

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Aktivní filtr PFC pro spínané zdroje do výkonu 2kW

**vedoucí práce: Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
autor: Ondřej Sýkora**

2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ondřej SÝKORA**
Osobní číslo: **E11N0062P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a aplikovaná informatika**
Název tématu: **Aktivní filtr PFC pro spínané zdroje do výkonu 2kW**
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 :

Návrhněte a realizujte aktivní filtr PFC pro síťové impulsní napájecí zdroje s maximálním výstupním výkonem 2kW.

1. Proveďte rozbor stávajícího stavu v oblasti jak pasivních, tak aktivních filtrů PFC pro síťové výkonové impulsní napájecí zdroje včetně jejich vlastností.
2. Navrhněte obvodové řešení a proveďte výpočty aktivního filtru PFC pro síťové napětí 110V/60Hz a 230V/50Hz s výstupním napětím 400V.
3. Realizujte funkční vzorek navrženého řešení a proveďte měření nejdůležitějších parametrů.
4. Proveďte zhodnocení dosažených výsledků a případně navrhněte další možnosti zlepšení parametrů filtru PFC.

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, ZČU v Plzni, Plzeň 1998
2. **Krejčířík, A.:** Napájecí zdroje I, II, III, Praha, Technická literatura BEN, 2002
3. **Billings, K.:** Switchmode power supply handbook, McGraw-Hill Handbooks, 1999, 2nd edition, ISBN 0-07-006719-8

Vedoucí diplomové práce:

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Konzultant diplomové práce:

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2012**

Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2013**



L.S.

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan

Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev

vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Anotace

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na popis problematiky kompenzace účinníku a návrh řešení zařízení aktivní kompenzaci. V práci jsou popsány způsoby kompenzace, výpočet součástí a návrh samotného zařízení. Cílem práce je vytvořit funkční prototyp aktivního zařízení.

Klíčová slova

účinník, PFC filtr, aktivní PFC filtr, UCC28070

<i>počet stran</i>	<i>počet příloh</i>	<i>počet obrázků</i>	<i>počet tabulek</i>
45	4	7	2

Abstract

The master thesis presents problems of power factor and power factor correction. In these power factor correction methods, electrical components calculation and power factor correction device design are described in thesis. The aim is to assess the design and produce of the functional device.

Key words

power factor, power factor correction, active PFC, UCC28070

<i>number of pages</i>	<i>number of appendixes</i>	<i>number of pictures</i>	<i>number of tables</i>
45	4	7	2

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

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

V Plzni dne 9.5.2013

Ondřej Sýkora

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Dod. Ing. Jiřímu Hammerbauerovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
1 ÚVOD	10
2 PFC FILTRACE	11
2.1 ÚČINÍK	11
2.2 ZAŘÍZENÍ BEZ PFC FILTRU	12
2.3 PASIVNÍ PFC FILTR	13
2.3.1 <i>Pasivní kapacitní PFC filtr</i>	14
2.3.2 <i>Pasivní indukční PFC filtr</i>	15
2.4 AKTIVNÍ PFC FILTR	16
2.4.1 <i>Aktivní PFC filtr typu boost</i>	18
2.4.2 <i>Aktivní PFC filtr typu bridgeless</i>	18
2.4.3 <i>Aktivní PFC filtr typu interleaved</i>	19
3 NÁVRH FUNKČNÍHO VZORKU	21
3.1 VÝBĚR PFC CONTROLLERU	21
3.2 NÁVRH A VÝPOČET AKTIVNÍHO PFC FILTRU	22
4 ZPRACOVÁNÍ FUNKČNÍHO VZORKU	38
5 ZÁVĚR	39
6 POUŽITÁ LITERATURA	40
PŘÍLOHY	41

Seznam symbolů a zkratk

PFC	Korekce účinníku
PWM	Pulzně šířková modulace
$\cos \varphi$	Účinník
φ	Fázový posuv
η	Účinnost
U_{IN} [V]	Vstupní střídavé napětí
U_{OUT} [V]	Výstupní stejnosměrné napětí
P_{OUT} [W]	Výstupní výkon
f_S [Hz]	Pracovní frekvence
f_{IN} [Hz]	Vstupní frekvence
I_{T_RMS} [A]	Efektivní hodnota proudu před indukčností
V_{RIPPLE} [V]	Zvlnění napětí
I_{COUNT_LF} [A]	Efektivní hodnota proudů nízkých kmitočtů přes kondenzátor
I_{COUNT_HF} [A]	Efektivní hodnota proudů vysokých kmitočtů přes kondenzátor
I_{IPEAK} [A]	Špičková hodnota proudu
N_{CT}	Převod transformátoru
f_{DM} [Hz]	Rozsah změn pracovní frekvence
f_{DR} [Hz]	Rychlost přeladování pracovní frekvence
V_{OPV} [V]	Vypočtená hodnota výstupního napětí
t_{SSMIN}	Minimální doba trvání soft start

1 Úvod

Předkládaná práce se zabývá kompenzací účinníku v zařízeních odebírajících nelineární proud, který má frekvenci odlišnou od frekvence sítě.

Jen málokteré zařízení se chová jako čistě odporová zátěž. Všechny ostatní zařízení mají zhoršený účinník a odebírají ze sítě nesinusový proud. S rozvojem elektrických zařízení a s nárůstem jejich počtu se dostával problém účinníku čím dál více do zájmu distributorů elektrické energie i dalších společností. Nyní jsou v platnosti normy definující průběh proudu u zařízení od určitých výkonů a splnění těchto norem se zabývá tato práce

V první části budou popsány způsoby kompenzace účinníku, jejich rozdíly a parametry. Dále bude popsán návrh zařízení pro kompenzaci účinníku včetně výpočtů součástek a na závěr budou uvedeny výsledky dosažené daným zařízením.

2 PFC filtrace

V současné době je vyvíjen tlak na zlepšování účinníku. To samozřejmě vede ke zlepšování filtračních metod sloužících k jeho zlepšení. Proč je ale účinník tak důležitý? Jaké jsou možnosti jeho zlepšení? Tato problematika bude podrobně popsána na následujících stránkách.

2.1 Účinník

Každé elektrické zařízení (dále jen zátěž) má nějaký příkon a odebírají nějaký proud. Protože je většinou zátěž připojena na rozvodnou síť se střídavým napětím, může mít druh zátěže vliv na odebíraný výkon. Nejlepším případem jsou zátěže, které mají odporový charakter. U těchto zařízení je odebíraný proud ve fázi s napájecím napětím, a proto je spotřebováván všechny dodávaný výkon. V případě induktivní nebo kapacitní zátěže dochází k posunu fází napětí a proudu. Tento fázový posuv může být až $\pm 90^\circ$ elektrických. Tento fázově posunutý proud je odebírán ze zdroje, ukládán v reakčním prvku a následně vracen do zdroje. Tento zpětný proud pak znečišťuje napájecí síť.

Jak je zřejmé, velikost účinníku je závislá na fázovém posuvu napětí a proudu. Velikost účinníku lze vypočítat přes $\cos \varphi$, kde φ je fázový posuv napětí a proudu. Účinník tedy může nabývat hodnot od nuly do jedné, kdy hodnota jedna je nejlepší možný stav. V tomto případě není mezi proudem a napětím žádný fázový rozdíl a je odebírán pouze činný výkon.

V případě, že se jedná o zhoršený účinník pouze díky fázovému posuvu, je možné tento problém kompenzovat. Většinou tento problém nastává u motorů a kompenzace je prováděna pomocí přídavných kapacit. Tyto případy jsou obvykle převážně ve velkých podnicích, kdy využívají mnoho velkých točivých strojů, protože pokud odběratel odebírá velké množství jalového výkonu, může být sankcionován. Ovšem mnohem častějším případem zhoršení účinníku jsou případy usměrňovačů pracujících do kapacitního filtru. Toto je případ nelineární zátěže, kde se nejedná pouze o fázový posuv.

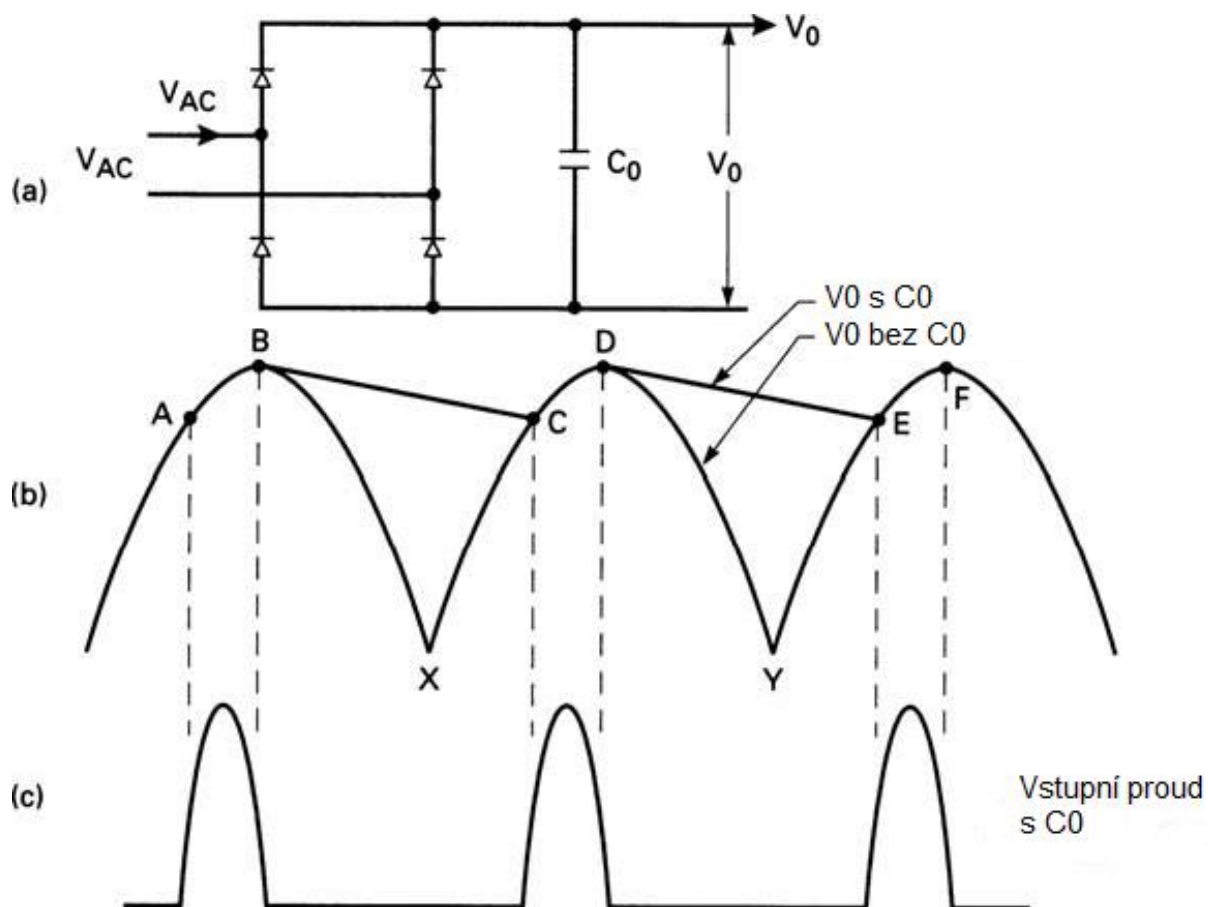
Mezi nelineární zátěže patří zařízení napájená přes usměrňovač nebo zařízení využívající obloukový výboj (zářivky, svářečky, ...). Jak je popsáno v [3], při jejich provozu

dochází vlivem spínání k vzniku vyšších harmonických složek. Problémem vyšších harmonických je fakt, že je nelze jednoduše kompenzovat. Navíc je nutné tento problém řešit, neboť podle norem je potřeba tuto kompenzaci zavádět u zařízení s čím dál menším výkonem. K této kompenzaci se využívají PFC filtry, které jsou již součástí zařízení.

2.2 Zařízení bez PFC filtru

Zařízení mající síťový usměrňovač, za kterým je zařazený kondenzátor, odebírají proud pouze při nabíjení kondenzátoru a z kondenzátoru je dále napájen celý zbytek obvodu. Aby bylo možné dodat do kondenzátoru dostatek energie, je nutné nabíjet jej v krátkém čase relativně velkým proudem.

Vzorový příklad je na obrázku 1. Na obrázku 1a je zobrazeno schéma běžného můstkového usměrňovače s filtračním kondenzátorem. Na obrázku 1b jsou dále vyobrazeny průběhy výstupního napětí s připojeným nebo odpojeným filtračním kondenzátorem. Je zřejmé, že bez kondenzátoru C0 kopíruje výstupní napětí usměrněný sinusový vstup, což je v moderních zařízeních nepřijatelné zvlnění. Na obrázku 1c je zobrazen průběh vstupního proudu při zapojeném kondenzátoru. Je vidět, že se kondenzátor nabíjí pouze v době, kdy je vstupní napětí vyšší než napětí na kondenzátoru a to je mezi body AB, CD a EF. V těchto intervalech jsou na vstupech velké proudové špičky složené z vyšších harmonických. Vyšší harmonické, stejně jako fázový posuv, mají vliv na účinník a je nutné je omezit.



Obr. 1: Můstkový usměrňovač. (a) Schéma zapojení s filtračním obvodem. (b) Výstupní napětí s a bez filtračního kondenzátoru C_0 . (c) Průběh vstupního proudu na kondenzátoru C_0 .

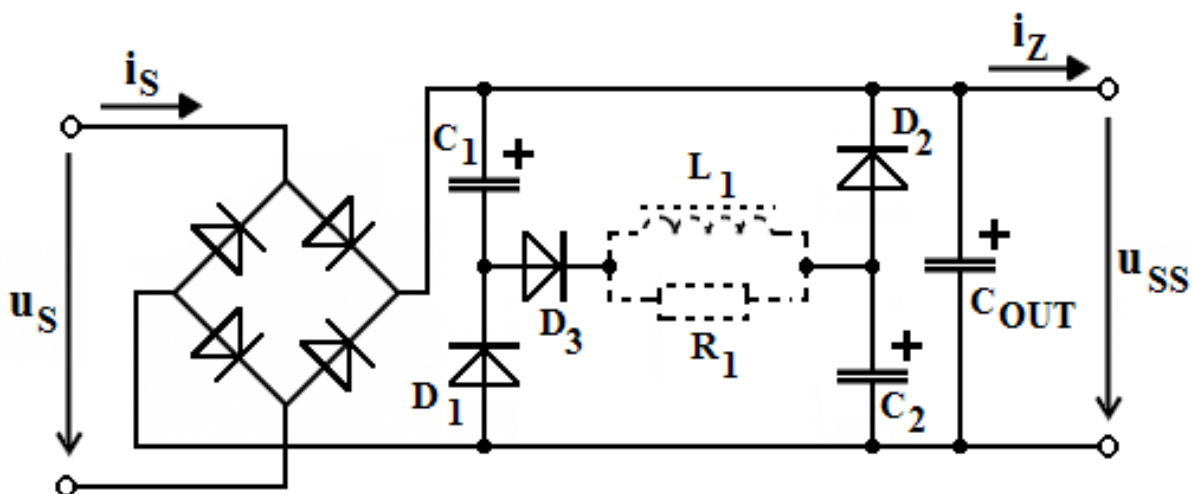
2.3 Pasivní PFC filtr

Jak již bylo znázorněno na obrázku 1, nabíjením filtračního kondenzátoru vznikají na vstupu zařízení proudové špičky složené z vyšších harmonických. Za účelem snížení ztrát těmito proudy, byla v roce 2006 přijata norma ČSN EN 61000-3-2 jako česká verze evropské normy EN 61000-3-2. Tato norma omezuje maximální velikost vyšších harmonických pro zařízení se vstupním fázovým proudem nižším nebo rovným 16 A.

Nejsnazším řešením splnění této normy je použití pasivního PFC filtru. Jak již název napovídá, jedná se o filtr skládající se pouze z pasivních součástí. Podle druhu použitých součástí lze filtry rozdělit do dvou skupin – kapacitní a indukční. Podrobněji jsou popsány v [5].

2.3.1 Pasivní kapacitní PFC filtr

Jak již název napovídá, jedná se o filtr vyšších harmonických založený na elektrolytických kondenzátorech. Schéma zapojení tohoto filtru je zobrazeno na obrázku 2. Dále je na obrázku vstupní můstkový usměrňovač a vyhlazovací kondenzátor C_{OUT} . Celý filtr se tedy skládá z elektrolytických kondenzátorů C_1 a C_2 , diod D_1 , D_2 a D_3 a indukčnosti L_1 , kterou lze nahradit i odporem R_1 .



Obr. 2: Schéma zapojení zdroje s kapacitním PFC filtrem [5]

Funkce filtru je velice jednoduchá. Pokud vstupní napětí roste, jsou kondenzátory C_1 a C_2 spojeny před diodu D_1 do série a oba se nabíjejí na hodnotu vstupního napětí. V okamžiku překročení maxima vstupního napětí, napětí začíná klesat a dioda D_3 se zavírá. Tady je využita indukčnost L_1 , která při komutaci diod omezí protékající proud. V tuto chvíli je každý kondenzátor nabit na polovinu vstupního napětí. V této době je výstup napájen z filtračního kondenzátoru C_{OUT} . Velikost C_{OUT} je však často velmi malá a slouží pouze ke kompenzaci

rychlých změn odběru zátěže. Když vstupní napětí klesne pod polovinu, začne se výstup napájet z kondenzátorů.

Je zřejmé, že je proud ze zdroje odebíráán po celou dobu, kdy je napětí vyšší než polovina maxima. Toto řešení má velký zvlnění výstupního napětí, které může být až 70%. Na druhou stranu, čím je zvlnění vyšší, tím je omezení vyšších harmonických úspěšnější.

S ohledem na zvlnění výstupního napětí, je obtížné najít pro toto zapojení vhodné využití. Jednou z možností jsou světelné zdroje, kde toto zvlnění příliš nevadí. Další možností je vhodný spínaný zdroj, který bude schopen tento rozptyl doregulovat.

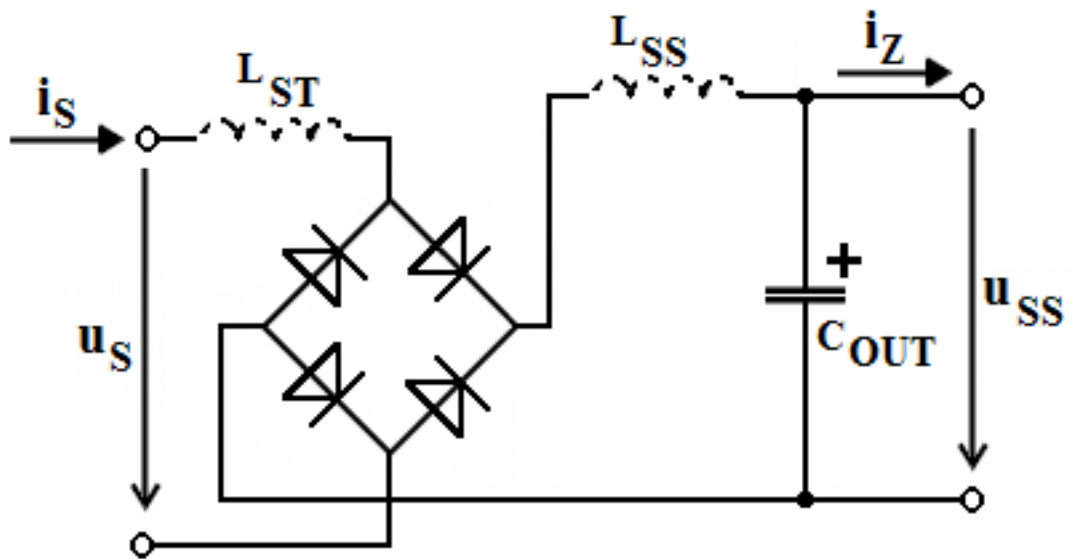
2.3.2 Pasivní indukční PFC filtr

Dalším pasivním filtrem je filtr indukční a jak už název napovídá, jedná se o filtr využívající indukčnosti. Přesněji řečeno tlumivky. Schéma zapojení tohoto filtru je vyobrazeno na obrázku 3. Je zde vidět tlumivka L_{ST} na napájecí straně procházená střídavým proudem, můstkový usměrňovač, tlumivka L_{SS} , která je umístěna na usměrňované straně a za ní následuje vyhlazovací kondenzátor C_{OUT} .

Funkce filtru je velmi jednoduchá. Indukčnost pouze rozšiřuje proudové pulzy, kterými je nabíjen kondenzátor C_{OUT} . Rozšířením pulzů dojde ke snížení amplitud vyšších harmonických a tím ke zlepšení účinnosti.

Nevýhodou indukčních filtrů jsou samotné tlumivky. Protože tlumivky pracují na síťové frekvenci 50 Hz, je jejich stavba dost robustní. To znemožňuje využití tohoto typu filtru u impulzních zdrojů vyšších výkonu. Toto řešení se používá pouze do hodnoty výkonu okolo 250 W.

V porovnání v pasivním kapacitním PFC filtrem, mají indukční filtry mnohem menší zvlnění výstupního napětí. Co se týče potlačení vyšších harmonických proudů, je těžké určit který filtr je lepší, protože přesné hodnoty jsou vždy závislé na použitých součástkách.

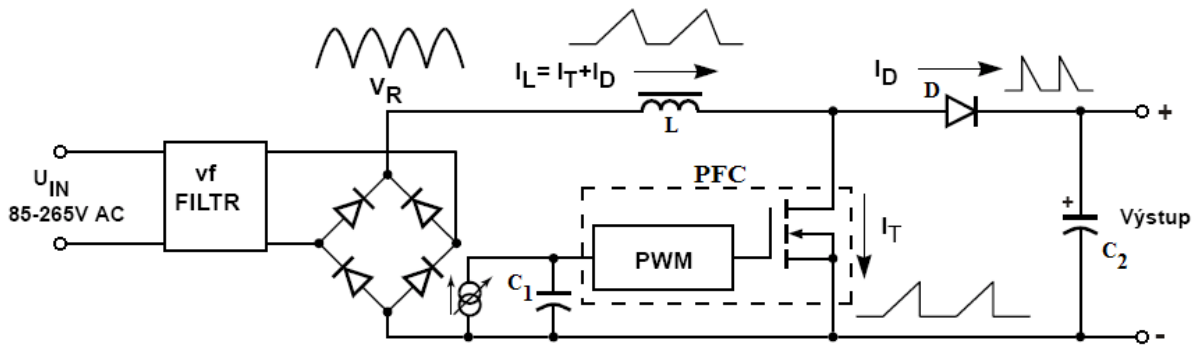


Obr. 3: Schéma zapojení zdroje s indukčním PFC filtrem

2.4 Aktivní PFC filtr

Další možností filtrace vyšších harmonických je použití aktivního PFC filtru. Aktivní PFC filtr je nejčastěji řešen jako obvod s funkcí blízkou step-up měniči, ale jeho princip není zcela totožný. Schéma filtru je zobrazeno na obrázku 4.

Pro správnou funkci aktivního PFC filtru je nutné snímat hodnotu vstupního a výstupního napětí. Tyto hodnoty jsou vyhodnocovány řídicím obvodem a podle toho dochází ke spínání aktivního prvku. Řídicí obvod řídí odběr proudu pomocí PWM řízení. Díky PWM řízení je odebírán trojúhelníkový nepřerušovaný proud který teče tlumivkou. Výsledkem je odebíraný sinusový proud znečištěný vyššími harmonickými, které do průběhu vnáší PWM řízení. Tyto vyšší harmonické jsou odfiltrovány vstupním vysokofrekvenčním filtrem.



Obr. 4: Schéma aktivního PFC filtru

Moderní řídicí systémy jsou vyráběny v podobě integrovaných obvodů. Jejich pracovní frekvence dosahuje v dnešní době až 500 kHz, ale u vysokých frekvencí je třeba počítat se zotavovací dobou polovodičových součástek, aby nedošlo k vysokým ztrátám a případně i destrukci zařízení.

Jak je zřejmé z popisu funkce aktivního filtru, dosahuje toto řešení velmi dobrých výsledků. Díky neustálému odběru proudu a jeho filtraci pomocí vstupního vysokofrekvenčního filtru je dosaženo velmi dobrého potlačení vyšších harmonických. Zvlnění na výstupu je taky velmi malé, protože PWM spínání je řízeno podle změřeného výstupního napětí.

V závislosti na spínacím cyklu a průběhu proudu lze aktivní PFC filtry rozdělit do třech základních metod. Tyto metody jsou Continuous Control Mode (CCM), Discontinuous Control Mode (DCM) a Critical Control Mode (CRM).

U CCM se využívá regulace pomocí nepřerušovaného proudu přes indukčnost. Celé zapojení funguje na frekvenci, která je v jistých mezích konstantní. Tento mód je využíván hlavně pro zařízení vyšších výkonů, protože je dosahováno nejnižších hodnot špičkového proudu a jeho zvlnění.

Metoda řešení DCM je naopak vhodnější pro malé výkony do 250 W. Využívá proudu, jehož hodnota klesá vždy k nule před opětovným sepnutím aktivního prvku. Tyto filtry mají proměnnou pracovní frekvenci [2]. Výhodou tohoto řešení je nízká cena, jednoduché obvodové řešení a potřeba malých indukčností.

Další metodou je CRM, kdy je průběh proudu na kritické mezi, to znamená, že k poklesu proudu na nulovou hodnotu dochází v okamžiku sepnutí a opětovnému nárůstu, z čehož plyne, že proud v podstatě nikdy nulové hodnoty nedosáhne.

Podle způsobu obvodového řešení lze rozdělit aktivní PFC filtry do tří základních podkategorií. Základní princip spínání do indukčnosti je u všech zachován, ale liší se obvodovým zapojením a některými vlastnostmi.

2.4.1 Aktivní PFC filtr typu boost

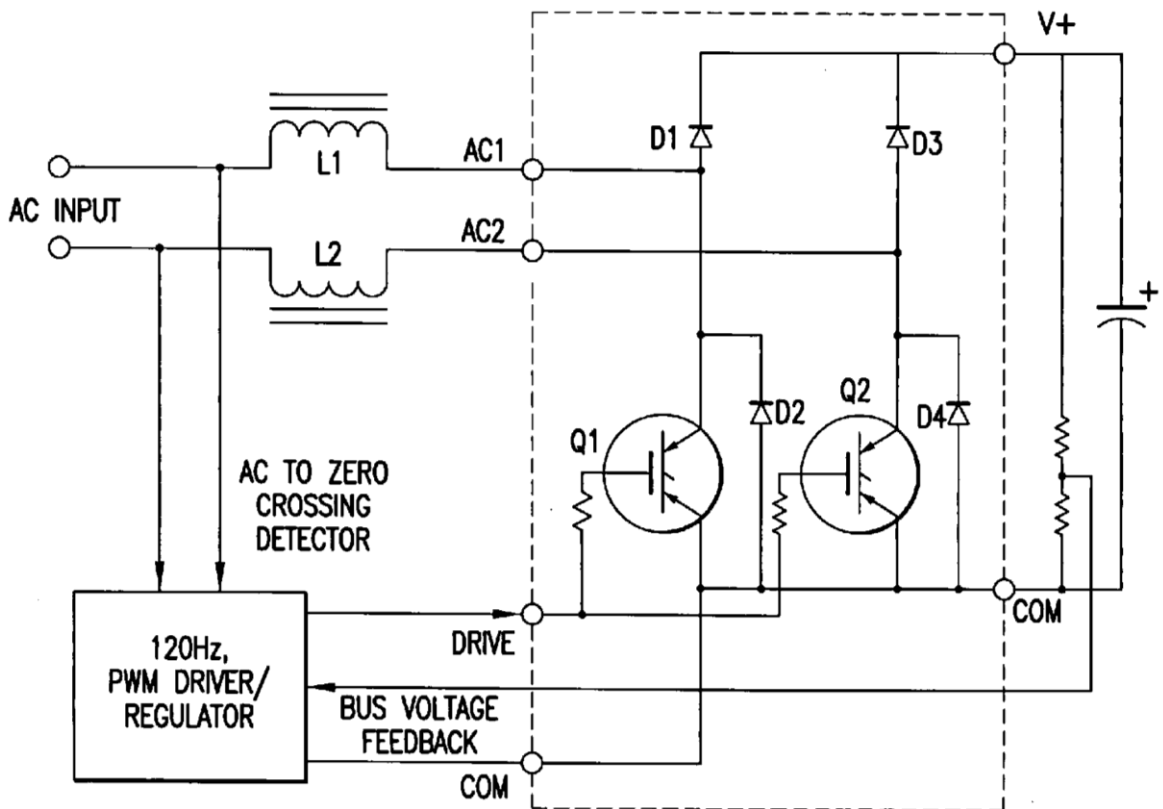
Obvodové zapojení tohoto druhu filtru (Obr. 4) obsahuje na vstupní síťový filtr, můstkový usměrňovač, řídicí PFC controllér pro spínání aktivního prvku, indukčnost a výstupní kapacitní filtr.

Jedná se o základní zapojení, kdy výstupní usměrněné napětí je vyšší než špičková hodnota vstupního střídavého napětí. Tato metoda je v dnešní době nejběžnější.

2.4.2 Aktivní PFC filtr typu bridgeless

Jak již z názvu vyplývá, jedná se o aktivní PFC filtr, který nemá na vstupu můstkový usměrňovač? Schéma tohoto filtru je na obrázku 5.

Tento obvod vznikl ve snaze zvýšit účinnost PFC filtru. Oproti filtru typu boost, kde proud prochází vždy přes 2 diody můstkového usměrňovače a pak ještě přes blokovací diodu, která je součástí PFC filtru. Zde byl počet diod snížen a tím se současně klesl i napěťový úbytek a zvýšila se účinnost. Podrobný popis funkce a vlastností v[1].



Obr. 5: Schéma aktivního bridgeless PFC filtru

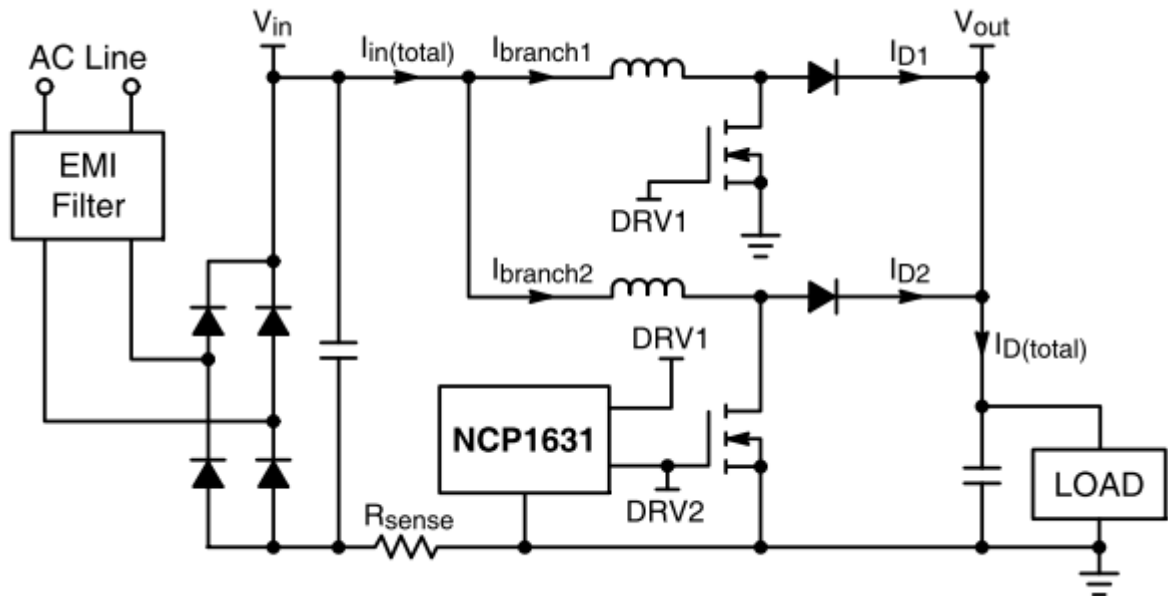
2.4.3 Aktivní PFC filtr typu interleaved

Princip tohoto druhu filtru vychází z možnosti složit PFC filtr pro požadovaný výkon s dvou filtrů s výkonem polovičním. Tímto řešením se sníží proud procházející jednotlivými filtry a tím i distribuce tepla. Dále jsou potřeba menší součástky a tak se ani celková velikost filtru nijak výrazně nezmění. Použitím menších součástek je také možno dosáhnout nižší celkové ceny zařízení.

Pokud se u těchto dvou filtrů nastaví rozdílná fáze, zlepší se tím i zvlnění vstupního proudu. Ačkoliv se s touto metodou používá nejčastěji řízení fází CRM, tak se pak na vstupu celý filtr chová jako CCM [4].

Jak je vidět na obrázku 6, interleaved filtr využívá dvou paralelních větví osazených samostatným aktivním prvkem a indukčností, ale síťový filtr, můstkový usměrňovač a

výstupní filtr jsou společné. Složitost celého PFC filtru se tak v podstatě nijak zásadně nezmění.



Obr. 6: Schéma aktivního interleaved PFC filtru

3 Návrh funkčního vzorku

Úkolem této práce bylo navrhnout aktivního PFC filtru a od toho se odvíjel i celý postup příprav a návrhu. Jak již bylo popsáno výše, každý aktivní PFC filtr využívá odebrání proudu přes indukčnosti pomocí spínacích prvků. Tyto prvky je potřeba nějakým způsobem ovládat a to nejlépe podle hodnot vstupních i výstupních. V dnešní době jsou již na trhu integrované obvody, které toto vše zvládnou.

3.1 Výběr PFC controlleru

Od výběru PFC controlleru se odvíjí celý následný návrh obvodu a zařízení. Na trhu je velké množství výrobců, kteří nabízejí několik různých integrovaných obvodů. Je logické, že se tyto obvody více či méně liší. Každý výrobce volí jiný způsob řešení, aby se odlišil od své konkurence a nabídl zákazníkovi něco jiného.

Každý takovýto obvod má nějaké přednosti, které jsou vhodné pro určité použití. Pro potřeby této diplomové práce byl proveden průzkum nabízených PFC controllerů na stránkách internetového obchodu Farnell [8]. Po důkladnějším průzkumu byly vybrány tři nejvhodnější. Parametry těchto tří obvodů jsou v tabulce č. 1. Z tabulky je zřejmé, že se vybrané controllery navzájem dost liší a to jsou v tabulce vypsány pouze základní parametry.

výrobce	Texas Instrumnets	Analog Devices	Farchild
typ	UCC28070	ADP1048	FAN9612
počet vývodů	20	24	16
Soft start	ano	ne	ano
pracovní frekvence [kHz]	30-300	30-400	16,5-525
externí časová synchronizace	ano	ano	ne
programovatelná velikost Ipeak	ano	ano	ano
počet pracovních fází	2	1	2
Ucc [V]	12-21	3-3,6	9-18
cena [Kč]	196	248	56

Tab. 1: Vlastnosti užšího výběru PFC controllerů

Vypsané parametry měli při výběru rozdílnou váhu. Například počet vývodů neměl na výběr vůbec žádný vliv, pouze naznačuje složitost obvodu připadajícího k danému controlleru. Dalším nedůležitým kritériem byl výrobce obvodu. Dále je zde několik parametrů, které se z počátku zdály být důležité, ale nakonec se ukázaly jako zbytečné nebo se nevyužily. Takovým případem byla například cena součástky. Při prvotním výběru se zdála jako vhodný parametr, ovšem později se ukázalo, že cena samotného kontroléru je jen malou částí ceny celého zařízení, zvláště v případě zařízení s tak vysokým výkonem. Dalším podobným parametrem byla pracovní frekvence, nejvyšší pracovní frekvence se u PFC controllerů pohybuje okolo 500 kHz. Obvody v užším výběru tedy spadají do těch rychlejších. Jak se ale posléze ukázalo, použití takto vysoké frekvence při požadovaném výkonu a tím i vysokých proudech by doba zotavení výkonových součástek nebyla dostatečná a mohlo by dojít ke zničení celého zařízení. Prvním preferovaným parametrem byla programovatelná hodnota špičkového proudu, což ovšem uměly všechny z vybíraných controllerů. Dalším důležitým parametrem byla externí časová synchronizace, kterou obvod FAN9612 nenabízel. Obvod ADP1048 nebyl vybrán, protože nepodporoval funkci soft-start pro omezení startovacího proudu a používal pouze jednu filtrační fázi.

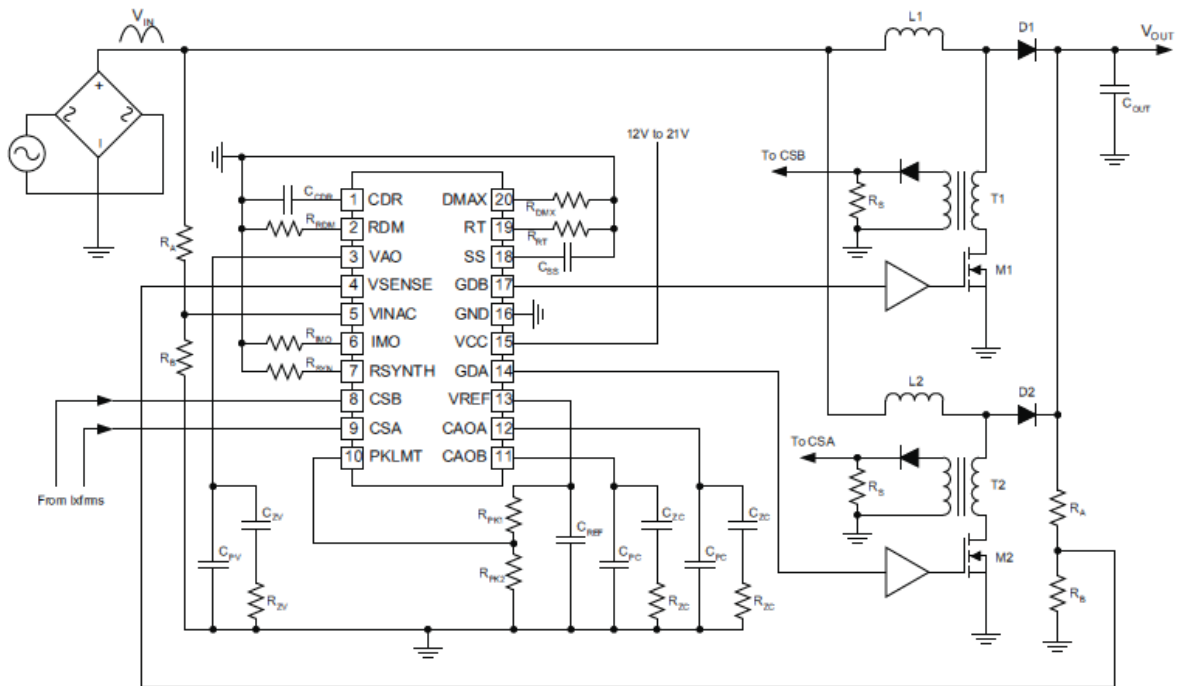
Naopak obvod UCC28070 je dvoufázový, funguje tedy na principu interleaved. Také podporuje funkci soft-start a externí synchronizaci. Maximální pracovní frekvence 300 kHz se ukázala být také dostatečná a rozsah napájecího napětí se překrývá s napájecím napětím obvodu TC4422, který byl použit pro buzení MOSFET tranzistorů.

3.2 Návrh a výpočet aktivního PFC filtru

Pro realizaci aktivního PFC filtru byl vybrán obvod UCC28070, jak bylo popsáno výše. Od této volby se dále odvíjí samotná realizace obvodového řešení, která vychází ze schématu uvedeného v katalogovém listu (Obr. 7). Po analýze obvodového řešení a návrhu realizace obvodu proudové zpětné vazby podle [7] bylo možné pokračovat výpočtem hodnot aktivního PFC filtru.

Aktivní filtr PFC pro spínané zdroje do výkonu 2kW

Ondřej Sýkora



Obr. 7: Základní zapojení aktivního PFC filtru s obvodem UCC28070

Když byl vybrán PFC controller a podle něho i schéma zapojení, bylo potřeba vypočítat hodnoty použitých součástek. Nejprve bylo nutné stanovit si pracovní hodnoty, ze kterých se bude během výpočtů vycházet. Tyto hodnoty jsou v tabulce 2. Hodnota V_{IN} a f_{IN} vychází z rozsahu tolerancí vstupního napětí pro evropskou a americkou napájecí síť. V_{OUT} a P_{OUT} jsou vycházení ze zadání. Účinnost je pouze předpokládaná převzatá z aplikačního listu [6] stejně jako většina výpočtů. Pracovní frekvence byla určena experimentálně, aby byla co nejvyšší a přesto umožňovala uzavření polovodičových součástek.

parametr		min	typ	max	jednotky
V_{IN}	střední hodnota vstupního napětí	95		265	V
V_{OUT}	výstupní napětí		400		V
P_{OUT}	výstupní výkon		2000		W
η	Účinnost	0,9			
f_s	pracovní frekvence	150			kHz
f_{IN}	vstupní frekvence	47		63	Hz

Tab. 2: Specifikace PFC filtru

Když bylo známé schéma zapojení a základní parametry, bylo možné začít s výpočtem prvních součástek.

První počítanou součástkou je jsou cívky L_1 a L_2 , které jsou závislé na maximálním zvlnění vstupního proudu. Pro toto zapojení bylo zvlnění stanoveno na 30%. Vzhledem k faktu, že se jedná o univerzální aplikaci pro vstupní napětí 95-265V, odvíjí hodnoty indukčností i od tohoto parametru. Následující výpočty vedou k volbě vhodné indukčnosti. D_{PLL} je pracovní cyklus při nejnižším napětí. $K(D_{PLL})$ je pak poměr vstupního proudu do induktoru při tomto napětí. ΔI_L je pak zvlnění tohoto proudu při daném napětí. A z těchto hodno je dále vypočítána hodnota indukčností.

$$D_{PLL} = \frac{V_{OUT} - V_{IN_MIN}\sqrt{2}}{V_{OUT}} = \frac{400V - 85V\sqrt{2}}{400V} \approx 0,66 \quad (1)$$

$$K(D_{PLL}) = \frac{2 * 0,66 - 1}{0,66} = 0,49 \quad (2)$$

$$\Delta I_L = \frac{P_{OUT} * \sqrt{2} * 0,3}{V_{IN_MIN} * \eta * K(D_{PLL})} = \frac{2000W * \sqrt{2} * 0,3}{95V * 0,90 * 0,49} \approx 20,1 \text{ A} \quad (3)$$

$$L1 = L2 = \frac{V_{IN_MIN} * \sqrt{2} * D_{PLL}}{\Delta I_L * f_s} = \frac{95V * \sqrt{2} * 0,66}{20,1A * 150kHz} = \approx 29,6\mu H \quad (4)$$

Vypočtenou hodnotu indukčnosti lze využít ke zjištění efektivní hodnoty proudu procházejícího indukčností.

$$I_{L1RMS} = I_{L2RMS} =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{\frac{P_{OUT}}{2}}{V_{IN_{MIN}} * \eta}\right)^2 + \left(\sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{V_{IN_{MIN}} \sqrt{2} \sin(\theta)}{L1 * f_s} * \frac{V_{OUT} - V_{IN_{MIN}} \sqrt{2} \sin(\theta)}{V_{OUT}}}{\sqrt{12}}}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{\frac{2000W}{2}}{95V * 0,90}\right)^2 + \left(\sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{95V \sqrt{2} \sin(\theta)}{140\mu H * 150kHz} * \frac{400V - 95V \sqrt{2} \sin(\theta)}{400V}}{\sqrt{12}}}\right)^2} \approx 9,4A \quad (5)$$

Podle vypočtené hodnoty byla pak zvolena skutečná hodnota použité indukčnosti.

$$L1 = L2 = 16,3 \mu H \quad (6)$$

Dále pokračuje výpočet výstupního kapacitního filtru.

$$C_{OUT} \geq \frac{\frac{2 * P_{OUT}}{f_{LINE}}}{V_{OUT}^2 - (V_{OUT} * 0,75)^2} = \frac{\frac{2 * 2000W}{47 \text{ Hz}}}{(400V)^2 - (300V)^2} \approx 1,21mF \quad (7)$$

Pro realizaci byla použita paralelní kombinace dvou kondenzátorů 860 μ F.

$$C_{OUT} = 1,36mF \quad (8)$$

Pro použitou hodnotu kondenzátorů je pak možné vypočítat hodnotu zvlnění výstupního napětí.

$$V_{RIPPLE} = \frac{2 * P_{OUT}}{\eta} \frac{1}{V_{OUT} * 2\pi * 2f_{LINE} * C_{OUT}} = \frac{\frac{2 * 2000W}{0,90}}{400V * 2\pi * 47Hz * 1,36mF} \approx 13,8V \quad (9)$$

Pro doplnění parametrů kondenzátorů je nutné určit efektivní hodnoty proudů nízkých a vysokých frekvencí. Vysokonapěťové elektrolytické kondenzátory mají obě hodnoty uvedené v katalogovém listu.

$$I_{COUT_LF} = \frac{P_{OUT}}{\eta V_{OUT} \sqrt{2}} = \frac{2000W}{0,90 * 400V * \sqrt{2}} \approx 3,93A \quad (10)$$

$$I_{COUT_HF} = \sqrt{\left(\frac{P_{OUT}}{\eta V_{OUT}} \sqrt{\frac{16 * V_{OUT}}{6\pi * V_{IN_MIN} \sqrt{2}}} - \eta^2\right)^2 - (I_{COUT_LF})^2} =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{2000W}{0,90 * 400V} \sqrt{\frac{16 * 400V}{6\pi * 95V \sqrt{2}}} - (0,90)^2\right)^2 - (3,93)^2} \approx 6,1A \quad (11)$$

Výběr diod a MOSFET tranzistorů je založeno na výkonových požadavcích. Pro výběr součástek je potřeba určit proudy procházející těmito součástkami.

$$I_{PEAK} = \left(\frac{P_{OUT} * \sqrt{2}}{2 * V_{IN_MIN} * \eta} + \frac{\Delta I_{L1}}{2} \right) 1,2 = \left(\frac{2000W * \sqrt{2}}{2 * 95V * 0,90} + \frac{20,1A}{2} \right) 1,2 \approx 32A \quad (12)$$

Efektivní hodnota proudu přes MOSFET.

$$I_{DS} = \frac{\frac{P_{OUT}}{\eta}}{2 * V_{IN_MIN} \sqrt{2}} \sqrt{2 - \frac{16 * V_{IN_MIN} \sqrt{2}}{3 * \pi * V_{OUT}}} = \frac{\frac{300W}{0,90}}{2 * 85V \sqrt{2}} \sqrt{2 - \frac{16 * 85V \sqrt{2}}{3 * \pi * 390V}} \approx 10A \quad (13)$$

Efektivní hodnota proudu diodou.

$$I_D = \frac{P_{OUT}}{V_{OUT}} = \frac{2000W}{2 * 400V} \approx 2,5A \quad (14)$$

Dalším krokem je výpočet obvodu pro snímání proudu. Jedná se o výpočet převodu transformátoru a následného obvodu.

$$N_{CT} = \frac{N_S}{N_P} \geq \frac{I_{PEAK}}{I_{RS}} = \frac{32A}{0,1A} = 320 \quad (15)$$

Protože se transformátor s tímto převodem nevyrábí, byl vybrán a použit transformátor s převodem 500.

$$N_{CT} = 500 \quad (16)$$

Dále je vypočítán odpor pro snímání proudu za transformátorem. Hodnota V_S udává mezní hodnotu napětí na daném odporu. Konstanta 0,9 udává ztráty a činí obvod odolnější vůči šumu.

$$R_{SA} = R_{SB} = \frac{0,9 * V_S}{\frac{I_{PEAK}}{N_{CT}}} = \frac{0,9 * 3,7V * 500}{32A} \approx 52 \Omega \quad (17)$$

Byla použita standardizovaná hodnota.

$$R_S = 51 \Omega \quad (18)$$

Dále pokračuje obvod RC členem, jehož úkolem je podržet hodnotu pro vstupní pin CSx. Tento RC člen byl určen experimentálně.

$$R_{SS} = 51 \Omega, C_{SS} = 3,3nF \quad (19)$$

Nyní již zbývá určit jen hodnoty odporů a kondenzátorů sloužících k nastavování funkce PFC controlleru. V první řadě je zde odporový dělič sloužící k nastavení proudového omezení. Toto nastavení je provádí pomocí odporů R_{PK1} a R_{PK2} . Napětí V_{REF} je pevně stanoveno na 6 V a

$$R_{PK2} = \frac{V_S * R_{PK1}}{V_{REF} - V_S} = \frac{3,7V * 3,6k\Omega}{6V - 3,7V} \approx 5,8k\Omega \quad (20)$$

Také je potřeba pomocí externích součástek nastavit pracovní frekvenci a případně její přeladování při běhu filtru.

$$R_{RT} = \frac{7,5 * 10^9 \Omega * Hz}{f_s} = \frac{7,5 * 10^9 \Omega * Hz}{150 kHz} = 50 k\Omega \quad (21)$$

Hodnota odporu byla vybrána z dostupných hodnot, hodnota pracovní frekvence se tím výrazně nezměnila.

$$R_{RT} = 51k\Omega \quad (22)$$

Pomocí odporu R_{DMX} se následně nastavuje maximální hodnota PWM pracovního cyklu. Ten byl stanoven na hodnotu 0,9.

$$R_{DMX} = R_{RT} (2 * D_{MAX} - 1) = 51 k\Omega (2 * 0,9 - 1) = 40 k\Omega \quad (23)$$

Opět byla vybrána nejbližší hodnota odporu.

$$R_{DMX} = 39k\Omega \quad (24)$$

Pro snížení elektromagnetického rušení se možné nastavit kolísání pracovní frekvence a rychlost změny této frekvence. Pro realizaci tohoto filtru bylo rozmezí stanoveno na 20 kHz, což znamená, že bude frekvence kolísat od 140 kHz do 160 kHz. A rychlost změny byla stanovena na 2 kHz.

$$f_{DM} = 20\text{kHz} \quad (25)$$

$$f_{DR} = 2\text{kHz} \quad (26)$$

$$R_{RDM} = \frac{937,5 * 10^6 \Omega}{f_{DM}} = \frac{937,5 * 10^6 \Omega}{20 \text{ kHz}} = 46,8 \text{ k}\Omega \quad (27)$$

Opět byl vybrán standardizovaný rezistor.

$$R_{RDM} = 47 \text{ k}\Omega \quad (28)$$

$$C_{CDR} = \frac{0,0667 * 10^{-9} \text{F} * R_{RDM}}{f_{RD}} = \frac{0,0667 * 10^{-9} \text{F} * 47\text{k}\Omega}{2\text{kHz}} = 1,57 \text{ nF} \quad (29)$$

Hodnota kondenzátoru byla vybrána z běžně dostupných hodnot.

$$C_{DRC} = 1,5 \text{ nF} \quad (30)$$

Protože PFC controller potřebuje snímat hodnotu vstupního a výstupního napětí, je potřeba mu navrhnout vhodný odporový dělič. Podmínkou je, aby bylo při maximálním napětí na vstupech VSENCE a VINAC napětí 3 V, což je polovina referenčního napětí. Nejsnazším postupem bylo jeden odpor si zvolit a druhý dopočítat.

$$R_A = 3M\Omega \quad (31)$$

$$R_B = \frac{\frac{V_{REF}}{2} * R_A}{V_{OUT} - \frac{V_{REF}}{2}} = \frac{3V * 3M\Omega}{400V - 3V} \approx 22,5 k\Omega \quad (32)$$

Vypočtená hodnota byla dostatečně blízká reálné hodnotě rezistoru, takže skutečné výstupní napětí nebude příliš rozdílné.

$$R_B = 22 k\Omega \quad (32)$$

Ze známých hodnot odporového děliče je možné zpětně vypočítat velikost výstupního napětí, které bude skutečně na výstupu aktivního PFC filtru.

$$V_{OPV} = 3,18V \frac{R_A + R_B}{R_B} = 3,18V \frac{3M\Omega + 22k\Omega}{22k\Omega} \approx 435V \quad (32)$$

Protože je pro řízení napěťové smyčky stejné metody jako by se jednalo o jednofázový systém, je potřeba napěťovou smyčku kompenzovat. K této kompenzaci se využívá vnitřní napěťový zesilovač chyby, jehož výstup je vyveden na pin controlleru a tím pádem je možné jej ovlivnit. Na vstupy zesilovače je přivedena reference 3V a vstup z napěťového snímače VSENCE.

Zesílení napěťového zesilovače:

$$g_{mV} = 70\mu S \quad (33)$$

Zesílení zpětné vazby napěťového děliče:

$$H = \frac{V_{VREF}}{V_{OUT}} = \frac{3V}{400V} \approx 0,0075 \quad (34)$$

Doporučená efektivní výstupní hodnota napěťového zesilovače:

$$\Delta V_{AO} = 3,2V \quad (35)$$

Změnou výstupní impedance je možné snížit zvlnění výstupního napětí až na 3%, čehož se dosáhne připojením zpětnovazebního kondenzátoru.

$$Z_0 = \frac{\Delta V_{AO} * 0,03}{V_{RIPPLE} * H * g_{mV}} = \frac{3,2V * 0,03}{13,8V * 0,0075 * 70\mu S} \approx 13,2 \text{ k}\Omega \quad (36)$$

$$C_{PV} = \frac{1}{2\pi * 2 * f_{LINE} * Z_0} = \frac{1}{2\pi * 2 * 47Hz * 12,3k\Omega} \approx 128 \text{ nF} \quad (37)$$

Pro řešení vybrán dostupný kondenzátor.

$$C_{PV} = 120\text{nF} \quad (38)$$

Pro zjištění nejvyšší možné frekvence křížení napěťové smyčky je potřeba spočítat následující vzorec.

$$f_{CV} = \sqrt{H * gm_V * \frac{P_{OUT}}{\Delta V_{AO}} * \frac{1}{j * 2\pi * C_{OUT}} * \frac{1}{V_{OUT}} * \frac{1}{2 * \pi * C_{PV}}} =$$

$$= \sqrt{0,0075 * 70\mu S * \frac{2000W}{0,90}} * \frac{1}{3,2V} * \frac{1}{2 * \pi * 1,36nF * 400V} * \frac{1}{2 * \pi * 120nF} \approx 11,5Hz$$

(39)

Podle zjištěné frekvence bylo možné dopočítat hodnotu kompenzačního odporu a vybrat vhodnou dostupnou velikost.

$$R_{ZV} = \frac{1}{2\pi * f_{CV} * C_{PV}} = \frac{1}{2\pi * 11,5 Hz * 120nF} \approx 108 k\Omega$$

(40)

$$R_{ZV} = 100 k\Omega$$

(41)

Napěťový kompenzační kondenzátor CZV byl použit pro zvýšení stejnosměrného zisku napěťové smyčky.

$$C_{ZV} = \frac{1}{2\pi * \frac{f_{CV}}{10} * R_{ZV}} = \frac{1}{2\pi * \frac{11,5Hz}{10} * 100k\Omega} \approx 1,38 \mu F$$

(42)

$$C_{ZV} = 1,5 \mu F$$

(43)

Kromě korekce napěťové smyčky má vybraný PFC controller i korekci proudovou a to pro každou fázi samostatnou. Nejprve bylo potřeba určit odpor pro proudový systezátor.

$$R_{SYN} = \frac{N_{CT} * L1_{MAX} \frac{R_B}{R_A + R_B}}{R_S * 0,1nF} = \frac{500 * 350\mu H * \frac{22k\Omega}{3M\Omega + 22k\Omega}}{51\Omega * 0,1nF} \approx 11,6 k\Omega \quad (44)$$

$$R_{SYN} = 11 k\Omega \quad (45)$$

Pro výpočet kompenzačních obvodů bylo nejprve potřeba definovat referenční hodnotu napětí určením odporu R_{IMO} připojeného na pin IMO.

$$I_{IMO} = \frac{17 * 10^{-6}A * V_{INAC} (V_{VAOMAX} - 1V)}{K_{VFF}} = \frac{17 * 10^{-6}A * 2,25V (5V - 1V)}{2,922V^2} \approx 52 \mu A \quad (46)$$

$$V_1 = \frac{2,25V * (R_A + R_B)}{R_B * \sqrt{2}} = \frac{2,25V * (3M\Omega + 22k\Omega)}{22k\Omega * \sqrt{2}} \approx 217 V \quad (47)$$

$$V_2 = \frac{1,1 * P_{OUT} * \sqrt{2}}{2 * \eta * V1} * \frac{1}{N_{CT}} * R_S = \frac{1,1 * 2000W\sqrt{2}}{0,9 * 217V} * \frac{1}{500} * 51\Omega \approx 0,8 V \quad (48)$$

$$R_{IMO} = \frac{V_2}{I_{IMO}} = \frac{0,8V}{52\mu A} \approx 15,4 k\Omega \quad (49)$$

$$R_{IMO} = 16,5 k\Omega \quad (50)$$

Pro výpočet součástí pro proudovou korekci bylo nejprve potřeba vypočítat zisk proudové smyčky a díky známému zisku proudového zesilovače g_{m_c} bylo možné zjistit i velikosti externích odporů a kondenzátorů.

$$G_{PSC} = \frac{V_{OUT} * R_S * \frac{1}{N_{CT}}}{2\pi * \frac{f_S}{10} * L1 * V_{RAMP}} = \frac{400V * 51\Omega * \frac{1}{500}}{2\pi * \frac{150kHz}{10} * 16,3\mu H * 4,0V} \approx 6,6 \quad (51)$$

$$g_{mC} = 100\mu S \quad (52)$$

$$R_{ZC1} = R_{ZC2} = \frac{1}{g_{mC} * G_{PSC}} = \frac{1}{100\mu S * 6,6} = 1,5 \text{ k}\Omega \quad (53)$$

$$C_{ZC1} = C_{ZC2} = \frac{1}{2\pi * \frac{f_S}{10} * R_{ZC}} = \frac{1}{2\pi * \frac{150kHz}{10} * 1,5k\Omega} \approx 7 \text{ nF} \quad (54)$$

$$C_{PC1} = C_{PC2} = \frac{1}{2\pi * \frac{f_S}{2} * R_{ZC}} = \frac{1}{2\pi * \frac{150kHz}{2} * 1,5k\Omega} \approx 1,4 \text{ nF} \quad (55)$$

Podle vypočtených hodnot byly vybrány vhodné dostupné součástky.

$$R_{ZC1} = 1,5 \text{ k}, C_{ZC1} 6,8 \text{ nF}, C_{PC1} = 1,5 \text{ nF} \quad (56)$$

Vzhledem k vysokému výkonu, bylo potřeba omezit velikosti proudů při startu. Obvod podporoval funkci soft start, takže stačilo dopočítat externí součástky. Podmínkou možnosti kontrolovat funkci soft start je dodržení velikosti kondenzátoru C_{SS} .

$$t_{SSMIN} = \frac{2,25V * C_{ZV}}{10\mu A} = \frac{2,25V * 1,5\mu F}{10\mu A} \approx 338ms \quad (56)$$

$$C_{SS} \geq C_{ZV} \quad (57)$$

$$C_{SS} = \frac{10\mu A * t_{SS}}{2,25V} = \frac{10\mu A * 338ms}{2,25V} \approx 1,5 \mu F \quad (58)$$

$$C_{SS} = C_{ZV} = 1,5\mu F \quad (59)$$

Aktivní filtr PFC pro spínané zdroje do výkonu 2kW

Ondřej Sýkora

Mimo těchto součástí byl navrhovaný aktivní PFC filtr doplněn o můstkový usměrňovač a vstupní síťový filtr. Síťový filtr byl složen z indukčnosti 2×1 mH, kondenzátoru typu X velikosti $0,1 \mu\text{F}$ a dvou kondenzátorů typu Y velikosti 22nF .

4 Zpracování funkčního vzorku

Když byly všechny součástky vybrány a vypočítány, bylo vytvořeno schéma zapojení celého obvodu. Po navržení schématu nic nebránilo návrhu samotné desky. Při navrhování desky bylo nutné dodržet umístění namáhaných součástek u okraje desky, aby byly dobře dostupné při instalaci chladičů. Dále bylo nutné, aby byly cesty, kterými prochází velký proud, měli dostatečný průřez.

Při dodržení základních podmínek byla deska navržena a odeslána k výrobě. Současně s tím byly objednány chybějící součástky.

Když byla deska hotová a součástky kompletní, bylo na čase desku zkompletovat a oživit. Oživování však neprobíhalo příliš úspěšně a doposud nebylo dosaženo uspokojivých parametrů, které by mělo smysl měřit.

Během oživování bylo dosaženo spínání tranzistorů i výstupního napětí blízkého 400 V, ale při nadměrně vysokém proudovém odběru.

5 Závěr

V dnešní době není potřeba řešit, zda PFC filtry použít nebo nepoužít. Normy týkající se této problematiky jasně stanovují, jaká zařízení je třeba opatřit PFC filtry a které ne. Navíc lze očekávat další zpřísnování těchto norem, díky čemuž tuto budou do této povinnosti zahrnuta i zařízení nižších příkonů.

Co se týče účinnosti různých filtrů, vše bylo popsáno výše. Aktivní PFC filtry jsou oproti pasivním účinnější, ale o to složitější. Na trhu sice existují součástky, které pokryjí většinu řízení jen s minimem součástek, ale přesto je návrh složitější a dražší. Proto je vhodné si před samotným návrhem a říci, zda pro naše zařízení nepostačí třeba pasivní filtr.

Pro zařízení vyšších výkonů, která požadují minimální zvlnění a maximální omezení vyšších harmonických proudů je volba jasná, tímto případem byl i aktivní filtr, řešený v rámci této diplomové práce. Jak je možné si odhadnou při pohledu na výpočty, jedná se o zdlouhavou práci, zvláště pokud se jedná o návrh prvního filtru s určitým PFC controllerem.

Vzhledem k faktu, že zatím nebylo zařízení plně v provozu, není možné zde zhodnotit jeho parametry a tím i vhodnost jeho realizace.

6 Použitá literatura

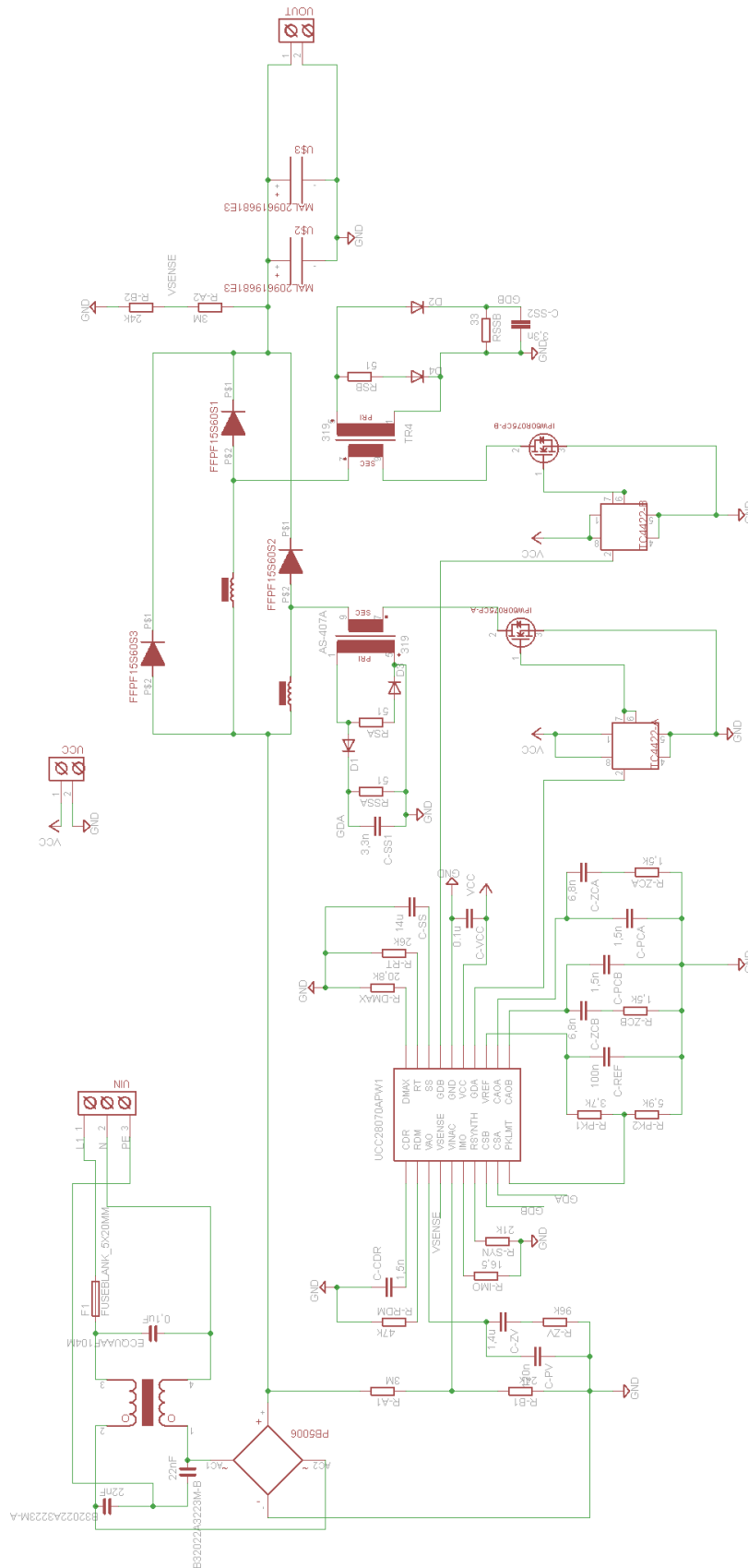
- [1] Wood Peter: *Bridgemes boost converter with PFC circuit*, Rolling Hill, Estates, 2006
- [2] Ta-yung Yang, Chern-Lin Chen, Jenn-yu G. Lin: *Discontinuous mode PFC controller having a power saving modulator and operation method thereof*, Systém General Corp, Taipei hssien, Taiwan, 2004
- [3] Pressman A. I., Billings K., Morey T.: *Switching power supply design*, McGraw-Hill Professional, 2008, 3rd edition, ISBN 978-0-07-159432-5
- [4] ON Semiconductor: *Power Factor Correction (PFC) Handbook*, Literature distribution center, Denver, Colorado, 2011
- [5] Matejov Michal: *Pasivní PFC filtry pro spínané napájecí zdroje*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektroniky a komunikačních technologií, 2008. 78 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Drápela, Ph.D.
- [6] O'Loughlin: *UCC28070 300W Interleaved PFC Pre-Regulator Design Review*, Texas Instruments, 2010
- [7] *UCC28070 Data Sheet*, Texas Instruments Literature Number [SLUS794](#), <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/ucc28070.pdf>
- [8] Internetový obchod Farnell dostupný na [<www.farnell.com>](http://www.farnell.com)

Aktivní filtr PFC pro spínané zdroje do výkonu 2kW

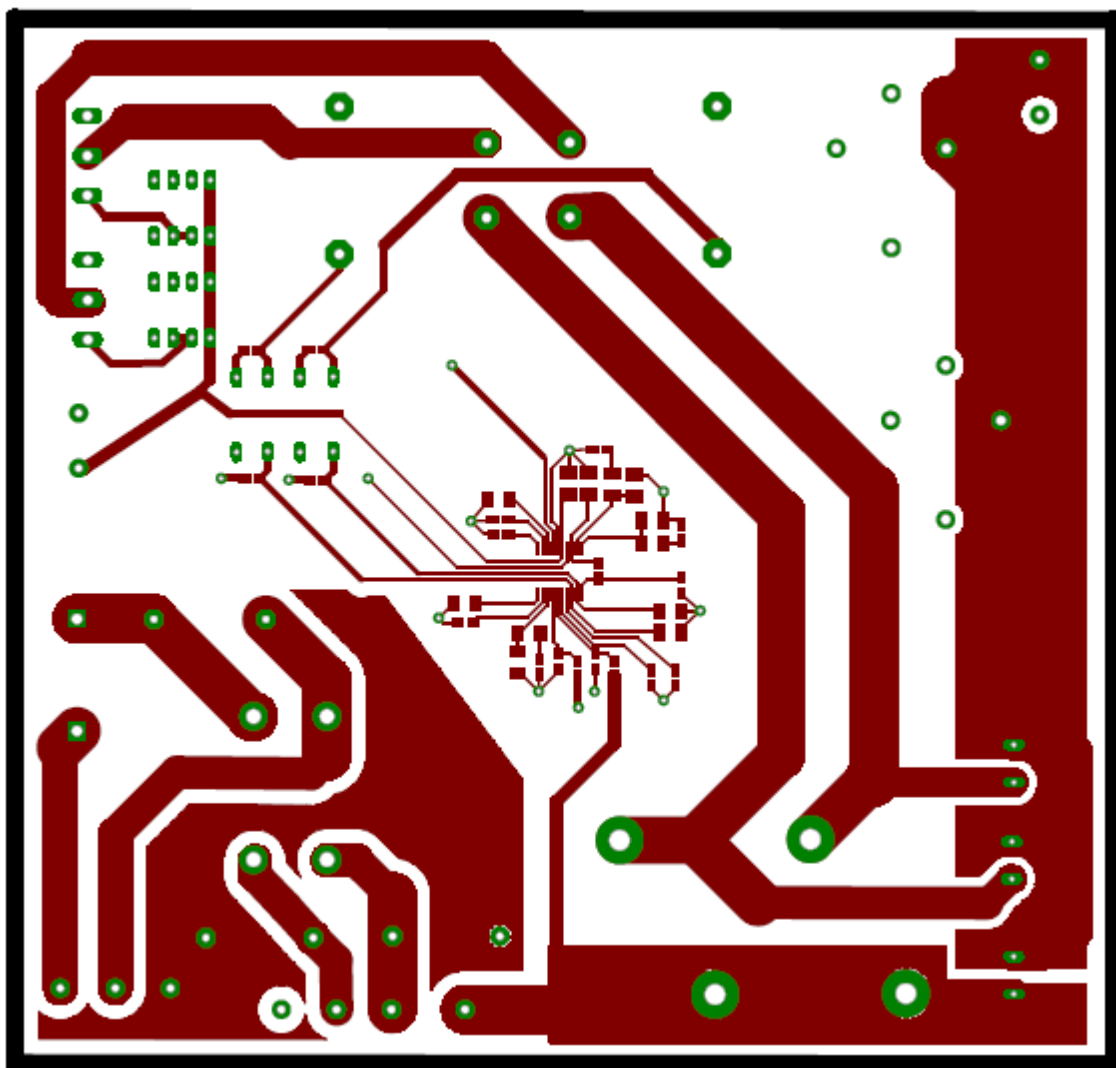
Ondřej Sýkora

Přílohy

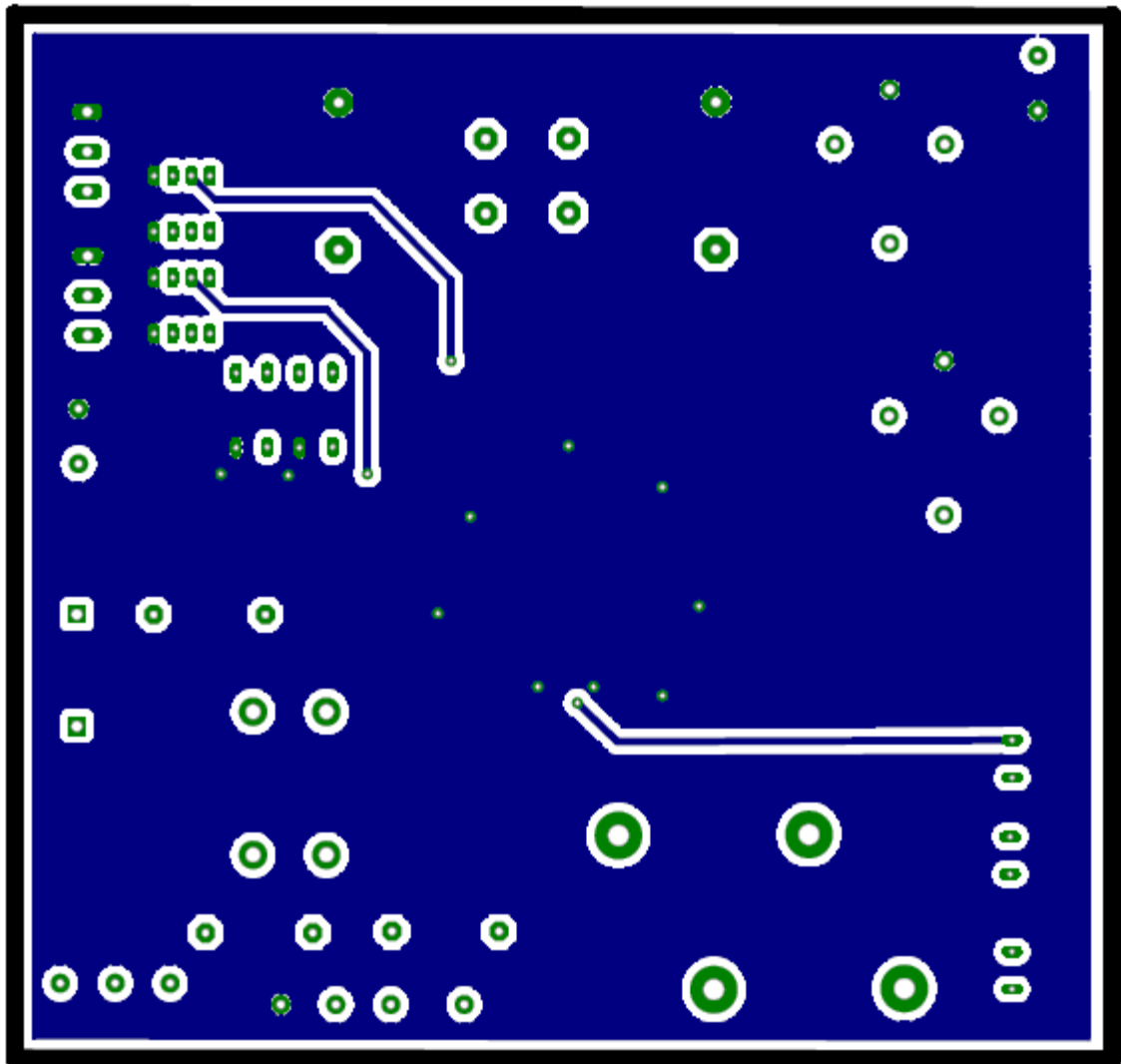
Příloha A – Schéma zapojení obvodu



Příloha B – Pohled na desku plošného spoje ze strany součástek



Příloha C – Pohled na desku plošného spoje ze spodní strany



Příloha D – Osazovací schéma součástek

