉ ZAPOJENIE STRIEDAVÉHO MENIČA NAPÄTIA

B ZOZNAM SÚČIASTOK

C ROZLOŽENIE SÚČIASTOK A CESTY NA PLOŠNOM SPOJI STRIEDAVÉHO MENIČA NAPÄTIA

D OBSAH CD



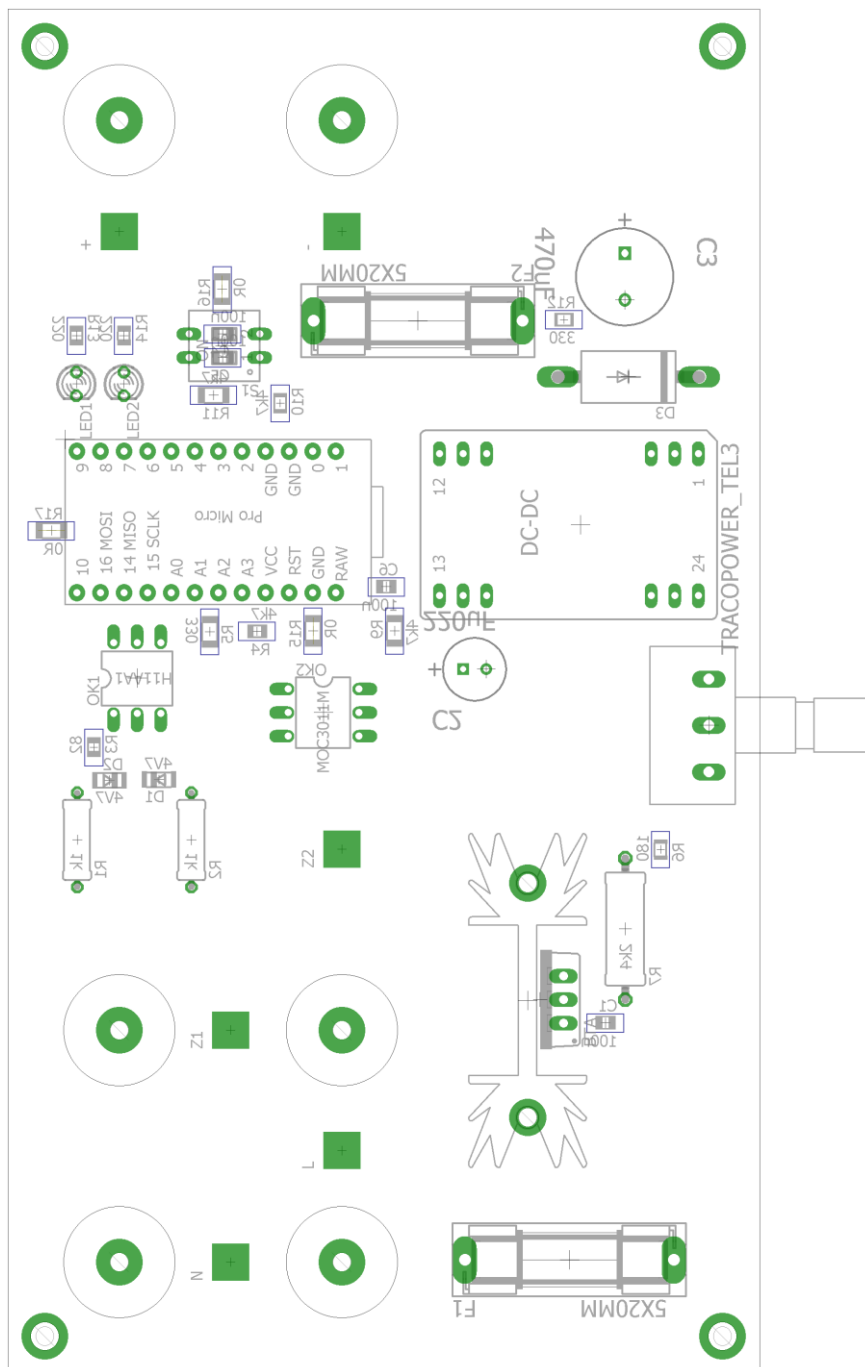


B ZOZNAM SÚČIASTOK

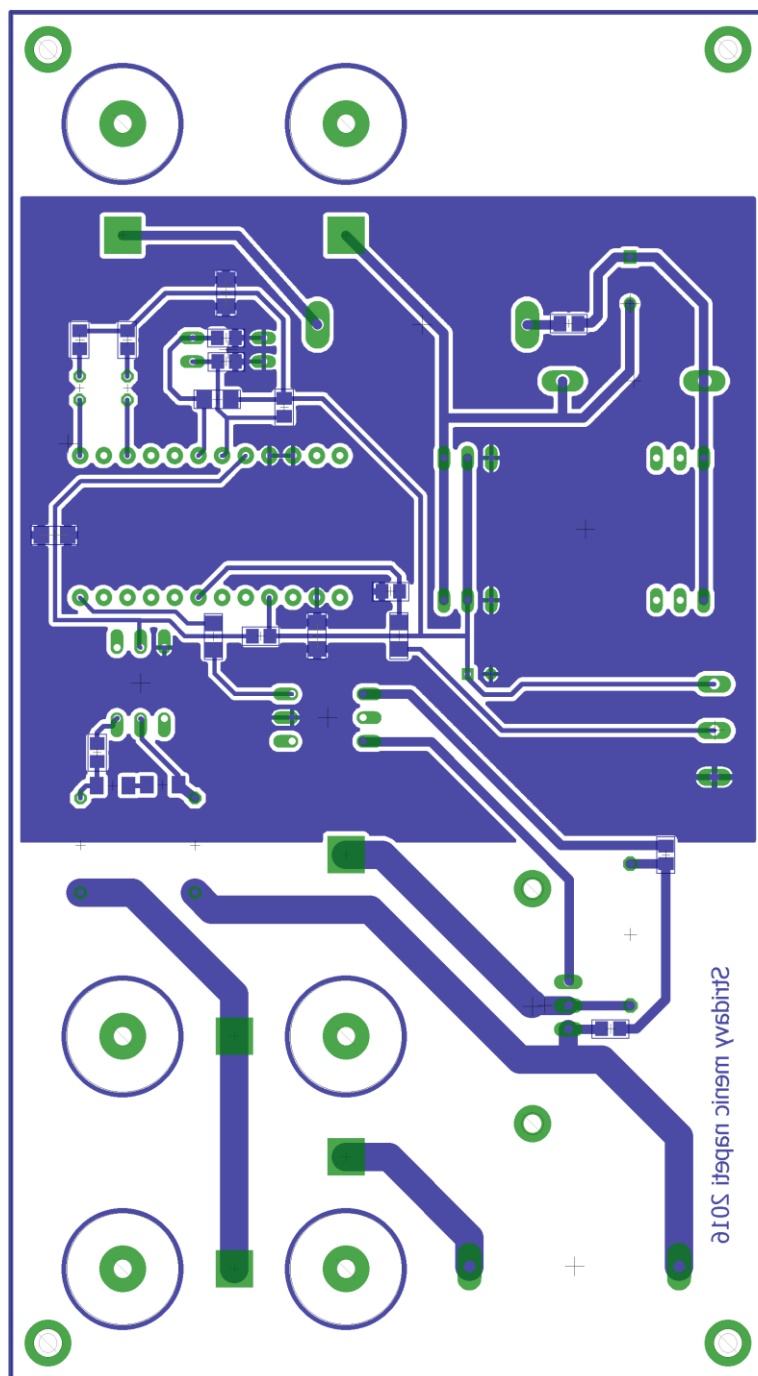
Tab. B.1: Zoznam súčiastok

Zoznam súčiastok				
Označenie	Hodnota	Typ	Názov	Poznámka
R1,2	1k	0309/10	Odpor	
R3	82	R0805	Odpor	
R4,10,11	4k7	R0805	Odpor	
R5	330	R1206	Odpor	
R6	180	R0805	Odpor	
R7	2k4	0414/15	Odpor	
R8	PC1621	PC1621	Potenciometer	Zmena riadiaceho uhla
R9	4k7	R1206	Odpor	
R11	4k7	R1206	Odpor	
R12	330	R0805	Odpor	
R13,14	220	R0805	Odpor	
R15,16,17	0R	R1206	Odpor	Pospojovanie GND
C1,4,5,6	100n	C0805	Kondenzátor	
C2	220μ	EL.CAP.6,3x11	Kondenzátor	
C3	470μ	EL.CAP.10x20	Kondenzátor	
D1,2	4v7	SOD80C	Zenerová dioda	Prepät'ová ochrana H11AA1
D3	3A	1N5400	Dioda	Ochrana proti prepólovaniu
LED1	LED 3mm	LED 3mm	LED Zelená	Program č.1 aktívny
LED2	LED 3mm	LED 3mm	LED Žltá	Program č.2 aktívny
BTA	6A	BTA06	Triak	
CH	11°C/W	V7477X	Chladič triaka	
OK1	H11AA1	H11AA1	Optotriak	Detekcia prechodu U nulou
OK2	-	MOC3011M	Optotriak	Budenie triaka
DC/DC	TEL-3-2411	TRACOPOWER	DC/DC menič 24/5VDC	Pomocný zdroj 5VDC
ProMicro	-	Arduino Micro	Mikroprocesor	Riadenie nap. meniča
DIP_02	DIP02YL	DIP02YL	Spínače	Voľba programu
F1	6,3A	FF	Ultrarýchla poistka	Istenie triaka
F2	200mA	F	Rýchla poistka	Istenie pomocného zdroja
Z1, Z2	-	ZDIRKA 4mm	Zdierka zelená	Pripojenie záťaže (R, RL)
L, N	-	ZDIRKA 4mm	Zdierka čierna	Silové napájanie 50VAC
24V+	-	ZDIRKA 4mm	Zdierka červená	
24V-	-	ZDIRKA 4mm	Zdierka modrá	

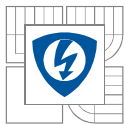
C ROZLOŽENIE SÚČIASTOK A CESTY NA PLOŠNOM SPOJI STRIEDAVÉHO MENIČA NAPÄTIA



Obr. C.2 Rozloženie súčiastok na plošnom spoji striedavého meniča napätia



Obr. C.3 Cesty na plošnom spoji striedavého meniča napätia



D OBSAH CD

Na CD sa nachádza elektronická forma bakalárskej práce, katalógové listy navrhnutých súčiastok, zdrojový kód programu pre riadenie meniča a súbory z Eaglu obsahujúce schému a dosku v elektronickej podobe.