

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Aktivní PFC filtr pro spínané zdroje do výkonu 150W

Vedoucí práce: Ing. Jan Moldaschl

Autor: Bc. Jan Leisner

2014

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan LEISNER**
Osobní číslo: **E12N0177P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a aplikovaná informatika**
Název tématu: **Aktivní PFC filtr pro spínané zdroje do výkonu 150W**
Zadávající katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

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

1. Proveďte rozbor pasivních a aktivních PFC filtrů pro síťové výkonové impulzní napájecí zdroje.
2. Navrhněte obvodové řešení aktivního PFC filtru pro vstupní napětí v rozsahu 85-265VAC a s výstupním napětím 400V.
3. Realizujte funkční vzorek navrženého řešení a proveďte měření jeho hlavních parametrů.
4. Proveďte zhodnocení dosažených parametrů, případně diskutujete o možných vylepšeniích.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. HAMMERBAUER, J.: Elektronické napájecí zdroje a akumulátory. Vyd. 2. Plzeň: Západočeská univerzita, Elektrotechnická fakulta, 1998, 181 s. ISBN 80-708-2411-5.
2. PRESSMAN, A.; BILLINGS, K.: Switching power supply design. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2009. ISBN 978-007-1594-325.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jan Moldaschl

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání diplomové práce: 14. října 2013

Termín odevzdání diplomové práce: 12. května 2014

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan



Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software použitý při řešení této diplomové práce je legální.

V Horním Slavkově dne 7.5.2014

Jan Leisner

.....

Anotace

Diplomová práce je zaměřená na problematiku spínaných zdrojů a jejich vlivu na elektrorozvodnou soustavu. Hlavním problémem je průběh odebíraného proudu ze sítě. Popíšeme si, co tento proud způsobuje, jaké jsou možnosti nápravy. Vysvětlíme si, pojmy, které jsou úzce spjaty s problematikou, jako například PFC, Boost, CCM a jejich význam v této oblasti.

Druhým bodem práce je návrh a stavba PFC filtru typu boost. Představíme si schéma zapojení výpočty všech parametrů. Ukážeme si naměřené hodnoty a porovnáme je s hodnotami, které nám udává česká norma.

Klíčová slova

PFC, filtr, Boost, Power factor corection, CCM, DCM, CrM

Abstract

This master's thesis is focused on the topic "The issue of switching power supplies and their influence on the power system". The main problem is the line current shape. There is description what this electric current causes and some ways of the correctio. There is explanation of key words like PFC, Boost, CCM and their importance to this field.

The another part of this thesis is devoted to the design and construction of the filter type PFC boost, schematic diagram and calculations of all parameters. You can see comparison between the measured values and the values in the czech technical norm.

Keywords

PFC, filtr, Boost, Power factor corection, CCM, DCM, CrM

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce za cenné rady, připomínky a metodické vedení práce.

OBSAH:

Obsah:	8
Úvod	12
1 Problematika zdrojů	13
1.1 Norma ČSN 61000-3-2	13
1.2 Zdroj bez PFC	14
1.3 Pasivní PFC	15
2 Základní pojmy	17
2.1 Power factor (PF)	17
2.2 Total harmonic distortion (THD)	18
2.3 Účinník – Power factor correction (PFC)	18
3 Hlavní Součástky používané u APFC filtrů	20
3.1 Spínací prvky	20
3.2 Usměrnovací diody	20
3.3 Boost dioda.....	20
4 Aktivní PFC	21
4.1 Boost topologie	21
4.2 Flyback topologie.....	21
4.3 Sepic topologie.....	22
4.4 Režimy spínání.....	23
5 Výběr Obvodu, výpočty a návrh DPS	26
5.1 Výběr obvodu.....	26
5.2 Popis obvodu.....	27
5.3 Výpočty	31
5.4 Tlumivka	37
5.5 Návrh DPS	38
5.6 Měření	40
6 Závěr	49
Použitá literatura	50
Seznam příloh	1
Přílohy	2

Seznam symbolů a zkratek

PFC	Power Factor Corection
CCM	Critical Conduction Mode
DCM	Discontinous Conduction Mode
CrM	Critical Conduction Mode
FCCrM	Frequency Clamped Critical Conduction Mode
THD	Total harmonic disortion

Seznam obrázků

Obr. 1: Můstkový usměrňovač.....	14
Obr. 2: Překlenující PFC filtr.....	15
Obr. 3: Induktivní PFC filtr [1].....	16
Obr. 4: Znázornění vztahu mezi výkony.....	18
Obr. 5: Boost topologie [1].....	21
Obr. 6: Flyback topologie [1].....	22
Obr. 7: Sepic topologie [1].....	22
Obr. 8: Průběh proudu v režimu CCM [4].....	23
Obr. 9: Průběh proudu v režimu DCM [4].....	24
Obr. 10: Průběh proudu v režimu CrM [4].....	24
Obr. 11: Průběh proudu v režimu FCCrM [4].....	25
Obr. 12: Zapojení jednotlivých bloků v UCC28019 [6].....	27
Obr. 13: Zapojení soft start bloku [6].....	28
Obr. 14: Zapojení ochrany před podpětím na VCC [6].....	28
Obr. 15: Zapojení ochrany před nízkým napájecím napětím [6].....	29
Obr. 16: Zapojení napěťové zpětné vazby [6].....	29
Obr. 17: Zapojení proudové zpětné vazby.....	30
Obr. 18: Zapojení výstupního budiče [6].....	30
Obr. 19: Základní zapojení PFC filtru UCC28019 [6].....	31
Obr. 20: Toroidní jádro tlumivky.....	37
Obr. 21: Jádro EI tlumivky.....	38
Obr. 22: Schéma zapojení PFC filtru.....	39
Obr. 23: Deska plošného spoje.....	39
Obr. 24: Motiv plošného spoje určený pro planární tlumivku.....	40
Obr. 25: Zapojení síťového analyzátoru při měření [4].....	40
Obr. 26: Účinnost toroidní tlumivky v závislosti na příkonu.....	43
Obr. 27: PF toroidní tlumivky v závislosti na příkonu.....	43
Obr. 28: THD-I toroidní tlumivky v závislosti na příkonu.....	44
Obr. 29: Účinnost planární tlumivky 42 závitů v závislosti na příkonu.....	46
Obr. 30: PF planární tlumivky 42 závitů v závislosti na příkonu.....	46
Obr. 31: THD-I planární tlumivky 42 závitů v závislosti na příkonu.....	47
Obr. 32: Účinnost PFC filtru v závislosti na příkonu při napájecím napětí 230V.....	47

Seznam tabulek

Tab. 1: Vlastnosti vybraných PFC obvodů	26
Tab. 2: Základní specifikace PFC filtru	31
Tab. 3: Toroidní jádro, změřené hodnoty při $U_{in}=85\text{ V}$	41
Tab. 4: Toroidní jádro, změřené hodnoty při $U_{in}=150\text{ V}$	42
Tab. 5: Toroidní jádro, změřené hodnoty při $U_{in}=230\text{ V}$	42
Tab. 6: Planární tlumivka 18 závitů, změřené hodnoty při $U_{in}=230\text{ V}$	44
Tab. 7: Planární tlumivka 42 závitů, změřené hodnoty při $U_{in}=85\text{ V}$	45
Tab. 8: Planární tlumivka 42 závitů, změřené hodnoty při $U_{in}=150\text{ V}$	45
Tab. 9: Planární tlumivka 42 závitů, změřené hodnoty při $U_{in}=230\text{ V}$	45
Tab. 10: Hodnoty maximálního povoleného proudu pro jednotlivé harmonické u zařízení třídy A.	48

ÚVOD

Tato diplomová práce se zabývá návrhem konstrukcí a měřením aktivního PFC filtru pro spínané zdroje. Spínané zdroje mají pro výrobu nespočet výhod. Mezi ně patří na prvním místě cena použitých součástek, při správném návrhu také účinnost a kvalita výstupního napětí. Vlivem hromadné aplikace spínaných zdrojů do všech možných elektronických zařízení je nutné se zabývat i dopadem na elektrorozvodnou soustavu.

Bude potřeba provést úvod do problematiky spínaných zdrojů jejich vliv na síť, vysvětlení normy ČSN 61000-3-2 a požadavků kladených na koncová zařízení. Probereme zapojení vstupního filtru a použitých součástek. Hlavním cílem práce je porovnání několika dostupných obvodů pro aktivní PFC filtr. Z vybraných filtrů vybrat jeden řídicí obvod pro něj provést výpočty. Na základě získaných výpočtů vybrat vhodné součástky a filtr realizovat. Tlumivku, která je součástí filtru bude potřeba zkonstruovat tak, aby hodnotou indukčnosti odpovídala hodnotě spočtené. Při návrhu zvážím možnost realizace planární tlumivky. U filtru budou následně změřeny jeho hlavní parametry. Hlavním parametrem bude hodnota PF ale také účinnost celého zařízení. V případě testování více tlumivek provedu jejich zhodnocení a porovnání.

1 PROBLEMATIKA ZDROJŮ

Každý zdroj, který pro vyhlazení výstupního nebo vstupního napětí používá grétzův můstek doplněný filtračním kondenzátorem, odebírá ze sítě proud, jež svým průběhem nekopíruje napětí. Proud je odebírán v krátkých špičkách, které jsou v místech maximálního napětí sítě. Proudové špičky způsobují deformaci síťového napětí a proudové namáhání součástek. Pro snížení vlivu rušení a vyhovění norem se používá tzv. PFC (Power factor corector) filtr.

1.1 Norma ČSN 61000-3-2

Tato norma vychází z evropské normy IEC 61000. Norma se zabývá omezením proudů vyšších harmonických. Norma stanovuje meze harmonických složek odebíraných proudů. Zařízení se rozdělují do jednotlivých skupin A, B, C a D. Jednotlivé skupiny mají definovány maximální proudy pro jednotlivé harmonické.

Požadavky:

1. Elektrické zařízení se vstupním fázovým proudem až do 16 A včetně.
2. Zařízení je připojené do veřejné distribuční sítě nízkého napětí.
3. Jmenovité vstupní napětí 220/380 V

Třídění zařízení:

Třída A:

- Symetrická trojfázová zařízení
- Domácí spotřebiče, kromě zařízení identifikovaného jako zařízení třídy D
- Nářadí, kromě přenosného nářadí
- Stmívače pro zářivky
- Zvuková zařízení

Třída B:

- Přenosná nářadí
- Oblouková svářečka, která není profesionálním zařízením

Třída C:

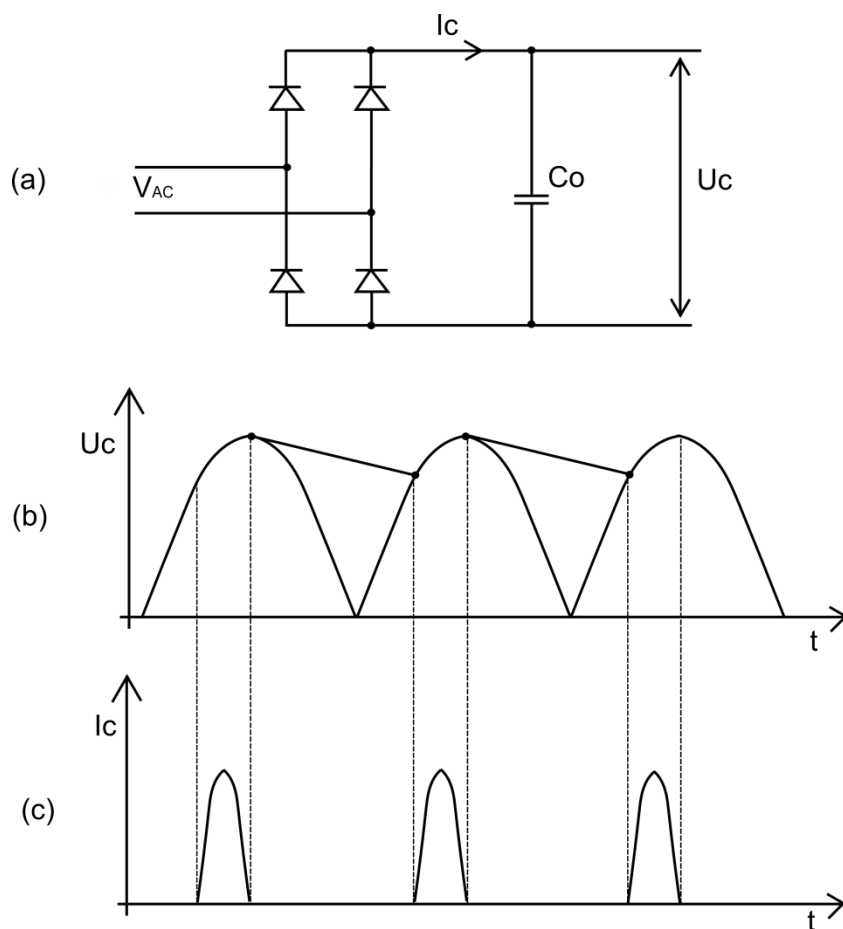
- Světelná zařízení

Třída D:

- Zařízení s menším výkonem nebo rovným 600 W následujícího typu
- Osobní počítače a monitory osobních počítačů
 - Televizní přijímače

1.2 Zdroj bez PFC

Nejjednodušším příkladem je čtyřcestný usměrňovač s filtračním kondenzátorem (Obr. 1). Každý spínaný zdroj obsahuje na vstupu podobné zapojení. Vstupní napětí je usměrněno a pomocí kondenzátoru C vyfiltrováno. Tímto způsobem dostáváme stejnosměrné napětí, které je v nezátíženém stavu vyfiltrováno. $U_c = (U_{in} - 2 * U_d) * \sqrt{2}$ Při zatížení zdroje dochází k poklesu U_c k nabíjení dochází až při hodnotě $U_{in} > U_c$. Zvětšení kondenzátoru pro lepší stabilizaci výstupního napětí má za následek zvýšení maximální hodnoty nabíjecího proudu.

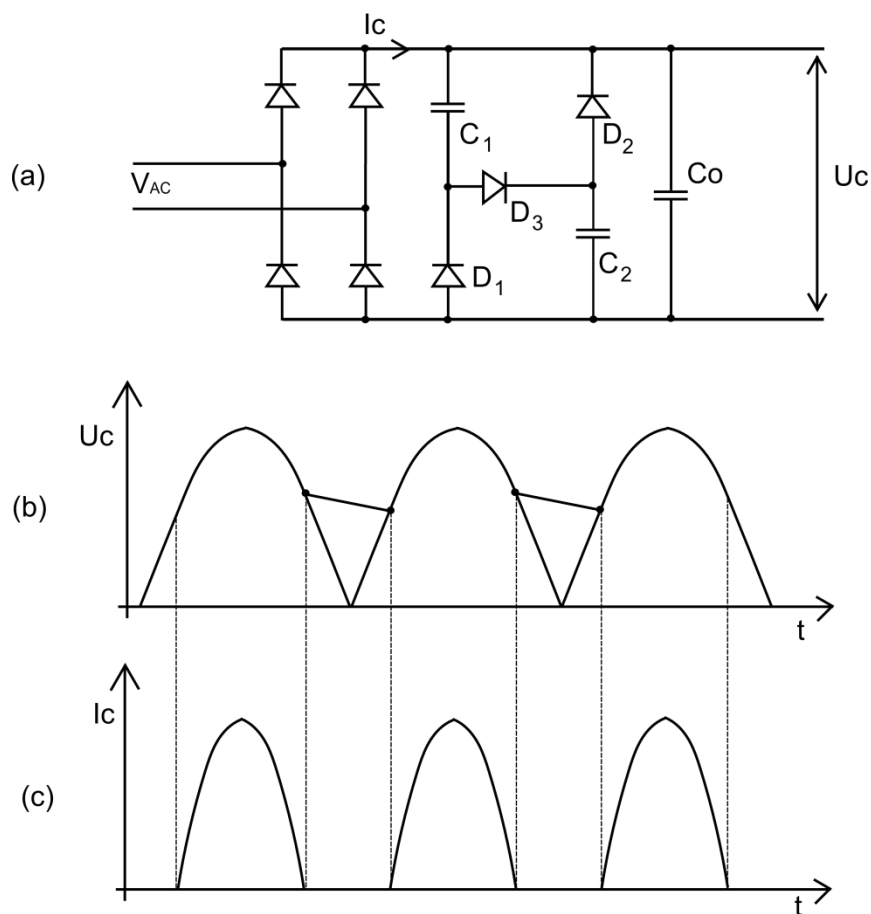


Obr. 1: Můstkový usměrňovač

(a) Schéma zapojení s filtračním kondenzátorem. (b) Výstupní napětí s filtračním kondenzátorem C_0 . (c) Průběh vstupního proudu při nabíjení kondenzátoru C_0 [I]

1.3 Pasivní PFC

První možností je použití kapacitního filtru. Vhodné zapojení tří kondenzátorů a tří diod umístěných za usměrňovačem ovlivní špičky odebíraného proudu (Obr. 2). Nabíjení kondenzátorů C_1 a C_2 probíhá při jejich sériové kombinaci. Sériovou kombinaci v tomto případě zajistí dioda D_3 . Vybíjení kondenzátorů C_1 a C_2 probíhá v jejich paralelní kombinaci způsobenou otevřenými diodami D_1 a D_2 . Obvod lze vybavit prvkem pro omezení maximálního proudu. Jedná se o paralelní kombinaci odporu a indukčnosti. Umístěna je hned za diodou D_3 .

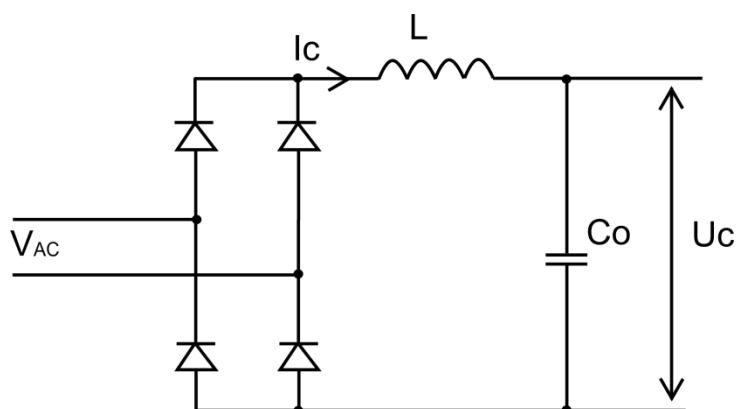


Obr. 2: Překlenující PFC filtr

(a) Schéma zapojení (b) Průběh výstupního napětí na kondenzátoru C_0 . (c) Průběh vstupního proudu při nabíjení kondenzátorů C_1 a C_2 [1]

Výstupní napětí U_c v případě tohoto zapojení velice zvlněno. S tímto zvlněním se musí počítat při návrhu spínaného zdroje. Toto zapojení je vhodné pro světelné zdroje případně pro blokuující měnič s PWM střídou až 100 %.

Další možností pasivního filtru je obvodové zapojení pracující s tlumivkou podle zapojení (Obr. 3). Takové řešení má lepší vlastnosti než zapojení kapacitního filtru. Vložená indukčnost snižuje strmost náběžných hran odebíraného proudu ze sítě. Filtr v ideálním případě může pracovat v nepřerušovaném režimu kdy po celou dobu $\frac{1}{2}$ periody vstupního napětí prochází tlumivkou proud. Tlumivku lze umístit jak do střídavé části, tak do části stejnosměrné. Umístění v části střídavé má značnou nevýhodu. Provozní frekvence tlumivky je v tomto případě 50 Hz. To má za následek rozměry, které nejsou vzhledem k rozměrům celého zdroje zanedbatelné.



Obr. 3: Induktivní PFC filtr [1]

2 ZÁKLADNÍ POJMY

2.1 Power factor (PF)

Termín Power Factor (PF) je převzat z teorie AC obvodů. Když sinusový napájecí AC zdroj napájí induktivní nebo kapacitní zátěž, zatěžovací proud je také sinusový, ale zaostává nebo předchází vstupnímu napětí. Z efektivní hodnoty napětí a proudu lze vypočítat zdánlivý výkon S pomocí následující rovnice (1).[2]

$$U_{ef} = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}} [V] \quad I_{ef} = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}} [I] \quad S = U_{ef} * I_{ef} [VA, V, A] \quad (1)$$

Do výpočtu činného výkonu P (2) je nutné v případě kapacitní nebo induktivní zátěže zahrnout hodnotu úhlu, který nám udává fázový posun mezi napětím a proudem.

$$P = U * I * \cos\varphi [W, V, I, -] \quad (2)$$

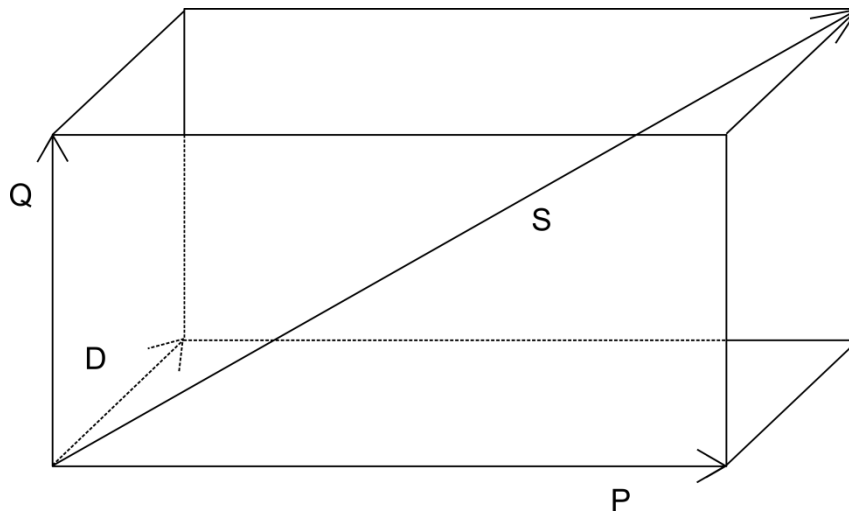
V případě nelineárního systému, kterým spínaný zdroj bezesporu je se musí použít toho deformačního výkonu. Tomuto výkonu se také říká výkon distorzní a značený D (3). Výkon je generován vlivem proudů vyšších harmonických, které generuje měnič.

$$D = m * U \sqrt{\sum_{m=2}^{\infty} I_{(n)}^2} \quad (3)$$

Suma nám udává součet efektivních hodnot proudů vyšších harmonických kde m - počet fází a U - efektivní hodnota harmonického napětí. Můžeme tak definovat, že zdánlivý výkon se skládá z těchto hodnot P , Q a D pomocí vztahu (4).

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (4)$$

Výkon S lze poté vyjádřit pomocí (Obr. 4). Z obrázku je patrné v jakém vztahu jsou jednotlivé výkony.



Obr. 4: Znárodnění vztahu mezi výkony

Hodnotu výkonového faktoru PF lze vypočítat dle vztahu:

$$PF = \frac{P}{S} \quad (5)$$

Z uvedených vztahů lze odvodit vztah:

$$PF = |\cos\varphi| \quad (6)$$

2.2 Total harmonic distortion (THD)

THD vychází z anglického termínu total harmonic distortion, česky celkové harmonické zkreslení. Udává poměr mezi efektivní hodnotou druhé až n-té harmonické napětí nebo proudu k efektivní hodnotě první harmonické. Pro přesnost by bylo nutné uvažovat do výpočtu všechny harmonické. Při výpočtu uvažujeme harmonické od $n = 2$ až do $n = 40$. Do 40 harmonické také uvažuje norma ČSN EN 61000-3-2.[2]

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_n^2}}{U_1}, THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} I_n^2}}{I_1} \quad (7)$$

2.3 Účinník – Power factor correction (PFC)

Účinník je poměr činného výkonu P k výkonu zdánlivému S (8). Hodnota účinníku $\cos\varphi$ je vždy menší nebo rovna 1. To je dáno tím, že činný výkon je vždy menší nebo roven

výkonu zdánlivému. Pokud nastane případ $\cos\varphi = 1$ je činný výkon roven výkonu zdánlivému, což je pro nás nejlepší možný stav. Při této hodnotě dochází k maximální efektivitě přenosu výkonu rozvodnou soustavou.

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{U_{ef} * I_{ef}} \quad (8)$$

Úkolem PFC filtru je vylepšit hodnotu $\cos\varphi$ v ideálním případě na hodnotu 1. V reálném filtru se blížíme k této hodnotě.

Kompenzace účinníku je nutná pro snížení ztrát při přenosu výkonu elektrorozvodnou soustavou. Některá zařízení při svém provozu neodebírají pouze činnou energii, část energie je jalová. Jedná se především o kapacitní nebo induktivní zátěž (motory, zářivky). Způsob kompenzace může být odlišná pro různá zařízení. Je nutné zvolit vhodnou metodu pro danou aplikaci s ohledem na funkci a cenu.

3 HLAVNÍ SOUČÁSTKY POUŽÍVÁNE U APFC FILTRŮ

Mezi hlavní součástky patří výkonové polovodičové součástky. Ty jsou namáhány jak přenosem vysokého výkonu, tak vysokým napětím v propustném i v nepropustném směru.

3.1 Spínací prvky

Mezi hlavní polovodičový prvek patří spínací tranzistor. Tranzistor může být bipolární nebo unipolární v závislosti na potřebném výkonu a spínací frekvenci. Tranzistor je nutné ochránit před napěťovými špičkami. Tyto špičky vznikají při rozpojení spínacího prvku. Dále se využívá tranzistoru jako usměrňovače. V případě nahrazení diodového můstku tranzistoru je možné velice výrazně eliminovat ztráty, které vznikají na vstupním usměrňovači.

3.2 Usměrňovací diody

Vstupní můstek je složený ze čtyř standardních diod. Slouží k usměrnění vstupního napětí tak, aby bylo možné toto napětí dále spínat jedním tranzistorem. Můstek je nutné dimenzovat jak pro provoz při maximálním vstupním napětí, tak pro provoz při nízkém vstupním napětí. K těmto hodnotám napětí je nutné dopočítat maximální proud při maximálním zatížení a na tento proud dimenzovat usměrňovač pomocí rovnice č. (10). Usměrňovač je v případě PFC filtru velice ztrátovou částí.

3.3 Boost dioda

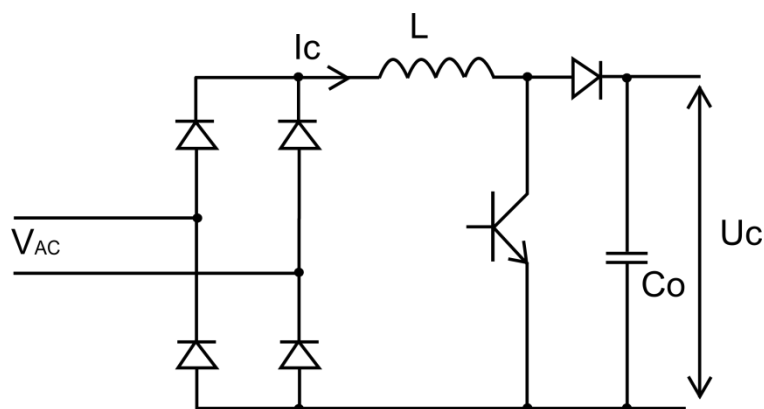
Při výběru boost diody je nutné brát v úvahu spínací frekvenci tranzistoru. Touto diodou lze ovlivnit napěťové namáhání spínacího prvku při přechodu ze sepnutého stavu do stavu rozepnutého. Protože spínací prvek pracuje na frekvenci desítek kHz, je nutné, aby dioda byla dostatečně rychlá. Dnešní rychlé shottkyho diody jsou vyráběny ze SiC (Silicon Carbidu). Výhodou těchto diod je velká rychlost, velké závěrné napětí a vysoká provozní teplota.

4 AKTIVNÍ PFC

Aktivní PFC je ve své podstatě tzv. spínaný zdroj. *Impulsní regulace zajistí stabilizované výstupní napětí i pro velké změny vstupního napětí; účinnost zdroje se přitom téměř nemění. Impulsně regulované zdroje jsou i přes větší obvodovou složitost ekonomicky výhodnější.* [1]. Pro aktivní PFC je možné volit několik různých topologií.

4.1 Boost topologie

Při tomto zapojení dostáváme na výstupu pokaždé vyšší napětí, než je napětí vstupní. Při sepnutí tranzistoru se energie akumuluje v indukčnosti a výstupní proud je dodáván z výstupního kondenzátoru. Při rozepnutí tranzistoru dochází k otočení napětí na indukčnosti a napětí na anodě diody je větší než na katodě. Výstupní kondenzátor se nabíjí na maximální hodnotu napětí, která je součtem vstupního napětí zdroje a napětí na indukčnosti.[1]



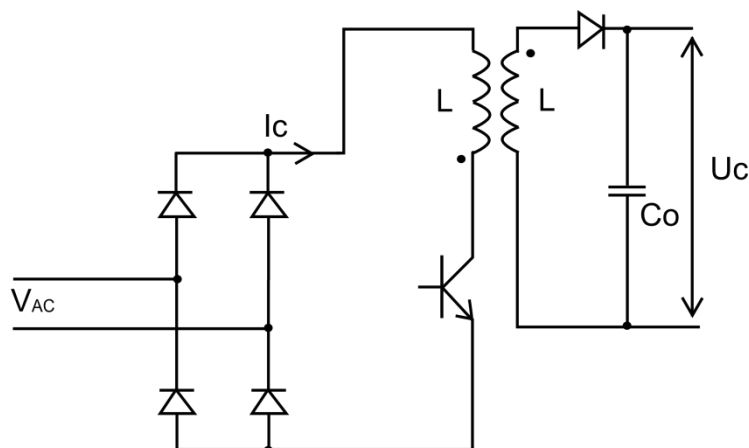
Obr. 5: Boost topologie [1]

Výhody: Jednoduchost zapojení, vysoký výstupní výkon.

Nevýhody: Na výstupu je napětí i při přerušení spínání, výstupní napětí je vždy vyšší.

4.2 Flyback topologie

Jedná se o jednoduchý spínaný zdroj s transformátorem (Obr. 6). Měnič funguje také ve dvou fázích. Při sepnutí tranzistoru se akumuluje energie v transformátoru. Vzhledem k opačnému směru vinutí primární a sekundární strany je na výstupu transformátoru záporné napětí. Po rozpojení tranzistoru dochází k otočení výstupního napětí a otevření výstupní diody, která je součástí výstupního filtru. Tato topologie je vhodná pro nízké výstupní výkony.[1]



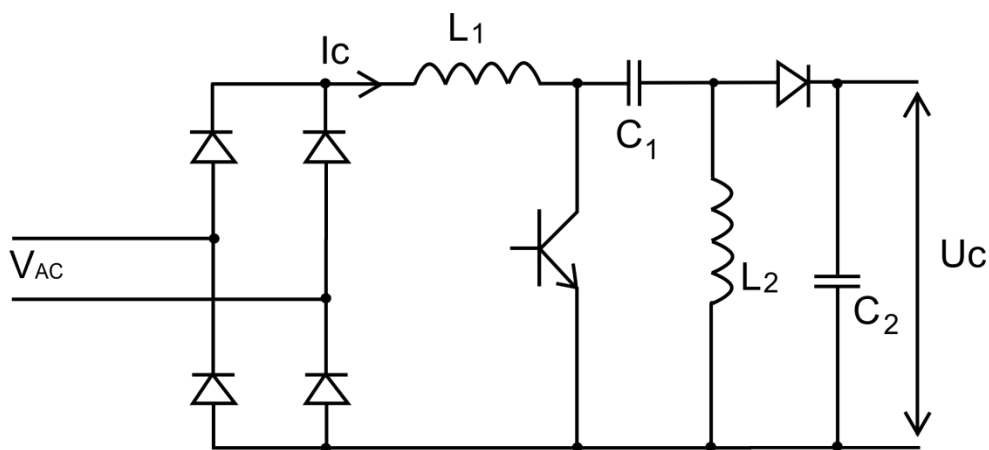
Obr. 6: Flyback topologie [1]

Výhody: Výstupní napětí lze nastavit i na nižší hodnotu než je napájecí napětí

Nevýhody: Nízký výstupní výkon.

4.3 Sepic topologie

Jedná se o méně populární topologii pro PFC filtr. Zapojení vychází z boost topologie, které je dále rozšířena. Výhodou sepic filtru je, že výstupní napětí lze měnit v určitých mezích kolem napájecího napětí. To znamená, že výstupní napětí může být vyšší nebo nižší než je vstupní napětí.[1]



Obr. 7: Sepic topologie [1]

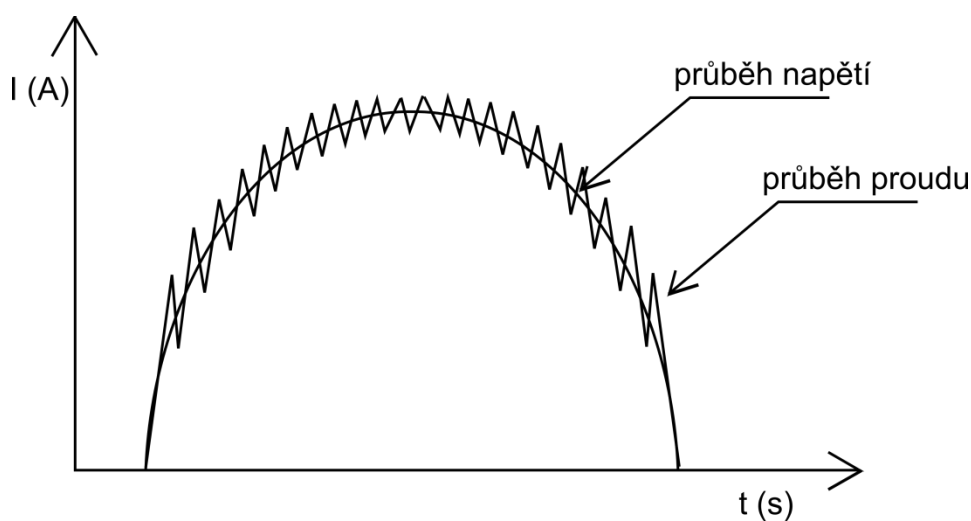
Výhody: Výstupní napětí lze nastavit i na nižší hodnotu než je napájecí napětí

Nevýhody: Více součástek než u boost topologie.

4.4 Režimy spínání

Pro řízení je možné použít několik typů spínání. Mezi tyto režimy patří CCM (Critical Conduction Mode), DCM (Discontinuous Conduction Mode), CrM (Critical Conduction Mode) a FCCRM (Frequency Clamped Critical Conduction Mode). Jednotlivé režimy se odlišují průběhem proudu, ale také frekvencí spínání. Spínací frekvence může být konstantní, ale také proměnlivá v závislosti na průběhu napájecího napětí.

Při použití režimu CCM nedochází při jednom cyklu, který odpovídá $\frac{1}{2}$ periodě, k poklesu procházejícího proudu k nule. Hodnota proudu se udržuje na určité hranici (Obr. 8).

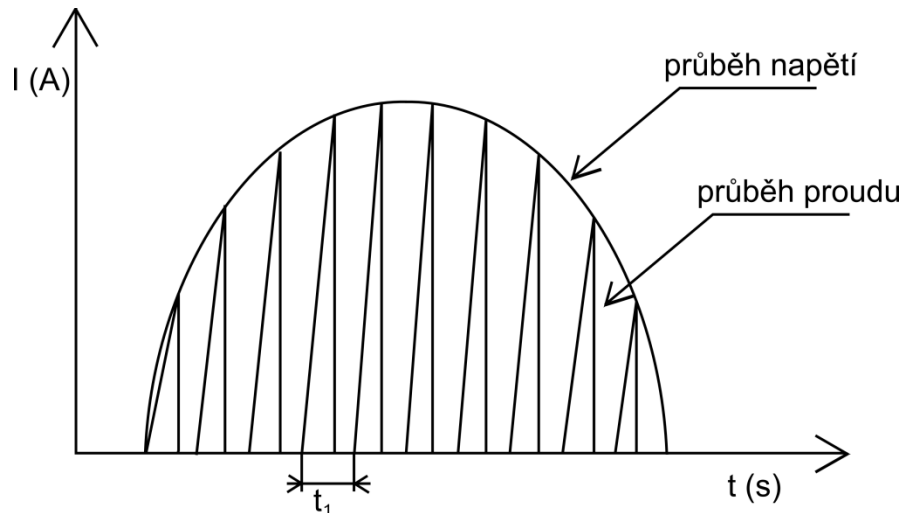


Obr. 8: Průběh proudu v režimu CCM [4]

Vlastnosti:

- Pevná spínací frekvence
- Vysoká hodnota indukčnosti
- Minimalizované proudové špičky

DCM má jako předchozí režim pevně stanovenou spínací frekvenci. Pokud proud překročí maximální hodnotu určenou pro daný filtr, dojde k rozpojení spínacího prvku. Průběh je možné vidět na následujícím obrázku (Obr. 9).

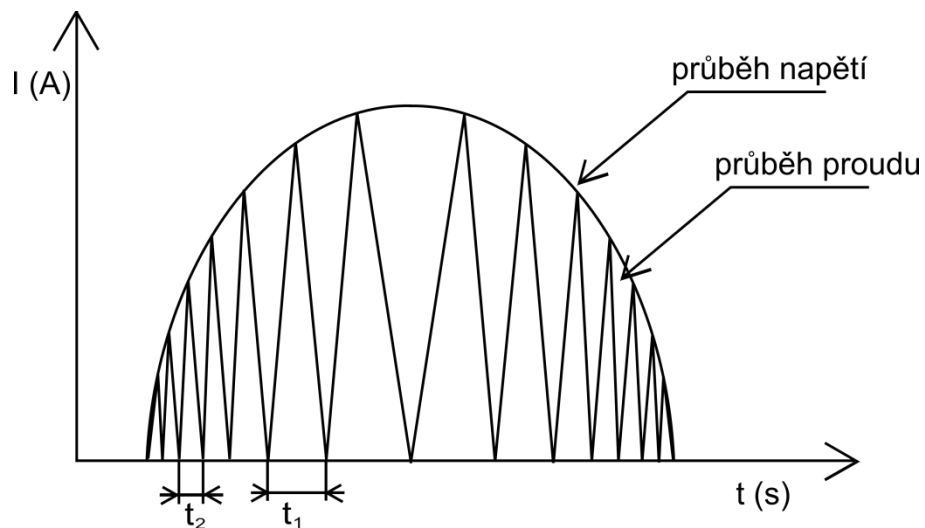


Obr. 9: Průběh proudu v režimu DCM [4]

Vlastnosti:

- Pevná spínací frekvence
- Menší počet závitů na tlumivce
- Vysoké proudové špičky

Režim CrM má od předchozích režimů proměnlivou spínací frekvenci. Spínání nového cyklu probíhá v okamžiku poklesu proudu na nulovou hodnotu. Pokud srovnáme periodu t_1 s periodou t_2 je patrné že dochází k velké změně spínací frekvence (Obr. 10).

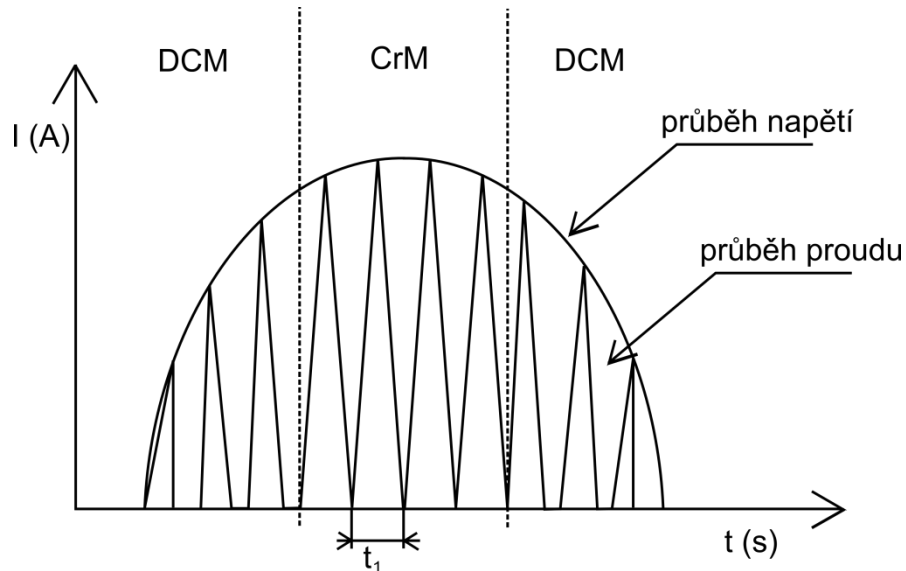


Obr. 10: Průběh proudu v režimu CrM [4]

Vlastnosti:

- Proměnlivá spínací frekvence
- Menší proudové špičky než DCM

Pokud provedeme kombinaci režimu CrM a režimu DCM dostaneme režim FCCrM. Tento režim využívá v první a poslední třetině periody napětí režim DCM. V prostřední třetině dochází k přepnutí filtru na režim CrM.[4]



Obr. 11: Průběh proudu v režimu FCCrM [4]

Vlastnosti:

- Spínací frekvence se pohybuje v menším rozsahu
- Menší počet závitů na tlumivce

5 VÝBĚR OBVODU, VÝPOČTY A NÁVRH DPS

Zadáním této práce bylo navrhnout aktivní PFC filtr pro výkon 150 W pro výstupní napětí 400 V. Dalším hlavním parametrem bylo vstupní napětí, které bylo zadáno v rozsahu 85–265 V. Bylo nutné zvážit požadované vlastnosti a vybrat vhodný obvod na ovládání aktivního prvku.

5.1 Výběr obvodu

Při výběru vhodného obvodu bylo nutné prostudovat vlastnosti jednotlivých řídicích obvodů filtrů (Tab. 1). Na trhu je velký výběr řídicích obvodů od několika výrobců. Rozdíl jednotlivých řídicích obvodů je jak v obvodovém zapojení, tak v provozním režimu. Jelikož bylo úkolem vyrobit filtr pro nízký výkon, byl z mé strany kladen důraz na jednoduchost a kompaktnost celého filtru.

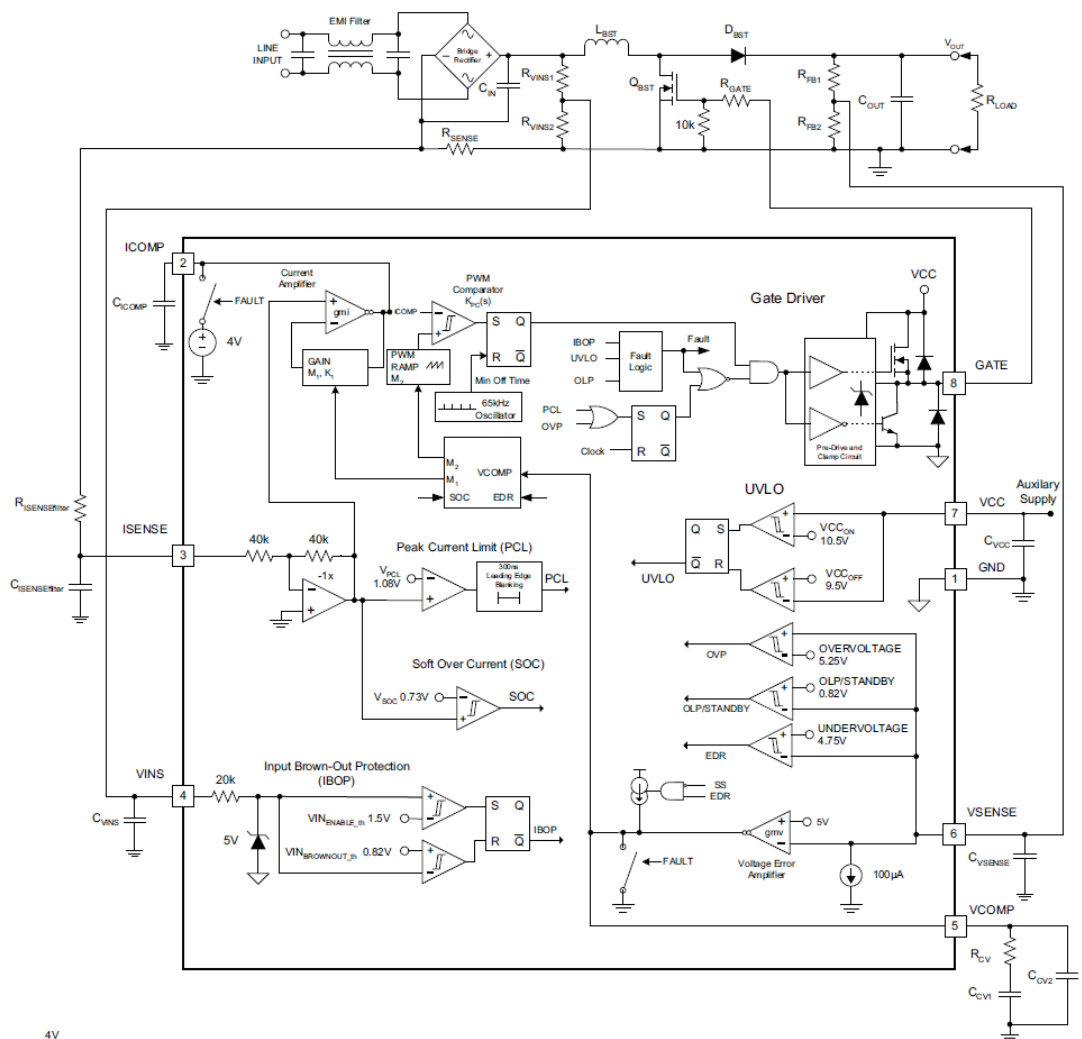
Tab. 1: Vlastnosti vybraných PFC obvodů

Výrobce	ON Semiconductor	Texas Instrument	Analog Devices
Označení	NCP 1650	UCC28019	ADP1047
Frekvence [kHz]	25-250	65	30-400
Duty cycle [%]	5-97	0-97	48,8 -99,8
Standby mode	ANO	ANO	ANO
UCC [V]	11-21 V	11-22 V	3-3,6 V
počet fází	1	1	2
počet pinů	16	8	24
pouzdro	SO-16	8-SOIC	QSOP-24
cena [Kč]	130	75	160

U vybraných obvodů bylo nutné prostudovat všechny vlastnosti a vybrat nejvhodnější obvod. Požadavkem bylo, aby byl filtr typu Boost. Tento požadavek splňují všechny tři vybrané obvody. Všechny z vybraných filtrů se vyrábějí v provedení SMD. Pro takto nízký výkon jsem chtěl použít spínací frekvenci kolem 50 kHz. Dále jsem prostudoval možnost sehnání součástek. Při výběru byla možná dostupnost všech obvodů na zahraničním internetovém portálu za výše uvedené ceny bez poštovného. Po oslovení výrobců jsem dostal od výrobce Texas Instrument 3 kusy UCC28019 zcela zdarma. Jelikož byl obvod svými vlastnostmi vhodný, začal jsem s návrhem a výpočty.

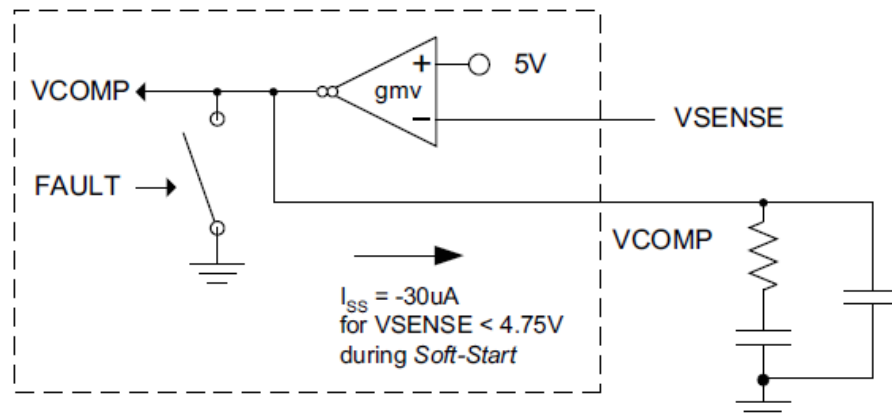
5.2 Popis obvodu

Vybraný obvod UCC28019 je vybaven několika odlišnými bloky. Na následujícím obrázku (Obr. 12) je možné vidět blokové zapojení jednotlivých částí obvodu. Hlavní částí obvodu je PWM komparátor, který generuje pulzy pro spínání na základě dvou informací. Do komparátoru je zavedena jak informace z proudové zpětné vazby, tak informace z napěťové zpětné vazby. PWM signál dále vstupuje do budiče spínacího tranzistoru.[6]



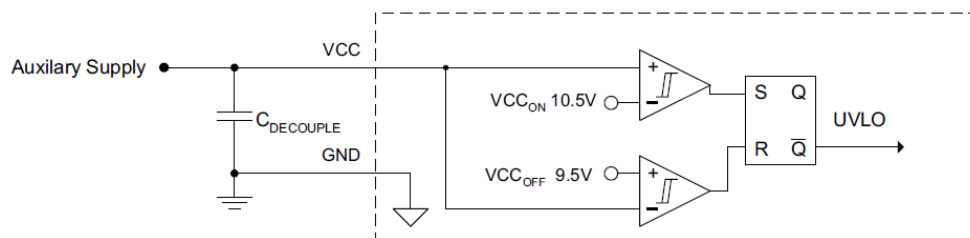
Obr. 12: Zapojení jednotlivých bloků v UCC28019 [6]

Obvod je vybaven několika druhy ochrany. Jako první je obvodové řešení, které se stará o soft start celého zařízení v případě poruchy (Obr. 13).



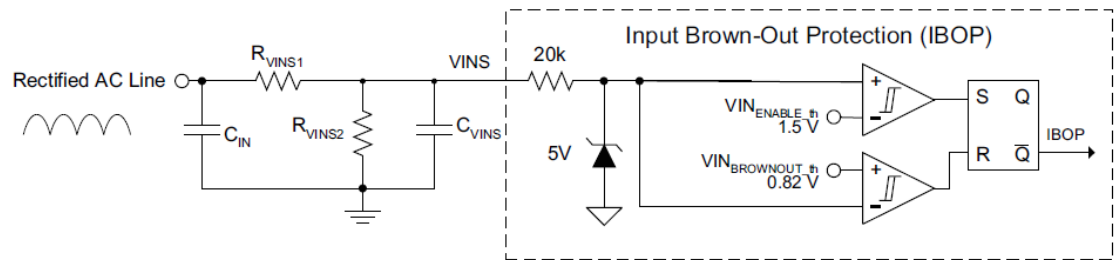
Obr. 13: Zapojení soft start bloku [6]

Pomocí kompenzačního bloku zapojeného na vstupu VCOMP dochází k odběru proudu který je pro hodnotu VSENSE < 4,75 V roven $I_{SS} = 30 \mu\text{A}$. Pomocí tohoto proudu dochází k lineárnímu nárůstu výstupního napětí až k hodnotě 85 % z pracovního napětí. Při dosažení úrovně 85 % dochází k snižování proudu I_{SS} až k 95 % výstupního napětí. Další velice důležitou funkcí je ochrana před podpětím. Obvod je nutné napájet externím zdrojem o doporučeném napětí 12 V. V případě poklesu napájecího napětí je nutné okamžitě odstavit řídicí obvod. Zapojení této ochrany je vidět na obrázku (Obr. 14).



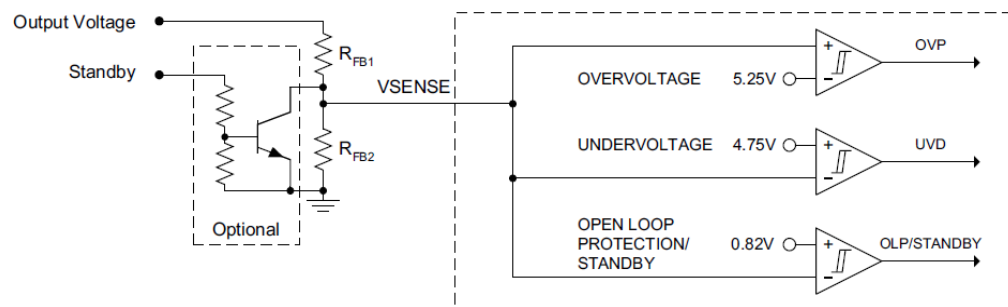
Obr. 14: Zapojení ochrany před podpětím na VCC [6]

Obvod je navržen pro určitý rozsah síťového napájecího napětí je nutné obvodovým řešením (Obr. 15) tyto hodnoty pohlídat. Obvod hlídá velikost napětí za usměrňovačem. Pokud napětí poklesne pod určitou mez, dochází k odstavení obvodu.



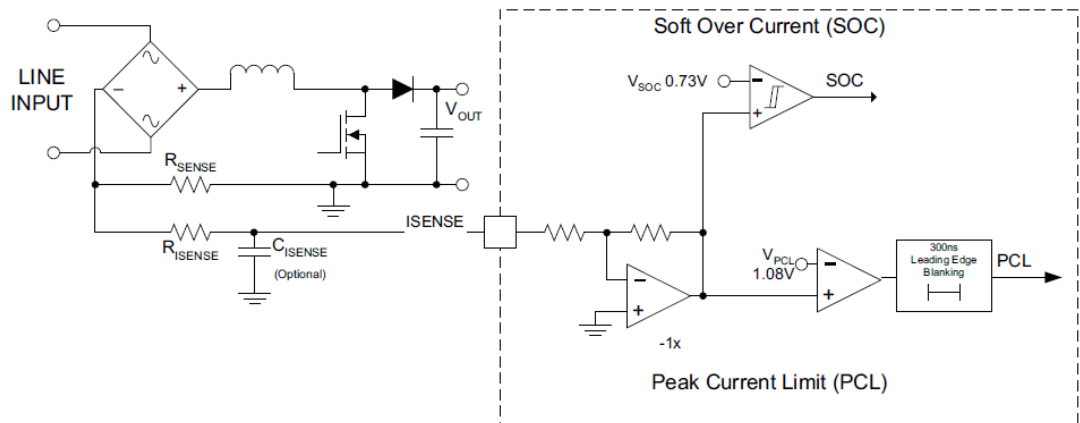
Obr. 15: Zapojení ochrany před nízkým napájecím napětím [6]

Regulací dochází ke kmitání výstupního napětí kolem hodnoty požadované. Pomocí zapojení (Obr. 16). Dochází zde k vyhodnocení překročení výstupního napětí to je signalizováno na pinu OVP. V případě nízkého napětí je tato skutečnost signalizována na pinu UVD. Posledním možným výstupním signálem je OLP/STANDBY signál. Tento signál slouží jako ochrana tranzistoru před zkratem a také jako detekce standby režimu.



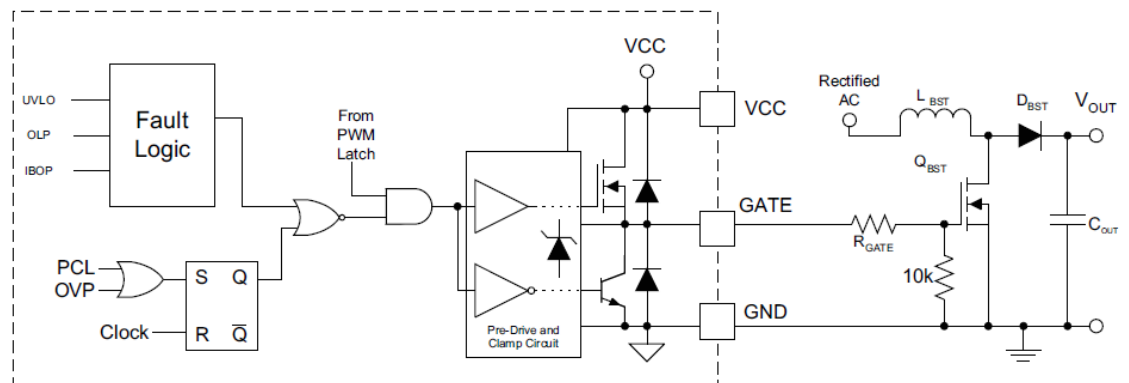
Obr. 16: Zapojení napěťové zpětné vazby [6]

Další zpětnou vazbou, která je v obvodu obsažena, je proudová zpětná vazba (Obr. 17). Pomocí odporu R_{SENSE} dochází k detekci hodnoty proudu. Obvod chrání indukčnost před přesycením, ale také před přetížením výstupu.



Obr. 17: Zapojení proudové zpětné vazby

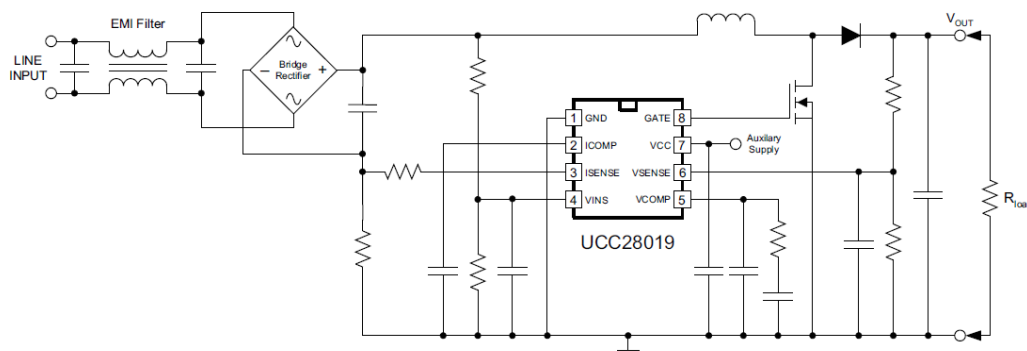
Jako výstup slouží blok pro buzení spínacího prvku (Obr. 18). V tomto bloku jsou také zakončeny chybové signály z jednotlivých ochran. Tyto signály slouží k přímé blokaci PWM signálu. Výstupní budič obsahuje dva budící tranzistory. Druhý tranzistor umístěn tak, aby při sepnutí uzemnil výstupní bránu GATE a tím odvedl náboj z hradla výkonového prvku. Dochází tím k rychlejšímu rozepnutí výkonového prvku.



Obr. 18: Zapojení výstupního budiče [6]

5.3 Výpočty

Pro výpočet součástí a hodnot nutných pro návrh jsem použil výpočty uvedené v dokumentaci. Jelikož byl vybrán obvod UCC28019, obvodové zapojení vycházelo ze schématu uvedeného v katalogovém listu (Obr. 19).[6]



Obr. 19: Základní zapojení PFC filtru UCC28019 [6]

Hodnoty, které bylo nutné spočítat, vycházely z hodnot dle zadání (Tab. 2). Hodnoty V_{in} , V_{out} a P_{out} vycházejí ze zadání. Účinnost byla převzata z dokumentace k obvodu UCC28019.

Tab. 2: Základní specifikace PFC filtru

parametr		min	typ	max	jednotka
V_{in}	střední hodnota vstupního napětí	85		265	V
V_{out}	Výstupní napětí		400		V
P_{out}	výstupní výkon	0	100	150	W
η	Účinnost	0,92			

Po shrnutí požadovaných vlastností a schématu zapojení bylo možné provést výpočty. Jako první byl proveden výpočet maximální hodnoty vstupního a výstupního proudu. ((9) (10)

$$I_{OUT(max)} = \frac{P_{OUT(max)}}{V_{OUT}} = \frac{150W}{400V} = 0,375 \text{ A} \quad (9)$$

Pro výpočet vstupního proudu bylo nutné vzít v úvahu účinnost celého systému a také hodnotu PF, se kterou bude filtr pracovat. Tyto dvě hodnoty byly dosažené z tabulkových hodnot a to $\eta = 0,92$ a $PF = 0,99$.

$$I_{IN_RMS(max)} = \frac{P_{OUT(max)}}{\eta * V_{IN(min)} * PF} = \frac{150W}{0,92 * 85 * 0,99} = 2A \quad (10)$$

Dále bylo potřeba vypočítat maximální hodnotu proudu (11) a průměrnou hodnotu vstupního proudu (12).

$$I_{IN_PEAK(max)} = \sqrt{2} * I_{IN_RMS(max)} = \sqrt{2} * 2 = 2,8A \quad (11)$$

$$I_{IN_AVG(max)} = \frac{2 * I_{IN_PEAK(max)}}{\pi} = \frac{2 * 2,8A}{3,14} = 1,8A \quad (12)$$

Pomocí vstupních proudů lze nyní spočítat výkonovou ztrátu (13) na vstupním usměrňovači, který je součástí PFC filtru.

$$\begin{aligned} P_{BRIDGE} &= 2 * V_{FBRIDGE} * I_{IN_AVG(max)} = 2 * 0,95 * 1,8 \\ &= 3,42W \end{aligned} \quad (13)$$

Další důležitý parametr je hodnota vstupního kondenzátoru (19). Pro jeho výpočet je nutné stanovit zvlnění vstupního proudu I_{RIPPLE} na 20 % a zvlnění vstupního napětí V_{RIPPLE_IN} na 6 %. Obě hodnoty byly uvedeny v dokumentaci jako výchozí. Jako první jsem si spočítal zvlnění vstupního proudu I_{RIPPLE} (14) a napětí $V_{IN_RIPPLE(max)}$ (18).

$$I_{RIPPLE} = \Delta I_{RIPPLE} * I_{IN_PEAK(max)} \quad (14)$$

$$\Delta I_{RIPPLE} = 0,2$$

$$I_{RIPPLE} = 0,2 * 2,8 = 0,56 \cong 0,6A \quad (15)$$

$$\Delta V_{RIPPLE_IN} = 0,06 \quad (16)$$

$$V_{IN_RECTIFIED(min)} = \sqrt{2V_{IN}} = \sqrt{2 * 85} = 120V \quad (17)$$

$$V_{IN_RIPPLE(max)} = \Delta V_{RIPPLE_IN} * V_{IN_RECTIFIED(min)} = 0,06 * 120V = 7,21V \quad (18)$$

$$C_{IN} = \frac{I_{RIPPLE}}{8f_{SW}V_{IN_RIPPLE(max)}} = \frac{0,6A}{8 * 65kHz * 7,21} = 0,16 \mu F \quad (19)$$

Pro správnou funkci filtru je třeba spočítat hodnotu indukčnosti (22). Pro výpočet je třeba spočítat maximální hodnotu proudu indukčností (21).

$$I_{L_PEAK(max)} = I_{IN_PEAK(max)} + \frac{I_{RIPPLE}}{2} \quad (20)$$

$$I_{L_PEAK(max)} = 2,8A + \frac{0,6}{2} = 3,1 A \quad (21)$$

$$L_{BST(min)} \geq \frac{V_{OUT} * D(1 - D)}{f_{SW(typ)} * I_{RIPPLE}} = \frac{400 * 0,5 * (1 - 0,5)}{65kHz * 0,6 A} = 2,56 mH \quad (22)$$

$$DUTY_{(max)} = \frac{V_{OUT} - V_{IN_RECTIFIED(min)}}{V_{OUT}} = \frac{400 V - 120 V}{400} = 0,7 \quad (23)$$

Výpočet výkonových ztrát na rychlé shotkyho diodě byl vypočítán dle rovnice (25). Bohužel se mi nepodařilo sehnat v katalogovém listu diody hodnotu Q_{RR} , proto jsem za hodnotu dosadil 0 nC stejně jako při vzorovém výpočtu výrobce Texas Instrumen.

$$P_{DIODE} = V_{F_125C} * I_{OUT(max)} + 0,5 * f_{SW(typ)} * V_{OUT} * Q_{RR} \quad (24)$$

$$V_{F_125C} = 1,5 V$$

$$Q_{RR} = 0 nC$$

$$P_{DIODE} = 1,5 V * 0,375 A + 0,5 * 65 kHz * 0 nC = 0,56 W \quad (25)$$

Výpočet tranzistoru byl závislý na hodnotách vybraného tranzistoru. Byl vybrán tranzistor IRG4PC40W. Pro výpočet výkonových ztrát bylo nutné vyhledat v dokumentaci jeho parametry. Mezi důležité hodnoty patří $R_{DSon(125c)}$, t_r a C_{OSS} . Výsledné ztráty jsou součtem ztrát vzniklých na přechodu (27) a ztrátami spínacími (28).

$$R_{DSon(125c)} = 0,1 \Omega$$

$$I_{DS_RMS} = \frac{P_{OUT(max)}}{V_{IN_RECTIFIED(min)}} \sqrt{2 - \frac{16 * V_{IN_RECTIFIED(min)}}{3 * \pi * V_{OUT}}} \quad (26)$$

$$= 1,523 A$$

$$P_{COND} = I_{DS_RMS}^2 * R_{DSon(125c)} = 0,232 W \quad (27)$$

$$t_r = 22 ns$$

$$C_{OSS} = 140 pF$$

$$P_{SW} = f_{SW(typ)} * (t_r * V_{OUT} * I_{IN_PEAK(max)} + 0,5 * C_{OSS} * V_{OUT}^2)$$

$$P_{SW} = 65 kHz * (4,5 ns * 400 V * 2,8 A + 0,5 * 140 pF * 400 V^2) \quad (28)$$

$$= 4,148 W$$

$$P_{FET} = P_{COND} + P_{SW} = 0,232 W + 4,148 W = 4,380 W \quad (29)$$

Hodnota odporu sloužícího jako proudová zpětná vazba se spočítá pomocí rovnice (30). Pro správný výběr odporu pak bylo nutné dopočítat ztráty, které na odporu mohou vzniknout dle rovnice (31).

$$R_{SENSE} = \frac{V_{SOC}}{I_{L_PEA(max)} * 1,25} = \frac{0,66}{3,1 A * 1,25} = 0,17 \Omega \quad (30)$$

$$P_{RSENSE} = I_{IN_RMS(max)}^2 * R_{SENSE} = (2 A)^2 * 0,2 \Omega = 0,8 W \quad (31)$$

Maximální špičkovou hodnotu proudu odporem spočítáme pomocí Ohmova zákona (32), kde napětí V_{PCL} je 1,15V .

$$I_{PCL} = \frac{V_{PCL}}{R_{SENSE}} = \frac{1,15 V}{0,2 \Omega} = 5,75 A \quad (32)$$

Pro ochranu vstupu ISENSE je doporučeno použít odpor $R_{ISENSE} = 220 \Omega$ a kondenzátor $C_{ISENSE} = 1000 \text{ pF}$

Výstupní kondenzátor je nutné dimenzovat dle požadavků zdroje, který bude za PFC filtrem zapojen (33). Minimální hodnota výstupního napětí byla stanovena na 300 V.

$$\begin{aligned} C_{OUT(min)} &\geq \frac{2 * P_{OUT} * t_{HOLDUP}}{V_{OUT}^2 - V_{OUT_HOLDUP(min)}^2} \\ &= \frac{2 * 150 W * 21,28 ms}{400 V^2 - 300 V^2} = 90 \mu F \end{aligned} \quad (33)$$

Po výpočtu hodnoty výstupního kondenzátoru je možné spočítat hodnotu zvlnění výstupního napětí (34).

$$\begin{aligned} V_{OUT_RIPPLE(pp)} &< 0,05 V_{OUT} < 0,05 * 400 V < 20 V \\ V_{OUT_RIPPLE(pp)} &= \frac{I_{OUT}}{\pi(2 * f_{LINE(min)} * C_{OUT})} \\ &= \frac{0,375}{\pi * (2 * 50 Hz) * 100 \mu F} = 12,699 V \end{aligned} \quad (34)$$

Pro přesné nastavení výstupního napětí bylo potřeba upravit výstupní dělič našim požadavkům. Doporučená hodnota odporu R_{FB1} je 1 M Ω , hodnotu R_{FB2} je třeba spočítat (35).

$$R_{FB2} = \frac{V_{REF} * R_{FB1}}{V_{OUT} - V_{REF}} = \frac{5V * 1 M\Omega}{400 V - 5 V} = 12,709 k\Omega \quad (35)$$

Ochrana výstupního napětí je nastavena při překročení nominálního napětí o $\pm 5\%$, v našem případě je tato hodnota 410,7 V a 371,6 V dle (36).

$$\begin{aligned} V_{OUT(OVP)} &= V_{SENSE_{OVP}} * \left(\frac{R_{FB1} + R_{FB2}}{R_{FB2}} \right) \\ &= 5,25 V * \left(\frac{1 M\Omega + 13 k\Omega}{13 k\Omega} \right) = 410,7 V \\ V_{OUT(UVD)} &= V_{SENSE_{UVD}} * \left(\frac{R_{FB1} + R_{FB2}}{R_{FB2}} \right) \\ &= 4,75 V * \left(\frac{1 M\Omega + 13 k\Omega}{13 k\Omega} \right) = 371,6 V \end{aligned} \quad (36)$$

Další hodnoty součástek, které bylo potřeba spočítat, byly hodnoty odporového děliče, který slouží k detekci vstupního napětí (37). Pro správnou funkci bylo nutné stanovit hodnotu napětí, při kterém dojde k odpojení PFC filtru. Filtr se vypne při hodnotě $V_{AC(off)} = 65V$ a znovu se zapne při hodnotě $V_{AC(on)} = 75V$. Doporučená hodnota proudu přes dělič je $I_{VINS} = 15 \mu A$

$$\begin{aligned} R_{VINS1} &= \frac{\sqrt{2} * V_{AC(on)} - V_{F_BRIDGE} - V_{INS_ENABLE_th(max)}}{I_{VINS}} \\ &= 6,9 M\Omega \\ R_{VINS2} &= \frac{V_{INS_ENABLE_th(max)} * R_{VINS1}}{\sqrt{2} * V_{AC(on)} - V_{INS_ENABLE_th(max)} - V_{F_BRIDGE}} \\ &= 100 k\Omega \end{aligned} \quad (37)$$

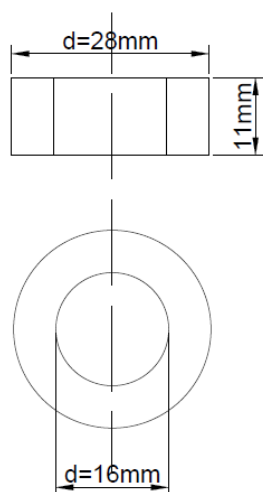
Vypočítané hodnoty součástek bylo nutné zařadit do řad a vybrat hodnotou nejbližší součástku v řadě. Hodnoty pro napěťovou zpětnou vazbu jsem byl nucen doplnit precizním potenciometrem. Výstupní napětí se lišilo od požadovaného vlivem výběru hodnoty odporu z výrobní řady.

5.4 Tlumivka

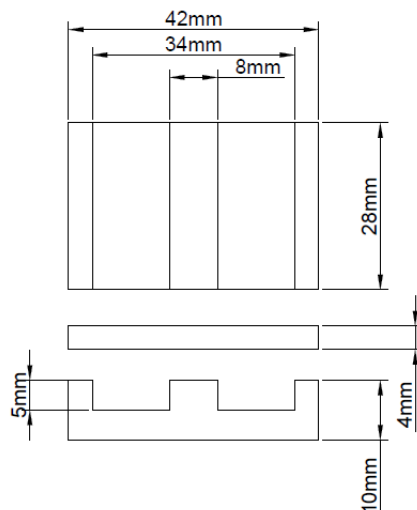
Pro filtr jsem se rozhodl použít dva druhy tlumivek. První volbou byla tlumivka navinuta na standardním toroidním jádře (Obr. 20). Pro druhou tlumivku jsem se rozhodl použít planární technologii. V obou případech jsem chtěl přibližně dodržet vypočítanou hodnotu $L = 2,56$ mH.

Jako toroidní tlumivka byla použita tlumivka z počítačového zdroje použitá také v části PFC. Tlumivka byla navinuta pomocí měděného lakovaného vodiče o průměru 0,8 mm. Odhad počtu závitů pro požadovanou indukčnost byl kolem 200 závitů. Při samotné výrobě byla požadovaná indukčnost při 150 závitěch. Hodnota konečné tlumivky byla $L = 2,49$ mH.

Další tlumivka byla pokusně navinuta (vyleptána) pomocí tří vrstev plošného spoje, každý se 6 závitů. Celkově tedy 18 závitů na jádře typu EI (Obr. 21). Tloušťka cest byla volena dle potřebného výkonu 1 mm. Hodnota vyrobené tlumivky byla $L = 2,60$ mH. Bohužel tato tlumivka nepřinesla uspokojivé výsledky. Byla při výkonu 50 W přesycena a docházelo k rapidním ztrátám na jádře. [5]



Obr. 20: Toroidní jádro tlumivky



Obr. 21: Jádru EI tlumivky

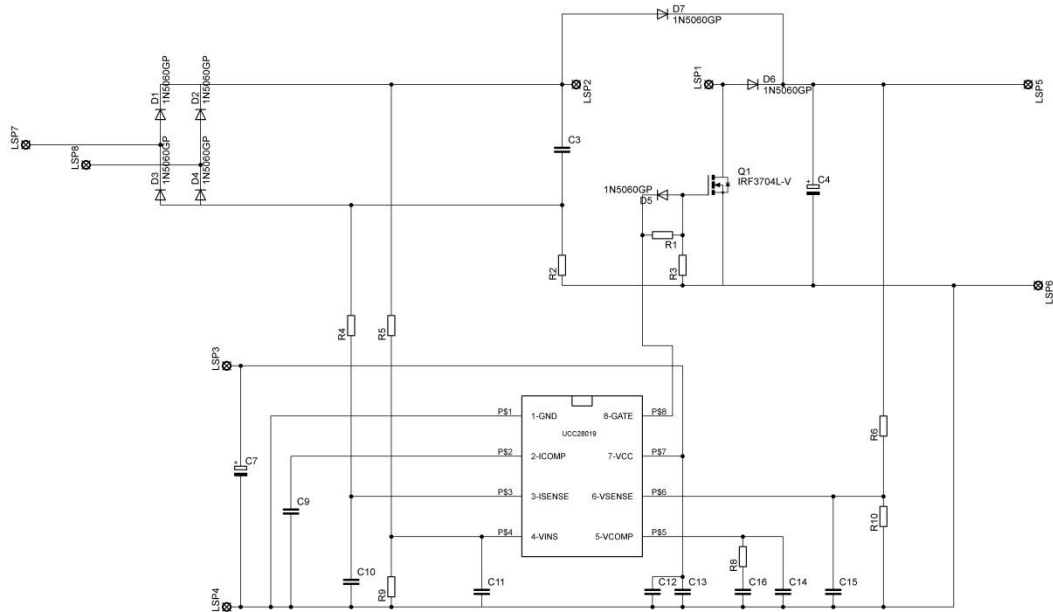
Další možností bylo pokusit se pomocí malé mezery na jádře upravit charakteristiku jádra tak, aby nedocházelo k přesycování. Vlivem mezery bylo potřeba navýšit počet závitů, aby byla dodržena indukčnost. Bylo nutné vytvořit planární tlumivku o 42 závitech. Při dodržení 6 závitů na vrstvu bylo nutné rapidně zmenšit tloušťku plošného spoje. Místo pro vinutí bylo vysoké pouhých 5 mm, a tak byl zvolen plošný spoj o tloušťce 0,2 mm. Tloušťka cest byla zachována. Hodnota indukčnosti takovéto tlumivky byla 2,39 mH

Vhodnost jednotlivých tlumivek je popsána v kapitole 5.6 Měření.

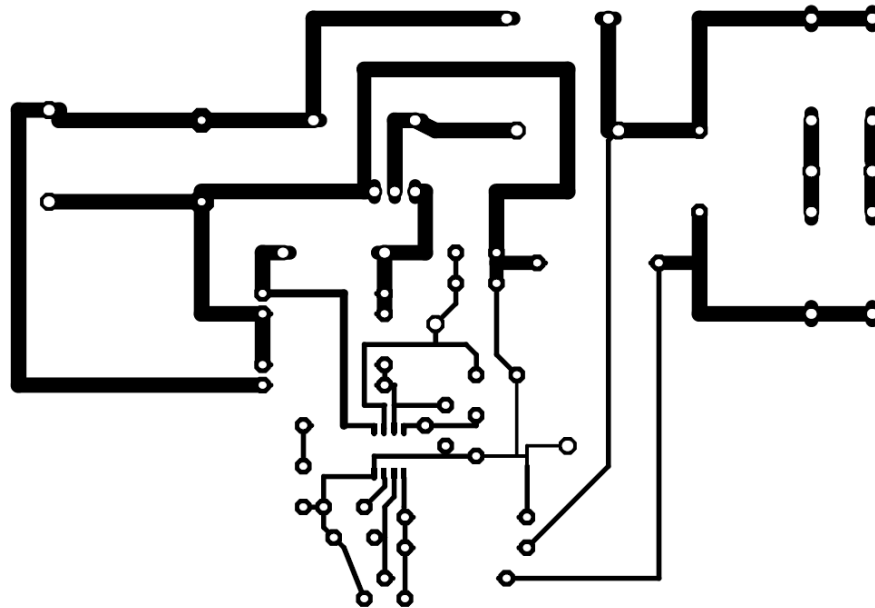
5.5 Návrh DPS

Po vypočítání všech hodnot, které hrály důležitou roli při výběru součástek, bylo možné začít s návrhem. Po vytvoření schématu zapojení (Obr. 22) mohl začít návrh desky plošného spoje (Obr. 23). Pro začátek měření bylo nutné provést návrh plošného spoje, který by bylo možné vyrobit i v domácím prostředí. Při návrhu jsem dbal na to, aby bylo možné při měření jednoduše připojit měřicí sondy. Důležitá také byla, v případě potřeby, možnost výměny součástek. Volba THT součástek byla z toho samého důvodu.

Vzhledem k velikosti desky bylo možné provést výrobu v domácích podmínkách. Výroba byla provedena pomocí nažehlení tonerového prachu. Následovalo odleptání v roztoku chloridu železitého. Stejný postup byl proveden při výrobě planární tlumivky.

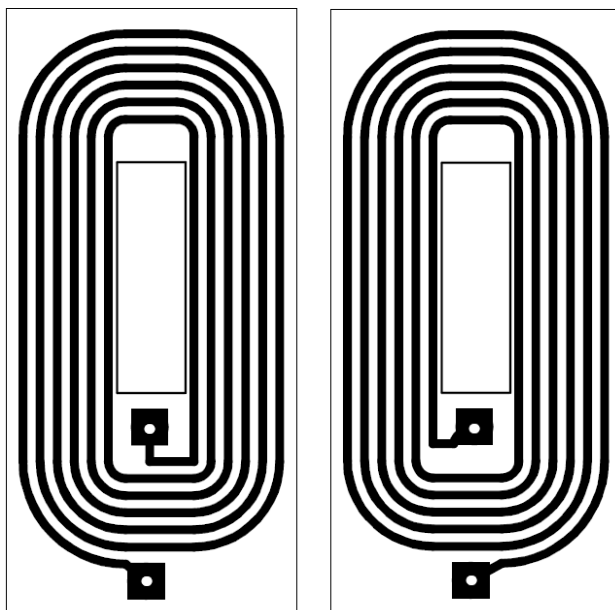


Obr. 22: Schéma zapojení PFC filtru



Obr. 23: Deska plošného spoje

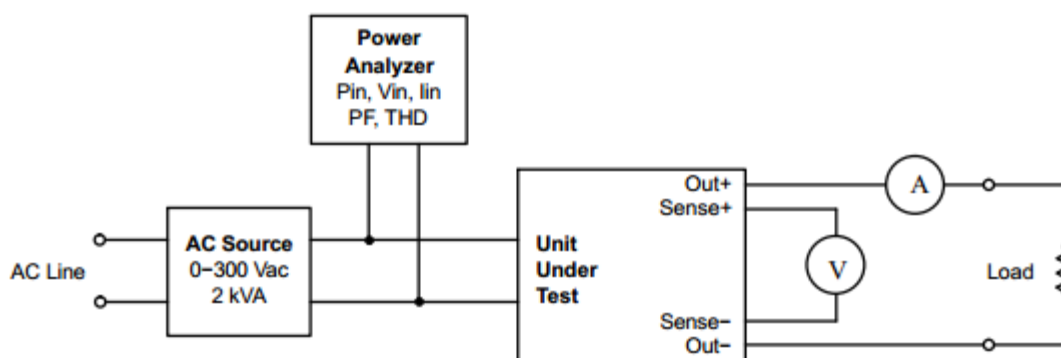
Jelikož jsem se rozhodl provést měření i na planární tlumivce, bylo nutné provést také návrh této desky. Při návrhu tlumivky nebylo jisté, kolik bude potřeba závitů pro výslednou indukčnost 2,57 mH. Závity jsem dimenzoval na proud při napájecím napětí 230 V. Navrhl jsem dva motivy. Jeden motiv (Obr. 24 levý) a druhý motiv (Obr. 24 pravý). Při skládání těchto motivů ve vhodném pořadí jednotlivých dílů bylo možné přidávat další vrstvy. Propojení mezi deskami bylo provedeno pomocí pájky.



Obr. 24: Motiv plošného spoje určený pro planární tlumivku

5.6 Měření

Měření bylo prováděno pomocí síťového analyzátoru HIOKI 3196. Toto zařízení slouží ke kompletní analýze odebíraného proudu, výkonu, jednotlivých harmonických složek odebíraného proudu, povahy odebíraného výkonu, PFC faktoru a dalších veličin. Výstupní napětí bylo před měřením nutné doladit potenciometrem umístěným ve zpětnovazebním děliči tak aby byla hodnota výstupního napětí 400 V. Měření bylo provedeno pomocí zapojení (Obr. 25).



Obr. 25: Zapojení síťového analyzátoru při měření [4]

Měření jsem prováděl při třech různých vstupních napětích 85 V, 150 V a 230 V. Při těchto hodnotách napájecího napětí jsem provedl měření se zátěží 20 W, 50 W, 75 W, 100 W, 125 W a 150 W. Odečtené hodnoty byly zaznamenány do připravených tabulek. Tento postup

měření jsem provedl pro jednotlivé, mnou vyrobené, tlumivky. Vzhledem k tloušťce vinutí u planární tlumivky nebylo možné měření při nízkém napětí dokončit. V případě planární tlumivky bez vzduchové mezery nebylo měření provedeno pro napětí 85 V a 150 V.

Vždy, když byla zátěž 100 W, byla provedena detailní analýza. Tato analýza spočívala v tom, že analyzátor měřil všechny proměnné po dobu 5 minut a tyto hodnoty ukládal na paměťovou kartu. Ve výsledných datech lze dohledat průběhy napětí proudu, ale také procentuální zastoupení jednotlivých harmonických. Jako zátěž byla použita odporová zátěž, složená ze dvou výkonových odporů.

První měření probíhalo na tlumivce navinuté na toroidním jádře. Výhodou této tlumivky byla tloušťka použitého vodiče a tím i možnost provést dlouhodobé měření při nízkém napájecím napětí. V případě nízkého napájecího napětí nebylo možné dostat do zátěže větší výkon než 85 W. Vlivem proudové ochrany byl omezen výstupní výkon. Filtr dosáhl největší účinnosti při napájecím napětí 230 V. Toto chování bylo očekáváno a je způsobeno menším proudem odebíraným ze sítě. Nižší proud pak způsobil menší výkonové ztráty na všech prvcích. Účinnost byla změřena mezi hodnotami 94 až 95 % (Tab. 5). Nejhorší výsledky byly změřeny při napájecím napětí 85 V (Tab. 3). Účinnost při maximální možné zátěži 84 W byla 80 %. Jelikož se jedná o hodnotu napětí, která by v elektrorozvodné soustavě neměla nastat, je hodnota účinnosti dostačující. Při nastavení napájecího napětí na hodnotu 150 V byly výsledky mezi 86 až 94 %. Hodnota PFC byla při nižších napětích lepší, a to od 0,956 až do 0,9957. Nejlepší hodnota byla naměřena při napájecím napětí 85 V a zátěži 69 W. V případě napájení ze sítě se hodnota PF pohybovala mezi hodnotami 0,87 až 0,9309.

Tab. 3: Toroidní jádro, změřené hodnoty při $U_{in}=85$ V

Analyzátor sítě					Výstup			
Vstupní výkon	U1	I1	P1	PF1	U	I	P	účinnost
W	V	A	kW	-	V	A	W	%
20	84,35	0,2401	0,0201	0,9909	395,92	0,05	17,86	88,84
50	83,84	0,6012	0,0502	0,9949	395	0,12	46,02	91,67
75	83,51	0,9037	0,0751	0,9957	396	0,18	69,34	92,33
100	83,98	1,2488	0,1005	0,9582	396	0,21	83,16	82,75
106	83,68	1,3357	0,1069	0,956	384	0,22	84,48	79,03

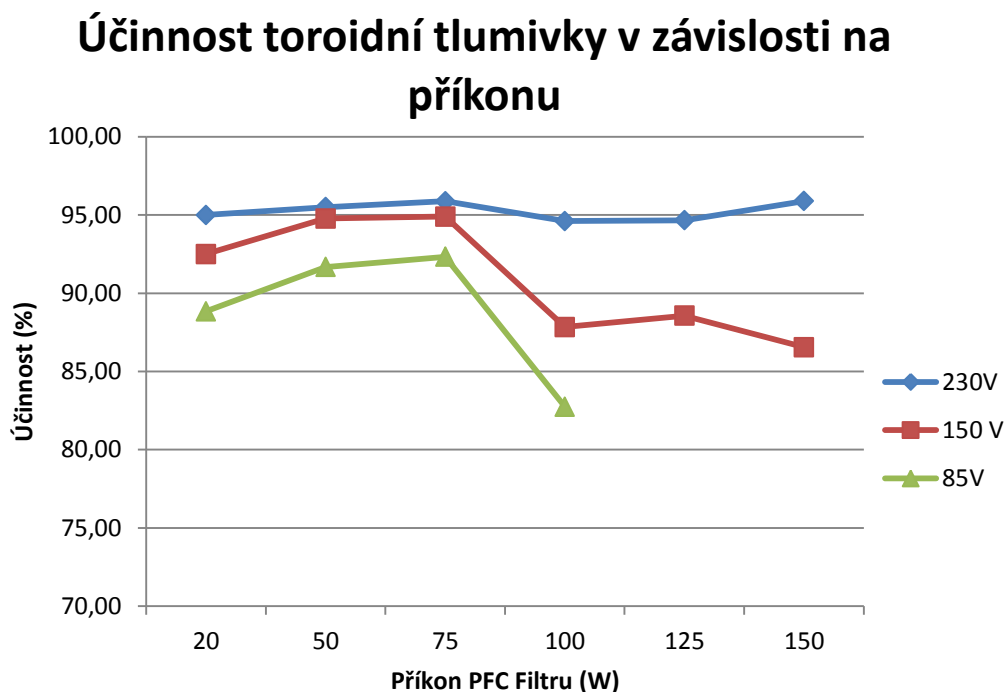
Tab. 4: Toroidní jádro, změřené hodnoty při $U_{in}=150\text{ V}$

Analyzátor sítě					Výstup			
Vstupní výkon	U1	I1	P1	PF1	U	I	P	účinnost
W	V	A	kW	-	V	A	W	%
20	151,12	0,1428	0,0208	0,9619	395,9	0,05	19,24	92,50
50	150,75	0,3361	0,0501	0,9885	395	0,12	47,48	94,77
75	150,04	0,5018	0,0746	0,991	392	0,18	70,80	94,90
100	149,83	0,6952	0,1016	0,9755	388	0,23	89,24	87,83
125	149,22	0,8574	0,1252	0,9788	396	0,28	110,88	88,56
150	148,94	1,0405	0,1506	0,9716	395	0,33	130,35	86,55

Tab. 5: Toroidní jádro, změřené hodnoty při $U_{in}=230\text{ V}$

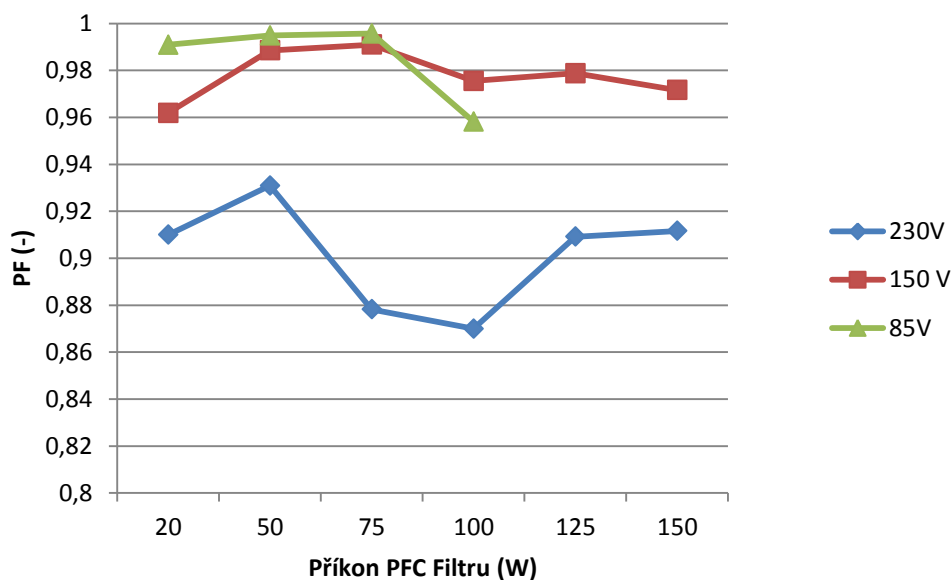
Analyzátor sítě					Výstup			
Vstupní výkon	U1	I1	P1	PF1	U	I	P	účinnost
W	V	A	kW	-	V	A	W	%
20	224,18	0,0979	0,02	0,91	400	0,05	19,00	95,00
50	224,41	0,2435	0,0509	0,9309	392	0,12	48,61	95,50
75	224,05	0,381	0,075	0,8782	391	0,18	71,90	95,87
100	224,82	0,5125	0,1002	0,87	395	0,24	94,80	94,61
125	224,19	0,615	0,1255	0,9092	396	0,30	118,80	94,66
150	223,74	0,7346	0,1498	0,9116	399	0,36	143,64	95,89

Naměřené hodnoty můžeme porovnat v následujících grafech. Na (Obr. 26) je názorně vidět pokles účinnosti při poklesu napájecího napětí. Průběh PF pro jednotlivá napájecí napětí je znázorněn v (Obr. 27). V posledním grafu (Obr. 28) nalezneme zkreslení proudu pro jednotlivá napájecí napětí.



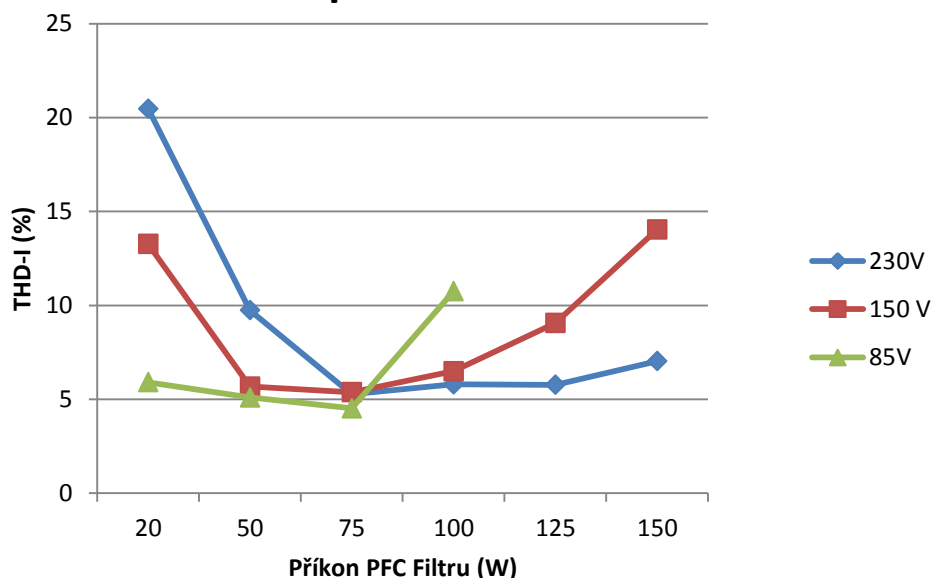
Obr. 26: Účinnost toroidní tlumivky v závislosti na příkonu

PF toroidní tlumivky v závislosti na příkonu



Obr. 27: PF toroidní tlumivky v závislosti na příkonu

THD-I toroidní tlumivky v závislosti na příkonu



Obr. 28: THD-I toroidní tlumivky v závislosti na příkonu

Další tlumivka byla první verze planární tlumivky. Tlumivka měla 18 závitů umístěných na 3 deskách plošného spoje. Měření jsem začal na napájecím napětí 230V. Při zvyšování zátěže začala při hodnotě 64 W klesat účinnost. Kontrolou byl zjištěn značný nárůst teploty samotného jádra. Při zátěži 78,4 W bylo nutné měření ukončit kvůli nárůstu teploty. Účinnost byla při největší zátěži 78 %. Hodnota PF se pohybovala mezi hodnotami 0,8825 až 0,9062.

Tab. 6: Planární tlumivka 18 závitů, změřené hodnoty při $U_{in}=230\text{ V}$

Vstupní výkon W	Analyzátor sítě				Výstup			
	U1 V	I1 A	P1 kW	PF1 -	U V	I A	P W	účinnost %
20	232,31	0,095	0,02	0,9062	392	0,05	18,03	90,16
50	231,35	0,2459	0,05	0,8784	391	0,12	45,86	91,73
75	231,44	0,3474	0,0731	0,8447	393	0,16	64,65	88,44
100	230,72	0,4935	0,1005	0,8825	392	0,20	78,40	78,01

Vzhledem k neuspokojivým výsledkům bylo nutné připravit novou verzi planární tlumivky. Nová verze byla vybavena 42 závity a opatřena vzduchovou mezerou. Novou tlumivku bylo možné proměřit v celém rozsahu napájecího napětí (Tab. 7) Malé omezení bylo v případě nižšího napájecího napětí při maximálním příkonu celého zařízení. Při napájecím

napětí 150 V bylo měření přerušeno při 125 W a v případě napájecího napětí 85 V bylo měření přerušeno při příkonu 100 W.

Tab. 7: Planární tlumivka 42 závitů, změřené hodnoty při $U_{in}=85 V$

Analyzátor sítě					Výstup			
Vstupní výkon	U1	I1	P1	PF1	U	I	P	účinnost
W	V	A	kW	-	V	A	W	%
20	84,5	0,2414	0,0202	0,991	392	0,04	17,59	87,07
50	84,25	0,6	0,0503	0,9953	385	0,11	43,16	85,80
75	83,48	0,9043	0,0752	0,9965	386	0,16	61,52	81,81
100	83,87	1,2816	0,1022	0,9506	381	0,17	64,77	63,38

Tab. 8: Planární tlumivka 42 závitů, změřené hodnoty při $U_{in}=150 V$

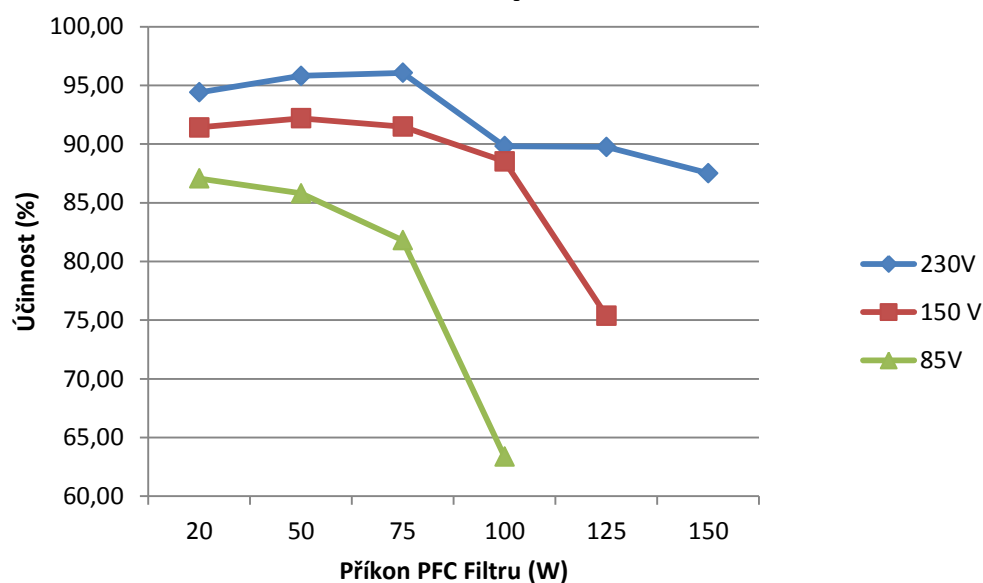
Analyzátor sítě					Výstup			
Vstupní výkon	U1	I1	P1	PF1	U	I	P	účinnost
W	V	A	kW	-	V	A	W	%
20	150,86	0,1367	0,0199	0,9674	387	0,05	18,19	91,43
50	150,23	0,3368	0,05	0,9888	386	0,12	46,10	92,20
75	150,11	0,5056	0,0752	0,9912	385	0,18	68,80	91,49
100	149,64	0,6747	0,1002	0,9926	386	0,23	88,71	88,53
125	149,51	0,8718	0,1279	0,9809	386	0,25	96,43	75,39

Tab. 9: Planární tlumivka 42 závitů, změřené hodnoty při $U_{in}=230 V$

Analyzátor sítě					Výstup			
Vstupní výkon	U1	I1	P1	PF1	U	I	P	účinnost
W	V	A	kW	-	V	A	W	%
20	223,02	0,1019	0,0207	0,9133	392	0,05	19,54	94,40
50	222,73	0,2365	0,0501	0,9506	393	0,12	48,00	95,81
75	222,72	0,3707	0,0753	0,915	392	0,18	72,34	96,07
100	223,03	0,4975	0,1004	0,905	392	0,23	90,18	89,82
125	223,52	0,5938	0,1244	0,9372	385	0,29	111,65	89,75
150	223,03	0,7139	0,1463	0,9192	388	0,33	128,04	87,52

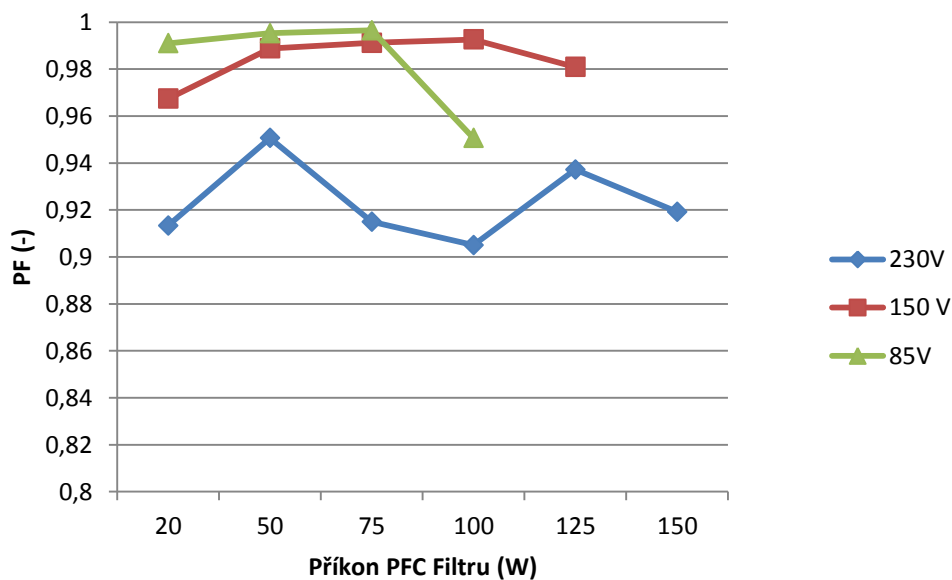
Účinnost se pohybovala v rozsahu 60 – 96 %. Pokud bychom se zaměřily výsledky změřené při napětí 230 V (Tab. 9) jsou naměřené hodnoty do příkonu 75 W velice uspokojivé. Hodnoty účinnosti se ohybují mezi 94 – 96 %. Při stoupající zátěži začala účinnost klesat vlivem ohmických ztrát na vinutí tlumivky. Pro porovnání naměřených hodnot jsem připravil stejné grafy jako v případě tlumivky toroidní. (Obr. 29),(Obr. 30),(Obr. 31).

Účinnost planární tlumivky 42 závitů v závislosti na příkonu



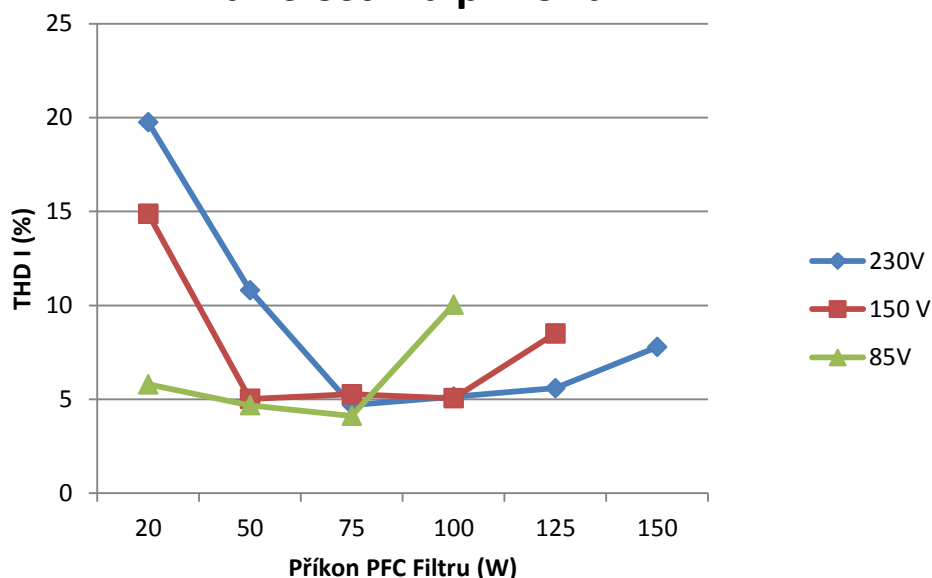
Obr. 29: Účinnost planární tlumivky 42 závitů v závislosti na příkonu

PF planární tlumivky 42 závitů v závislosti na příkonu



Obr. 30: PF planární tlumivky 42 závitů v závislosti na příkonu

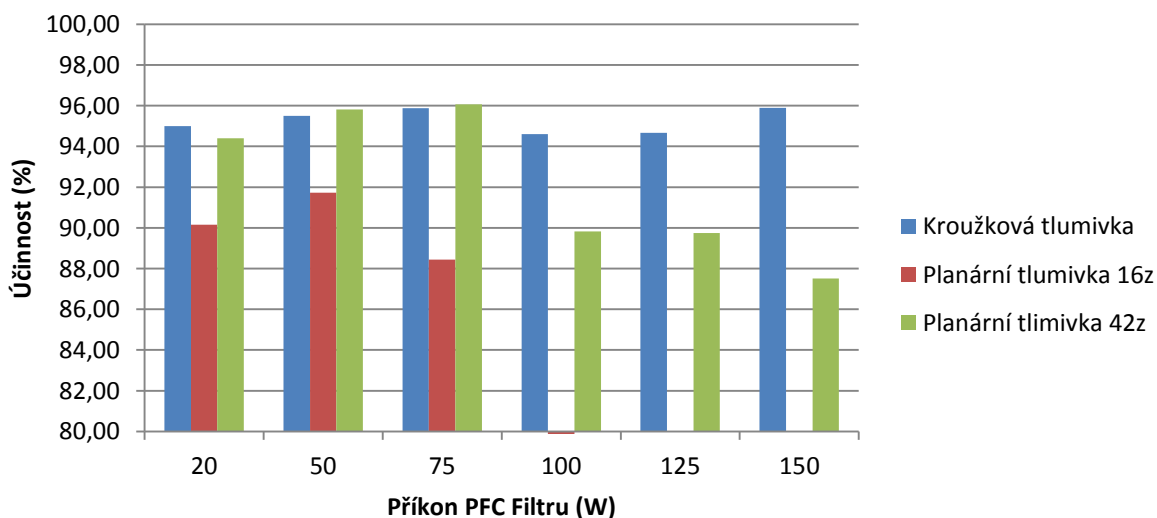
THD I planární tlumivky 42 závitů v závislosti na příkonu



Obr. 31: THD-I planární tlumivky 42 závitů v závislosti na příkonu

Při porovnání jednotlivých tlumivek při napájecím napětí 230 V (Obr. 32) je patrné, že klasická tlumivka a druhá verze planární tlumivky mají do příkonu 75 W podobné výsledky. Při vyšší zátěži je patrné že PFC filtr s klasickou tlumivkou je schopný pracovat jako jediný s účinností přes 94 %.

Účinnost PFC filtru v závislosti na příkonu při napájecím napětí 230V



Obr. 32: Účinnost PFC filtru v závislosti na příkonu při napájecím napětí 230V

Po účinnosti je další důležitá vlastnost potlačení vyšších harmonických. Jak bylo na začátku práce uvedeno, je třeba splnit normu ČSN 61000-3-2. Tato norma vychází z evropské normy a uvádí, jaké jsou maximální přípustné hodnoty proudů jednotlivých harmonických. Při zařazení filtru jako zařízení typu A nám norma udává maximální hodnoty proudu jednotlivých harmonických. Hodnota proudu je určena vzorcem. Pokud dosadíme do vzorce určeného normou, dostaneme hodnoty, které není povoleno překročit. (dle Tab. 10)

Tab. 10: Hodnoty maximálního povoleného proudu pro jednotlivé harmonické u zařízení třídy A.

Harm.	Povolený proud	Harm.	Povolený proud	Harm.	Povolený proud
n	A	n	A	n	A
1		15	0,150	29	0,078
2	1,080	16	0,115	30	0,061
3	2,300	17	0,132	31	0,073
4	0,430	18	0,102	32	0,058
5	1,140	19	0,118	33	0,068
6	0,300	20	0,092	34	0,054
7	0,770	21	0,107	35	0,064
8	0,230	22	0,084	36	0,051
9	0,400	23	0,098	37	0,061
10	0,184	24	0,077	38	0,048
11	0,330	25	0,090	39	0,058
12	0,153	26	0,071	40	0,046
13	0,210	27	0,083		
14	0,131	28	0,066		

Pokud srovnáme naměřené hodnoty proudů jednotlivých harmonických z normy (Tab. 1) s hodnotami naměřenými získáme tak Tab. C.1.

Při porovnání hodnot (Tab. C.1) je patrné, že druhá verze planární tlumivky má nejmenší hodnoty proudu pro jednotlivé harmonické. Jako druhá byla tlumivka na klasickém kroužkovém jádře a jako poslední se umístila první experimentální planární tlumivka. Všechny měřené tlumivky měly hodnoty jednotlivých harmonických v porovnání s hodnotami uvedenými v normě velice nízké.

6 ZÁVĚR

Při konstrukci nového zařízení je dnes nutné dodržet předepsané normy. Je možné, že v budoucnu budou dnes stanovené normy rozšířeny a zpřísněny. Na výběr máme z několika topologií pasivních filtrů, ale také z velkého množství řídicích obvodů pro filtr aktivní. Při návrhu je nutné zvážit požadavky na zařízení a na jeho použití, přičemž v dnešní době bude brán důraz na cenu celého zařízení, kterou lze pasivním filtrem snížit ve srovnání s aktivním filtrem.

Implementace aktivního PFC filtru je oproti filtru pasivnímu složitější. V případě použití ve spínaném zdroji tím přidáváme další zdroj rušení. Také tím klesá účinnost celého systému vlivem dalšího spínání a ztrátám na součástkách.

Při srovnání naměřených hodnot klasické tlumivky a tlumivky planární lze říci, že naměřené hodnoty jsou velice podobné. Pokud by se při návrhu planární tlumivky použila deska plošného spoje s dvojnásobnou tloušťkou cesty, předpokládám, že by hodnoty účinnosti byly i v případě vyšší zátěže velice podobné. V případě sériové výroby by měla výroba zdroje s aktivním PFC filtrem s planární tlumivkou několik výhod. Hlavní výhodou by byla cena, která by byla ušetřena na mědi. Další výhodou by bylo zjednodušení osazovacího procesu.

Před sériovou výrobou by bylo nutné provést optimalizaci tloušťky desky plošného spoje použitého jako vinutí. Jelikož většina součástek není výkonově namáhána, bylo by vhodné provést výměnu klasických součástek za součástky typu SMD. Měření bylo prováděno v pokojové teplotě při normální vlhkosti, bylo by vhodné provést detailní měření při různých hodnotách teploty a vlhkosti.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Hammerbauer, J. (1998). *Elektronické napájecí zdroje a akumulátory*. Plzeň: Vydavatelství Západočeské univerzity Husova 11.
- [2] PRESSMAN, Abraham I, Keith H BILLINGS a Taylor MOREY. *Switching power supply design*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, c2009, xxxvii, 841 s. ISBN 978-0-07-148272-1.
- [3] Analog Deice. (2011). *Digital Power Factor Correction Controller*. Norwood: Analog Devices.
- [4] Semiconductor, O. (2014). *Power Factor Correction (PFC) Handbook*. Colorado: Literature distribution center, Denver.
- [5] FLORIÁN, P. (2008). *3-D CÍVKY A TRANSFORMÁTORY*, Brno : Vysoké učení technické v Brně, fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 33 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Josef Šandera, Ph.D.
- [6] Texas Instrument. (2007). *8-Pin Continuous Conduction Mode (CCM) PFC controller*. Dallas.

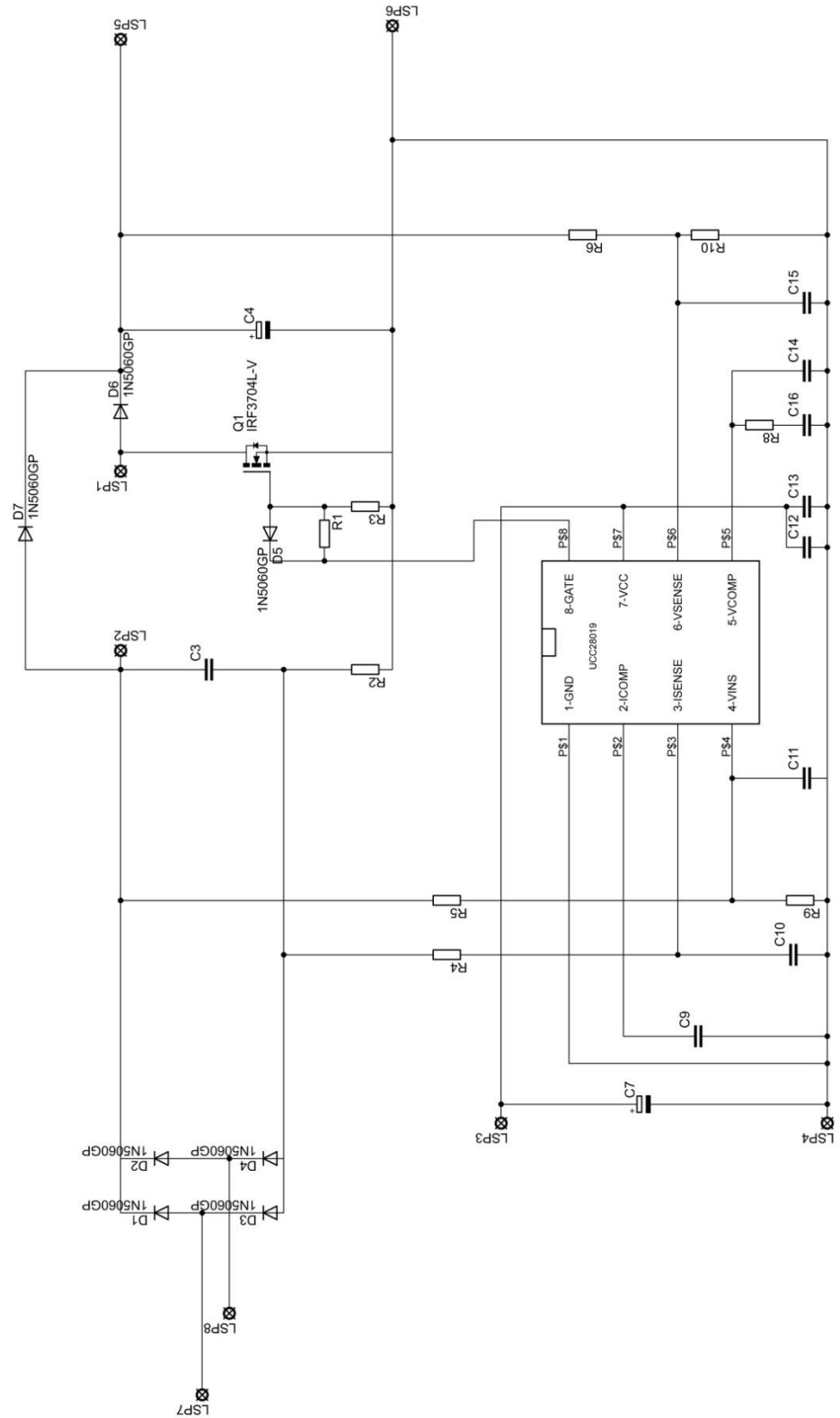
SEZNAM PŘÍLOH

A Návrh zařízení	2
A.1: Obvodové zapojení	2
A.2: Deska plošného spoje	3
A.3: Osazovací plán	3
A.4: Deska plošného spoje planární tlumivky	4
B Seznam součástek	5
C Měření	6
C.1: Srovnání naměřených proudů jednotlivých tlumivek	6
C.2: Průběh proudu odebíraného filtrem při použití toroidní tlumivky a napájecím napětím 230 V při 100 W	7
C.3: Průběh proudu odebíraného filtrem při použití první verze planární tlumivky a napájecím napětím 230 V při 100 W	7
C.4: Průběh proudu odebíraného filtrem při použití druhé verze planární tlumivky a napájecím napětím 230 V při 100 W	8
C.4: Měřicí pracoviště	8
D fotodokumentace	9
D.1: Toroidní tlumivka	9
D.2: První verze planární tlumivky s 18 závitů	9
D.2: Druhá verze planární tlumivky s 42 závitů	10

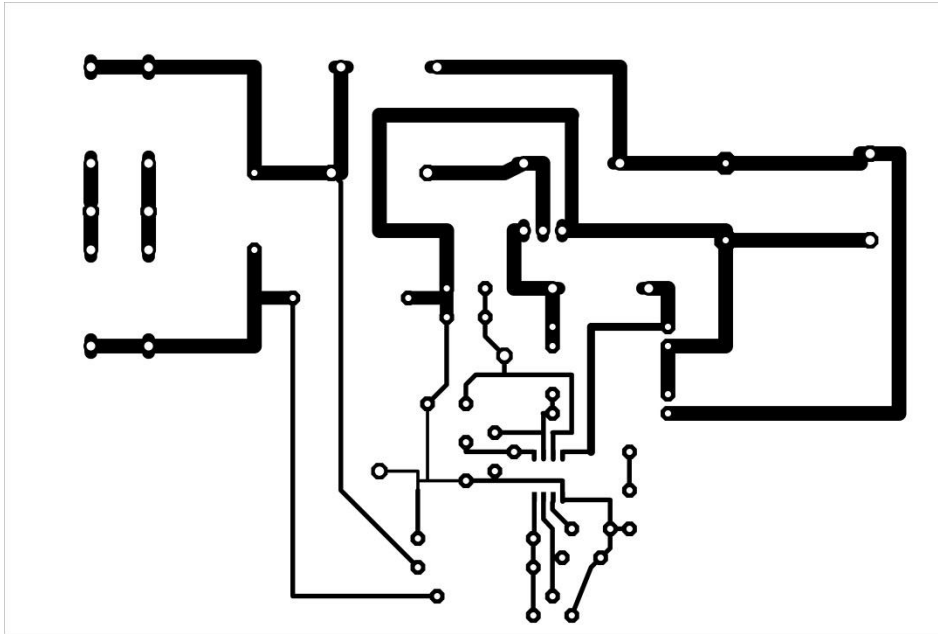
PŘÍLOHY

A Návrh zařízení

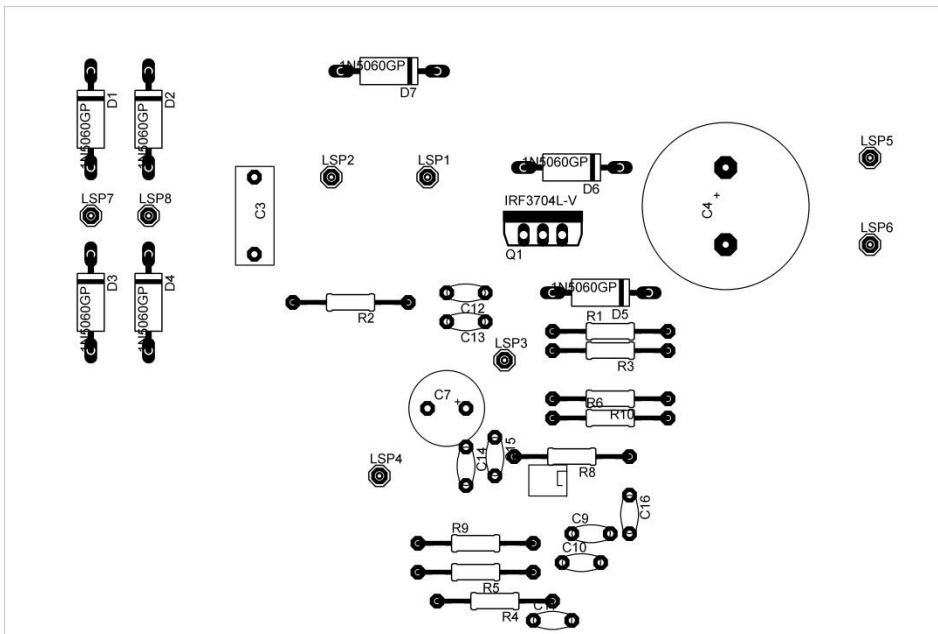
A.1: Obvodové zapojení



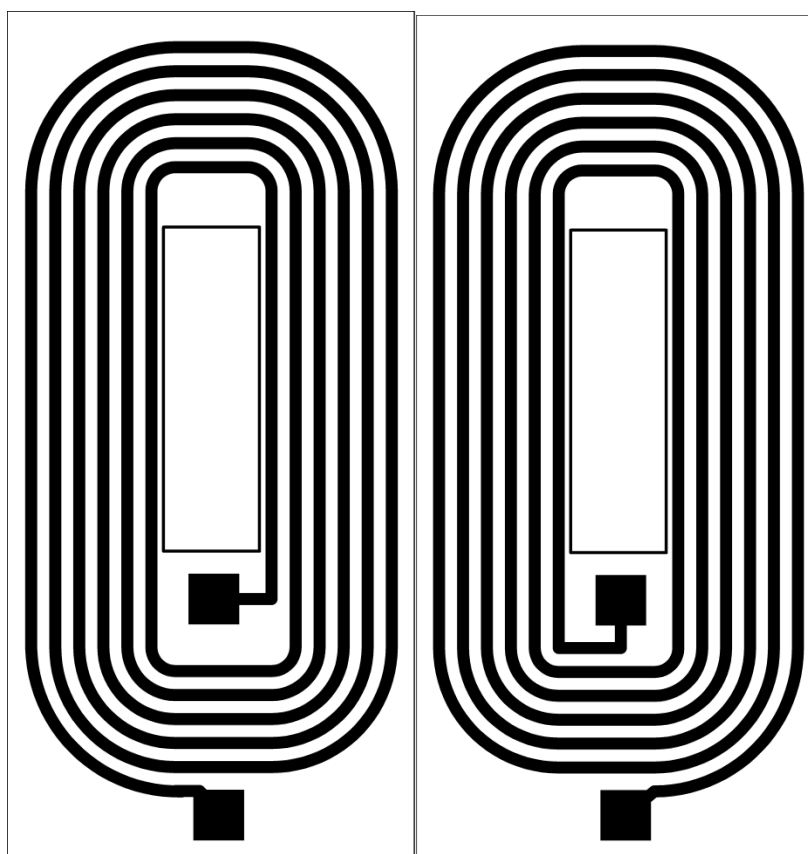
A.2: Deska plošného spoje



A.3: Osazovací plán



A.4: Deska plošného spoje planární tlumivky



B Seznam součástek

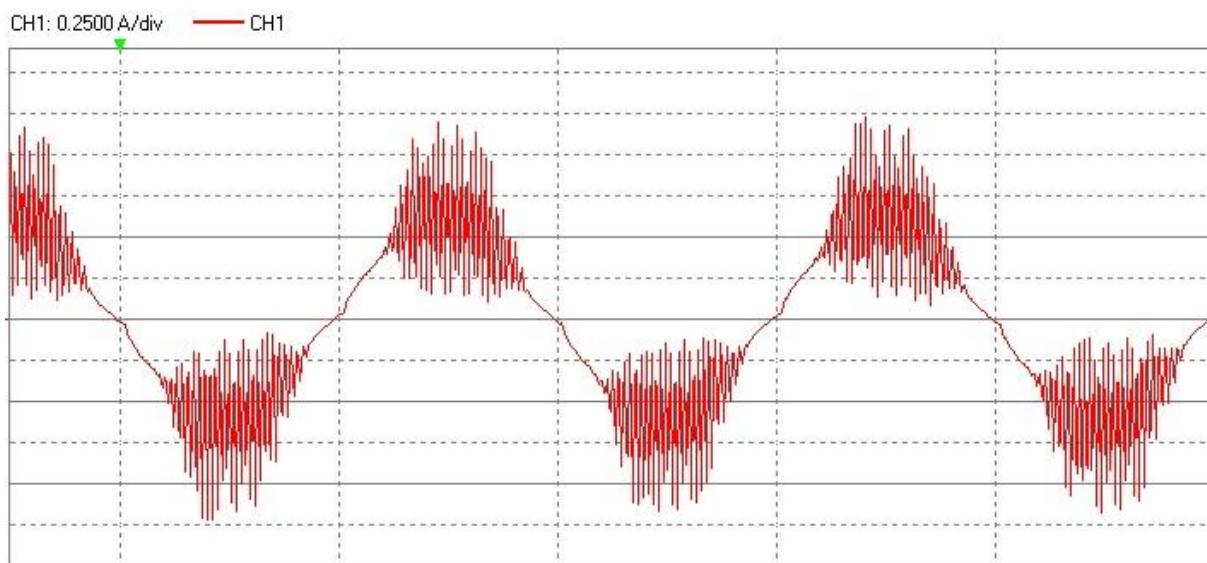
Označení	Hodnota/Označení
C _{in}	0,10uF /265V
L _{bst}	2,8mH / 2,1A
BoostDiode	12R06DI
Switch	G4PC40W
R _{sense}	0,2 Ω / 0,33 W
R _{isence}	220 Ω
C _{isence}	1113 pF /100V
C _{out}	100 uF / 400 V
R _{fb1}	1 MΩ
R _{fb2}	13 kΩ
C _{vsense}	800 pF
C _{icomp}	1200 pF
C _{vcomp}	3,3 uF
C _{vcomp_p}	0,2uF
R _{vins1}	6,5 MΩ
R _{vins2}	100 kΩ
C _{vins}	0,63 uF
VCC Bypas C	1 uF
PFC filter	UCC28019
R _{vcomp}	33 kΩ

C Měření

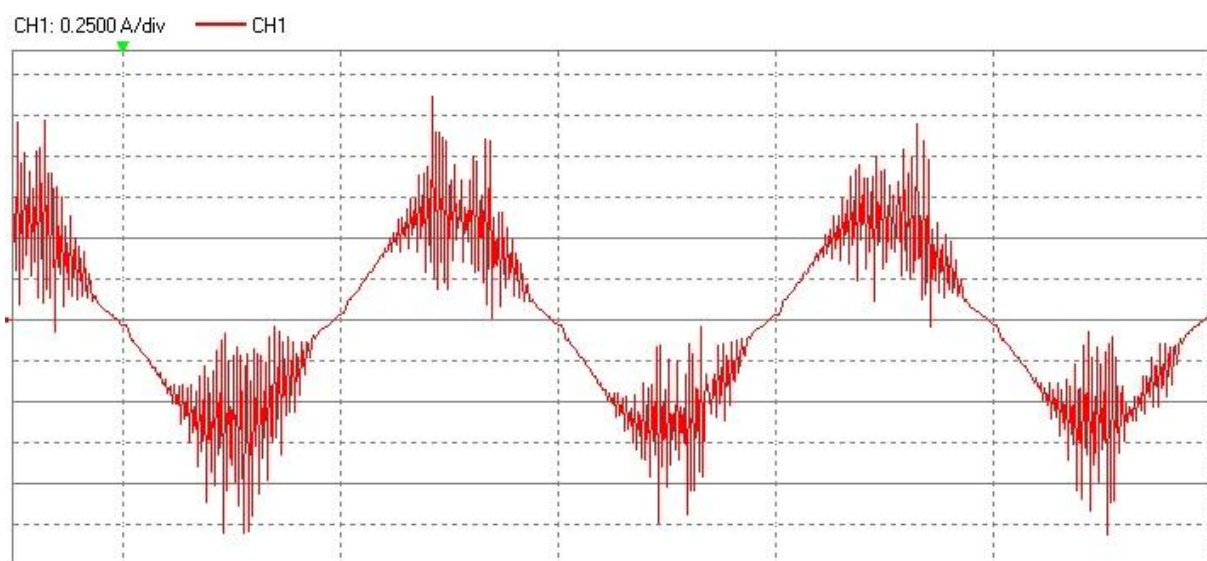
C.1: Srovnání naměřených proudů jednotlivých tlumivek s hodnotou udávanou normou pro zařízení třídy A při příkonu 100 W.

Harm.	Norma	Naměřeno		
	Povolený proud	Toroidní tlumivka	Planární tlumivka 18 závitů	Planární Tlumivka 32 závitů
n	mA	mA	mA	mA
1		512,50	483,60	497,00
2	1080,0	0,21	0,73	0,15
3	2300,0	16,86	20,65	14,11
4	430,0	0,15	0,53	0,05
5	1140,0	17,32	16,30	15,75
6	300,0	0,21	0,39	0,05
7	770,0	7,48	3,24	6,91
8	230,0	0,26	0,58	0,15
9	400,0	8,41	9,24	4,67
10	184,0	0,36	0,77	0,15
11	330,0	8,15	6,72	3,38
12	153,3	0,41	0,68	0,10
13	210,0	4,36	5,61	0,99
14	131,4	0,15	0,73	0,10
15	150,0	3,18	3,58	4,32
16	115,0	0,31	1,06	0,15
17	132,4	1,59	1,98	3,08
18	102,2	0,21	0,97	0,15
19	118,4	1,90	1,98	1,19
20	92,0	0,26	0,77	0,10
21	107,1	0,87	1,40	2,14
22	83,6	0,26	0,68	0,15
23	97,8	1,59	1,84	0,60
24	76,7	0,31	0,73	0,20
25	90,0	0,97	1,21	0,65
26	70,8	0,26	0,92	0,20
27	83,3	0,72	1,69	0,70
28	65,7	0,36	1,11	0,20
29	77,6	2,00	2,32	0,75
30	61,3	0,41	1,50	0,15
31	72,6	0,87	1,84	0,55
32	57,5	0,41	1,50	0,20
33	68,2	1,74	2,03	1,34
34	54,1	0,41	1,11	0,25
35	64,3	1,23	1,16	0,89
36	51,1	0,41	0,82	0,25
37	60,8	0,26	1,16	0,40
38	48,4	0,51	1,55	0,30
39	57,7	1,49	2,32	1,49
40	46,0	0,51	2,03	0,30

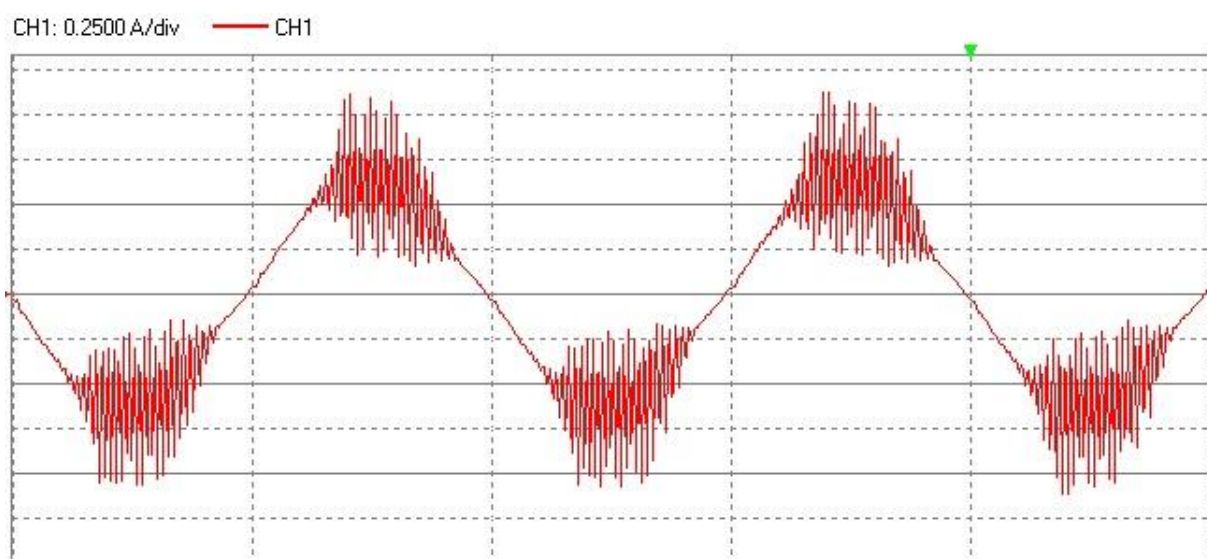
C.2: Průběh proudu odebíraného filtrem při použití toroidní tlumivky a napájecím napětím 230 V při 100 W



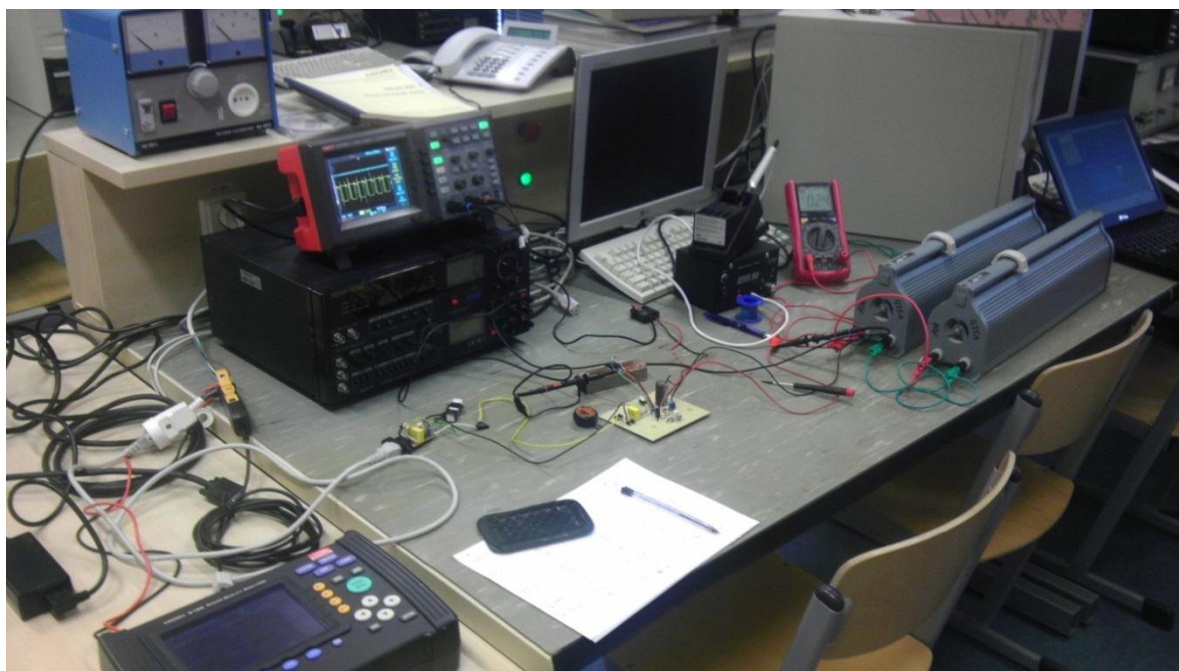
C.3: Průběh proudu odebíraného filtrem při použití první verze planární tlumivky a napájecím napětím 230 V při 100 W



C.4: Průběh proudu odebíraného filtrem při použití druhé verze planární tlumivky a napájecím napětím 230 V při 100 W

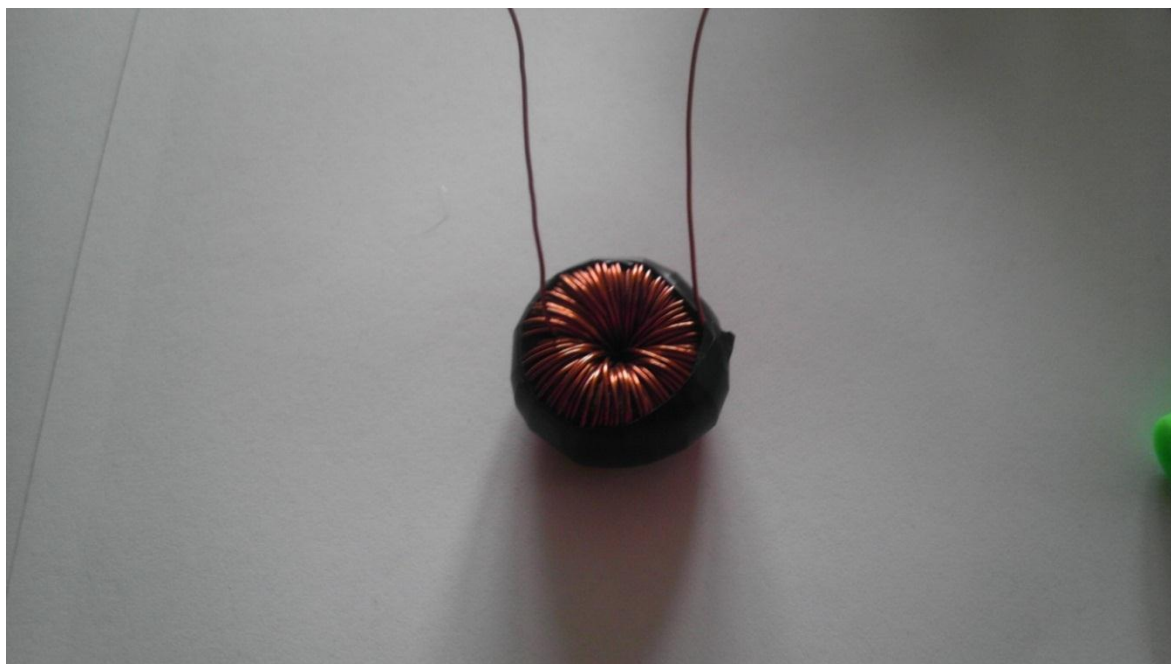


C.4: Měřicí pracoviště



D fotodokumentace

D.1: Toroidní tlumivka



D.2: První veze planární tlumivky s 18 závitů



D.2: Druhá veze planární tlumivky s 42 závitů

