



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA MIKROELEKTRONIKY



Návrh a realizace střídače s harmonickým průběhem na výstupu

Design and implementation of Pure Sine Wave Inverter

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Studijní program: Komunikace, Multimédia a Elektronika

Studijní obor: Aplikovaná elektronika

Vedoucí práce: Ing. Adam Bouřa, Ph.D.

Josef Ruffer

Praha 2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Ruffer** Jméno: **Josef** Osobní číslo: **425474**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektronika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh a realizace střídače napětí s harmonickým průběhem na výstupu

Název bakalářské práce anglicky:

Design and Implementation of Sine Wave Inverter

Pokyny pro vypracování:

1. Proveďte rešerši a seznamte se s problematikou střídačů napětí s harmonickým napětím na výstupu.
2. Na základě získaných poznatků zvolte vhodné technické řešení, navrhnete a realizujete střídač ze stejnosměrného napětí na vstupu v rozsahu 10 V až 16 V na střídavé napětí 230 V, 50 Hz se sinusovým průběhem na výstupu. U navrženého zařízení implementujte elektronickou ochranu přetížení na výstupu, elektronickou ochranu proti poklesu vstupního napětí pod zvolenou mez (vybitý akumulátor), ochranu proti přepětí na vstupu a ochranu proti přepětí na výstupu. Implementujte automatickou stabilizaci výstupního napětí při změně vstupního napětí v rozsahu 10 V až 16 V a při změně zátěže 0 W až 100 W.
3. Sestavte testovací pracoviště, proveďte měření a kriticky zhodnoťte dosažené parametry vašeho řešení. Na základě výsledků testování navrhnete další možná vylepšení.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Sanjay Dixit, Ambreesh Tripathi, Vikas Chola: 800VA Pure Sine Wave Inverter's Reference Design, Texas Instruments, Application Report 2013, URL (8.2.2017): <http://www.ti.com/lit/an/slaa602/slaa602.pdf>
- [2] Krejčířík, A.: DC/DC měniče, BEN-Technická literatura, 2002, ISBN 80-7300-045-8
- [3] Kús V.: Vliv polovodičových měničů na napájecí soustavu, BEN - technická literatura, 2002, ISBN 80-7300-062-8

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Adam Bouřa Ph.D., katedra mikroelektroniky FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **09.02.2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: **10.09.2018**

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení

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

V Praze dne

podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Adamu Bouřovi, Ph.D. za odborné vedení práce a cenné rady, které mi pomohly tuto práci zkompletovat. Dále mé poděkování patří rodině a přátelům za podporu a motivaci při zpracování této práce. Zvláštní poděkování pak patří Václavovi Hejnému za zapůjčení programátoru a technickou podporu při nahrávání programu.

Obsah

Obsah	9
Seznam tabulek	11
Seznam obrázků.....	12
Seznam použitých zkratk.....	13
Abstrakt	14
Klíčová slova	14
Abstract	15
Keywords	15
1. Úvod	16
2. Měníče napětí.....	17
2.1 Obecný pojem	17
2.2 Střídač napětí	18
2.3 Konstrukce střídače napětí	19
3. Rešerše	20
3.1 Dostupné technologie.....	20
3.2 Technické parametry a cena	20
4. Návrh střídače napětí.....	22
4.1 Základní princip	22
4.2 Střídač napětí	22
4.3 PWM – Pulzně šířková modulace	23
4.4 Použití mikrokontroléru	24
5. Návrh zapojení	25
5.1 Návrh schématu	25
5.2 Plošný spoj.....	28
5.3 Program mikrokontroléru	31
6. Měření střídače	33
6.1 Základní parametry	33
6.2 Zatížený střídač napětí výkonem 60 W.....	34

6.3 Zahřívání střídače napětí.....	35
6.4 Test ochranných prvků	36
7. Návrh možných vylepšení	37
8. Závěr	38
Zdroje	39
Seznam příloh.....	40
Obsah disku CD	40

Seznam tabulek

Tabulka č. 1 – Technické parametry vybraných vzorků střídačů.....	21
---	----

Seznam obrázků

Obr. č. 1 - Průběhy výstupního napětí	19
Obr. č. 2 – Blokové schéma prvního řešení	19
Obr. č. 3 – Blokové schéma druhého řešení	19
Obr. č. 4 – Principiální zapojení H-můstku	22
Obr. č. 5 – PWM modulace pro vytvoření sinového průběhu [7, str. 8]	23
Obr. č. 6 – Zapojení mikrokontroléru ATmega328P	25
Obr. č. 7 – Zapojení napájecího zdroje mikrokontroléru a komunikačního rozhraní	26
Obr. č. 8 – Zapojení H-můstku a budičů tranzistorů	27
Obr. č. 9 – Zapojení zpětné vazby pro regulaci výstupního napětí	27
Obr. č. 10 – Návrh vrstvy TOP plošného spoje	29
Obr. č. 11 – Návrh vrstvy BOT plošného spoje	30
Obr. č. 12 – Návrh vrstvy SMT a SMB plošného spoje	30
Obr. č. 13 – Hlavní smyčka programu mikrokontroléru	32
Obr. č. 14 – Vstupní napětí, proud a příkon nezatíženého střídače	33
Obr. č. 15 – Výstupní napětí nezatíženého střídače	34
Obr. č. 16 – Vstupní napětí a proud střídače zatíženého 60 W	34
Obr. č. 17 – Výstupní napětí a proud střídače zatíženého 60 W	35
Obr. č. 18 – Termo snímek střídače napětí	36

Seznam použitých zkratek

AC – střídavé napětí

DC – stejnosměrné napětí

R_{DS} – odpor mezi svorkami Drain a Source tranzistoru

U_{GS} – napětí mezi svorkami Gate a Source tranzistoru

I_{DS} – proud tekoucí svorkami Drain a Source tranzistoru

VCC – napájecí napětí

GND – společný vztažný bod napětí, záporný pól napájecího napětí

SMD – z angl. Surface Mounted Device, neboli součástka určená pro povrchovou montáž

THT – z angl.. Through-hole Technology, neboli technologie osazování plošných spojů pomocí součástek s piny vedoucích skrze díru plošného spoje

EMC – elektromagnetická kompatibilita

TOP – z angl.. Top, neboli vrchní vrstva plošného spoje

BOT – z angl. Bottom, neboli spodní vrstva plošného spoje

SMT – z angl. Solder Mask Top, neboli nepájivá maska vrchní strany plošného spoje

SMB – z angl.. Solder Mask Bottom, neboli nepájivá maska spodní strany plošného spoje

I2C – z angl. Inter-Integrated Circuit, neboli sběrnice pro připojení periférii k mikrokontroléru

Abstrakt

Předložená bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací DC/AC střídače napětí s harmonickým průběhem výstupního napětí.

Navržený střídač je určen především pro místa, kde není k dispozici síťové napětí 230VAC pro napájení spotřebičů. Jde o ostrovní solární autonomní systémy, ale také automobily, obytné přívěsy a plavidla s palubním napětím 12V.

Zařízení pracuje v rozsahu vstupního napětí 10 – 16V se zachováním velikosti výstupního napětí. Zapojení střídače obsahuje ochranu úplného vybití akumulátoru, ochranu proti opačné polaritě vstupního napětí a ochranu proti zkratu vstupního i výstupního napětí.

Klíčová slova

Střídač, měnič DC/AC, harmonický výstup, 230VAC

Abstract

Bachelor thesis deals with design a implementation of DC/AC inverter with pure sine output voltage.

The inverter is designed for places without mains voltage for devices power supply. These places are mostly solar autonom systems, cars, trailers and boats with 12V systém voltage.

The device works with input voltage from 10 to 16 V with keeping the output voltage. The construction of inverter contains the low battery voltage protection, reverse polarity protection and shortcut of input and output voltage protection.

Keywords

Inverter, DC/AC, Pure Sine Wave, 230VAC

1. Úvod

Tato práce navazuje na můj první a druhý semestrální projekt. V prvním semestrálním projektu byl navržen střídač napětí, určený pro napájení spotřebičů a zařízení konstruovaných pro provoz v rozvodných sítích se střídavým napětím o efektivní hodnotě 230 V. Navržený střídač byl napájen ze stejnosměrné soustavy o napětí 12 V. Výstupní napětí střídače mělo obdélníkový průběh o frekvenci 50 Hz. Pro zvýšení napětí byl použit transformátor, který zároveň galvanicky odděloval vstupní a výstupní napětí.

Ve druhém semestrálním projektu bylo toto zapojení vylepšeno tak, aby tvar výstupního napětí více odpovídal tvaru napětí v rozvodných sítích. Dále bylo upraveno zapojení můstku pro buzení vinutí transformátoru. Tranzistory MOS-FET typu P byly nahrazeny tranzistory typu N a zároveň byl použit obvod IR2101 pro buzení těchto tranzistorů. Vstupní signál pro budiče tranzistorů byl generován pomocí vývojového kitu Arduino MEGA2560.

Cílem této práce je zajištění zpětné vazby pro regulaci výstupního napětí při změně zátěže v rozmezí 0 – 100 W nebo při změně vstupního napětí v rozmezí 10 – 16 V. Zároveň i nahrazení vývojového kitu Arduino mikrokontrolérem Atmel ATmega328P. Dále je požadováno doplnění ochrany vstupního a výstupního napětí proti zkratům a přetížení.

Součástí této práce je pak zhodnocení výsledných parametrů střídače.

2. Měníče napětí

2.1 Obecný pojem

Měníče napětí slouží ke změně napětí, které máme v soustavě dostupné na napětí, které vyžaduje spotřebič, který chceme z naší soustavy napájet. Touto změnou může být jak frekvence střídavého napětí, amplituda, tvar a druh napětí.

Změna frekvence je vhodná v situacích, kdy chceme provozovat výrobek, který je určen pro napájení střídavým napětím o frekvenci 60 Hz, v sítích na území ČR, kde se používá frekvence napájecího napětí 50 Hz. Změna frekvence může být i vhodná pro regulaci točivých strojů, a to zejména synchronních a asynchronních motorů. Touto změnou můžeme regulovat nejen otáčky motoru, ale i zrychlení a zpomalení motoru.

Dále můžeme měnit amplitudu střídavého i stejnosměrného napětí. V praxi jde o použití transformátorů pro zvýšení i snížení amplitudy střídavého napětí a pro stejnosměrné napětí lze využít spínaných zdrojů pro snížení, ale i zvýšení napětí.

Změnou druhu napětí je pak myšleno převodu stejnosměrného napětí na střídavé popřípadě střídavého na stejnosměrné napětí. Při změně střídavého napětí na napětí stejnosměrné obvykle používáme usměrňovačů a to polovodičových, popřípadě operačních. Při změně stejnosměrného napětí na napětí střídavé pak mluvíme o střídačích napětí nejčastěji užívaných v nízkonapěťových soustavách pro napájení síťových spotřebičů.

V praxi měniče dělíme na:

- a) Měníče frekvence – jde o měnič typu AC/AC, používá se zejména pro regulaci otáček třífázových motorů
- b) Transformátory – jde o měnič typu AC/AC, používá se pro změnu amplitudy napětí, popřípadě pro galvanické oddělení pracovního napětí
- c) Usměrňovače – jde o měnič typu AC/DC, používá se pro převod střídavého napětí na stejnosměrné, typicky usměrnění výstupu transformátoru
- d) DC-DC měnič – jde o měnič typu DC-DC, používá se pro změnu velikosti napětí, typicky snižující pro USB napáječe pro 12 V systémy a zvyšující pro napájení notebooků pro 12 V systémy
- e) Střídače napětí – měnič typu DC/AC – používá se ve stejnosměrných soustavách pro napájení spotřebičů 230 V, typicky v automobilech, karavanech a solárních systémech

2.2 Střídač napětí

Střídačem napětí tedy rozumíme přeměnu stejnosměrného napětí na napětí střídavé.

Střídač napětí je i součástí každého nepřerušitelného zdroje, kdy při výpadku elektrické energie je použito právě střídače napětí k napájení důležitých spotřebičů pro dobu nezbytně nutnou k jejich bezpečnému vypnutí.

Dále střídač napětí nalezneme u většiny měničů frekvence. Zde je vstupní napětí, obvykle 3x400 VAC, usměrněno a následně pomocí střídače napětí opět vytvořeno střídavé napětí o jiné frekvenci.

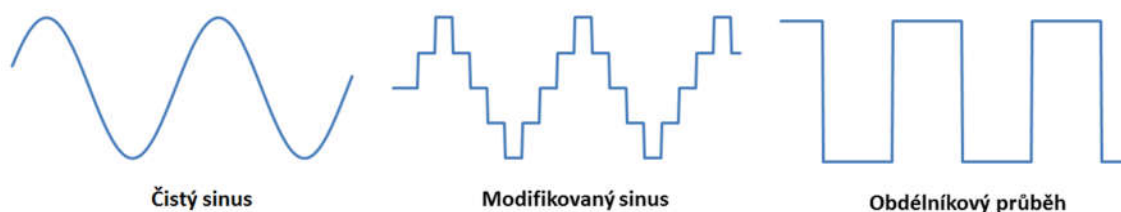
V případě samotných střídačů napětí jako samostatný celek pak mluvíme o spojení střídače napětí s měničem amplitudy napětí. Tedy z velmi nízkého napětí, obvykle stejnosměrná 12 V a 24 V soustava, požadujeme napětí používané v distribučních sítích, obvykle o jmenovitém střídavém napětí 230 V a 110 V.

Soustavou velmi nízkého napětí rozumíme soustavu, která pracuje v určitém rozsahu napětí kolem nominální hodnoty. Typickým příkladem je automobil s palubním stejnosměrným napětím 12 V, kde je použit olověný akumulátor, jehož pracovní napětí se pohybuje v rozmezí 10,5 V až 12,8 V. Baterie je však nabíjena zdrojem poháněným spalovacím motorem, v dnešní době obvykle alternátorem, takže napětí v soustavě může dosahovat mnohem vyšších hodnot. Při správně fungujícím dobíjení jde o napětí až 14,5 V.

Tento rozsah je tedy celkem široký vzhledem k nominální hodnotě, tudíž musí být střídač napětí schopný pracovat v takto širokém pásmu napájecího napětí.

Dále se budeme zajímat pouze o střídače napětí. Konkrétně o střídače určené pro soustavy používající nominálního stejnosměrného napětí 12 V. Výstupem pak požadujeme napětí, které se průběhem, amplitudou a frekvencí co nejvíce podobá síťovému napětí, které se používá v elektrických soustavách na území ČR. Konkrétně tedy napětí o sinusovém průběhu s frekvencí 50 Hz a hodnotou efektivního napětí 230 V.

Střídače lze dále dělit podle tvaru výstupního napětí. Základní tři tvary napětí jsou čistě sinusové napětí, modifikované sinusové napětí a obdélníkové napětí. Jejich průběhy jsou znázorněny na Obr. 1.



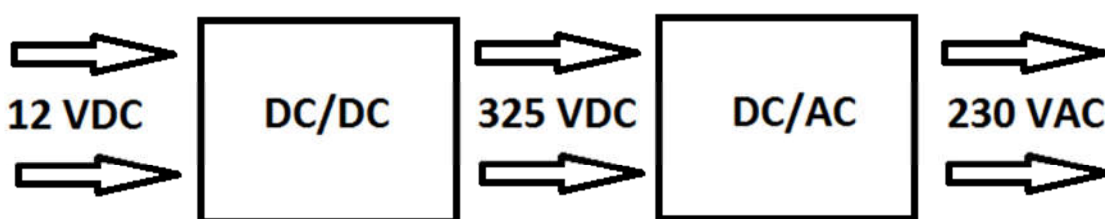
Obr. č. 1 - Průběhy výstupního napětí

2.3 Konstrukce střídače napětí

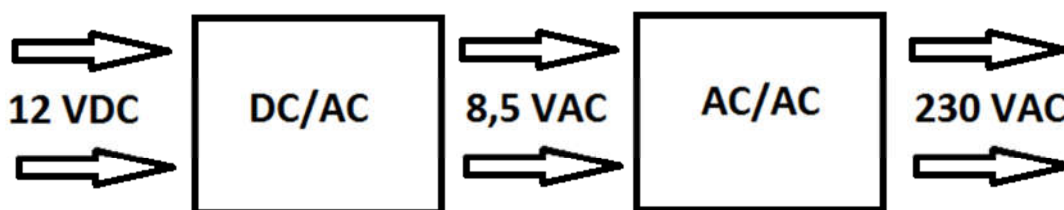
Základním principem střídače napětí je tedy spojení měniče amplitudy napětí a střídač napětí jako takový. Pro toto spojení existují dva různé přístupy konstrukčního řešení.

Prvním řešením je spojení DC/DC měniče, který bude mít jako vstupní napětí námi dostupných stejnosměrných 12 V a výstupem bude stejnosměrné napětí o velikosti 325 V jako amplituda námi požadovaného síťového napětí. Dále bude zapojení obsahovat střídač napětí, jehož vstupem bude zmíněných 325 V a výstupem pak střídavé napětí o efektivní hodnotě 230 V.

Druhým přístupem je použití střídače napětí se vstupním napětím 12 V a výstupním střídavým napětím o efektivní hodnotě 8,5 V. Dále bude zapojení obsahovat AC/AC měnič amplitudy, tj. transformátor, jehož vstupem bude zmíněně střídavé napětí o efektivním napětí 8,5 V a výstupem požadované napětí o efektivní hodnotě 230V. Výhodou tohoto řešení je galvanické oddělení vstupního a výstupního napětí a snížení rizika úrazu elektrickým proudem.



Obr. č. 2 – Blokové schéma prvního řešení



Obr. č. 3 – Blokové schéma druhého řešení

3. Rešerše

3.1 Dostupné technologie

V současné době je na trhu dostupná spousta střídačů napětí určených pro systémy napájené napětím 12 V. Dostupné střídače lze rozdělit na dvě základní skupiny a to střídače s výstupním napětím ve tvaru modifikované sinusovky a střídače s čistě sinusovým průběhem výstupního napětí.

Střídače s modifikovaným sinusovým průběhem výstupního napětí jsou vhodná pro většinu běžných spotřebičů. Výjimkou je malá oblast měřících a lékařských přístrojů citlivých na vstupní napětí. Pokud chceme napájet spotřebič, který obsahuje cívku nebo soustavu cívek, typicky transformátor nebo točivý stroj, budeme se potýkat s hlučností spotřebiče. Vzhledem k rychlým změnám napětí může dojít k nepříjemnému hluku transformátorových plechů popřípadě statoru motoru v slyšitelném spektru.

Ideální volbou je tedy střídač s čistě sinusovým tvarem výstupního napětí, avšak jeho cena je vzhledem k technologické náročnosti značně vyšší. Výstupní napětí je však moc od síťového napětí neliší a je tedy vhodný pro provoz všech spotřebičů a zařízení určených pro toto napětí.

3.2 Technické parametry a cena

Na trhu jsou dostupné střídače v širokém spektru pracovních výkonů. Nejlevnější střídače mají deklarovaný trvalý výkon desítky wattů, naopak výkonnější produkty až jednotky kilowatt. Střídače do výkonu kolem 300 W mají vstupní vodiče zakončené konektorem pro připojení do autozásuvky. Výkonnější střídače napětí jsou pak osazeny svorkami pro přímé napojení k autobaterii.

Většina prodávaných střídačů napětí má deklarovaný rozsah napájecího napětí v rozsahu od 10 V do 15 V, přičemž všechny dostupné produkty disponují ochranou akumulátoru proti trvalému poškození při poklesu napětí mimo pracovní rozsah.

Dále střídače disponují veškerými ochranami vstupního a výstupního napětí. Samozřejmostí je ochrana proti zkratování vstupního napětí, ochrana proti přepólování vstupního napětí, ochrana proti přetížení výstupu a ochrana proti přehřátí střídače napětí. Výkonnější střídače disponují aktivním chlazením a to pomocí ventilátoru spínaného dle zátěže nebo teploty šasi.

Důležitým parametrem je také klidový vstupní proud, tedy proud, který teče do střídače, pokud výstup není zatížen. Tato hodnota se výrazně liší u různých střídačů a to v rozmezí 0,25 A až 2 A.

Mezi další parametry, které při výběru zohledňujeme, patří tolerance výstupního napětí. Tento parametr může nabývat hodnoty až 10%, což může u některých citlivějších spotřebičů znamenat trvalé poškození.

Kvalitnější střídače pak disponují funkcí Soft Start, která umožňuje pomalý náběh výkonu při připojení střídače do soustavy a nedochází tedy k proudovým špičkám při zapnutí.

Vybrané technické parametry střídačů, které lze zakoupit v e-shopu [2] jsou shrnuty pro srovnání v tabulce č. 1.

Obchodní označení	Průběh napětí	Trvalý výkon	Špičkový výkon	Rozsah vst. napětí	Klidový proud	Tolerance výst. napětí	Orientační cena
12V/230V-150W Mini	Modifikovaná	150 W	300 W	10 - 15 V	< 0,25 A	5%	600 Kč
HQ150/12SIN	Čistá	150 W	300 W	10 - 15 V	< 0,65 A	5%	3800 Kč
CAR300-122	Modifikovaná	300 W	600 W	10 - 15 V	0,3 A	10%	900 Kč
P300U-122	Čistá	300 W	600 W	10,5 - 15 V	< 0,83 A	3%	2 000 Kč
CAR1K-122	Modifikovaná	100 W	2000 W	10 - 15V	0,8 A	10%	2 700 Kč
P1000-122	Čistá	1000 W	2000 W	10,5 - 15 V	< 0,83 A	3%	5 100 Kč
CAR2K-122	Modifikovaná	2000 W	4000 W	10 - 15 V	< 1,8 A	10%	5 200 Kč
P2000-122	Čistá	2000 W	4000 W	10,5 - 15 V	< 1,4 A	3%	9 500 Kč

Tabulka č. 1 – Technické parametry vybraných vzorků střídačů

Ze srovnání je vidět, že střídače s výstupním napětím ve tvaru čistě sinusovém, jsou téměř dvakrát dražší než střídače s napětím ve tvaru modifikovaného sinu. Dále vidíme, že střídače s čistě sinusovým výstupem mají mnohem menší rozsah výstupního napětí než střídače s modifikovaným sinem.

Pro srovnání parametrů navrženého střídače napětí bude použit komerční střídač napětí HQ150/12SIN, tedy střídač s trvalým výkonem 150 W a čistě sinusovým výstupním napětím.

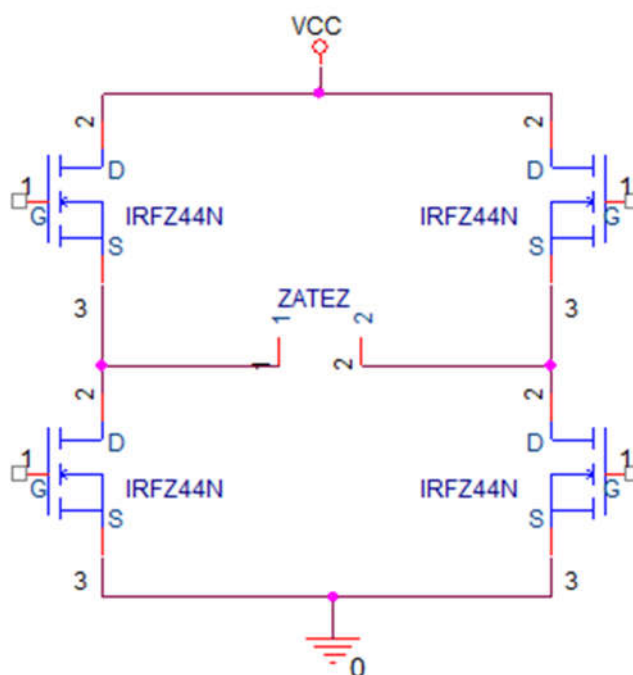
4. Návrh střídače napětí

4.1 Základní princip

Navržený střídač se sestává ze dvou částí. První částí je střídač napětí, který zajišťuje přeměnu stejnosměrného napětí na napětí střídavé, ale také zajišťuje správný tvar průběhu napětí. Druhou částí je pak měnič amplitudy střídavého napětí, v našem případě transformátor.

4.2 Střídač napětí

Základem střídače je použití H-můstku pro vytvoření střídavého napětí. S ohledem na spínací charakteristiku použitého typu tranzistoru je energeticky nejvýhodnější používat pouze dva stavy tranzistoru, a to plně uzavřený a plně otevřený. Tranzistor bude tedy pracovat jako napětím nebo proudem řízený rezistor.



Obr. č. 4 – Principiální zapojení H-můstku

V našem případě, kdy jsou použity tranzistory typu FET, budeme hovořit o napětově řízeném rezistoru. Konkrétně bude použit tranzistor IRFZ44N, u kterého výrobce udává

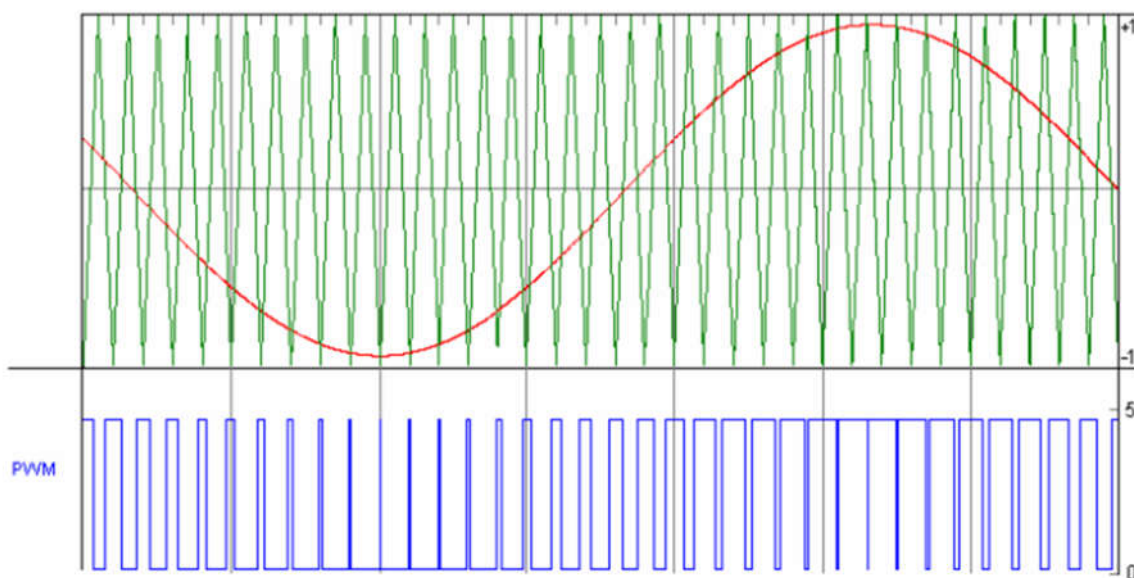
nejmenší odpor $R_{DS} = 15 \text{ m}\Omega$ při napětí $U_{GS} = 10 \text{ V}$. Naopak plně zavřený pro $U_{GS} = 0 \text{ V}$ dosahuje proud I_{DS} hodnot do $10 \text{ }\mu\text{A}$.

Vzhledem k použití tranzistorů typu N, je nutné horní dva tranzistory budit napětím vyšším než je napětí napájecí. K tomu je v zapojení použit obvod IR2101 jako budič tranzistorů. Obvod je schopný budit tranzistor napětím až o 20 V vyšším, než je napětí napájecí a tím je zaručeno, že tranzistory se plně otevřou v požadovaný okamžik.

4.3 PWM – Pulzně šířková modulace

Pro generování potřebného průběhu napětí je použita pulzně šířková modulace. Jde o modulaci, kterou lze měnit střední hodnotu napětí daného signálu a to pomocí změny poměru časů, kdy je signál v úrovni logické jedničky a v úrovni logické nuly. Jde tedy o obdélníkový signál s proměnnou délkou impulsů.

Signál je rozdělen do 20 vzorků na periodu. Jedné periodě tedy náleží 20 obdélníkových pulzů, jejichž střída odpovídá hodnotě funkce sinus v daném čase. Podobný signál je znázorněn na obrázku č. 5. Výsledným signálem je pak buzen tranzistorový H-můstek, a to zvlášť pro kladnou a zvlášť pro zápornou půlvlnu. Tím je řízena velikost i směr proudu tekoucí transformátorem. Výsledným signálem je ještě nutno vyhladit pomocí filtru typu dolní propust. Díky tomu se ztratí nosný kmitočet modulace a vynikne spojitý signál ve tvaru sinu.



Obr. č. 5 – PWM modulace pro vytvoření sinového průběhu [7, str. 8]

4.4 Použití mikrokontroléru

Pro zjednodušení zapojení obvodu je použit mikrokontrolér pro generování potřebného signálu. Vzhledem k potřebě 4 digitálních výstupů pro buzení mostu a 2 analogových vstupů pro zpětnou vazbu a měření vstupního napětí, byl vybrán mikrokontrolér ATmega328P od firmy Atmel. Pro tuto aplikaci je naprosto dostačující. Výhodou mikrokontroléru je, že je použit ve vývojovém kitu Arduino Nano, takže lze použít vývojové prostředí Arduino pro kompilaci programového kódu.

Základem programu je tabulka hodnot funkce sinus pro jednu periodu signálu. Díky tomu je snížena výpočetní doba programu, kdy se program nemusí počítat hodnotu funkce v daném bodě při každém průchodu cyklem.

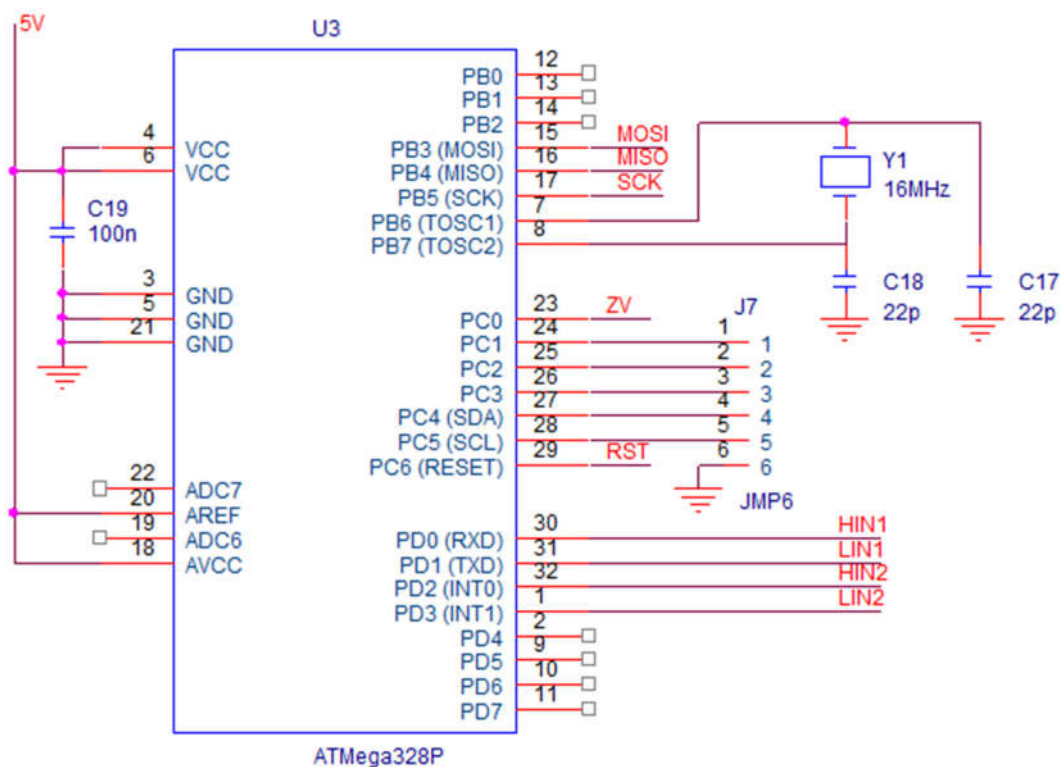
Dalším krokem je generování vzorku signálu s pevnou délkou 1 ms a s proměnnou střídou. Střída je následně korigována podle hodnoty napětí poskytované zpětnou vazbou. Pro kladnou půlvlnu jsou buzeny dva tranzistory, které zajistí, aby tekla proud transformátorem v kladném smyslu. Pro zápornou půlvlnu jsou použity jiné dva tranzistory, které zajistí, aby proud transformátorem tekla opačným směrem.

Mikrokontrolér je také použit pro měření napájecího napětí pomocí ADC převodníku. Při poklesu napětí pod danou hranici zajistí program odpojení zátěže a tím nedojde ke zničení akumulátoru.

5. Návrh zapojení

5.1 Návrh schématu

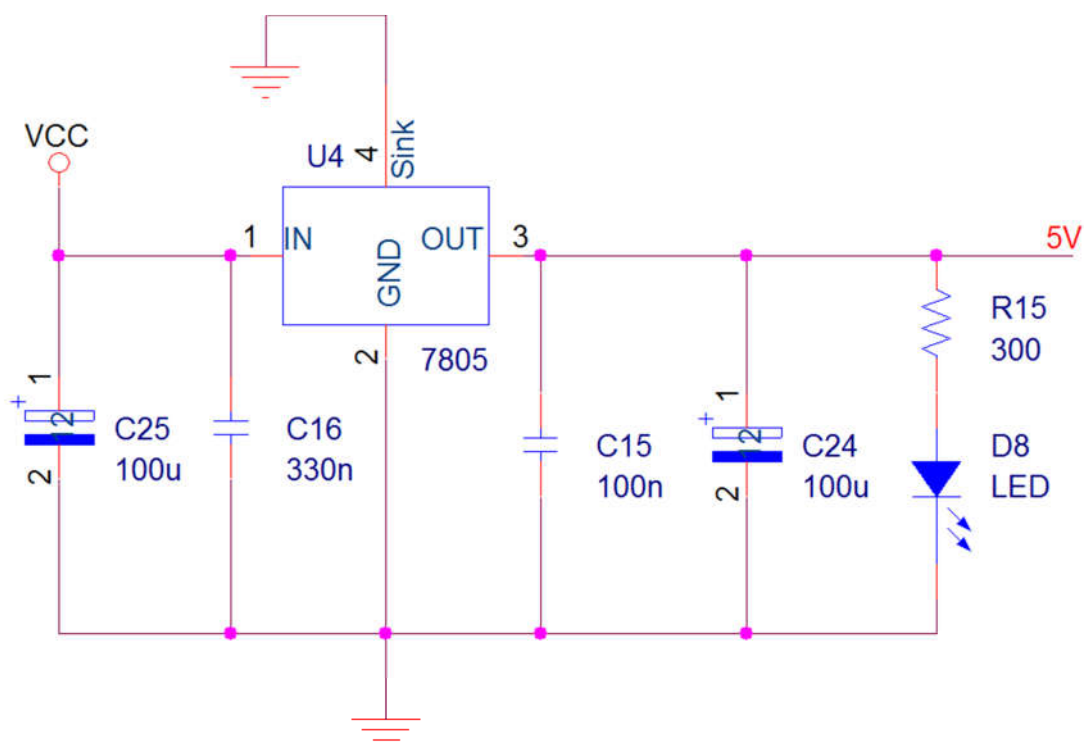
Základem zapojení je mikrokontrolér ATmega328P. Jeho zapojení vychází z katalogového zapojení [5]. Jako oscilátor je použit polovodičový krystal na oscilující na frekvenci 16Mhz. Dále jsou použity blokovací kondenzátory pro pokrytí proudových špiček napájení mikrokontroléru. Pro výstupní signály buzení tranzistorů byly použity digitální piny PD0, PD1, PD2 a PD3. Dále pro zpětnou vazbu byl použit analogový vstup PC0. Pro měření vstupního napětí byl použit pin PC1. Dále jsou vyvedeny piny MOSI, MISO, SCK a RESET pro nahrání programového kódu přes sběrnici SPI. Pro možnost dalšího rozšíření zařízení jsou vyvedeny piny PC1-PC5 na kolíkovou lištu.



Obr. č. 6 – Zapojení mikrokontroléru ATmega328P

Vzhledem k rozsahu napájecího napětí zařízení a nutnosti napájet mikrokontrolér napětím do 5,5 V je nutné implementovat do zapojení zdroj napětí 5 V. Pro konstrukci takového zdroje jsou dvě možnosti. První možností je použití spínaného zdroje s účinností kolem 90%. Takový zdroj však musí obsahovat spínaný stabilizátor napětí, cívku a kondenzátory. Zapojení je tedy složitější. Druhou možností je použití lineárního stabilizátoru. Jeho zapojení je jednoduché, obsahuje pouze integrovaný obvod a kondenzátory. Jeho účinnost je však nízká, jelikož je veškerý nadbytečný výkon přeměněn v teplo.

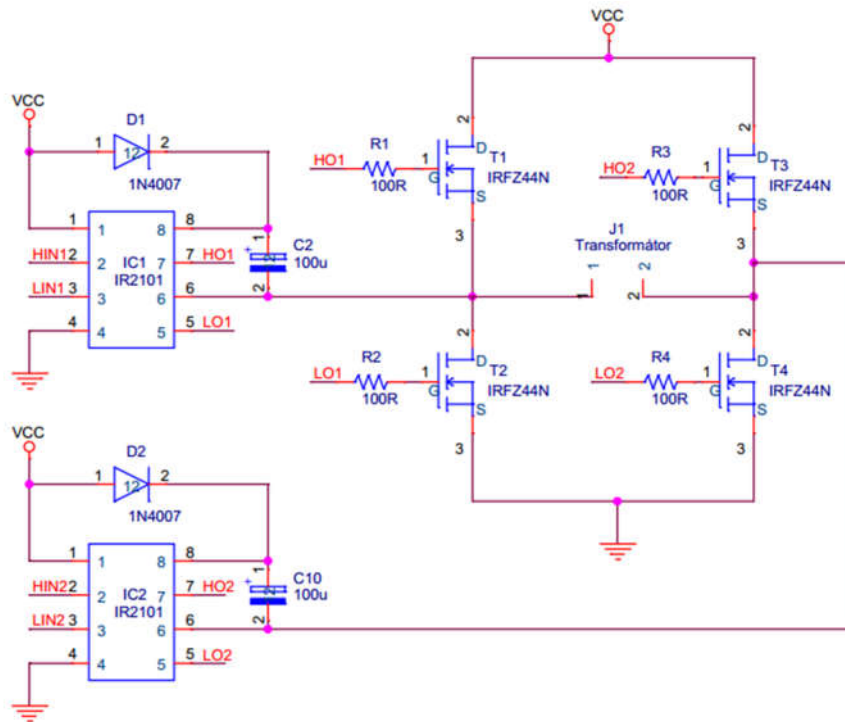
V našem případě potřebujeme napájet pouze mikrokontrolér, jehož spotřeba se pohybuje v desítkách miliampérů. Použití lineárního stabilizátoru je tedy výhodnější, jelikož ztráty při takovém protékajícím proudu můžeme vzhledem k celku zanedbat. Byl tedy zvolen lineární stabilizátor napětí 7805, který je zapojen dle katalogového listu [6]. Jeho maximální výstupní proud je 1 A a rozsah vstupního napětí 7 – 35 V. K zapojení byla dodána světlo emitující dioda jako signalizace správné funkce napájení.



Obr. č. 7 – Zapojení napájecího zdroje mikrokontroléru a komunikačního rozhraní

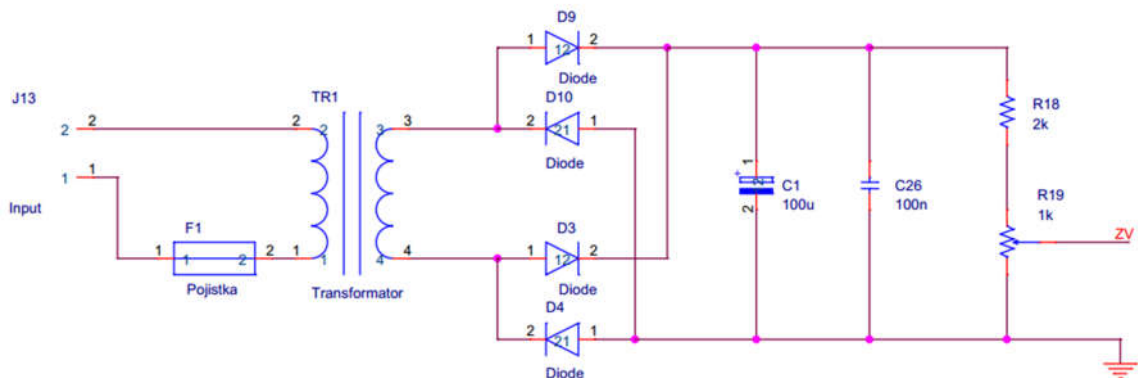
Pro buzení tranzistorového můstku je použita dvojice integrovaných obvodů IR2101, které jsou schopny budit tranzistor napětím až o 20 V vyšším, než je napětí napájecí. Tohoto napětí je třeba k dosažení plného otevření tranzistorů vrchní části mostu. Tyto integrované obvody jsou opět zapojeny dle katalogového listu [1]. Je zde použito blokovacích kondenzátorů k pokrytí proudových špiček napájení obvodů. Výstupy budiče jsou spojeny

s tranzistory přes rezistor, který omezuje proud do GATE tranzistoru. Maximální výstupní proud budiče tranzistoru je 130 mA. Gate tranzistoru má nezanedbatelnou parazitní kapacitu, díky níž může docházet k velkým proudovým špičkám při jeho spínání a rozpínání. Tento proud je pak omezován rezistory R1 – R4 na hodnotu 120 mA dle Ohmova zákona.



Obr. č. 8 – Zapojení H-můstku a budičů tranzistorů

Pro zpětnou vazbu byl použit transformátor s poměrem vinutí 230/9. Výstupní napětí je usměrněno, vyhlazeno a následně přes nastavitelný odporový dělič přivedeno na pin PC0 mikrokontroléru.



Obr. č. 9 – Zapojení zpětné vazby pro regulaci výstupního napětí

Pro měření vstupního napájecího napětí střídače je použit odporový dělič, který upravuje hodnotu napětí tak, aby bylo v rozsahu pro analogový vstup mikrokontroléru. Toto napětí je přivedeno na pin PC1 mikrokontroléru. Pokud toto napětí klesne pod hranici, která může zničit olověný akumulátor, dojde k odpojení střídače. Pro opětovné zapnutí střídače je třeba jej odpojit a opět připojit k akumulátoru.

5.2 Plošný spoj

Při návrhu plošného spoje bylo třeba zohlednit technologii budoucí výroby. Byl tedy zvolen dvoustranný plošný spoj s oboustrannou nepájivou maskou a jednostranným servisním potiskem. Minimální tloušťka spojů a mezery mezi spoji je 200 μm .

Nejdůležitějším krokem návrhu plošného spoje je rozmístění součástek. Součástky je třeba umístit tak, aby bylo možné je propojit podle schématu, ale také, aby spoje co nejméně zasahovali do spodní vrstvy plošného spoje, kde se nachází rozlitá měď jako záporný pól napájení. Je tedy vhodné součástky umístit dle jejich významu k sobě.

Dále je třeba vzít v úvahu proudové zatížení vodičů. Vodiče zatížené větším proudem je třeba dimenzovat na tento proud s tím, že musíme počítat se zahříváním vodičů. Také je vhodné uvažovat délku vodičů zatížených těmito proudy. Kratší vodiče mají menší parazitní indukčnost a dosahují tedy pro změny proudu lepších vlastností.

Důležité jsou i spoje, které nejsou zatíženy trvale velkým proudem, ale dochází zde k proudovým špičkám. Příkladem je napájení mikroprocesoru, který pracuje synchronně a při každém taktu dochází například k překlopení hradel nebo výstupních pinů. Toto překlápění vyžaduje určitý proud pro vybití nebo nabití kapacit vnitřních hradel. Dochází tedy k proudovým špičkám, které mohou rušit jiné zařízení v okolí pomocí elektromagnetického pole, ale také mohou ovlivnit přímo jiné součástky na plošném spoji. Proto je nutné, jak uvádí literatura [4], použít blokovací kondenzátory a vhodně je umístit na plošném spoji. Zpravidla se kondenzátory umísťují co nejbližší ke kritickému spotřebiči a to tak, aby byla nejkratší možná proudová smyčka.

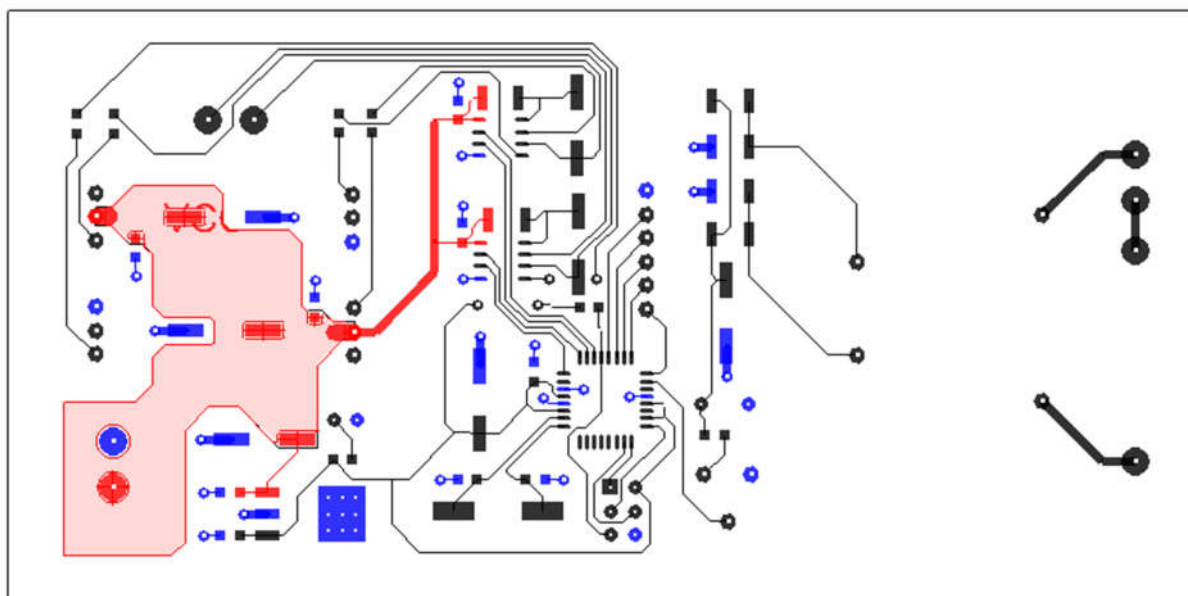
Dalším důležitým krokem návrhu je výběr součástek jako takových. V rámci snahy zkrácení proudových smyček je vhodné použít součástky typu SMD, které jsou určeny pro povrchovou montáž. Jejich přívodní piny nejsou tak dlouhé jako u technologie THT. Díky tomu mají přívodní piny nižší parazitní indukčnost i kapacitu. Zároveň je možné zmenšit výše zmíněné proudové smyčky a tím dosáhnout mnohem lepších vlastností.

V případě návrhu vícevrstevných desek je vhodné použít některé vrstvy jako napájecí. V případě dvoustranné desky je vhodné použít spodní stranu jako záporný napájecí pól. Pro vícevrstvé desky je pak vhodné používat vnitřní vrstvy pro kladný i záporný napájecí pól a tím vytvořit deskový kondenzátor.

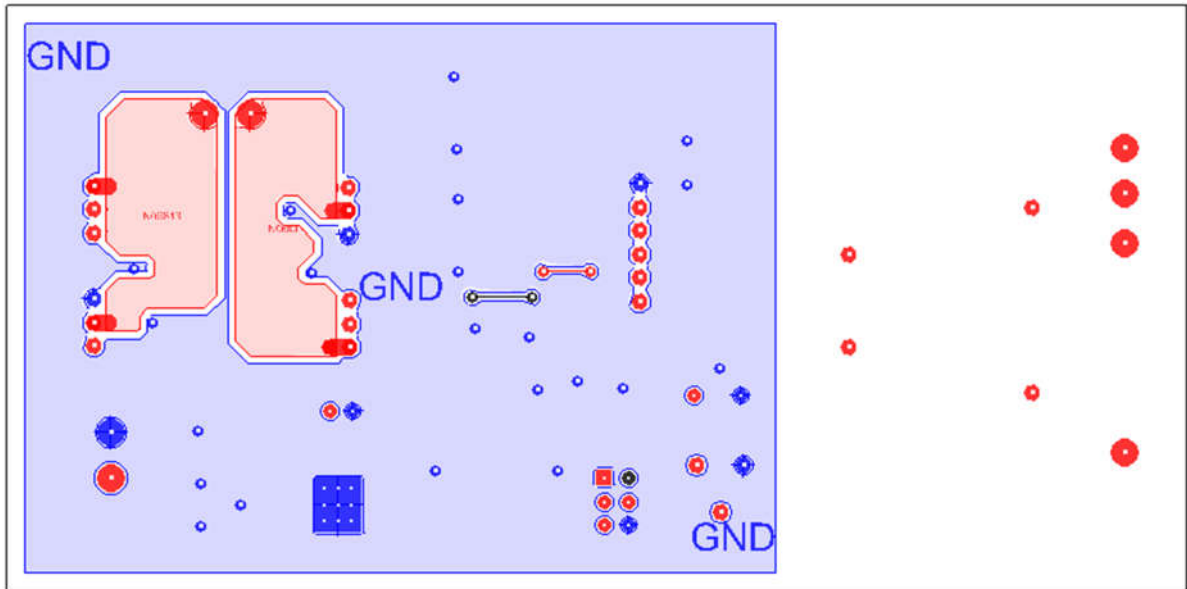
S ohledem na tyto pravidla pak můžeme docílit nízkého vyzařovaného rušení naším výrobkem. Tato vlastnost se nazývá Elektromagnetická kompatibilita a je nutnou podmínkou pro uvedení výrobku na trh.

Druhou stránkou EMC je odolnost proti vnějšímu rušení. Tím může být rušení elektromagnetické a rušení skrze napájecí zdroj. Elektromagnetické rušení lze potlačit použitím stíněných kabelů a uzemněných kovových prvků při konstrukci zařízení. Rušení skrze napájecí zdroj lze opět eliminovat pomocí blokovacích kondenzátorů. Tímto signálem může být například rušení, které vzniká u spínaných zdrojů.

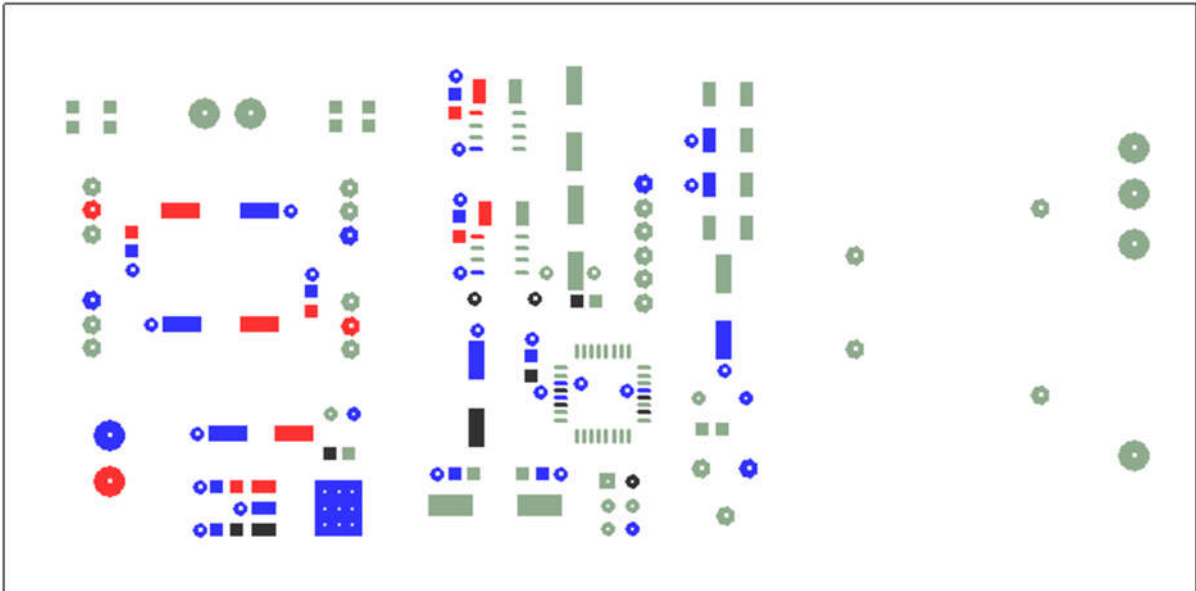
Dále je třeba při návrhu respektovat napětí, které bude na vodičích přítomno. Pokud uvažujeme přítomnost střídavého napětí 230V, což je v tomto případě přívod k měřicímu transformátoru, je třeba dostatečně dimenzovat izolační mezeru mezi vodiči. Dle literatury [4] je třeba dodržet izolační vzdálenost minimálně 0,5 mm.



Obr. č. 10 – Návrh vrstvy TOP plošného spoje



Obr. č. 11 – Návrh vrstvy BOT plošného spoje



Obr. č. 12 – Návrh vrstvy SMT a SMB plošného spoje

5.3 Program mikrokontroléru

Principem celého programu je smyčka, ve které dochází ke generování jedné periody výstupního signálu. Tato perioda je složena s dvaceti obdélníkových pulsů. Šířka těchto pulsů se mění v závislosti na čase. Střída signálu v daném čase pak odpovídá hodnotě funkce sinus v daném čase tak, aby bylo dosaženo frekvence 50 Hz. Tato část je vyobrazena na obrázku č. 13.

Vzhledem k náročnosti výpočtu hodnoty funkce sinus a vzhledem k faktu, že hodnoty jsou v každém cyklu shodné, byla definována tabulka hodnot, díky které se sníží výpočetní náročnost programu.

Další funkcí programu je sledování výstupního napětí. Pokud je napětí vyšší než požadované, v našem případě 230 V efektivního napětí, dojde k zúžení všech obdélníků budícího signálu. Pokud je napětí výstupu nižší než požadované, dojde naopak k rozšíření obdélníků.

Zároveň pak program hlídá, zda nedošlo k přetížení výstupu. Pokud je transformátor buzen maximálním signálem, tedy šířka obdélníků je maximální, a výstupní napětí je stále menší než pracovní napětí, dojde k odpojení střídače. Opětovné spuštění je možné pouze vypnutím a zapnutím střídače, tedy jeho odpojení a připojení ke zdroji.

Poslední funkcí je hlídání vstupního napájecího napětí. V každém cyklu programu je kontrolována hodnota vstupního napětí. Pokud toto napětí klesne pod hodnotu, která způsobí trvalé poškození akumulátoru, dojde k odpojení střídače a je nutné ho opět vypnout a zapnout jako v předchozím případě.

Tyto dva stavy jsou pak indikovány červenou chybovou svítivou diodou.

Díky použitému mikrokontroléru ATmega328P, který je použit firmou Arduino v jejich vývojovém kitu Arduino Nano, je možné celý program vyvíjet ve vývojovém prostředí Arduino. Vývojové prostředí umožňuje kontrolu a kompilaci programu do binární podoby. Binární soubor pak lze jednoduše přes programátor ASIX Presto nahrát do mikrokontroléru. Programátor je propojen s mikrokontrolérem přes sběrnici SPI skrze připravený konektor na desce plošného spoje.

```

37 void loop() {
38   double cas;
39   if(pretizeno) {
40     digitalWrite(led,HIGH);
41   } else {
42     if(arg < SR/2) {
43       PWM_out(0,3,sine[arg] * LB);
44     } else {
45       PWM_out(1,2,sine[arg] * LB);
46     }
47     arg++;
48     if(arg >= SR) {
49       int output = analogRead(A0);
50       if(output > 510) LB -= 0.02;
51       if(output < 490) LB += 0.02;
52       if (LB >= 1) { LB = 1; }
53       if (LB <= 0) { LB = 0; }
54       arg = 0;
55     }
56     if(analogRead(mes) < 375) // odpovida napeti 11V pro delic napeti 1:6
57     {
58       pretizeno = 1;
59     } else {
60       pretizeno = 0; }
61   }
62 }
63 }

```

Obr. č. 13 – Hlavní smyčka programu mikrokontroléru

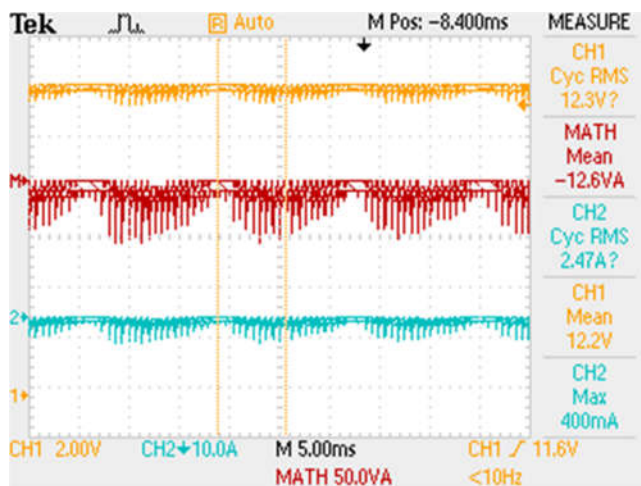
6. Měření střídače

6.1 Základní parametry

Bylo sestaveno měřicí pracoviště sestávající se z osciloskopu RIGOL DS1102E, olověné baterie 12 V 7,2 Ah pro napájení střídače, měřeného střídače, testovací zátěže v podobě 60W žárovky a rezistoru 0,1 Ω pro měření proudů. Vzhledem k cenám a dostupnosti transformátorů byl pro testování a měření použit transformátor s poměrem 10 / 230 V s celkovým výkonem 200 VA, tudíž nelze plně dosáhnout požadovaného napětí.

Nejprve byl měřen střídač bez zatíženého výstupu, tedy naprázdno. Na vstupní svorky bylo přivedeno napětí 12,6 V z olověného akumulátoru. Byla naměřena časová závislost vstupního napětí i proudu. Dále byl naměřen průběh výstupního napětí.

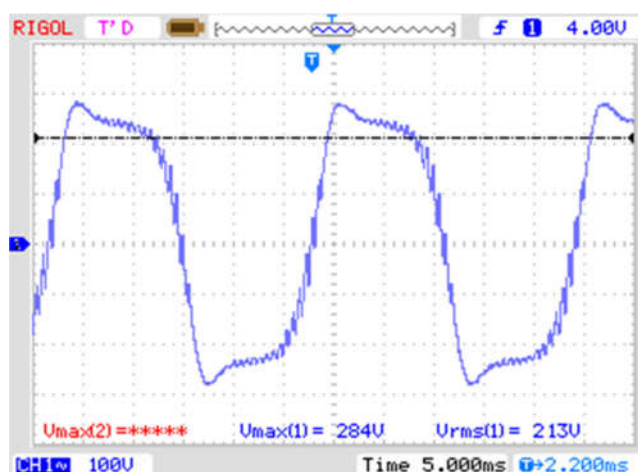
Na obrázku č. 14 vidíme závislost napětí a proudu na čase. Vstupní napětí je v grafu vyznačeno žlutě. Jeho maximální hodnota je 12,6 V. Minimální hodnota pak 11,6 V. Vstupní proud v grafu vyznačen modrou barvou. Proud byl měřen jako úbytek napětí na rezistoru o hodnotě 0,1 Ω a zároveň byl nastaven kanál v osciloskopu na použití se sondou 1:10. Osciloskop pak přepočítává automaticky změřené napětí na proud, který rezistorem teče. Dalším průběhem v grafu je příkon střídače. V grafu je označen červenou barvou. Vstupní příkon nezatíženého střídače je 12,6 W, což je převážně ztrátový výkon transformátoru. Tato hodnota se liší dle použitého transformátoru.



Obr. č. 14 – Vstupní napětí, proud a příkon nezatíženého střídače

Na obrázku č. 15 je vyobrazen průběh výstupního napětí nezatíženého střídače. Průběh není zcela totožný se sinovým průběhem. Na vzestupné a sestupné hraně dochází k překmitu napětí. Tento překmit je způsoben příliš velkou kapacitou filtračního kondenzátoru

výstupu. Efektivní hodnota výstupního napětí je 213 V, což je méně než požadovaná hodnota. Tento rozdíl je dán použitým transformátorem.

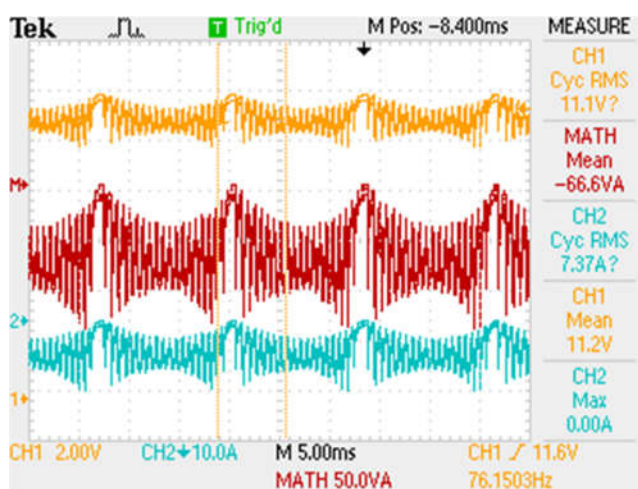


Obr. č. 15 – Výstupní napětí nezatíženého střídače

6.2 Zatížený střídač napětí výkonem 60 W

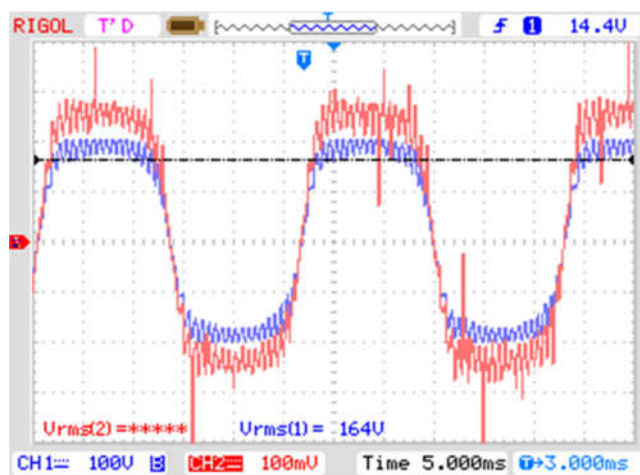
Pro měření zatíženého střídače byla zvolena klasická žárovka jako zátěž. Výhodou žárovky je malá parazitní indukčnost a kapacita vlákna. Lze jej považovat za odporovou zátěž.

Při měření byl opět snímán vstupní proud a vstupní napětí, jejichž průběh je znázorněn na obrázku č. 16. Napětí opět odpovídá žlutý průběh. Z grafu je patrné, že došlo k poklesu napětí akumulátoru, což je zcela běžné při jeho zatížení. Dále je zde vyobrazen proud, který střídač odebírá. Proud je vyznačen v grafu modrou barvou. Proud je opět měřen jako úbytek napětí na rezistoru. Z grafu vyplývá, že odběr proudu je 7,37 A. Příkon je označen červenou barvou a jeho hodnota se pohybuje okolo 67 W.



Obr. č. 16 – Vstupní napětí a proud střídače zatíženého 60 W

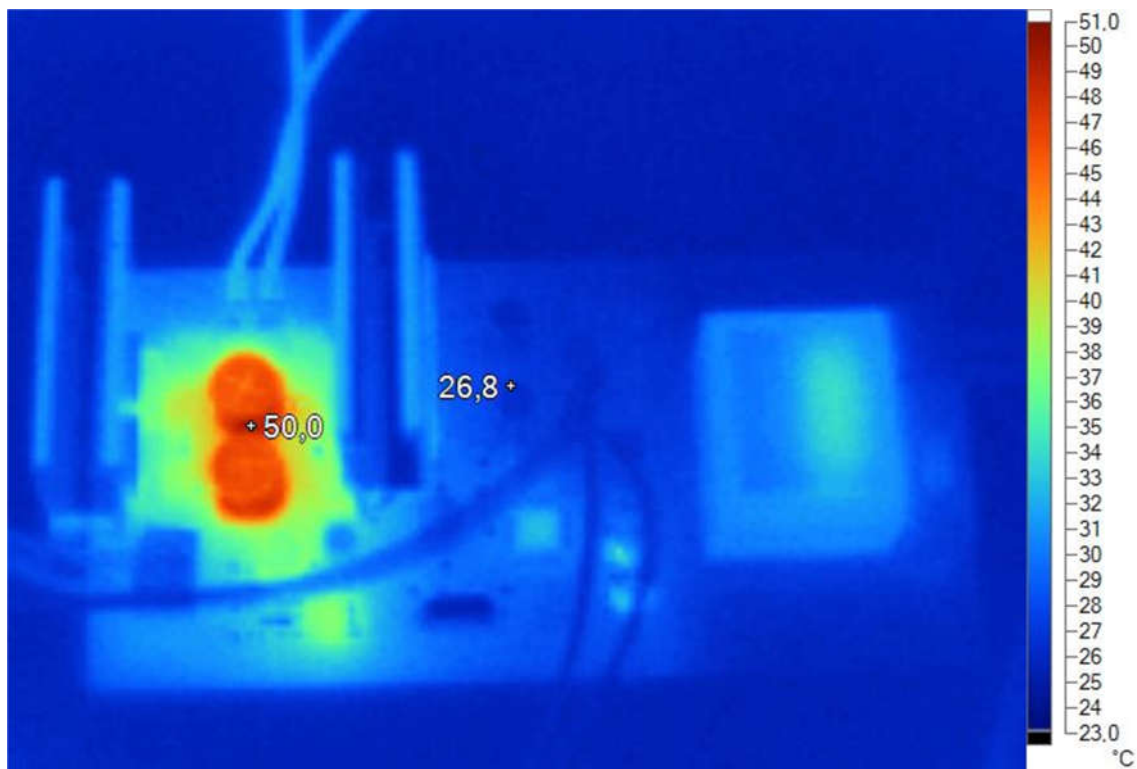
Na obrázku č. 17 je pak zaznamenaný průběh výstupního napětí a proudu tekoucím žárovkou. K měření proudu byl opět použit rezistor a úbytek napětí na něm. Z grafu je patrné, že nedochází k fázovému posuvu proudu a napětí, lze tedy skutečně považovat žárovku za odporovou zátěž. Výstupní napětí, modrý průběh, se už blíží k průběhu sinovému, avšak dochází ke zploštění průběhu vlivem špatného poměru vinutí transformátoru. Jeho efektivní hodnota je pouhých 173 V, což je opět způsobeno použitým transformátorem. Proud tekoucí žárovkou, červený průběh, je také velice blízko sinovému průběhu. Jeho efektivní hodnota odpovídá hodnotě 183 mA. Celkový výkon odebíraný žárovkou je pak 32 W.



Obr. č. 17 – Výstupní napětí a proud střídače zatíženého 60 W

6.3 Zahřívání střídače napětí

Při testovacím měření byla kontrolována teplota jednotlivých součástí. Kontrola prokázala nadměrné zahřívání blokovacích elektrolytických kondenzátorů. Jejich teplota přesáhla po 5 minutách běhu střídače hodnotu 50 °C. Nadměrné ohřívání je způsobeno vnitřním odporem kondenzátoru. Bylo by tedy vhodné použití lepšího kondenzátoru nebo více menších kondenzátorů. Profil teploty celého střídače je pak zachycen na obrázku č. 18.



Obr. č. 18 – Termo snímek střídače napětí

6.4 Test ochranných prvků

Součástí měření zkonstruovaného střídače je i zkouška ochranných prvků. Prvním takovým ochranným prvkem je ochrana úplného vybití baterie, kdy mikrokontrolér na základě měření vstupního napětí odpojí zátěž při poklesu vstupního napětí pod hodnotu 10,5 V při zátěži. Pro obnovení funkce střídače je nutné ho odpojit od napájení a znovu připojit.

Další funkcí je ochrana přetížení výstupu transformátoru. Tato ochrana je vzhledem k použití testovacího transformátoru nefunkční, neboť pracuje na principu poklesu napětí pod stanovenou hranici při plném buzení transformátoru.

Neméně důležitou ochranou je pak ochrana proti přepólování, kdy dioda zapojená antiparalelně k napájení způsobí zkrat a vybaví tak ochranu proti zkratu. Tou je tavná nevratná pojistka o hodnotě 10 A.

7. Návrh možných vylepšení

Možných vylepšení navrženého střídače je celá řada. První takovým vylepšením je použití správného transformátoru, což vyžaduje zakázkovou výrobu přesného transformátoru s odpovídajícími parametry. Dále je třeba vylepšit výstupní filtr a to dodáním tlumivky a vytvořením tak LC filtru typu dolní propust s přesnými parametry.

Z grafu viz výše je také patrné zvlnění napájecího napětí a to jak v zátěži tak naprázdno. Je tedy třeba i zlepšit blokování napájecího napětí. Ideálním prvkem je tlumivka zapojená v sérii s naším výrobkem. Díky tomu se zmenší zvlnění napětí a zároveň se sníží rušení ostatních spotřebičů napojených na stejný zdroj. Zároveň pak osazení kvalitnějších kondenzátorů, které způsobují ztráty výkonu.

Dalším možným vylepšením je úprava buzení transformátoru na vyšší frekvenci. Nyní je jedna perioda rozdělena pouze na 20 vzorků, což způsobuje zakřivení průběhu, který se pak odchyluje od požadovaného sinového průběhu. Díky zvýšení této frekvence také dojde k posunutí spektra budícího signálu do neslyšitelné oblasti. Důležitou výhodou zvýšení spínací frekvence je i snížení potřebných kapacit a indukčností k vyhlazení napájecího, ale i výstupního napětí.

V budoucnu je možné také implementace displeje zobrazující vstupní a výstupní napětí, popřípadě i výstupní výkon a proud střídače. V současné době je vyvedena sběrnice I2C pro tuto aplikaci na kolíkovou lištu na plošném spoji.

8. Závěr

Byl navržen, zkonstruován a otestován střídač napětí, který se lehce svými vlastnostmi odchyluje od zadání práce. Tato odchylka je však způsobena pouze výběrem transformátoru pro zvýšení amplitudy střídavého napětí. Pořízení transformátoru s přesnými parametry pro vytvoření jednoho prototypu střídače je drahá záležitost a byl tedy použit transformátor, který byl v danou chvíli nejdostupnější. Poměr závitů jeho vinutí není dostatečný pro vytvoření požadovaného napětí, nicméně při jeho nahrazení transformátorem se správným poměrem závitů bude střídač zcela vyhovující.

Navržený střídač je plně funkční, včetně všech potřebných ochranných zařízení. Výstupní napětí by v případě použití správného transformátoru mělo průběh ve tvaru sinu. Zároveň by pak i efektivní hodnota napětí odpovídala požadované hodnotě.

Zdroje

- [1] *IR2101 (S) / IR2102 (S) & (PbF)* [online]. International Rectifier, 2004 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.955-053.1.pdf>
- [2] *Český výrobce elektroniky* [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <https://deramax.cz/>
- [3] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *DC/DC měniče*. Praha: BEN, 2001. ISBN 80-7300-045-8.
- [4] ZÁHLAVA, Vít. *Návrh a konstrukce desek plošných spojů: principy a pravidla praktického návrhu*. Praha: BEN - technická literatura, 2010. ISBN 978-80-7300-266-4.
- [5] *Atmel ATmega328P* [online]. ATMEL, 2015 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: http://www.atmel.com/images/Atmel-8271-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega48A-48PA-88A-88PA-168A-168PA-328-328P_datasheet_Complete.pdf
- [6] *KIA7805AF~KIA7824AF BIPOLAR LINEAR INTEGRATED CIRCUIT* [online]. KEC Semiconductor, 2002 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.934-051.1.pdf>
- [7] *Sanjay Dixit, Ambreesh Tripathi, Vikas Chola: 800VA Pure Sine Wave Inverters Reference Design* [online]. Texas Instruments, 2013 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/slaa602/slaa602.pdf>

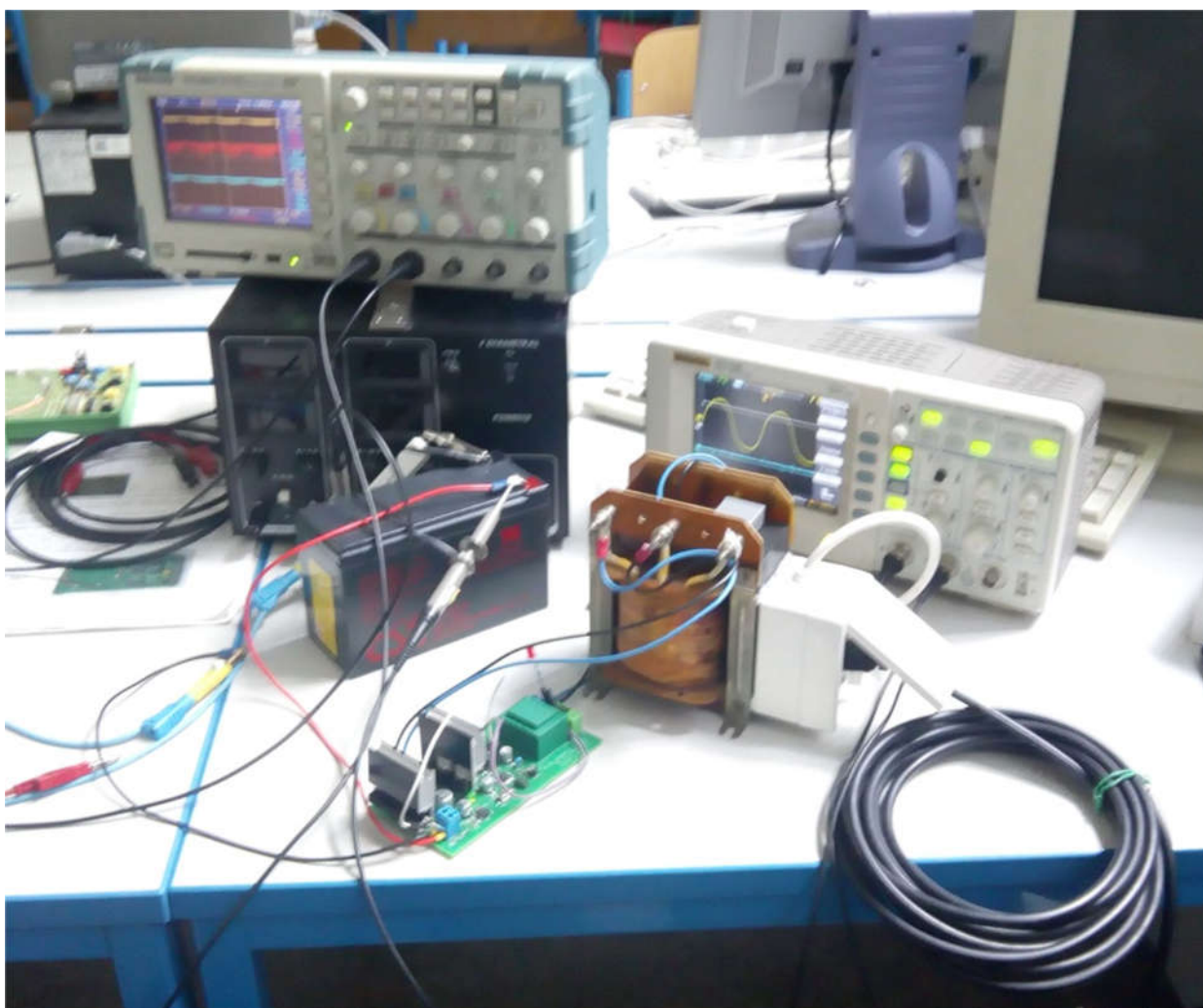
Seznam příloh

Příloha č. 1 – Měřicí pracoviště	i
Příloha č. 2 – Osazený plošný spoj střídače napětí	ii
Příloha č. 3 – Transformátor použitý pro testovací měření včetně zásuvky 230 VAC	ii
Příloha č. 4 – Funkce PWM_out a základní nastavení programu	iii

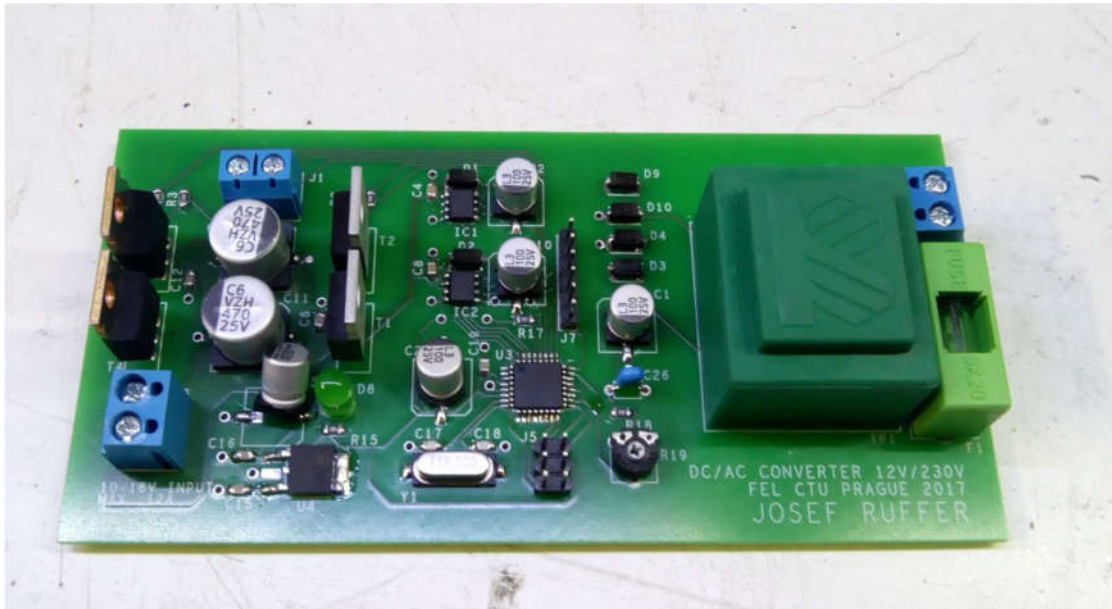
Obsah disku CD

- Literatura
 - Literatura\Atmel-8271-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega48A-48PA-88A-88PA-168A-168PA-328-328P_datasheet_Complete.pdf
 - Literatura\dsh.934-051.1.pdf
 - Literatura\dsh.955-053.1.pdf
 - Literatura\slaa602.pdf
- Vyrobní data
 - Vyrobní data\board7-1-4.drl
 - Vyrobní data\BOT.gbr
 - Vyrobní data\MILL.gbr
 - Vyrobní data\PLT.gbr
 - Vyrobní data\SMB.gbr
 - Vyrobní data\SMT.gbr
 - Vyrobní data\TOP.gbr
- Zdrojový kód
 - Zdrojový kód\ruffejos_bp.hex
 - Zdrojový kód\ruffejos_bp.ino
- ruffejos_bp.pdf

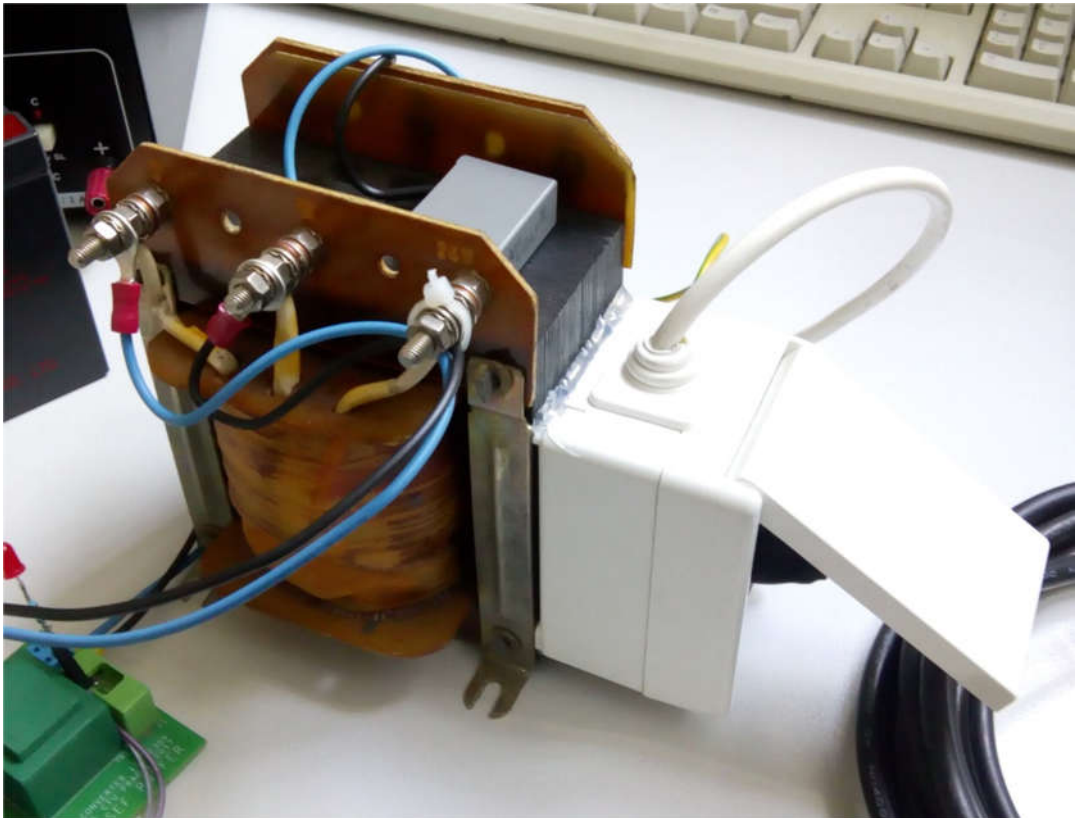
Přílohy



Příloha č. 1 – Měřící pracoviště



Příloha č. 2 – Osazený plošný spoj střídače napětí



Příloha č. 3 – Transformátor použitý pro testovací měření včetně zásuvky 230 VAC

```

1 int arg = 0;
2 int sine[40] = { 0 , 78 , 155 , 227 , 294 , 354 , 405 , 446 ,
3               476 , 494 , 500 , 494 , 476 , 446 , 405 , 354 ,
4               294 , 227 , 155 , 78 , 0 , 78 , 155 , 227 ,
5               294 , 354 , 405 , 446 , 476 , 494 , 500 , 494 ,
6               476 , 446 , 405 , 354 , 294 , 227 , 155 , 78 };
7 int SR = 40; // Pocet vzorku na periodu
8 int zakladna = 500; // Delka pulzu modulace v mikrosekundach
9 int pretizeno = 0; // Priznak pretizeni vystupu
10 double LB = 0.1; // Zpetna vazba pro regulaci napeti, pocatecni hodnota 0.1 pro softstart
11 int led = 15;
12 int mes = 16;
13
14 void setup() {
15     pinMode(0,OUTPUT);
16     pinMode(1,OUTPUT);
17     pinMode(2,OUTPUT);
18     pinMode(3,OUTPUT);
19     pinMode(led,OUTPUT);
20     pinMode(mes,INPUT);
21     digitalWrite(0,0);
22     digitalWrite(1,0);
23     digitalWrite(2,0);
24     digitalWrite(3,0);
25     digitalWrite(led,LOW);
26 }
27 // Funkce pro generovani pulzu dlouheho SR se stridou odpovidajici vstupnimu argumentu
28 void PWM_out(int a, int b, int arg) {
29     digitalWrite(a,1);
30     digitalWrite(b,1);
31     delayMicroseconds(arg);
32     digitalWrite(a,0);
33     digitalWrite(b,0);
34     delayMicroseconds(zakladna - arg);
35 }
36

```

Příloha č. 4 – Funkce PWM_out a základní nastavení programu