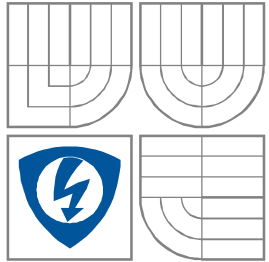


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TEORETICKÉ A EXPERIMENTÁLNÍ
ELEKTROTECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT THEORETICAL AND EXPERIMENTAL ELECTRICAL
ENGINEERING

Řízení odběru výkonu nekonvenčních zdrojů energie POWER ELECTRONIC MANAGEMENT OF UNCONVENTIONAL ENERGY GENERATORS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Karel Sládek

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Fiala, Ph.D.

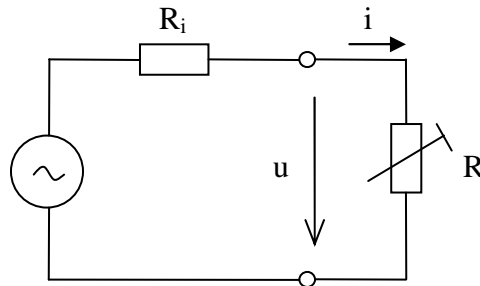
BRNO, 2008

Obsah:

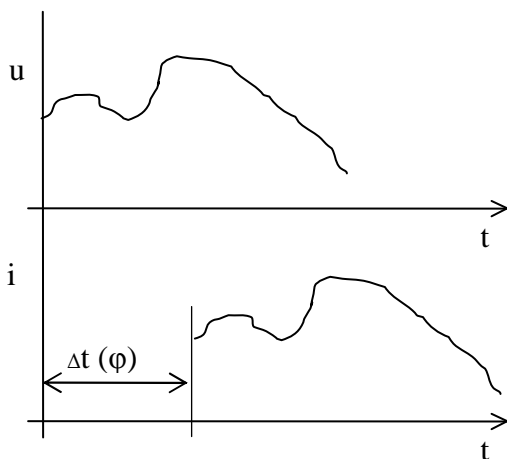
1. ÚVOD.....	4
2. ZDROJE S OBVODY PFC.....	6
2.1 PASIVNÍ PFC.....	8
2.2 NÍZKOFREKVENČNÍ AKTIVNÍ PFC.....	14
2.3 VYSOKOFREKVENČNÍ AKTIVNÍ PFC.....	17
2.3.1 Spínané měniče druhého řádu.....	17
2.3.2 Spínané měniče vyšších řádů.....	21
3. VYUŽITÍ KONKRÉTNÍCH OBVODŮ.....	22
3.1 BLOKOVÉ SCHÉMA.....	22
3.2 POPIS ZAPOJENÍ:.....	23
3.3 POPIS FUNKCE:.....	23
3.3 SCHÉMA MĚŘENÉHO OBVODU.....	24
4. INDIVIDUÁLNÍ NÁVRH OBVODU.....	27
4.1 SCHÉMA A JEHO POPIS.....	27
4.2 VÝSLEDKY SIMULACE.....	28
4.3 ZHODNOCENÍ.....	30
5. OBVOD PRO MALÝ VÝKON.....	30
5.1 ZAPOJENÍ S VYUŽITÍM VSTUPU CONTROL.....	30
5.2 ZAPOJENÍ S VYUŽITÍM VSTUPU RESET.....	31
6. ZÁVĚR.....	33
7. POUŽITÁ LITERATURA.....	34
8. SEZNAM OBRÁZKŮ.....	35
9. PŘÍLOHY.....	36

1. Úvod

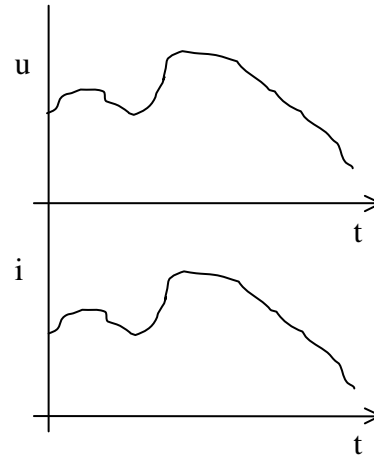
Odebírání výkonu z nekonvenčních zdrojů může být dosti problematické. Z charakteristik a ze schématu je patrné, že přímé odebírání výkonu ze zdroje by bylo dosti neefektivní. Navíc je zdrojem snímač vibrací, který je schopen dodávat jen relativně velmi malé množství energie. Hlavním problémem je velký vnitřní odpor zdroje $R_i \gg 0$ a posun fáze napětí a proudu.



Obr. 1 Základní schéma



Obr. 2 Výstupní charakteristiky zdroje



Obr. 3 Požadovaná charakteristika

Množství přeneseného výkonu ze zdroje do spotřebiče můžeme vyjádřit poměrem činného P a zdánlivého S výkonu. Tento poměr se nazývá účinník (power factor), značí se $\cos\varphi$ (příp. PF), nabývá hodnot 0-1 a vyjadřuje jak moc je průběh proudu zkreslený oproti napětí a jak moc jsou vzájemně fázově posunuty (pokud jsou ve fázi a mají sinusový průběh je $\cos\varphi = 1$). Účinník je mírou využití výkonu zdroje spotřebičem elektrické energie.

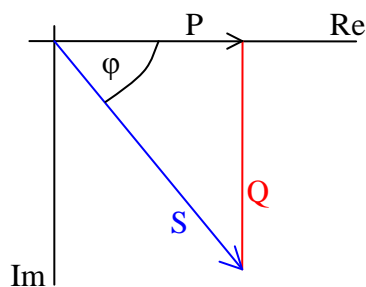
$$\cos\varphi = \frac{P}{S} \quad (1)$$

$$S = P + jQ \quad (2)$$

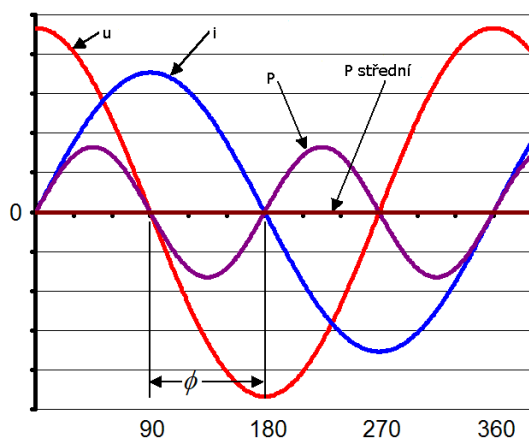
$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (3)$$

Při odebírání nesinusového průběhu se navíc uplatňuje deformační výkon D .

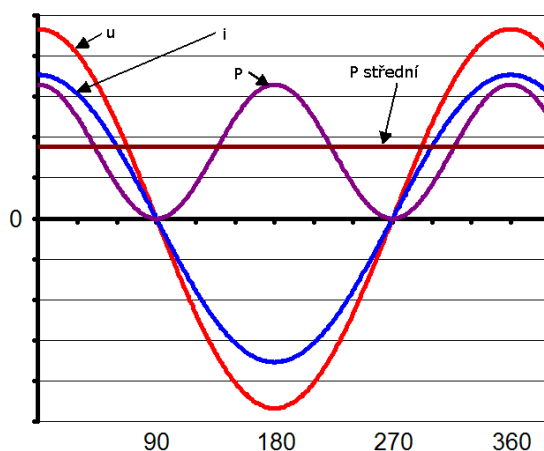
$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (4)$$



Obr. 4 Vektorový diagram (platí pro sinusové průběhy)



Obr. 5 Průběhy napětí a proudu jsou vzájemně posunuty o 90° , $\cos \phi = 0$; střední výkon je nulový [1]



Obr. 6 Napětí a prou jsou ve fázi, $\cos \phi = 1$; střední výkon je maximální [1]

V obvodech s čistě rezistivními součástkami je proud a napětí neustále ve fázi. Pokud ale máme kapacitní, nebo induktivní zátěž, dochází na ní k posunu o úhel ϕ . Se zvětšujícím se posunem roste podíl jalového výkonu, který není spotřebován k práci na zátěži a přispívá ke ztrátám na vedení a na vnitřním odporu zdroje. S rostoucím ϕ klesá účinnost a podíl činného výkonu, proud však neklesá. Tento problém je velmi vážný například pokud máme velkou induktivní zátěž (výkonné elektromotory, nebo transformátory) a nekompenzujeme jejich odběr. Zdroj a vedení musí být dosti předimenzované – na mnohem větší výkon, než je činný výkon motorů. Velká část přenášené energie je jen jalový výkon který zvyšuje náklady na výrobu a transport pro jejího dodavatele.

Většinou je možné, (velmi často však nutné) použít PFC – power factor correction. Obvod PFC zajišťuje, že spotřebič bude ze zdroje odebírat proud ve fázi s napětím a také že jejich průběhy budou blízké sinusovému průběhu. Právě nesinusový odběr proudu bývá problém při použití

usměrňovačů, některých druhů osvětlení (zářivky), elektrických pecí a spínaných zdrojů. Důvod, proč mají v ČR od roku 2001 prakticky všechny na trh nově uvedené zdroje PFC, je ten, aby splňovaly platné normy EMC (elektromagnetické kompatibility). Zdroj bez PFC způsobuje významné rušení rozvodné sítě (implementace PFC do zdroje není povinná, ale normy EMC jsou tak přísné, že použití PFC je nejvýhodnější způsob jak tyto normy splnit) [2].

Existují 2 základní typy PFC – pasivní a aktivní. Pasivní PFC je vlastně jen přidání tlumivky na vstup. Výsledkem je sice stále impulsní proud, ale více se podobá harmonickému průběhu. Nejjednodušší aktivní PFC je tvořeno cívkou a řízeným tranzistorem, čímž se dá dosáhnout prakticky „čistě“ sinusový odběr proudu (nevýhodou ale je větší rušení v oblasti vysokých frekvencí). Evropská norma EN61000-3-2 nařizuje použití alespoň pasivního PFC pro spínané zdroje s výkonem vyšším, než 75W [2]. Porovnání obvodů PFC:

Pasivní PF = 0,7 – je velký a těžký, použitelný pro výkony do 500W; jednoduchý obvod – spolehlivější, robustnější a levnější.

Aktivní nízko frekvenční PF = 0,95 do 1000W, potřeba velké cívky, Výstupní napětí je říditelné. Ruší síť vyššími harmonickými nižších řádů.

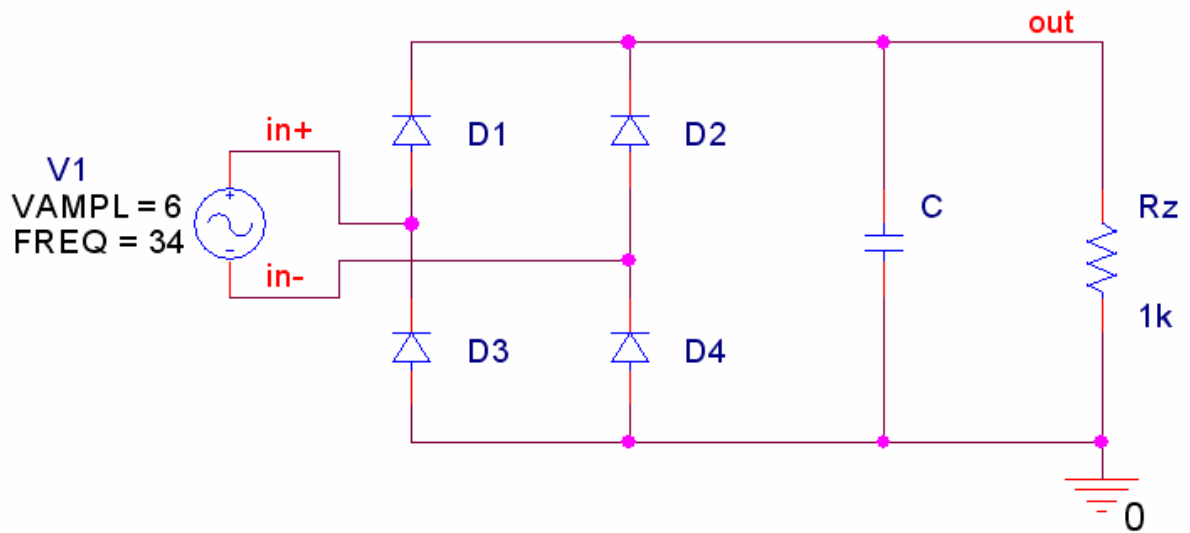
Aktivní VF PF = 0,99 obvod je malý, lehký, je schopny práce ve velkém rozsahu vstupního napětí a frekvencí. Frekvence mnohonásobně vyšší, než síťová. Problémem je elektromagnetické rušení (EMI) VF proudem.

Nevýhody PFC: obvod spotřebuje část energie, snižuje tím celkovou účinnost, zvyšuje složitost obvodu, tím snižuje spolehlivost, zvyšuje cenu a často i rozměry a hmotnost zdroje. Vyšší harmonické složky způsobují ztráty a přehřívání transformátorů Zrychlují stárnutí součástek a tím snižují jejich spolehlivost. Zvyšují proudy nulovým vodičem tří fázového systému, což zvyšuje jeho zahřívání a může vést k nežádoucímu vypínání jističů. Může dojít až k oscilacím a proražením izolace vodičů, nebo kondenzátorů. Zkreslují průběh síťového napětí a tím mohou rušit jiné přístroje citlivé na jeho tvar. Může dojít k rušení telefonů, měřících přístrojů, nebo zvýšení audio šumu.

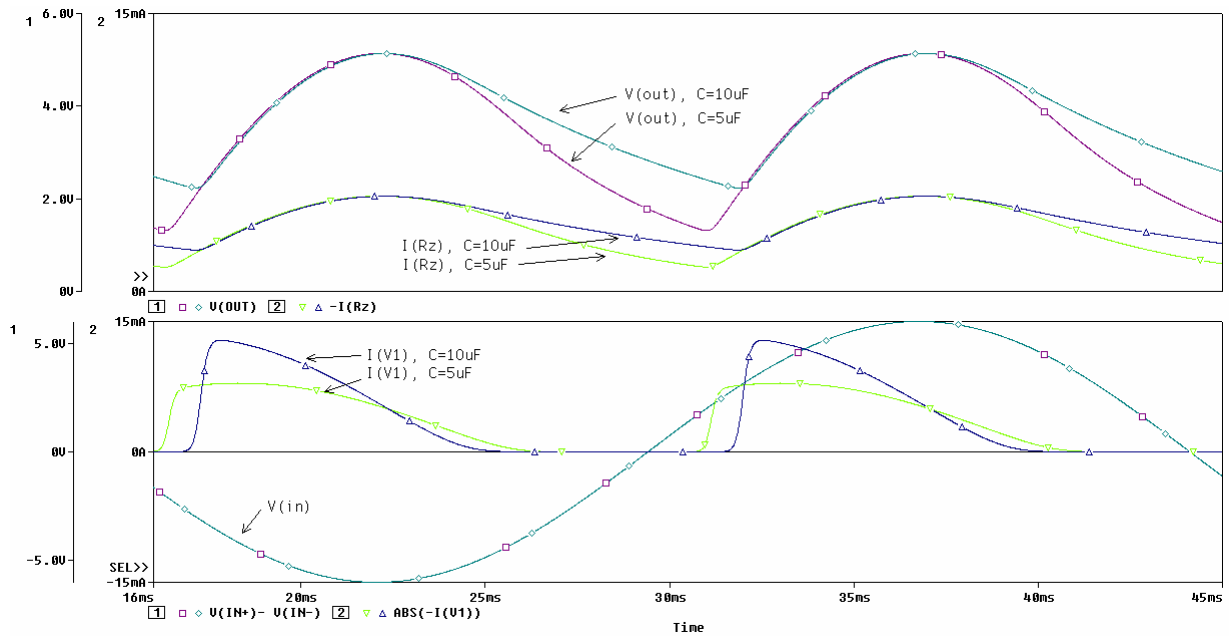
2. Zdroje s obvodem PFC

Jak již bylo řečeno, můstkový usměrňovač (*Obr. 7*) má nesinusový proudový odběr. To proto, že většina spotřebičů vyžaduje málo zvlněné napájecí napětí, čehož se dosahuje použitím velkých výstupních filtračních kondenzátorů. Kondenzátor se nabíjí jen ve chvíli, kdy je okamžitá hodnota vstupního napětí vyšší, než součet napětí kondenzátoru a úbytku na diodě. Výsledkem jsou úzké proudové impulsy obsahující mnoho harmonických.

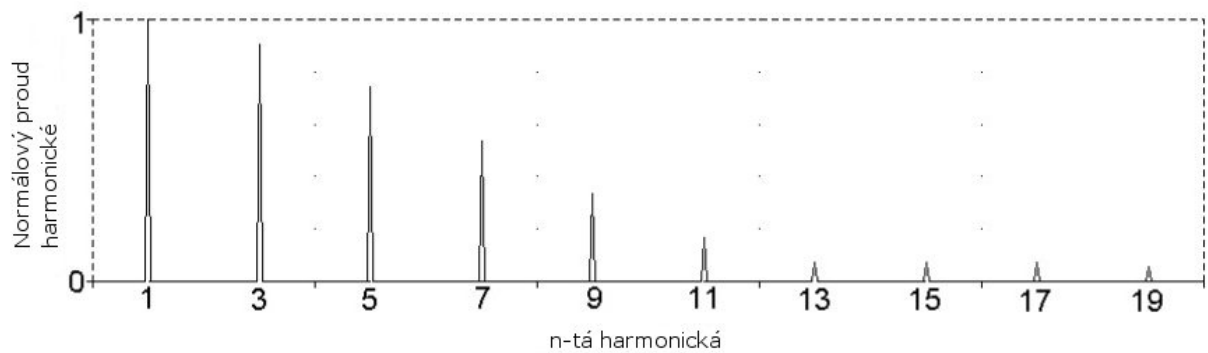
Nejjednodušší cestou pro zlepšení průběhu proudu je použití menšího filtračního kondenzátoru. Výstupní napětí bude více zvlněné a proudové impulsy se prodlouží, viz. průběhy na *Obr. 8*. Toto řešení je ale možné jen pokud spotřebiči nevdají pulsní napětí (např. ruční nářadí). Tvar průběhu proudu závisí samozřejmě také na charakteru zátěže.



Obr. 7 Schéma můstkového usměřovače s vyhlazovacím filtrem



Obr. 8 průběhy U a I usměřovače s vyhlazovacím filtrem



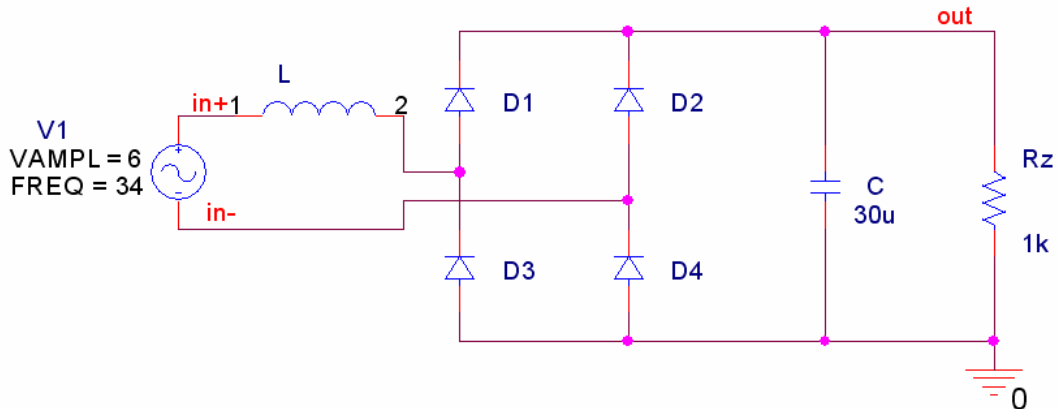
Obr. 9 Zastoupení jednotlivých harmonických na vstupu můstkového usměřovače

Vysvětlení k popisu následujících obrázků:

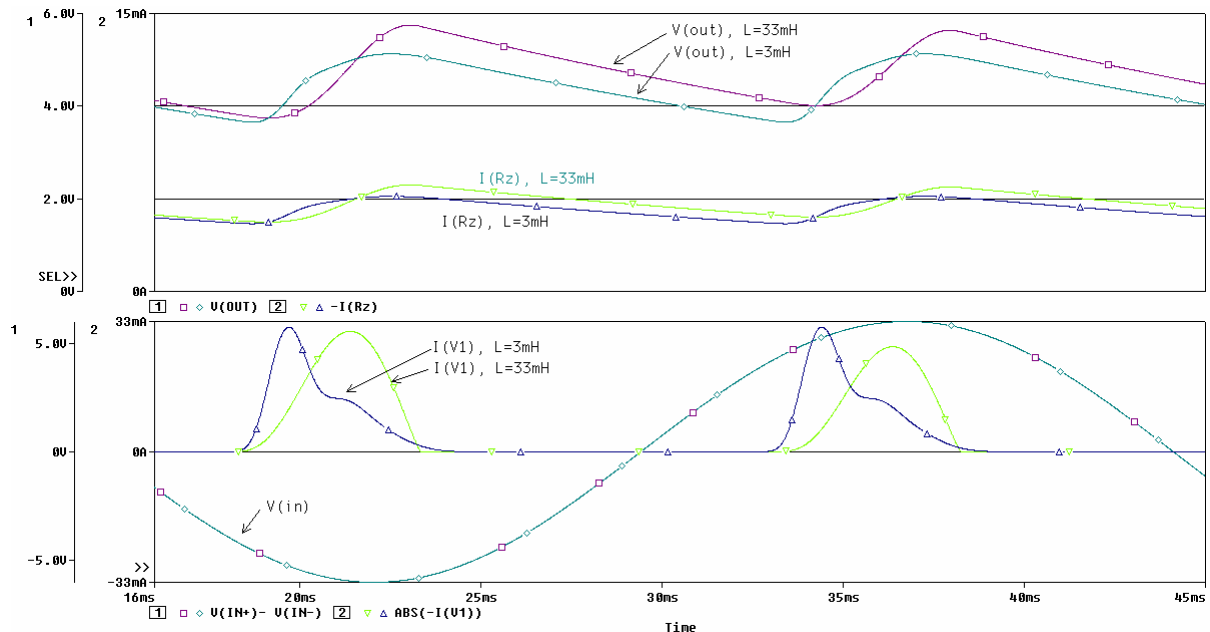
THD = Total harmonic distortion – maximální úroveň harmonického zkreslení (v %) je dána normou podle spotřeby přístroje. Kp = purity factor of the line current – pokud je proud čistě sinusový, je Kp = 1 a klesá s rostoucím podílem vyšších harmonických.

2.1 Pasivní PFC

Metoda pasivního PFC využívá další pasivní součástky ve spojení s můstkovým usměrňovačem. Nejjednodušším zapojením je sériové připojení cívky před usměrňovač. Můžeme dosáhnout účinnku maximálně 0,76 a podstatně nižšího zvlnění, než při zmenšení C_f.



Obr. 10 Schéma jednoduchého PFC – sériové zapojení cívky před usměrňovač

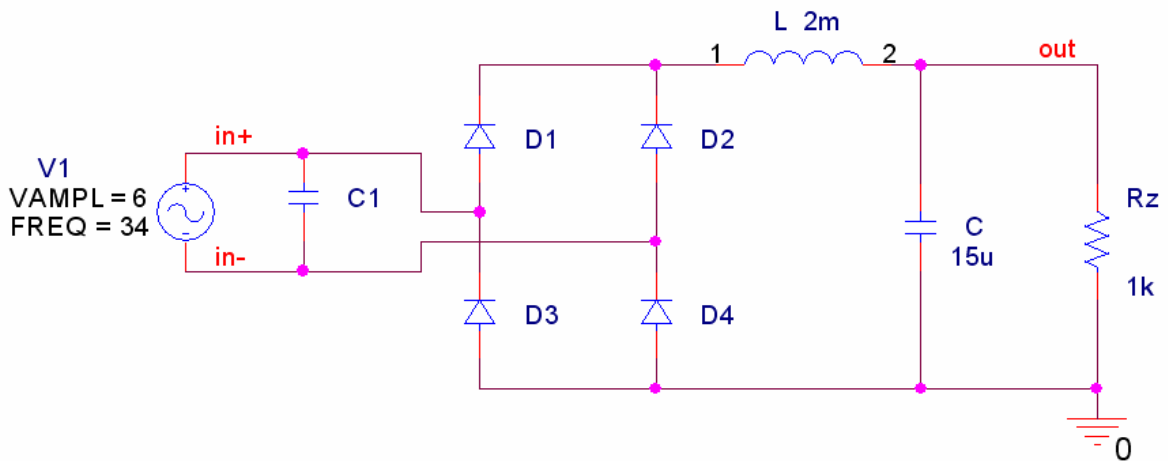


Obr. 11 Průběhy napětí a proudu - sériové zapojení cívky před usměrňovač

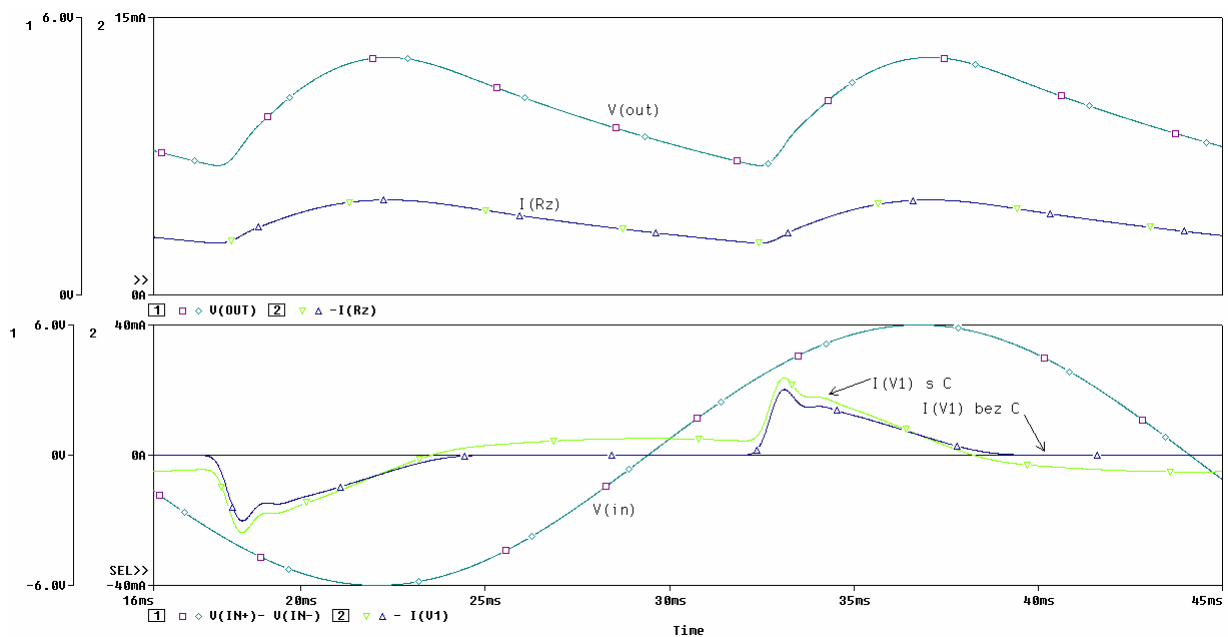
Cívka může být také umístěna až za usměrňovač, proud cívkou je pro vysoké hodnoty indukčnosti stálý. Teoreticky, v případě nekonečně velké indukčnosti, by byl proud konstantní a výsledkem by tedy byl účinnk $PF = 0,9$. Abychom se alespoň přiblížili tomuto stavu, museli bychom použít velmi velkou cívku s indukčností alespoň 1H. Účinnk však můžeme zvýši použitím kondenzátoru C_a který pomáhá kompenzovat fázový posun. Tímto zapojením můžeme dosáhnout:

s C_a: $Kp=0,905$; $\cos\varphi=0,999$; $PF=0,904$
 bez C_a: $Kp=0,897$; $\cos\varphi=0,935$; $PF=0,839$

[3]



Obr. 12 Schéma jednoduchého PFC – cívka za usměrňovačem

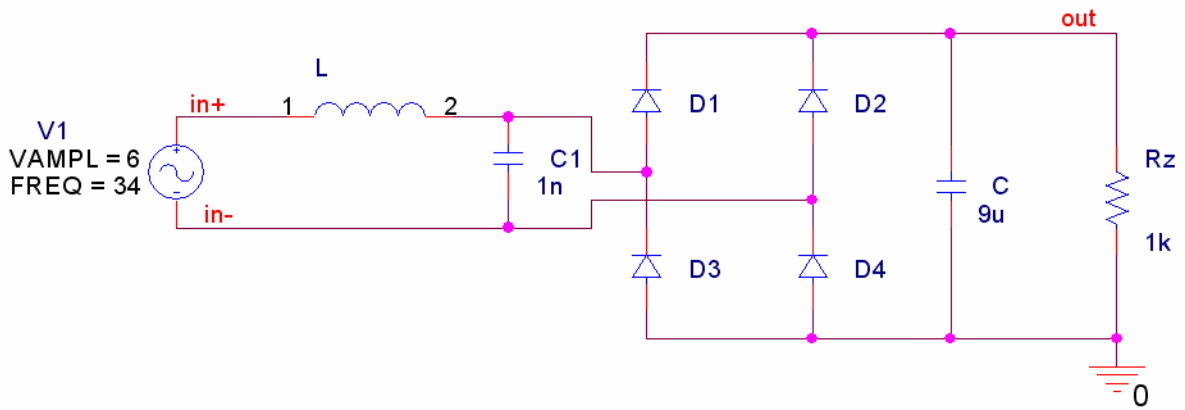


Obr. 13 Průběhy napětí a proudu – cívka za usměrňovačem

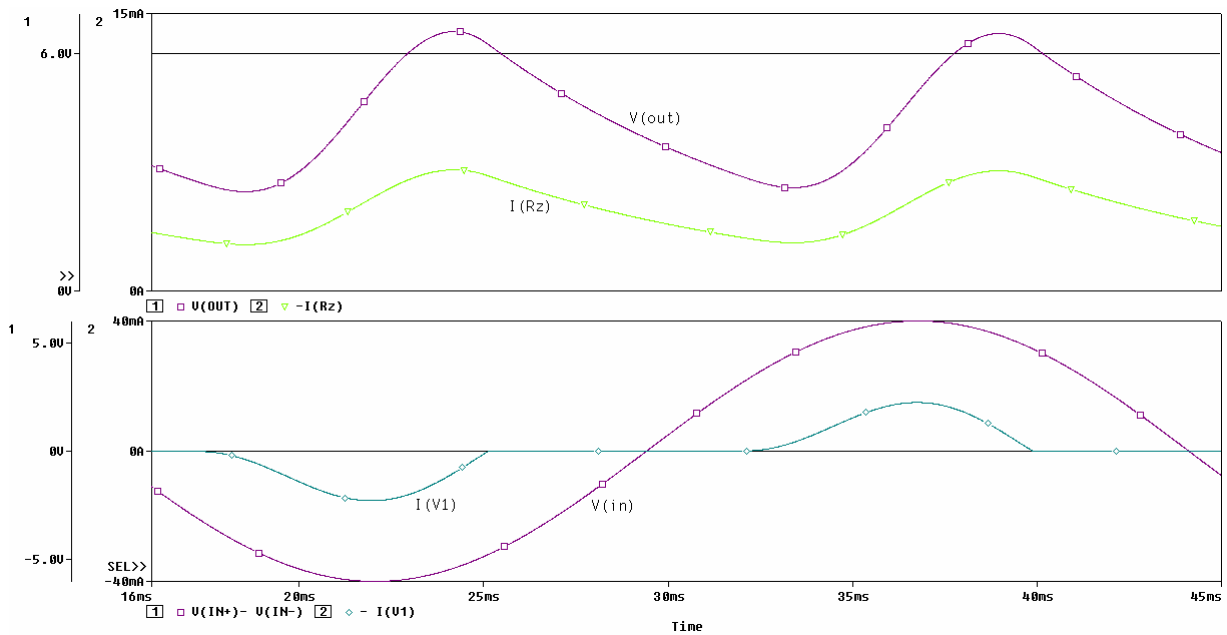
Průběh proudu můžeme dále vylepšovat použitím dolních propustí. Existují i různé rezonanční obvody pro potlačení harmonických. Například sériová dolní propust nalaďená na síťovou frekvenci. Toto zapojení je vhodné spíše pro vyšší síťové frekvence.

$K_p=0,993$; $\cos\varphi=0,976$; $PF=0,969$

[3]

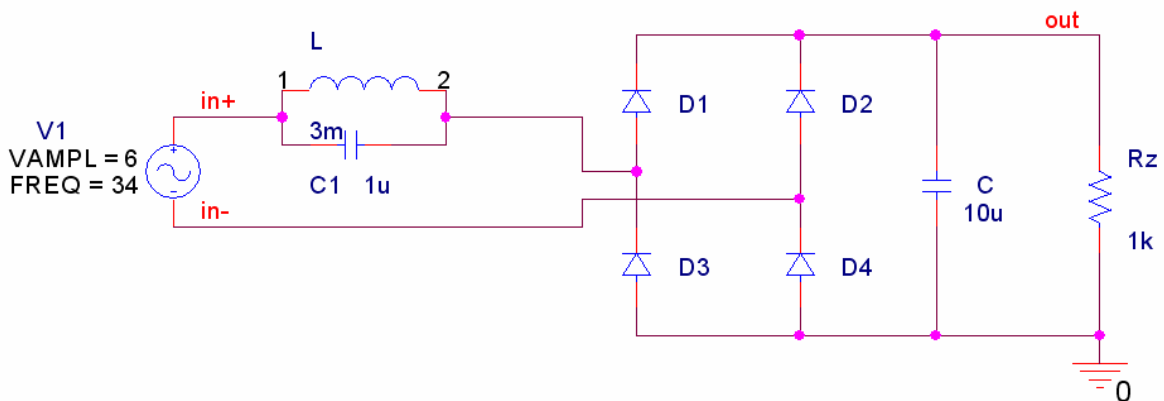


Obr. 14 Schéma usměřňovače se sériovou dolní propustí na vstupu

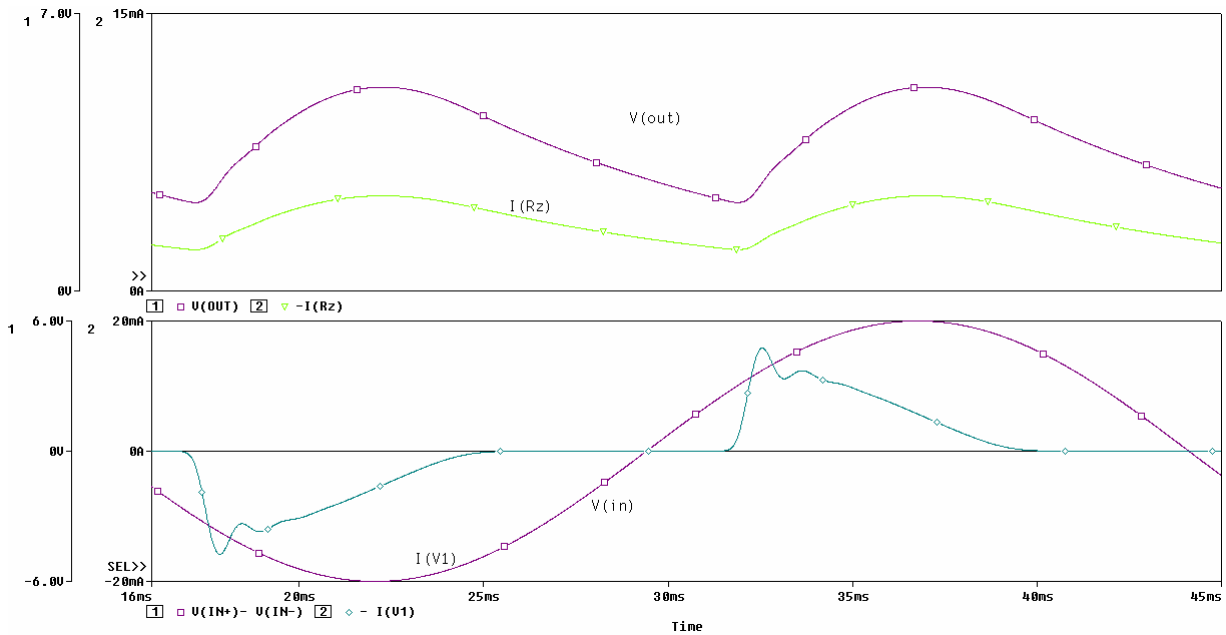


Obr. 15 Průběhy napětí a proudu - usměřňovače se sériovou dolní propustí na vstupu

Obvod můžeme řešit také pomocí paralelních rezonančních pásmových zadržů. Filtr je naladěn na 3. harmonickou, zapojení je vhodné pro menší hodnoty zatěžovací impedance, než v případě sériové dolní propusti. $K_p=0,919$; $\text{Cos}\varphi=0,999$; $\text{PF}=0,918$ [3]

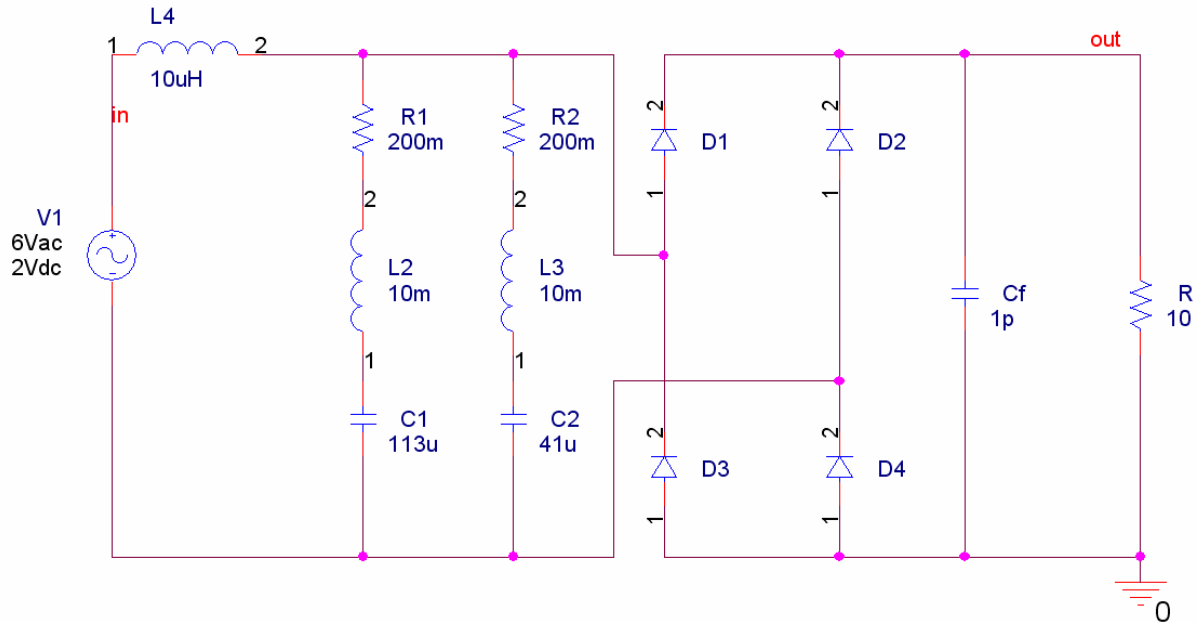


Obr. 16 Schéma usměřňovače s paralelní rezonanční pásmovou zadrží na vstupu

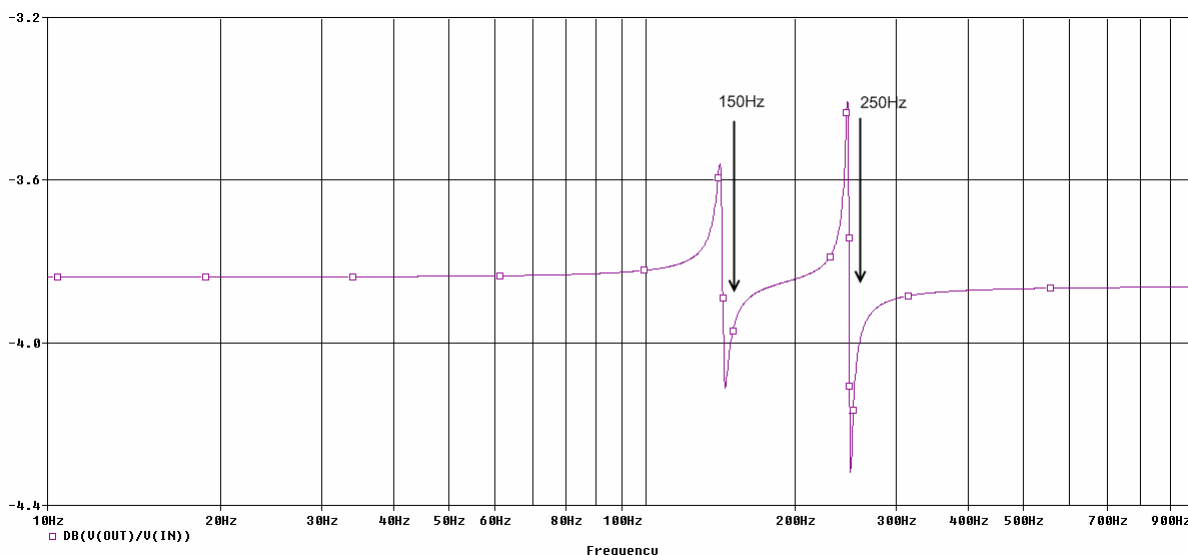


Obr. 17 Průběhy napětí a proudu - paralelní rezonanční pásmová zádržní na vstupu

Další možností je použití filtru vyšších harmonických sestávajícího ze série rezonančních obvodů připojených paralelně k neusměrněnému vstupu a naladěných na harmonické, které je potřeba utlumit. Například na následujícím obrázku máme filtr potlačující 3. a 5. harmonickou. Výsledný průběh proudu je velmi dobrý, téměř sinusový. Daní za to je však větší složitost obvodu. $K_p=0,999$; $\cos\varphi=0,999$; $PF=0,998$ [3]

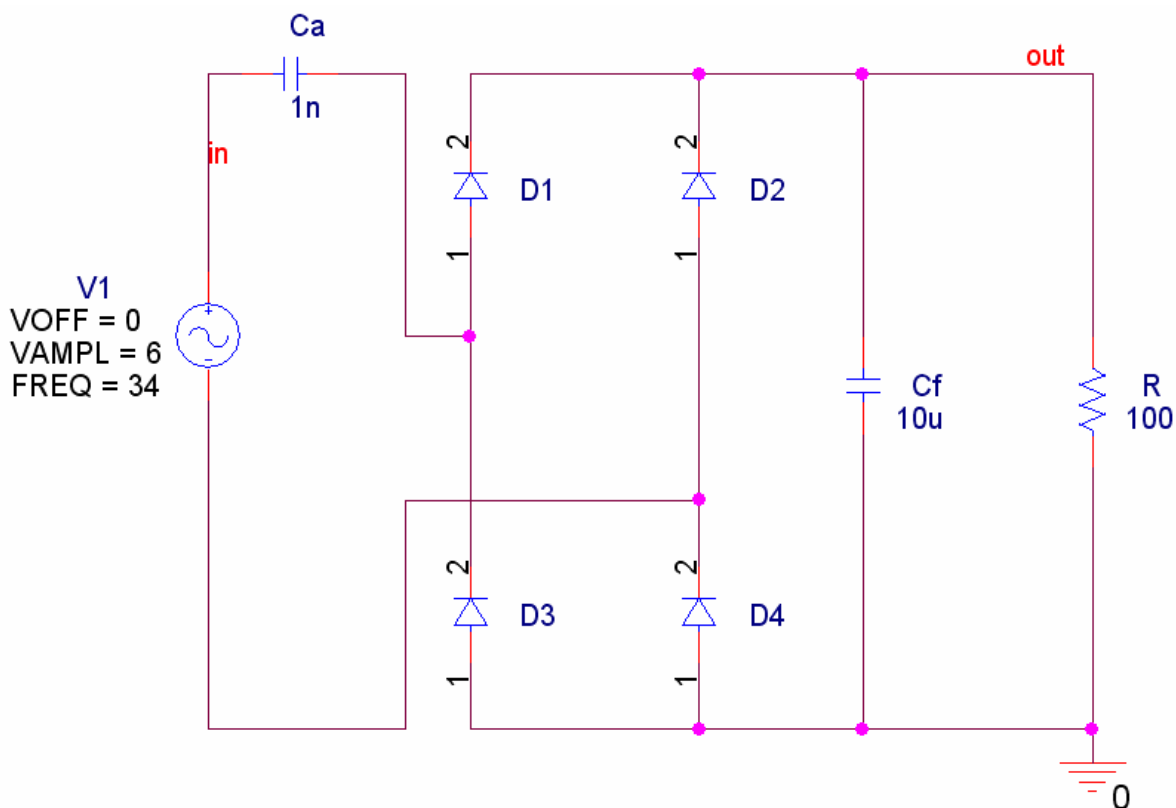


Obr. 18 PFC s dvojitým filtrem vyšších harmonických na vstupu

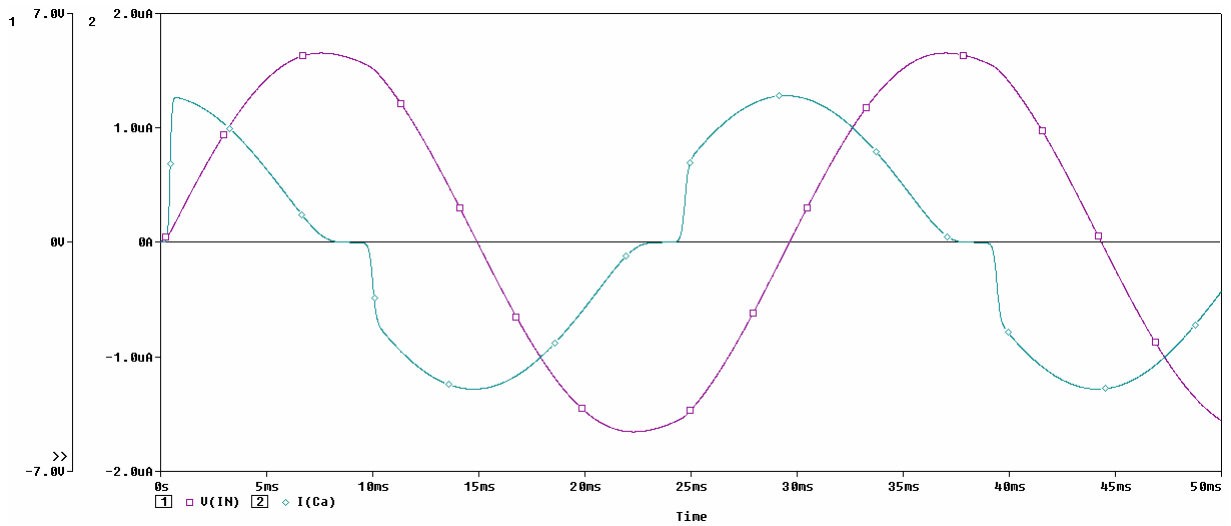


Obr. 19 Frekvenční char. PFC s dvojitým filtrem vyšších harmonických na vstupu

Schéma se sériově zapojeným kondenzátorem na vstupu usměrňovače (Obr. 20) je velice jednoduché, ale může splňovat normu IEC 1000-3-2 až do 250W. Kondenzátorem je možné nastavit požadované výstupní napětí, které je však velmi závislé na velikosti zátěže. Navzdory tomu, že harmonické jsou potlačeny, účinnost je velmi malá a to pro to, že kondenzátor způsobuje velký fázový posun.

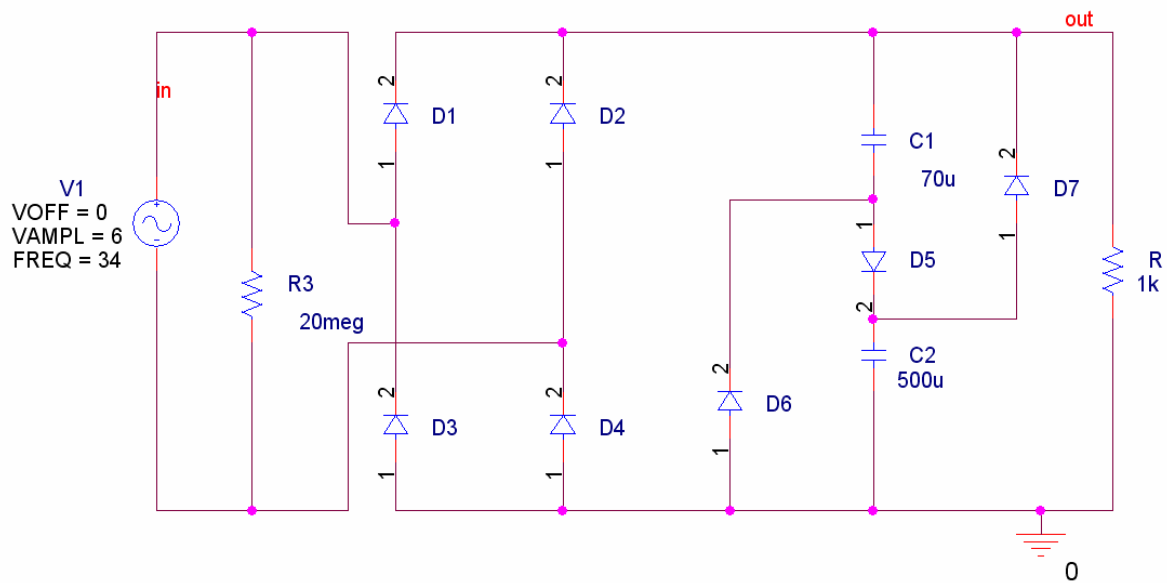


Obr. 20 PFC pomocí kondenzátoru na vstupu

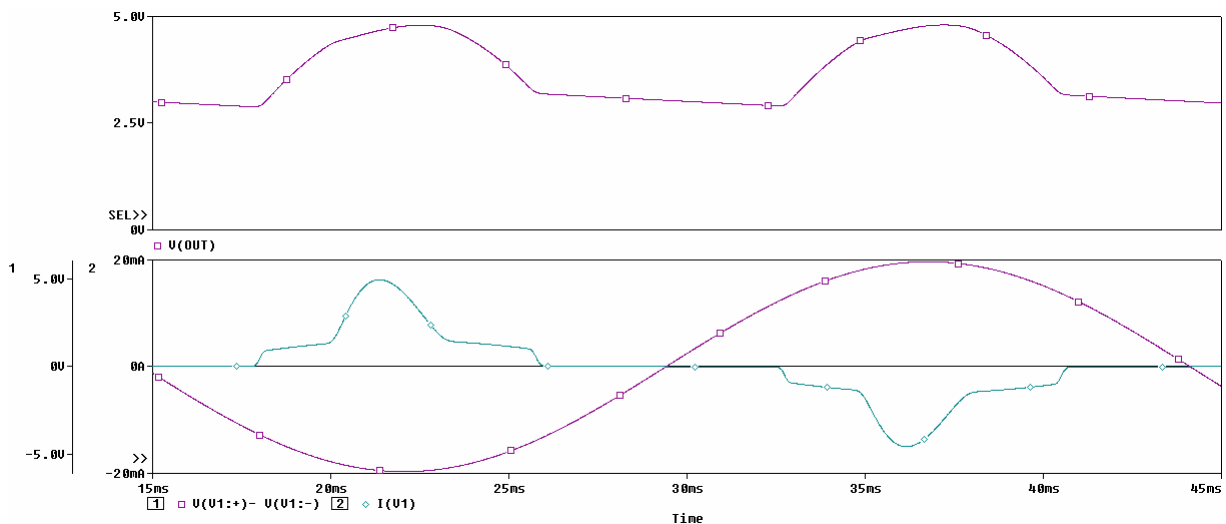


Obr. 21 Průběhy napětí a proudu - kondenzátor na vstupu

Na dalším obrázku je usměrňovač potlačující vyšší harmonické, výstupní napětí je však velmi zvlněné.



Obr. 22 PFC s potlačením vyšších harmonických



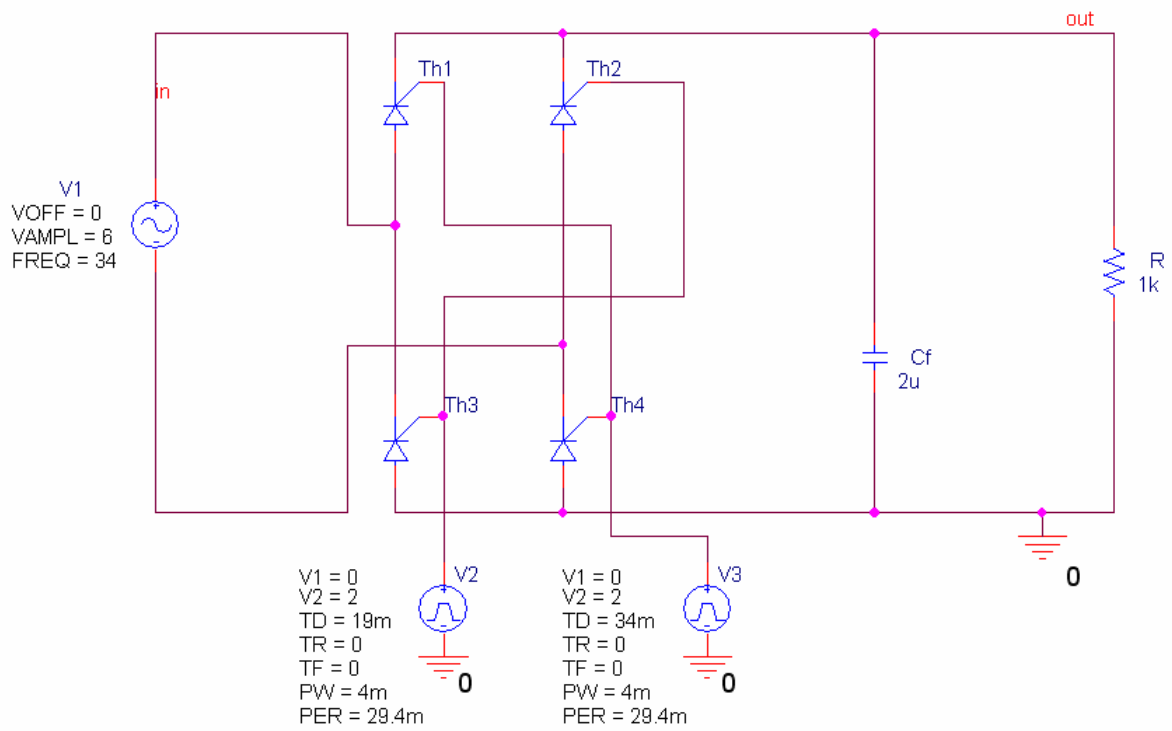
Obr. 23 Průběhy napětí a proudu - PFC s potlačením vyšších harmonických

Pasivní PFC mají mnoho výhod, jsou jednoduché, spolehlivé, odolné, nevytváří vysokofrekvenční rušení a netrpí tolik ztrátami. Na druhou stranu jsou těžké a objemné, protože využívají velké kondenzátory a cívky. Mají také malý rozsah použitelného vstupního napětí, nemají možnost regulace výstupního napětí a průběh vstupního proudu je závislý na zátěži. I když omezíme vyšší harmonické, dojde k fázovému posunu a tím ke snížení účinníku. Navíc rezonanční obvody jsou závislé na síťové frekvenci. Lepší charakteristiky získáme použitím aktivních PFC.

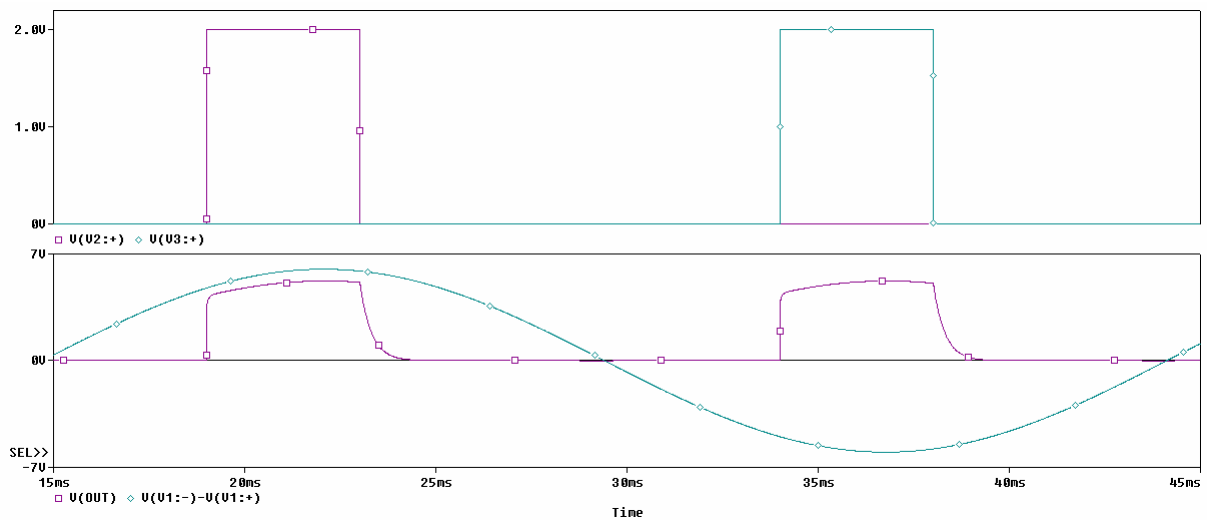
2.2 Nízkofrekvenční aktivní PFC

Na *Obr. 24* je schéma usměrňovače odvozeného z *Obr. 12* diody jsou v tomto případě nahrazeny tyristory. Výsledné K_p i $\cos\phi$ mohou být téměř rovny jedné, to však záleží mj. i na indukčnosti cívky a na úhlu otevření tyristorů. Výsledný účinník je však vždy menší než 0,9. Když se snažíme dosáhnout $K_p=1$, zvýší se fázový posun, který je v tomto obvodu kompenzován kondenzátorem paralelně připojeným před usměrňovač. Toto zapojení je jednoduché, spolehlivé, využívá levných tyristorů a umožňuje změnu výstupního napětí.

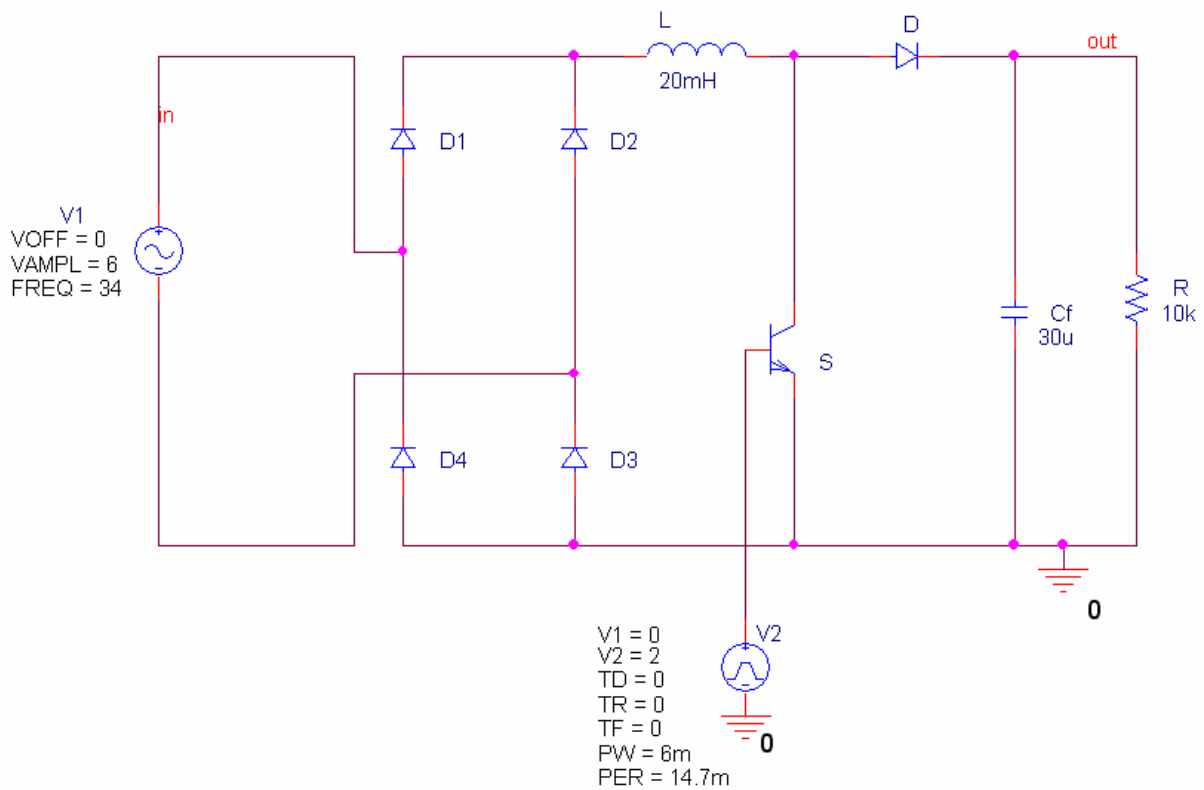
Schéma „boost converter“ na *Obr. 26* se většinou používá pro vysokofrekvenční PFC, můžeme jej však použít i pro NF PFC. Funguje tak, že spínač S je sepnutý po dobu T_{ON} a tím prodlouží dobu po kterou usměrňovačem teče proud. Je také možné spínat několikrát během jedné půl-periody pro zlepšení tvaru vstupního proudu. Nicméně výstupní napětí je dosti zvlněné.



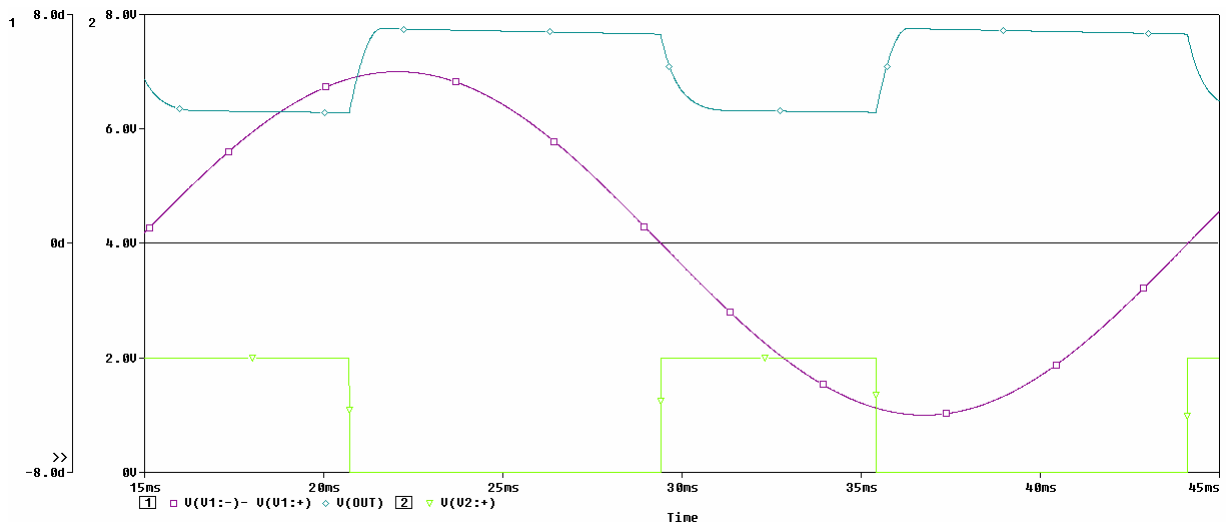
Obr. 24 NF aktivní PFC řízený triaky



Obr. 25 Průběhy napětí a proudu - PFC řízený triaky



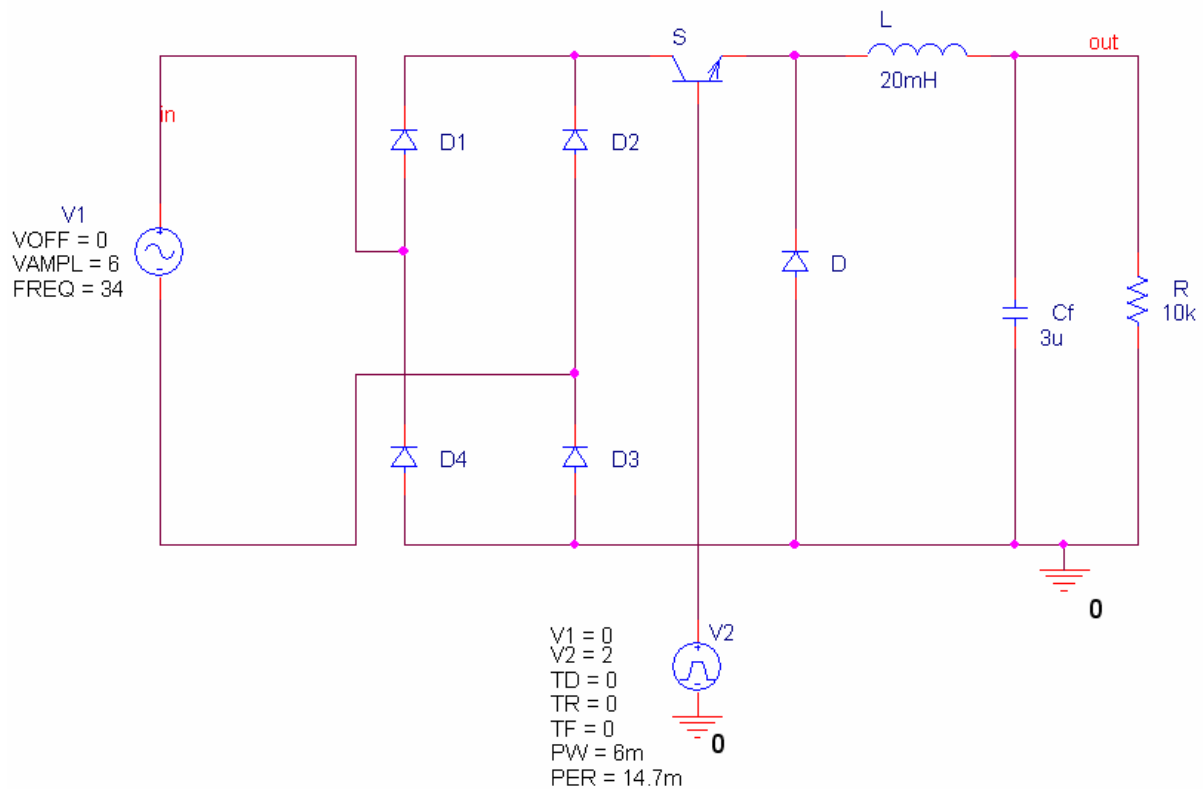
Obr. 26 NF aktivní PFC „boost converter“



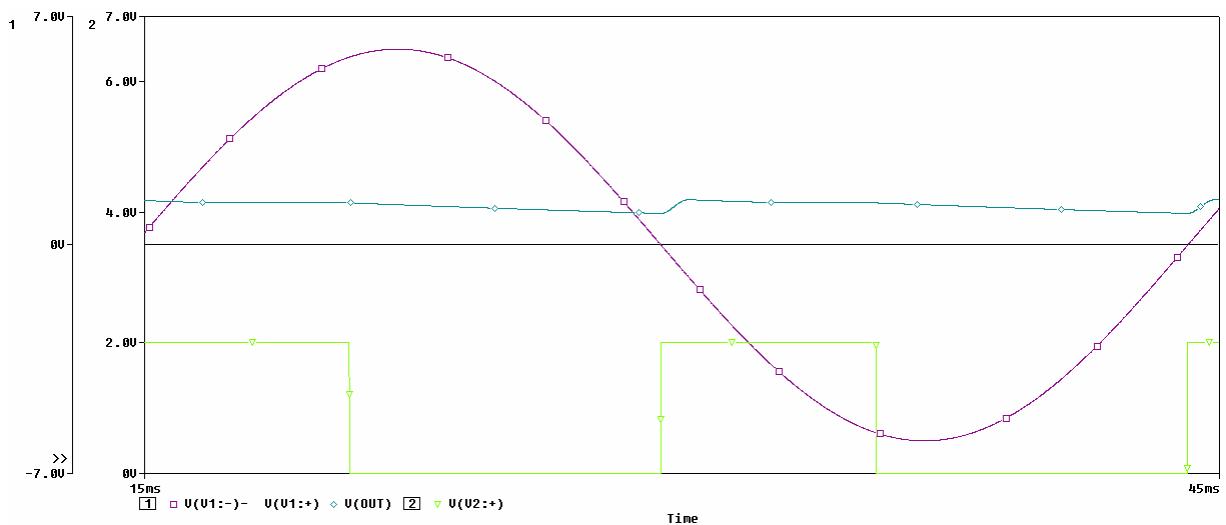
Obr. 27 Průběhy napětí a proudu – „boost converter“

NF „buck converter“ je na *Obr. 28*. Spínač S je sepnut po dobu T_{ON} intervaly sepnutí jsou souměrné. Vstupní proud má obdelníkový průběh s nastavitelnou dobou impulsu. Pro nižší obsah harmonických je vhodné spínat několikrát za jednu půl-periodu. Je však potřebná velká cívka, což je nepraktické.

NF PFC tedy umožňují kontrolu výstupního napětí v omezeném rozsahu; nezpůsobují VF rušení a ztráty při přepínání jsou malé. Nevýhodou jsou velké rozměry použitých součástek.



Obr. 28 NF aktivní PFC „buck converter“



Obr. 29 Průběhy napětí a řídicích signálů - „buck converter“

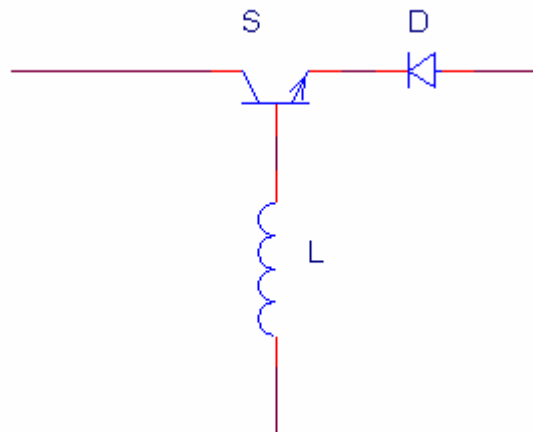
2.3 Vysokofrekvenční aktivní PFC

2.3.1 Spínané měniče druhého řádu

PFC můžeme realizovat se spínací frekvencí daleko vyšší, než je síťová. Spínaný měnič prvního řádu je na Obr. 30. Spínač S je ovládán vnějším vstupem, v praktickém zapojení je jako spínač použit tranzistor MOSFET, nebo IGBT. Stav druhého spínače – diody, je nepřímo ovládán stavem spínače S a okolními podmínkami obvodu.

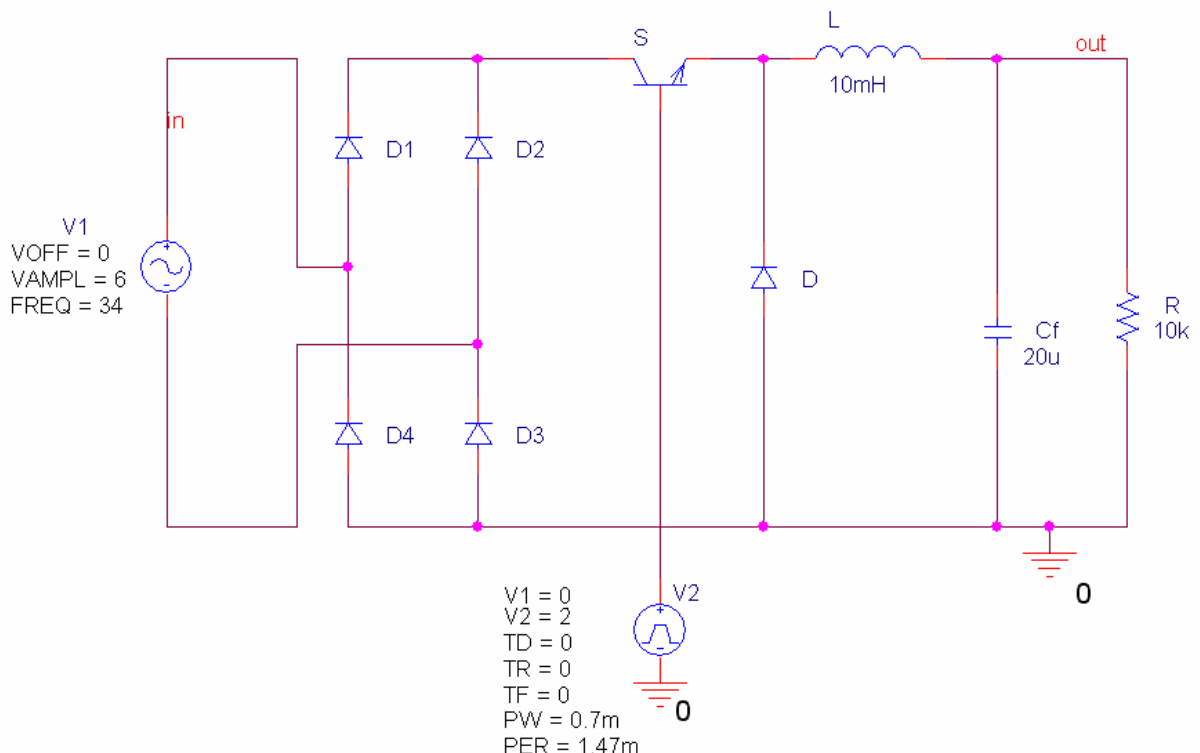
Základní „boost“ a „buck“ měniče (convertory) jsou odvozeny z měniče prvního řádu, obsahují však i filtrační kondenzátor. Tento kondenzátor můžeme považovat za napěťový zdroj. Měníče mohou pracovat ve spojitém režimu, kdy cívkou neustále teče proud, nebo v módu

přerušovaného proudu cívkou. Jak je vidět z následujících obrázků, tvar vstupního proudu závisí na použitém zapojení.

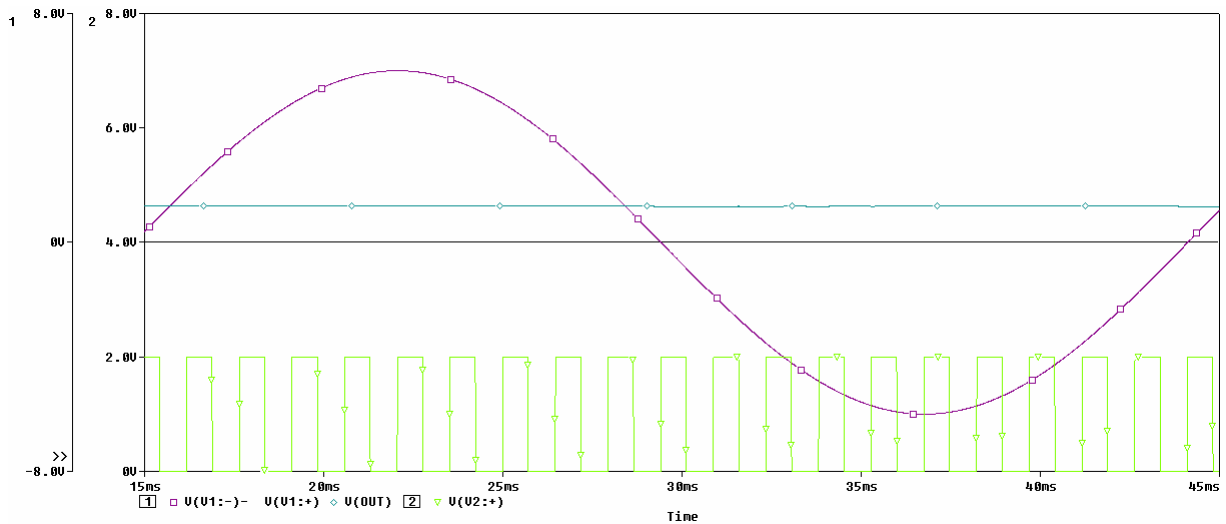


Obr. 30 Schéma měniče prvního řádu

„Buck converter“ (Obr. 31) má snižující převodní poměr, proto je možné získat U_2 menší, než je amplituda U_1 vstupního napětí. Nicméně převodník je schopný pracovat jen když je okamžitá hodnota u_1 větší, než u_2 , tj. jen v intervalu $(\alpha, \pi - \alpha)$, jinak dochází k deformaci vstupního proudu, ten je navíc impulsní (nespojité) a obsahuje velké množství harmonických, které je potřeba odfiltrovat.

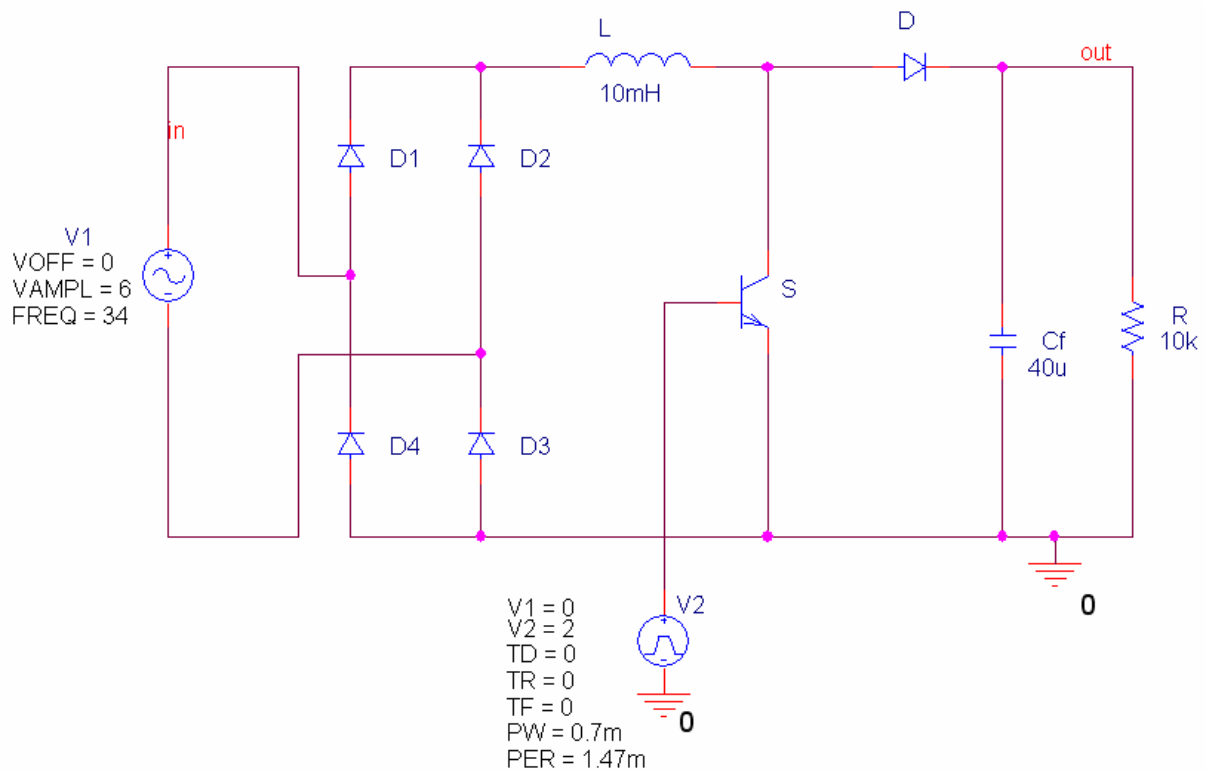


Obr. 31 VF aktivní PFC „buck converter“

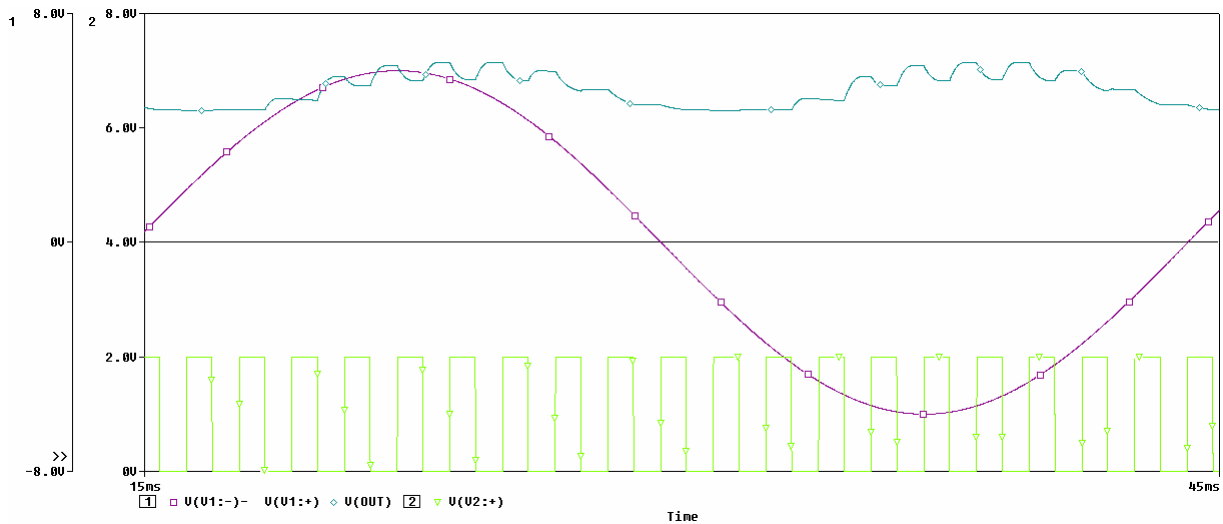


Obr. 32 Průběhy napětí a proudu - „buck converter“

„Boost converter“ (Obr. 33) má zvyšující převodní poměr, je schopný práce po celou půl-periodu a nedochází tedy k deformaci proudu když je u_1 blízké nule (oproti „buck konvertoru“). Průběh proudu je spojitý, protože cívka je umístěna v sérii se vstupem a spínač paralelně, obsahuje méně vyšších harmonických a je proto častěji používán.



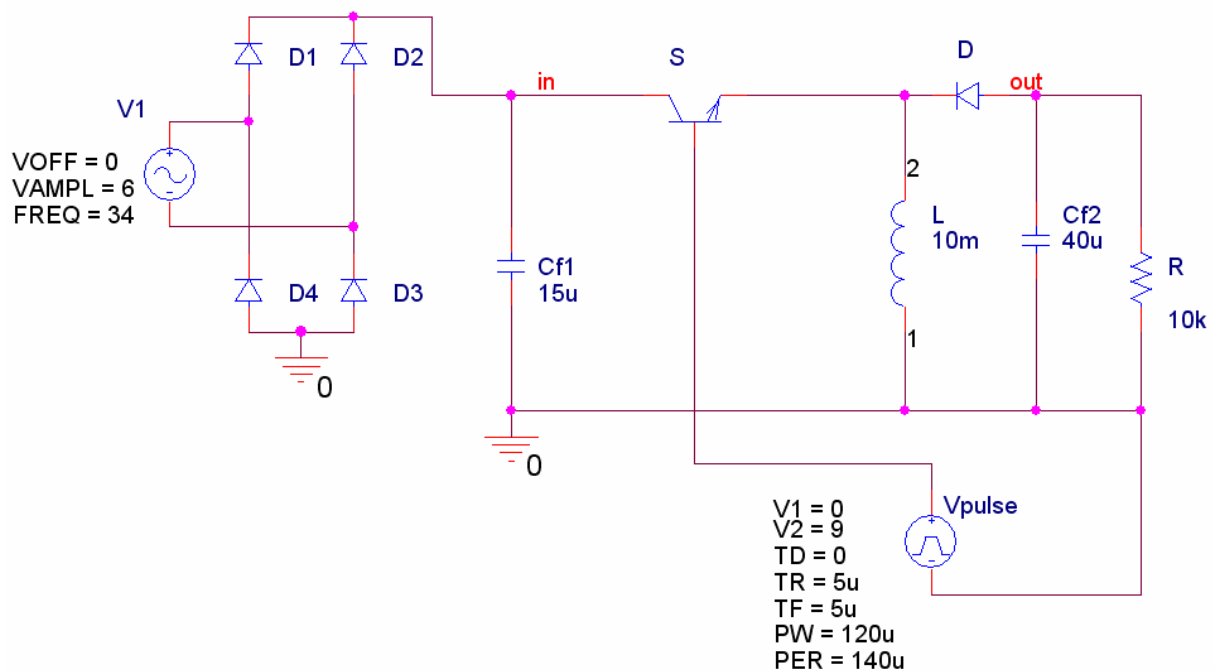
Obr. 33 VF aktivní PFC „boost converter“



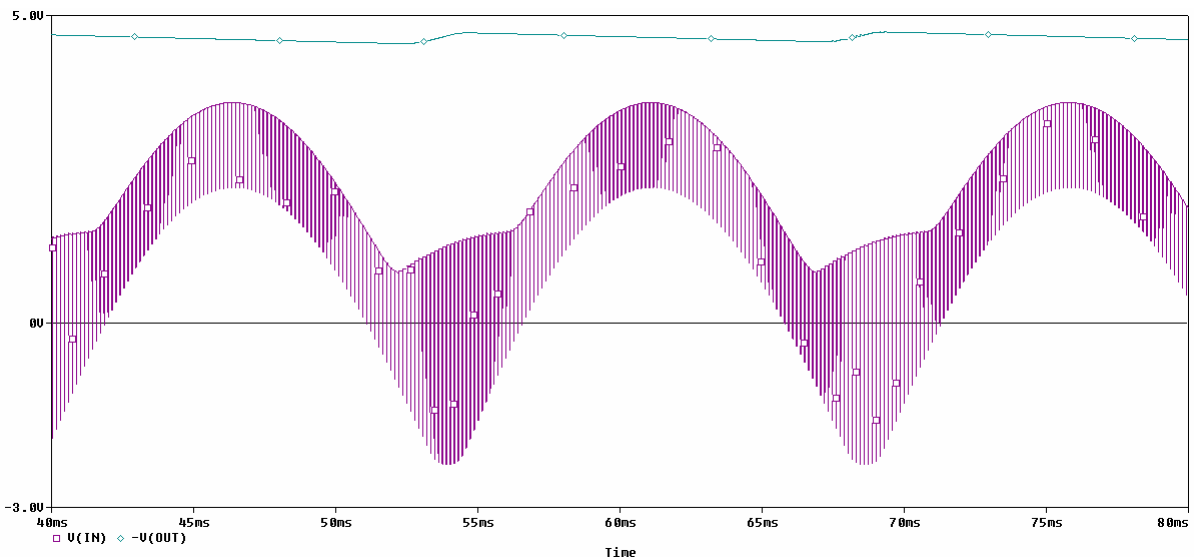
Obr. 34 Průběhy napětí a proudu - „boost converter“

„Buck-Boost coverter“ (Obr. 35) může pracovat ve zvyšujícím, nebo snižujícím režimu, což umožňuje regulaci výstupního napětí v opravdu velkém rozsahu. Výstupní napětí je však inverzní a to zvyšuje namáhání spínače, proud navíc obsahuje více harmonických (stejně jako „buck converter“) protože je nespojitý.

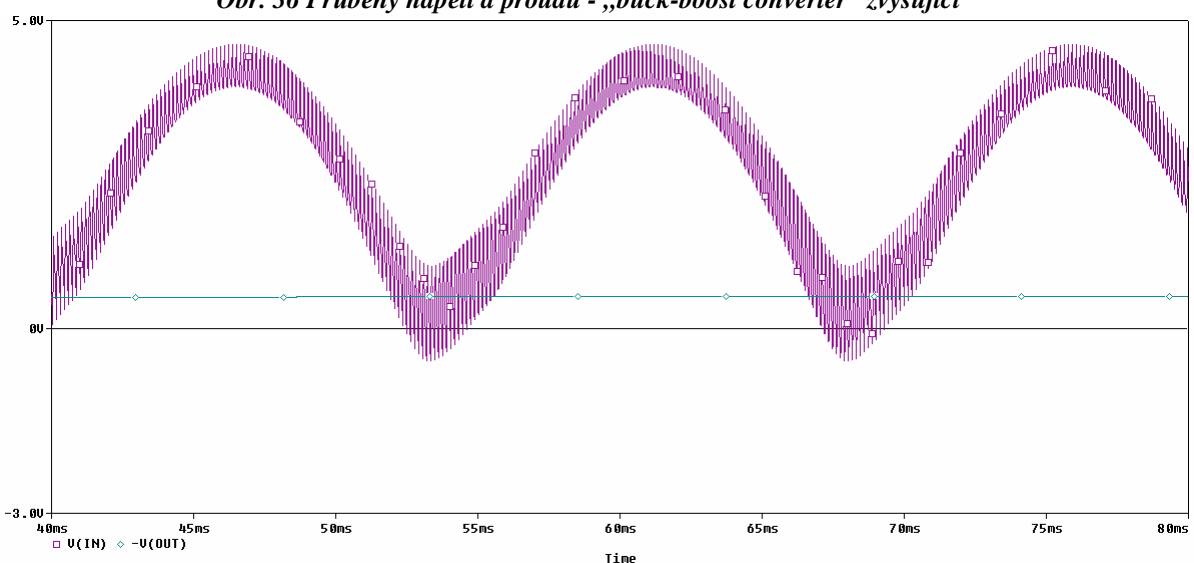
Dalším zajímavou možností je zapojení dvojitého spínaného měniče „Buck + Boost convetor“ které neinvertuje napětí, umožňuje nastavení U_2 v širokém rozsahu. Toto zapojení však obsahuje mnoho součástek a spínačů, což sebou nese mnoho nevýhod.



Obr. 35 VF aktivní PFC „buck-boost converter“



Obr. 36 Průběhy napětí a proudu - „buck-boost converter“ zvyšující



Obr. 37 Průběhy napětí a proudu - „buck-boost converter“ snižující zapojení (dosaženo 6x menší dobou otevření tranzistoru při stejné frekvenci)

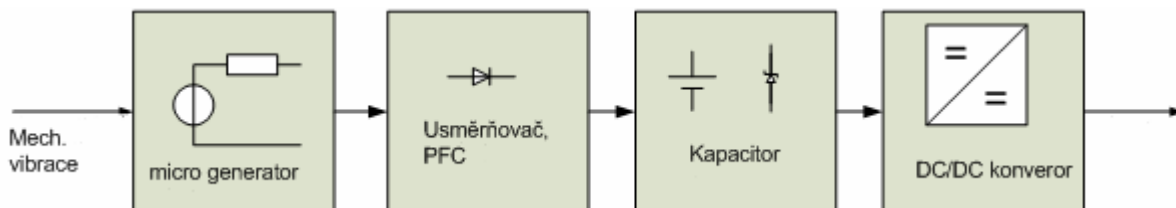
V těchto PFC obvodech bereme jako vstupní napětí usměrněné síťové napětí $u_1(t) = U_1 \cdot |\sin \omega_L t|$. Výstupní napětí považujeme za konstantní. Je vidět, že pokud použijeme spínač sériově připojený k usměrňovači, získáme impulsní proudovou charakteristiku s velkým obsahem vyšších harmonických. Pokud však zapojíme spínač paralelně bude podíl VF složky proudu nižší. Charakteristiky na předchozích obrázcích jsou však jen orientační. Spínání má ve skutečnosti daleko vyšší frekvenci.

2.3.2 Spínané měniče vyšších řádů

Je vidět, že požadavky na měnič (malý podíl harmonických, malé ztráty, pracující ve snižujícím režimu s malou deformací proudu) nás nutí dělat velmi komplexní PFC vyšších řádů s několika spínači. V našem případě ale nepřináší žádné zásadní výhody, proto bude vhodnější použít měnič druhého řádu.

3. Využití konkrétních obvodů

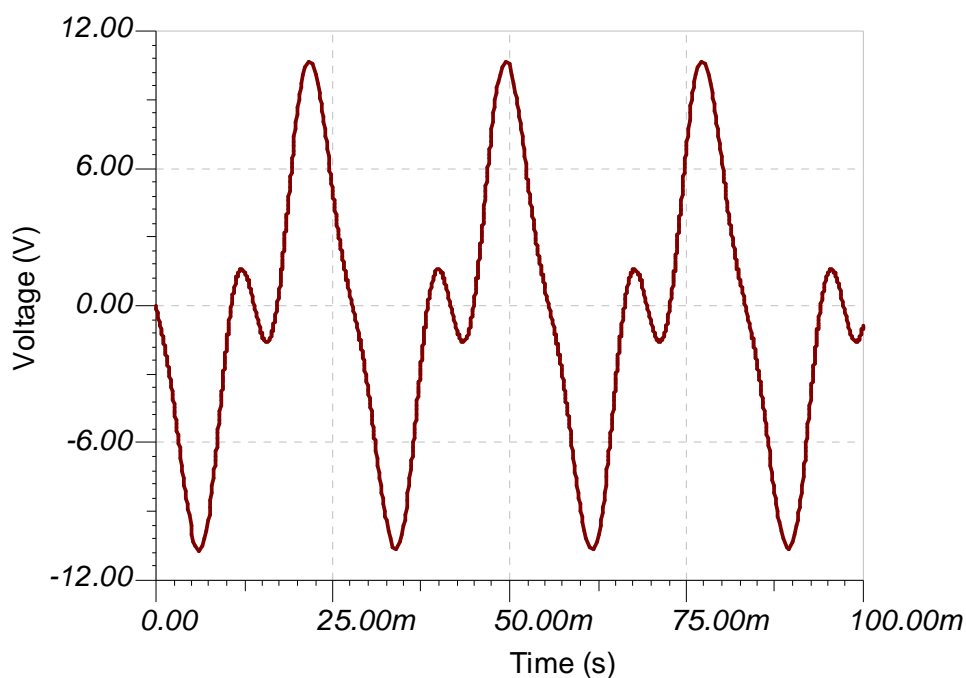
3.1 Blokové schéma



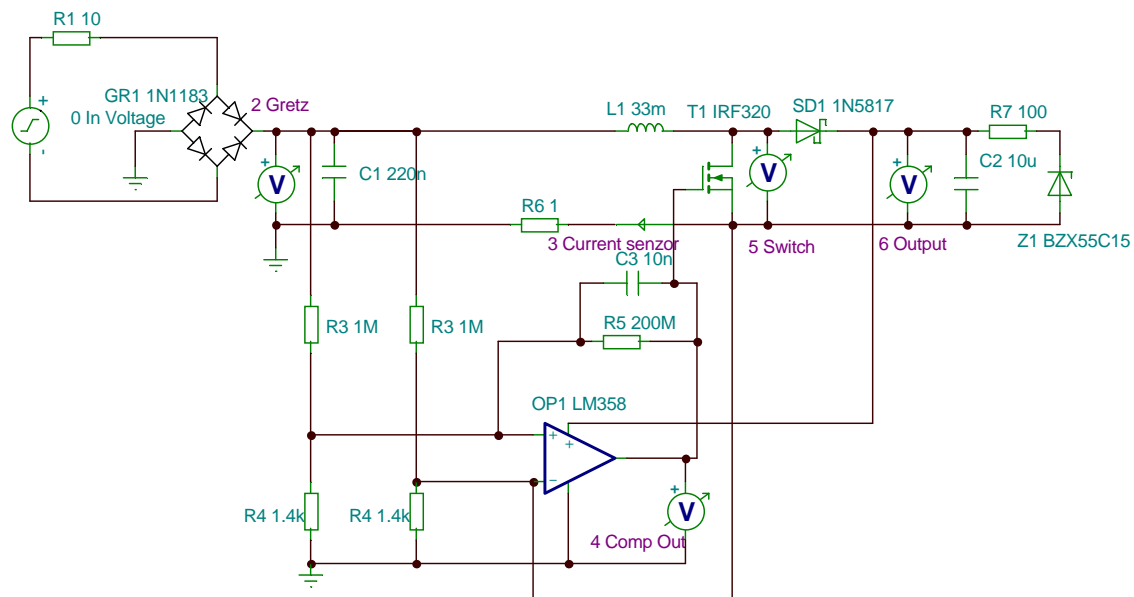
Obr. 38 Blokové schéma obvodu [4]

Mirko-generátor [4] přeměňuje mechanické oscilace na elektrický proud, ten je dále usměrněn, zpracován PFC obvodem a akumulován. DC/DC konvertor upravuje výstupní napětí na požadovanou hodnotu.

Na vstupu usměrňovače předpokládáme následující průběh. Je to součet 3 různých sinusových průběhů.



Obr. 39 Předpokládaný průběh napětí na výstupu mikro-generátoru [4]



Obr. 40 schéma usměrňovače, PFC obvodu a stabilizátoru výst.napětí pro simulaci [4]

Vysvětlivky:

- 0 In voltage..... Vstupní napětí
- 2 Gretz..... Usměrněné vstupní napětí
- 3 Current sensor..... Proud rezistorem R6
- 4 Comp out..... Výstup komparátoru
- 5 Switch..... Napětí na spínači
- 6 Output..... Výstupní napětí

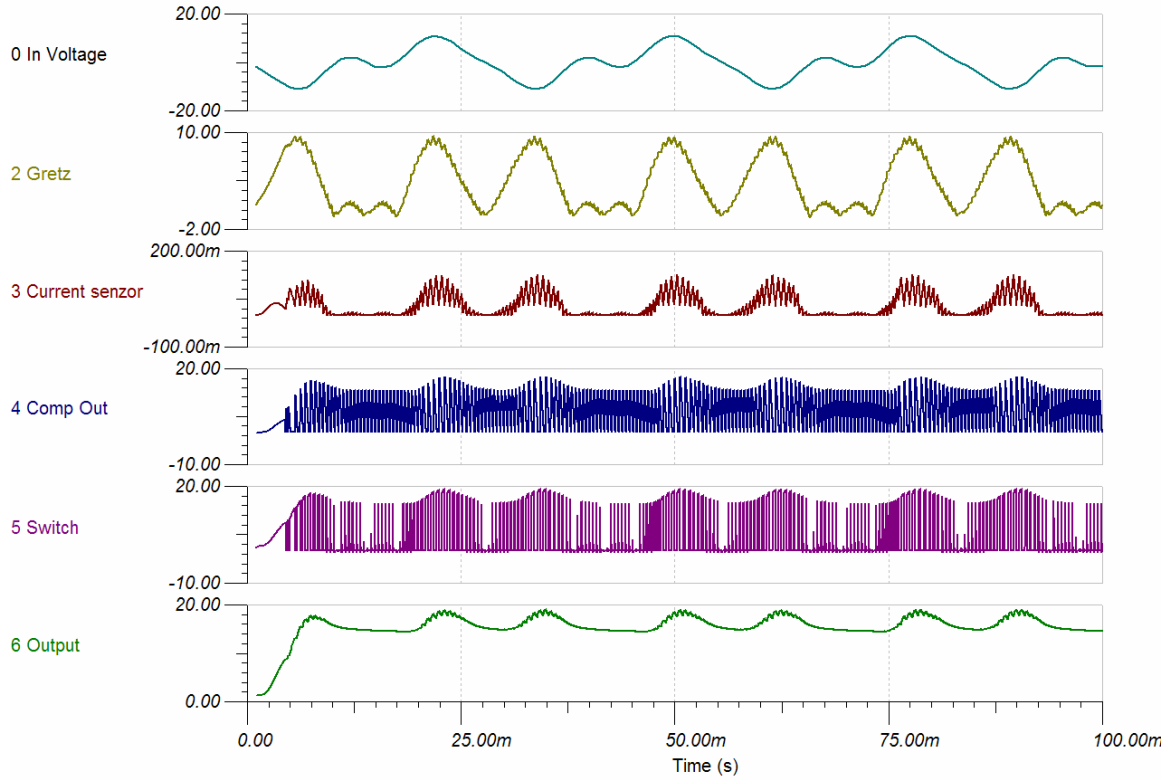
3.2 Popis zapojení:

Operační zesilovač je použit jako komparátor s hysterezí. Napětí přiváděné na oba vstupy OZ je nastavené děliči R3, R4. Hysterezi zajišťuje R5. OZ je napájen z výstupu obvodu. Aby výstupní napětí nemohlo příliš vzrůst, je nevyužitá energie rezistorem R7 a zenerovou diodou přeměněna na teplo. C1 potlačuje vstupní VF složku.

3.3 Popis funkce:

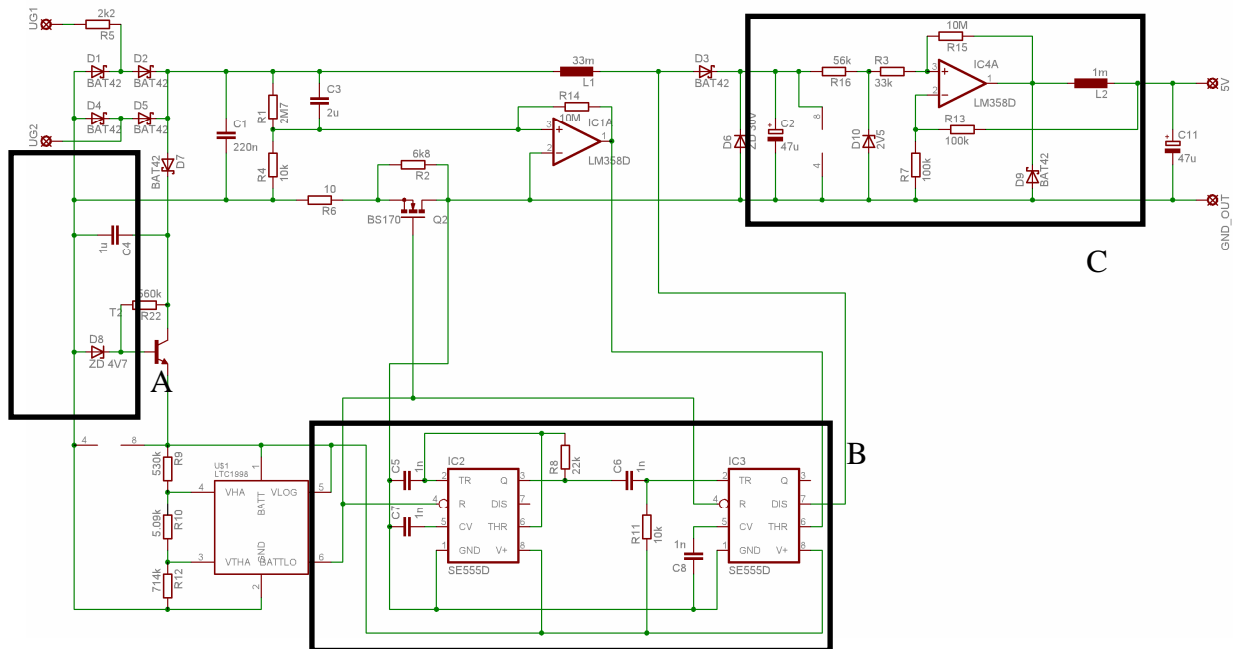
Předpokládejme sepnutý tranzistor. Proud teče cívkou, tranzistorem a rezistorem R6, který funguje jako proudový senzor. Okamžitá hodnota proudu je porovnávána s usměrněným vstupním napětím. Proud narůstá po celou dobu sepnutí spínače (v závislosti na indukčnosti cívky a vstupním napětím). Jakmile proud dosáhne určité hodnoty, komparátor rozepne tranzistor. Proud nyní protéká SD1 do C2. Když proud poklesne pod určitou hodnotu, je tranzistor opět sepnut a celý děj se opakuje.

Pro napájení OZ můžeme požit usměrněné stabilizované napětí, výstupní napětí, nebo jejich kombinaci. První možnost je využitelná jen při dostatečně vysoké hodnotě vstupního napětí. Nevýhodou druhé možnosti je, že při ní zatěžujeme výstup obvodu. Využitím jejich kombinace se zbavíme obou nevýhod [4].



Obr. 41 Časové průběhy napětí simulovaného obvodu [4]

3.3 Schéma měřeného obvodu



Obr. 42 Schéma měřeného obvodu [4]

A – Pomocný stabilizátor napětí pro napájení 5V

B – Pulzní šířková modulace (PWM)

C – Výstupní DC/DC konvertor

IC1A (LM358) – Komparátor vstupního napětí a proudu

IC2 – Zdroj hodinového signálu

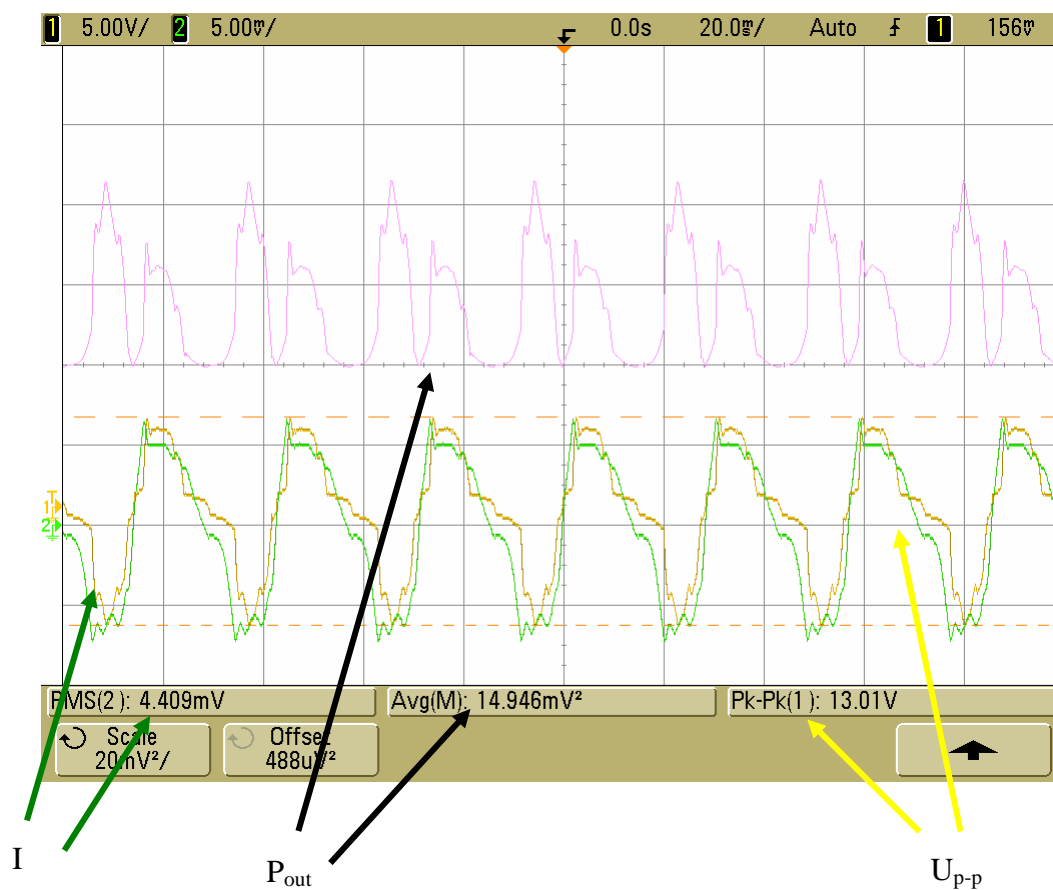
IC3 – Klopný obvod, využívá integrovaného tranzistoru jako hlavního spínače PFC (použitelné jen pro malé proudy)

R5 – Simuluje vnitřní odpor zdroje

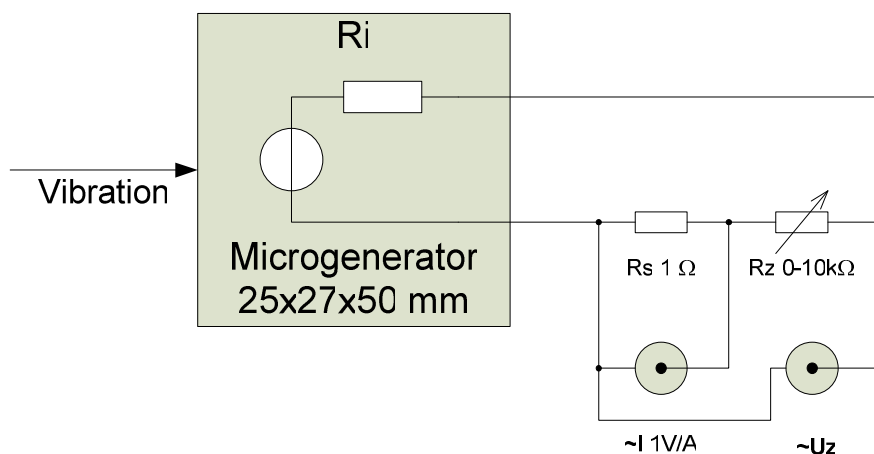
Hlavní části PFC obvodu jsou L1, D3, C2, IC1A a PWM blok. LTC1998 blokuje konvertor tranzistorem Q2 dokud nedosáhne vstupní napětí dostatečné úrovně. Výstupní napětí je omezeno Zenerovou diodou R6 a upraveno na požadovanou hodnotu DC/DC konvertorem (blok C). Spotřeba celého obvodu je $700\mu\text{A}/5\text{V}$ tj. $3,5\text{mW}$.

$$U_{\text{in_min_RMS}} = 3,1\text{V}$$

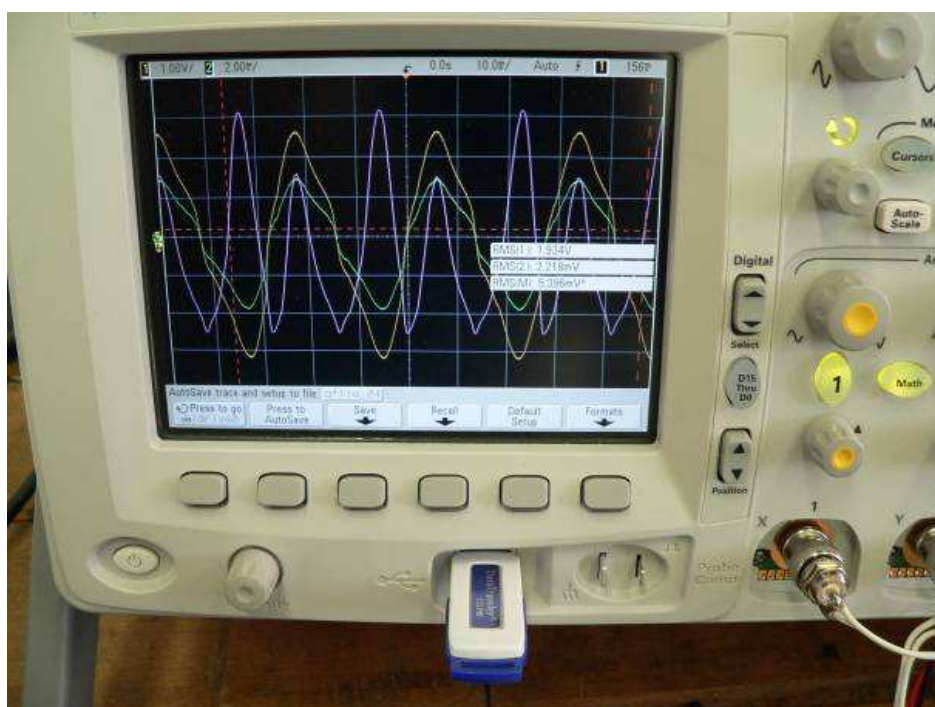
$$U_{\text{out_max_RMS}} = 18\text{V podle [4]}$$



Obr. 43 Průběhy měřeného obvodu [4]



Obr. 44 Schéma generátoru [4]

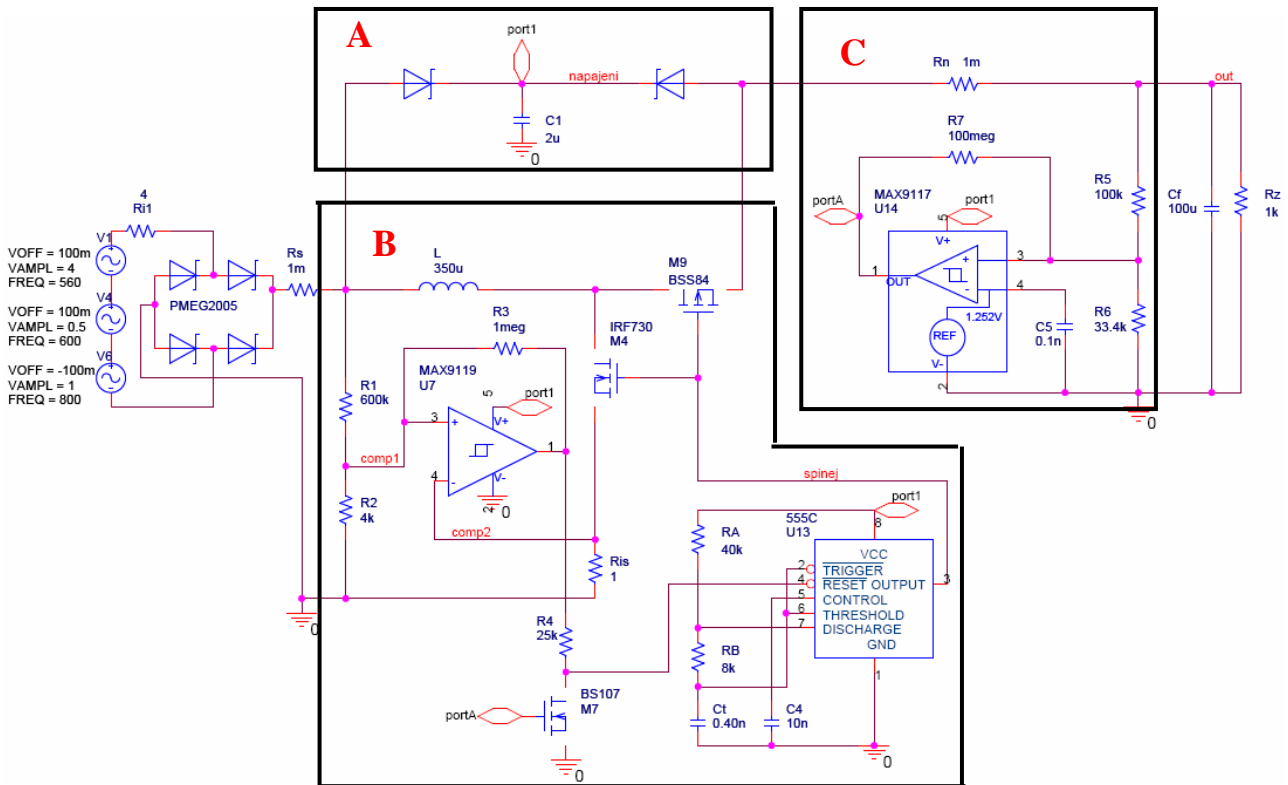


Obr. 45 Výstupní výkon, proud a napětí [4]

Měřený obvod vykazuje velmi dobrou účinnost, spotřeba je přibližně 3mW. Výstupní napětí je nastavitelné v rozsahu 3,1 – 18V a je téměř dokonale ve fázi s proudem.

4. Individuální návrh obvodu

4.1 Schéma a jeho popis



Obr. 46 Schéma navrženého obvodu (také v příloze)

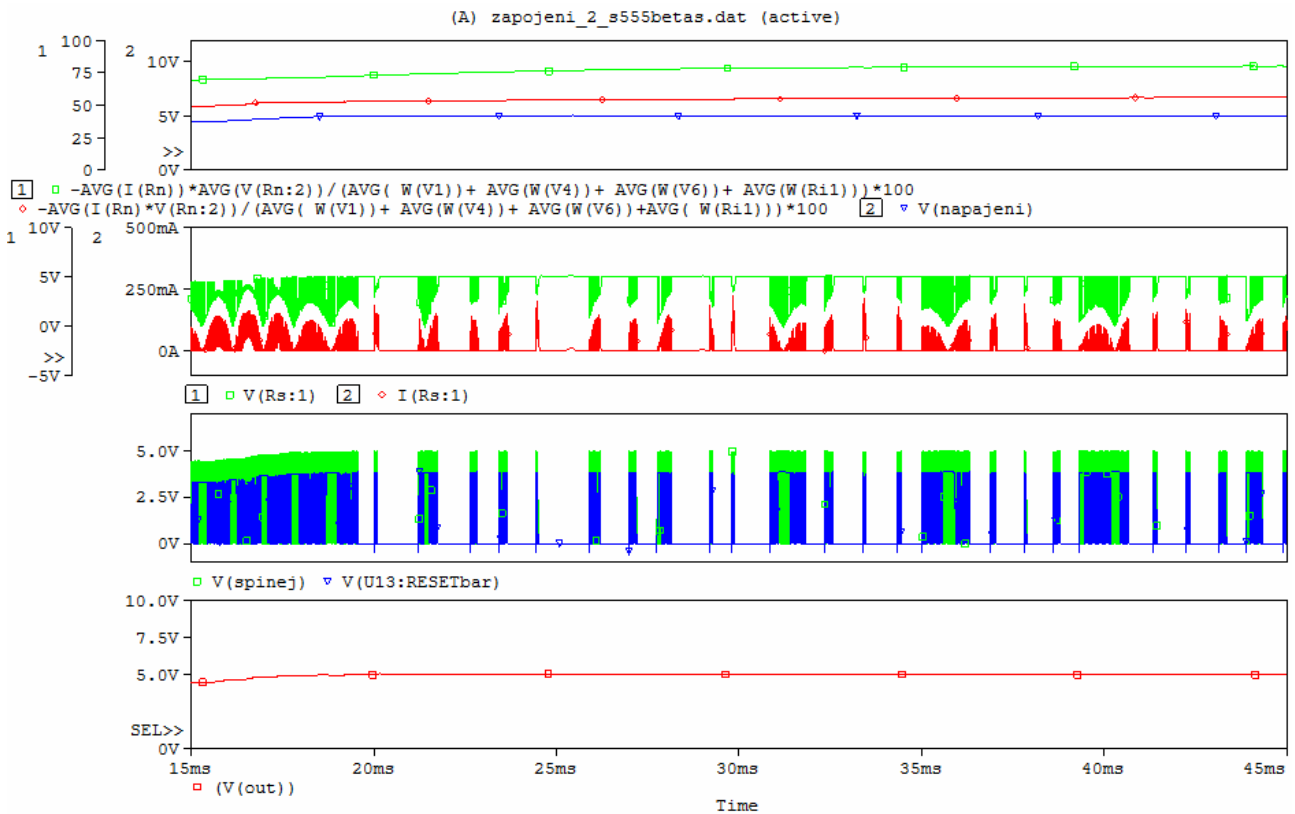
Jsou použity 3 zdroje harmonického proudu s různým kmitočtem a mírným offsetem. Proud je usměrněn můstkovým usměrňovačem za použití schottkyho diod PMEG2005, tyto diody se vyznačují velmi malým úbytkem napětí v propustném směru (0.1-0.4V).

Obvod je navržen tak, aby nepotřeboval žádné další vnější zdroje. O napájení se stará blok A, obsahující 2 diody a filtrační kondenzátor. První dioda zajistí počáteční minimální napětí přímo z usměrňovače, druhá dioda brání nabíjení výstupního kondenzátoru (Cf) napájecím napětím. Operační zesilovače vyžadují minimální napětí 1.6V, ale IO555 pracuje správně až od 3.6V. Proto je nutné, aby alespoň při rozběhu obvodu bylo napětí zdrojů vyšší.

Blok B je obvod pro úpravu účinníku, jedná se o zvyšující měnič. Je použit komparátor s velmi malou spotřebou (5uW), schopný pracovat na frekvenci v řádu desítek kHz. Tento komparátor porovnává vstupní napětí s napětím na proudovém senzoru (Ris), výstupní hodnota je přivedena na Reset IO555. R3 zajišťuje zpětnou vazbu, která mírně podporuje hysterezi samotného komparátoru. IO555 funguje jako zdroj napětí obdélníkového průběhu o frekvenci 64kHz a střídou 6:1 (high:low), tyto hodnoty se ukázali jako nejvhodnější pro použitou cívku a zátěž (vzhledem k účinnosti). Obdélníkový průběh spíná tranzistor M4, který je hlavním spínačem měniče. Dále spíná tranzistor M9, ten nahrazuje usměrňovací diodu obvyklou v základních zapojeních měničů, toto řešení zajišťuje menší úbytek napětí. Tranzistory M4 a M9 tedy spínají inverzně.

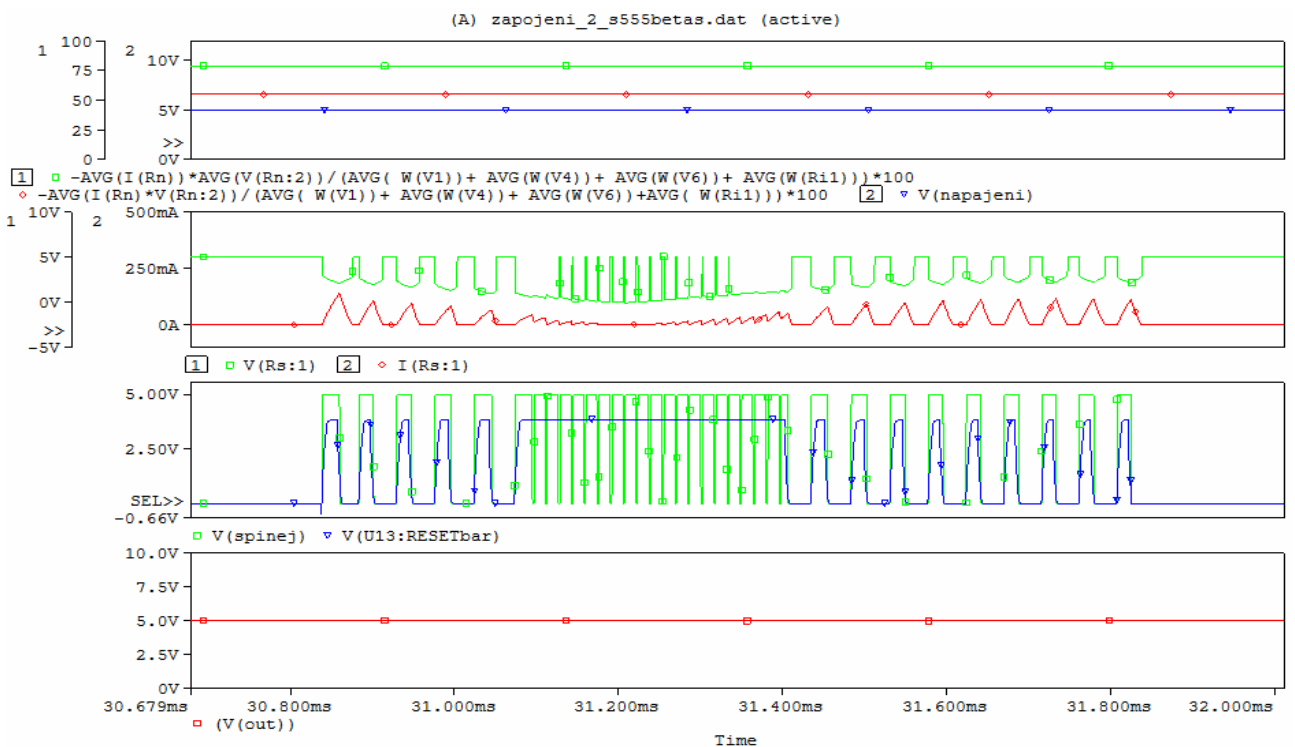
Blok C funguje jako stabilizátor a v podstatě jako snižující měnič. Komparátor 9117 porovnává výstupní napětí s integrovanou referencí, při překročení 5V spíná tranzistor M7 (PortA) a ten nuluje případnou vysokou úroveň resetu IO555, což zastaví kmitání. Komparátor výstupního napětí má spotřebu 20uW a IO555 300uW. Jedná se o průměrnou spotřebu simulovaných IO, reálná hodnota může být jiná.

4.2 Výsledky simulace



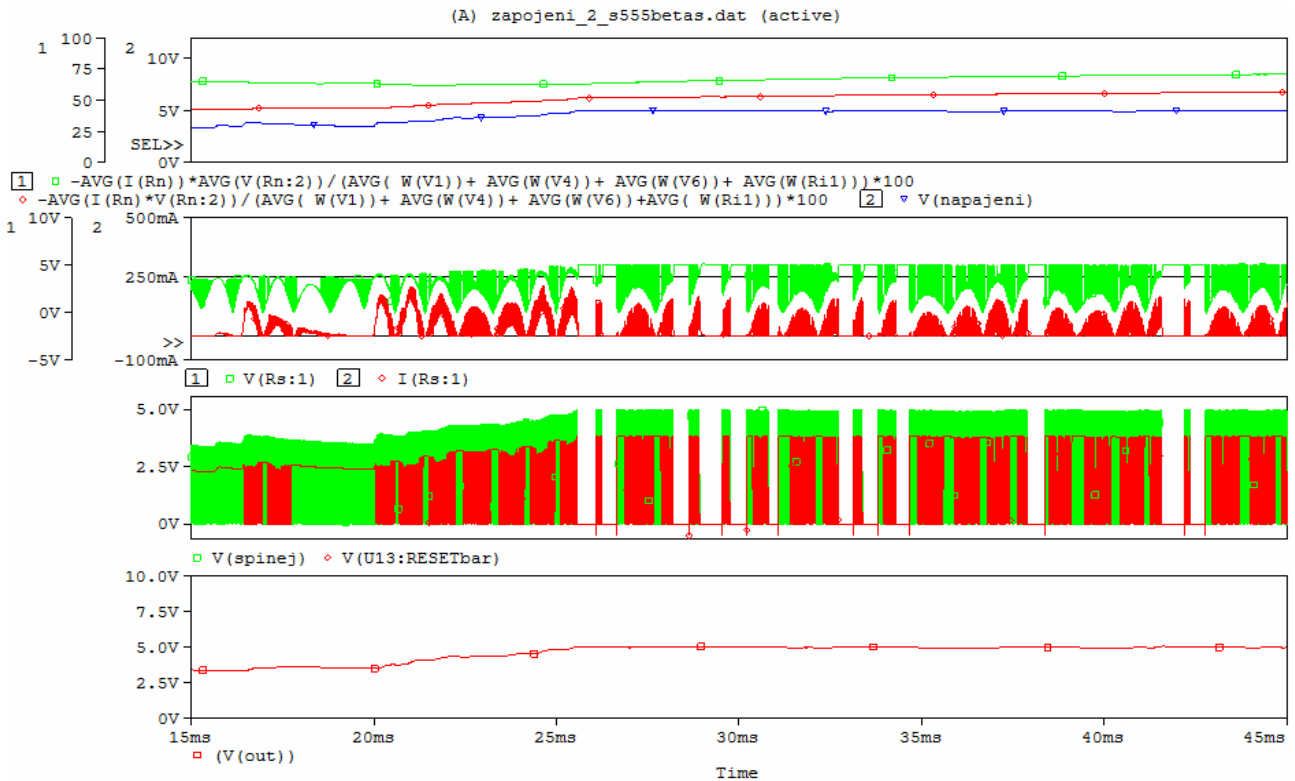
Obr. 47 Průběhy simulovaného obvodu

Z průběhů je vidět, že obvod dosahuje účinnosti 80% (všechny hodnoty průměrné) a 56% (průměrujeme až před podílem). Druhá hodnota je v reálném obvodu pravděpodobnější, proto se budu dále vhrnovat jen jí. Zvlnění výstupního napětí $\Delta_{\max} = 150\text{mV}$.



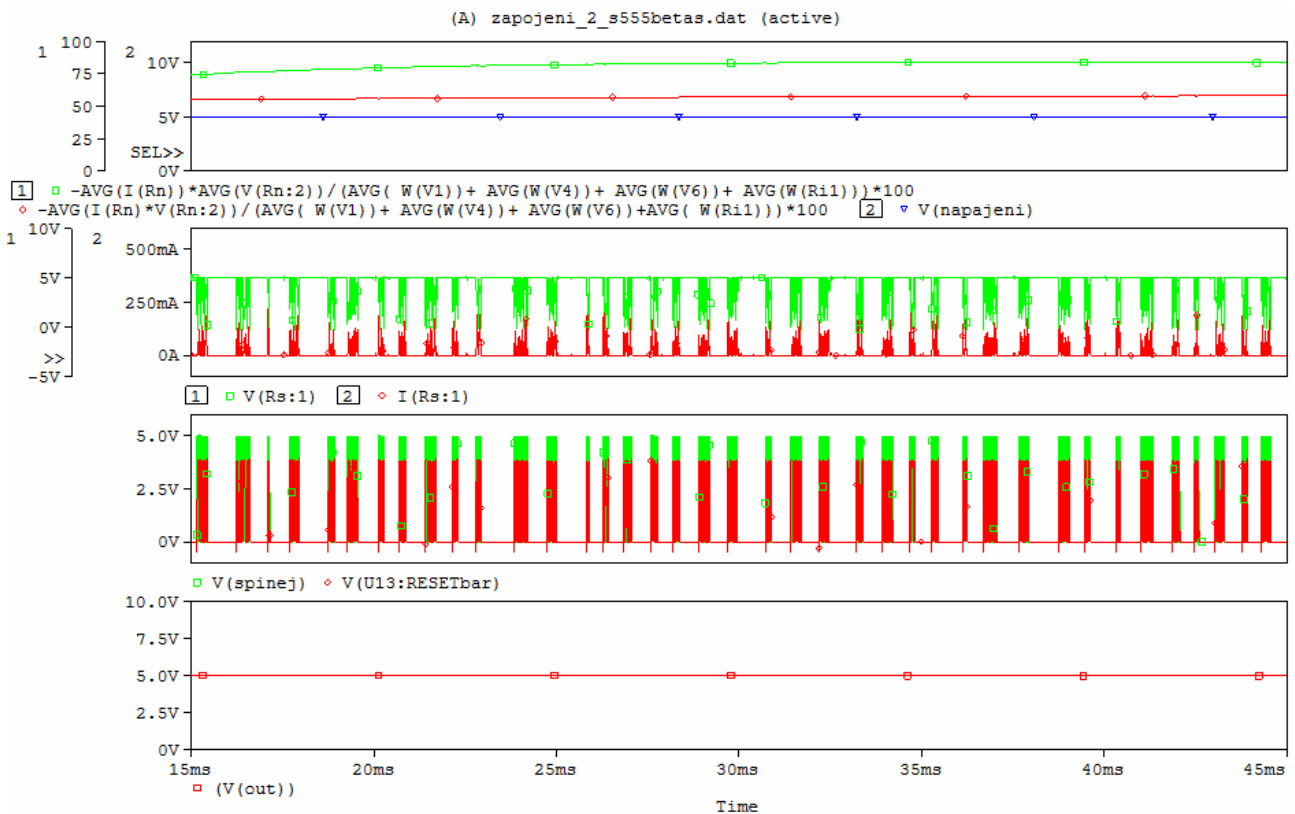
Obr. 48 Detail průběhů

Změna zatěžovacího odporu nemá na účinnost téměř vliv, na výstupní napětí však ano (Obr. 49). Při zvýšení vnitřního odporu zdroje z 4Ω na 8Ω trvá delší dobu než se obvod rozeběhne.



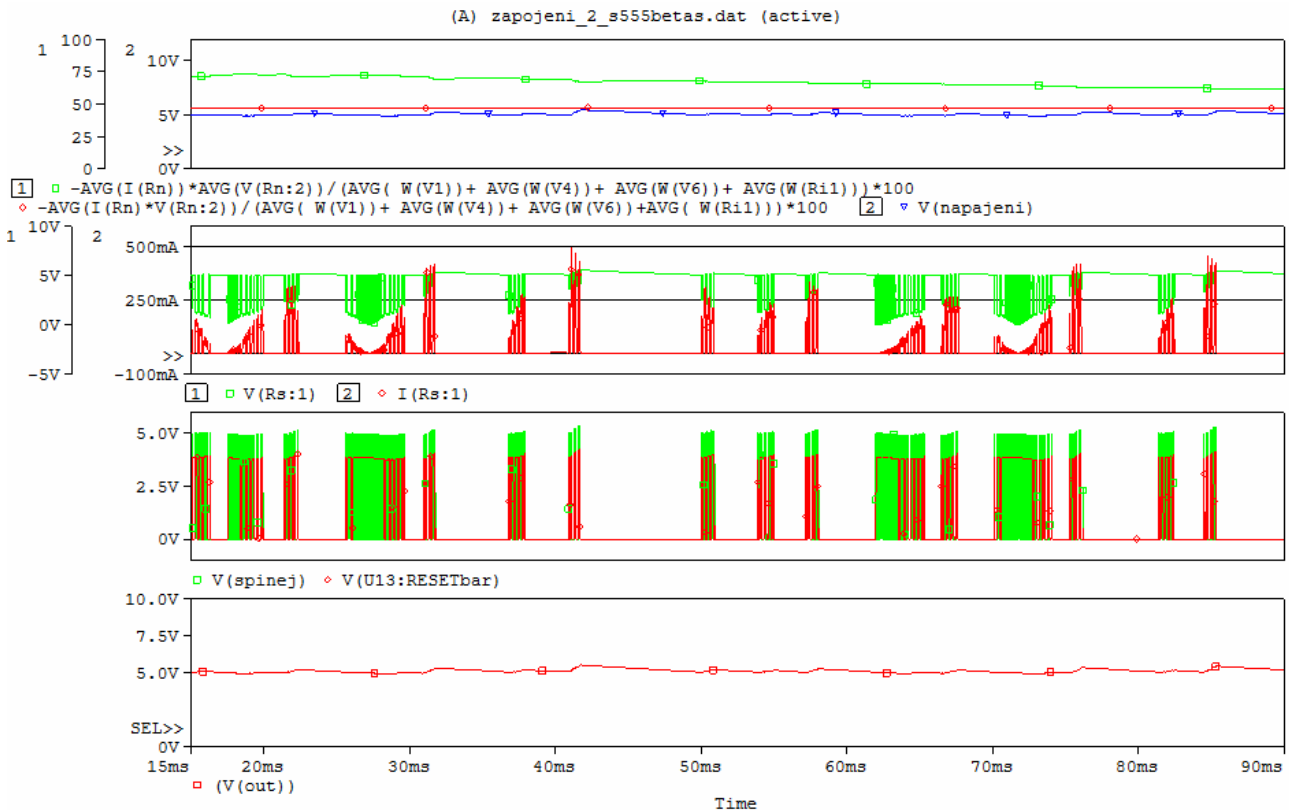
Obr. 49 Průběhy při vyšším zatížení obvodu

Desetinásobné zvýšení frekvence zdrojů nemá na účinnost vliv, klesne ale zvlnění výstupního napětí (Obr. 50).



Obr. 50 Průběhy při 10xvyšší frekvenci zdrojů

Desetinásobné snížení frekvence zdrojů způsobí pokles účinnosti (Obr. 51), pro tak nízkou frekvenci jsem musel zvětšit hysterezi. Výstupní napětí je více zvlněné.



Obr. 51 Průběhy při 10nížší frekvenci zdrojů

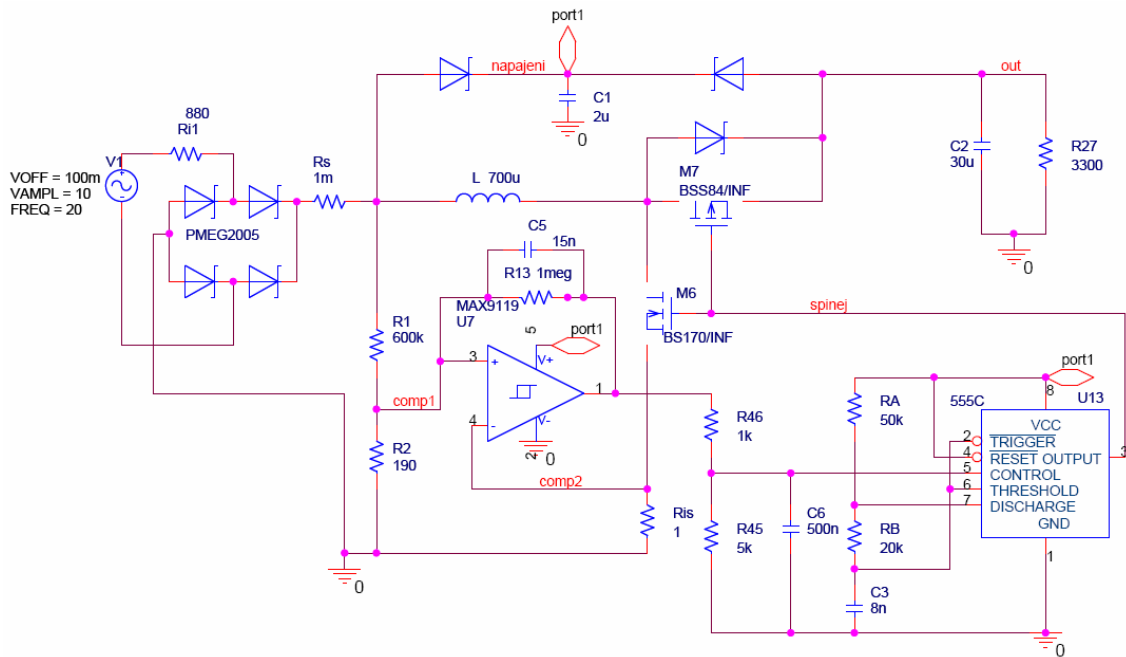
4.3 Zhodnocení

Výsledky simulací ukazují dobrou účinnost obvodu danou zejména minimální spotřebou integrovaných obvodů. Z frekvenční analýzy je vidět, že obvod je schopen pracovat se zdroji o různém kmitočtu, může se však zhoršit jeho účinnost. Proto je potřeba upravit hodnoty součástek podle předpokládaných parametrů zdroje a zátěže. Správný rozběh je podmíněn dostatečně vysokým napětím na vstupu, tento problém by mohla vyřešit nábojová pumpa. Obvod jsem z časových důvodů nestihl realizovat.

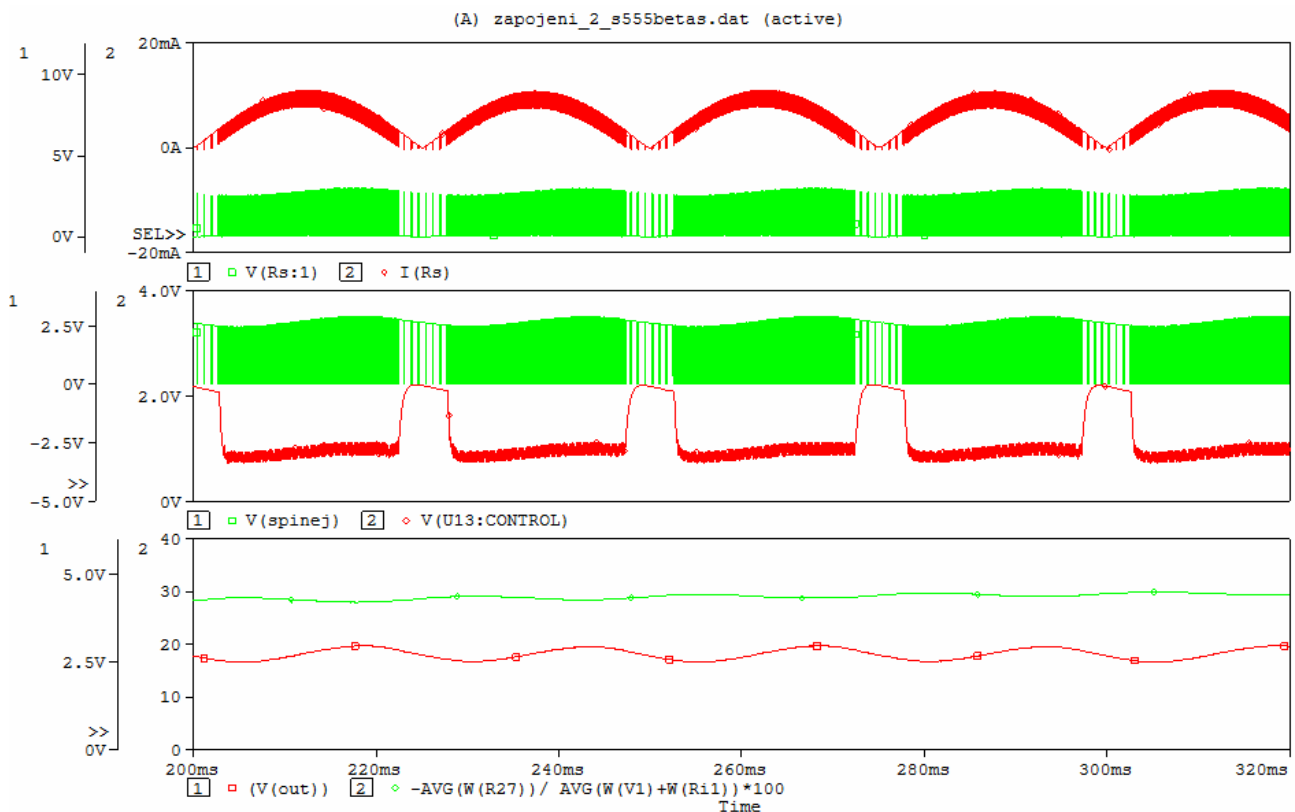
5. Obvod pro malý výkon

5.1 Zapojení s využitím vstupu CONTROL

Výsledný obvod, který by měl být realizován se od předchozího liší. Vnitřní odpor zdroje se má pohybovat v řádu stovek ohmů a zátěž bude impulsně spínaná, odporový ekvivalent je v řádu tisíců ohmů. Pokusil jsem se podobný obvod navrhnout úpravou schématu z Obr. 46. Časovač 555 už není ovládán resetem, jeho střída a frekvence je ovládána pomocí napětí přiváděného na vstup CONTROL. Toto napětí získáváme nabíjením kondenzátoru C6 z výstupu komparátoru. Pokud není napětí a proud ve fázi, je na výstupu komparátoru vysoká úroveň, napětí na kondenzátoru se blíží napájecímu, frekvence klesá na 1kHz a střída roste na 7:1 (H:L). Ve fázi $f = 5\text{kHz}$ a střída 1:1. Proti předchozímu zapojení se zde nespolehám na kmitání komparátoru. Dioda přemostující tranzistor M7 urychluje rozběh obvodu a zvyšuje mírně účinnost.



Obr. 52 Schém obvodu pro malý výkon

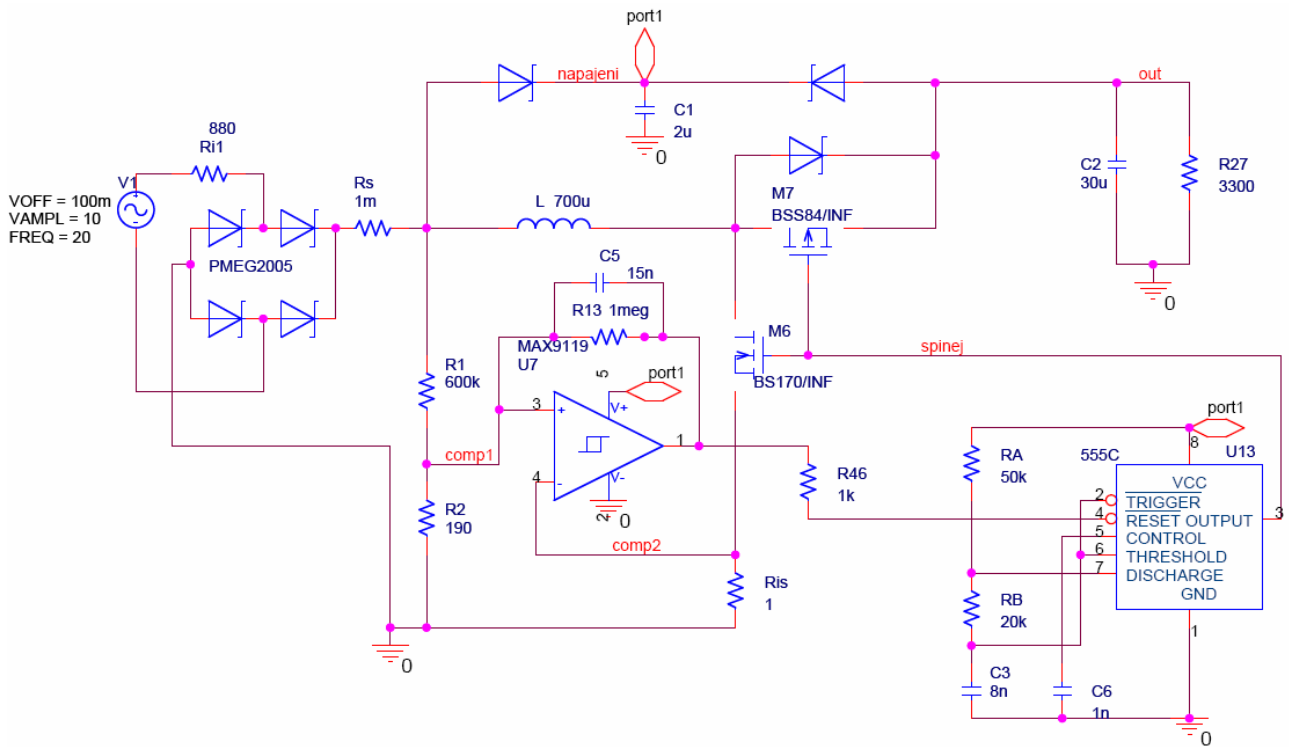


Obr. 53 Výsledky simulace obvodu pro malý výkon

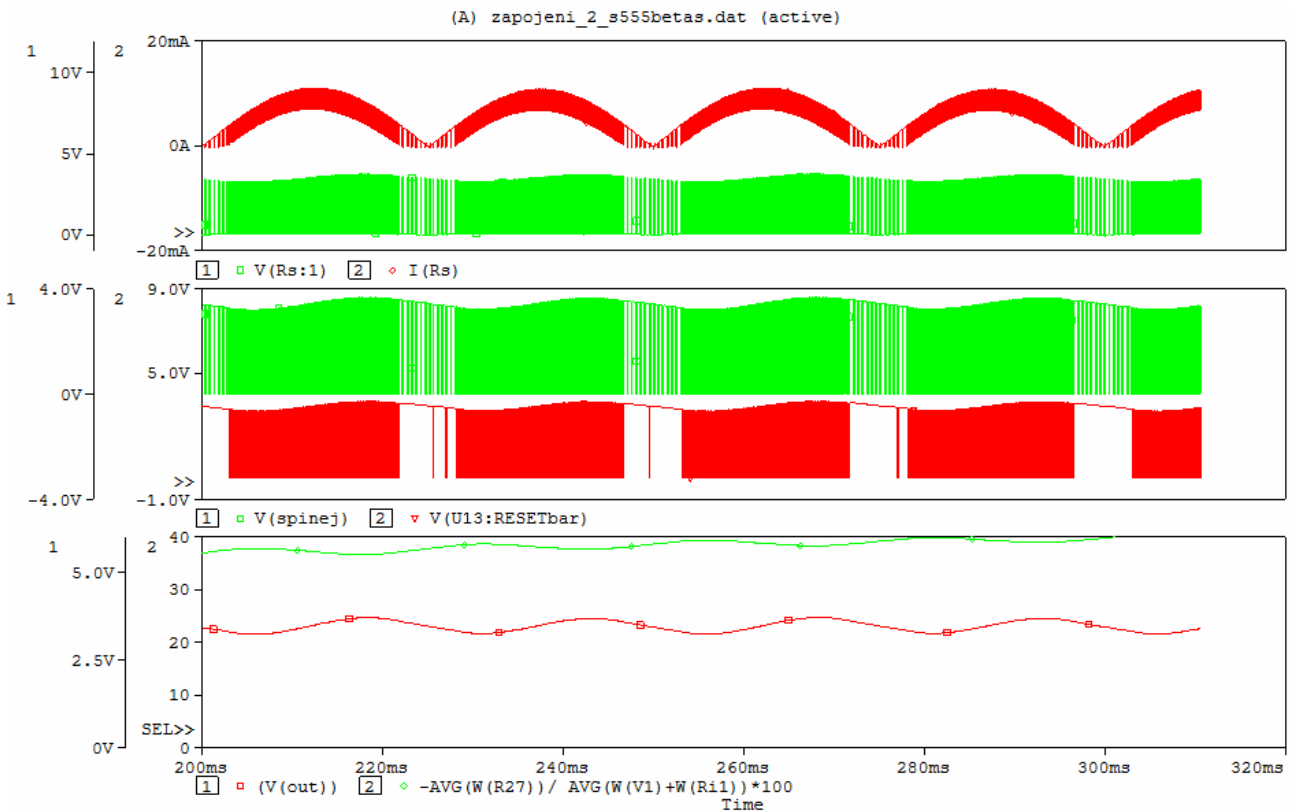
Účinnost obvodu je jen 30%, musíme však vzít v úvahu, že velkou část výkonu obvod sám spotřebuje (oproti zapojení Obr. 46). Dalším problémem je korekce účinníku, vyšší korekce znamená menší účinnost. Výstupní napětí je 2.5V.

5.2 Zapojení s využitím vstupu RESET

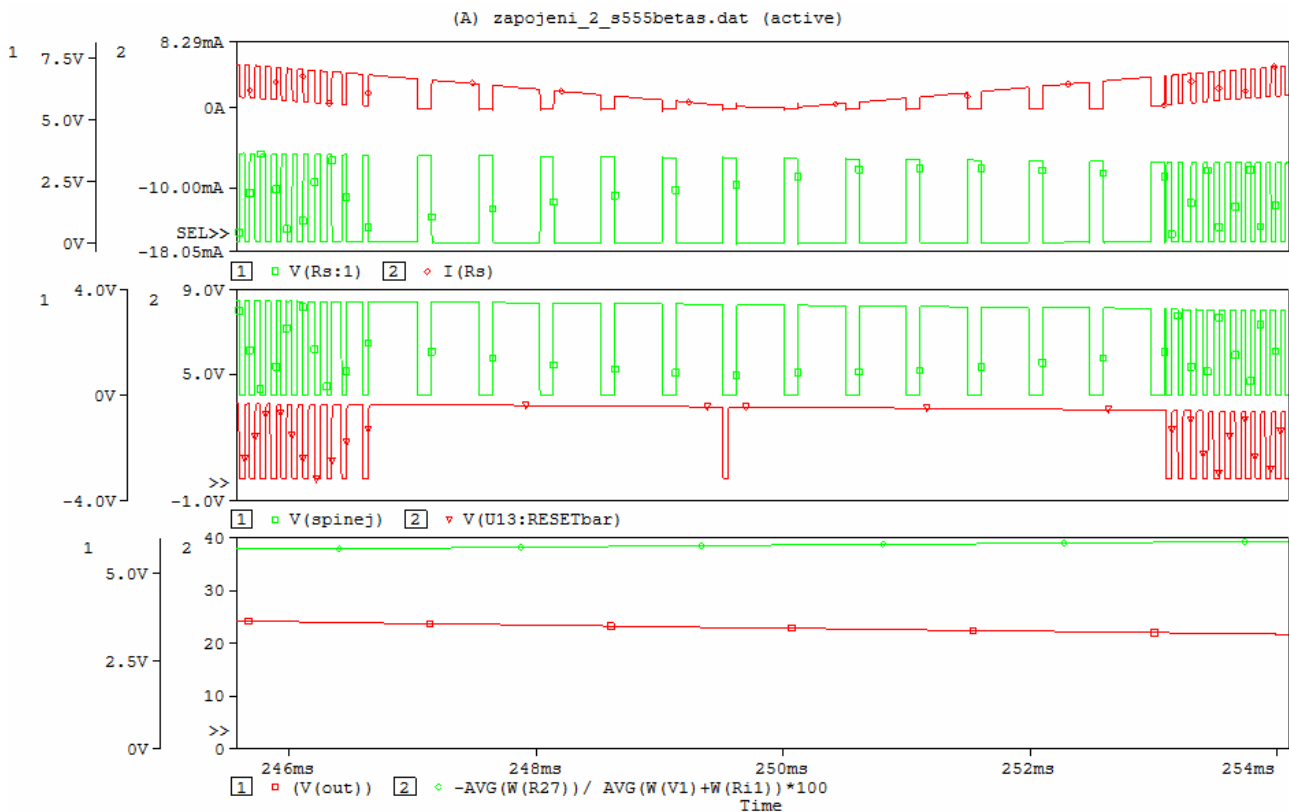
Následující zapojení je úpravou předchozího a Obr. 46, takže funguje opět díky oscilacím komparátoru a resetováním IO555. Účinnost se blíží 40%, výstupní napětí je průměrně 3,4V.



Obr. 54 Schéma obvodu pro malý výkon s využitím resetu



Obr. 55 Simulace obvodu s využitím resetu



Obr. 56 Detail simulace obvodu s využitím resetu

6. Závěr

Z výsledků simulací vyplývá, že pro obvod napájený zdrojem s vysokým vnitřním odporem by mělo být vhodnější zapojení využívající resetování IO555, *Obr. 54*. Dosahující účinnosti 40% a výstupního napětí 3,4V. Je však nutné obvod nejprve realizovat a ověřit zda bude komparátor opravdu schopen kmitat.

Zapojení z *Obr. 52* na kmitání komparátoru nespolehá a mělo by proto být spolehlivější, dochází v něm však k větším ztrátám, pravděpodobně neustálým nabíjením a vybíjením poměrně velkého kondenzátoru C6, optimalizováním nabíjecích cyklů by se měla účinnost zvýšit. Dále by bylo vhodné jej upravit tak, aby se frekvence měnila plynuleji. Jeho účinnost je 30% a výstupní napětí 2,5V.

Analýza citlivosti obvodů na parametry součástek se mi bohužel nepodařila provést, protože vždy skončila chybou konvergence. Dá se však odhadnout, že nejvyšší vliv budou mít zejména odpory nastavující napětí komparátorů, dále odpory a kondenzátor určující frekvenci a střihu IO555.

Navržené obvody nemají kvůli lepší účinnosti žádný obvod hlídající maximum výstupního napětí, jeho hodnota by se při odpojení zátěže mohla nebezpečně zvýšit. Bylo by proto vhodné zvážit použití bloku C z *Obr. 46* pro zastavení kmitání. Ve schématu je místo obvyklé diody, zabraňující vybíjení filtračního kondenzátoru při sepnutí spínače, použit tranzistor. Díky tomu se nepatrně zvýší účinnost. Pokud tento tranzistor ještě přemostíme schottkyho diodou, dosáhneme dalšího zvýšení účinnosti a rychlejšího náběhu po zapnutí. Obvody začínají pracovat od $U_{cc} = 1,6V$. Využitím aktivního usměrňovače namísto diodového můstku by mohlo přinést zlepšení výsledků.

7. Použitá literatura

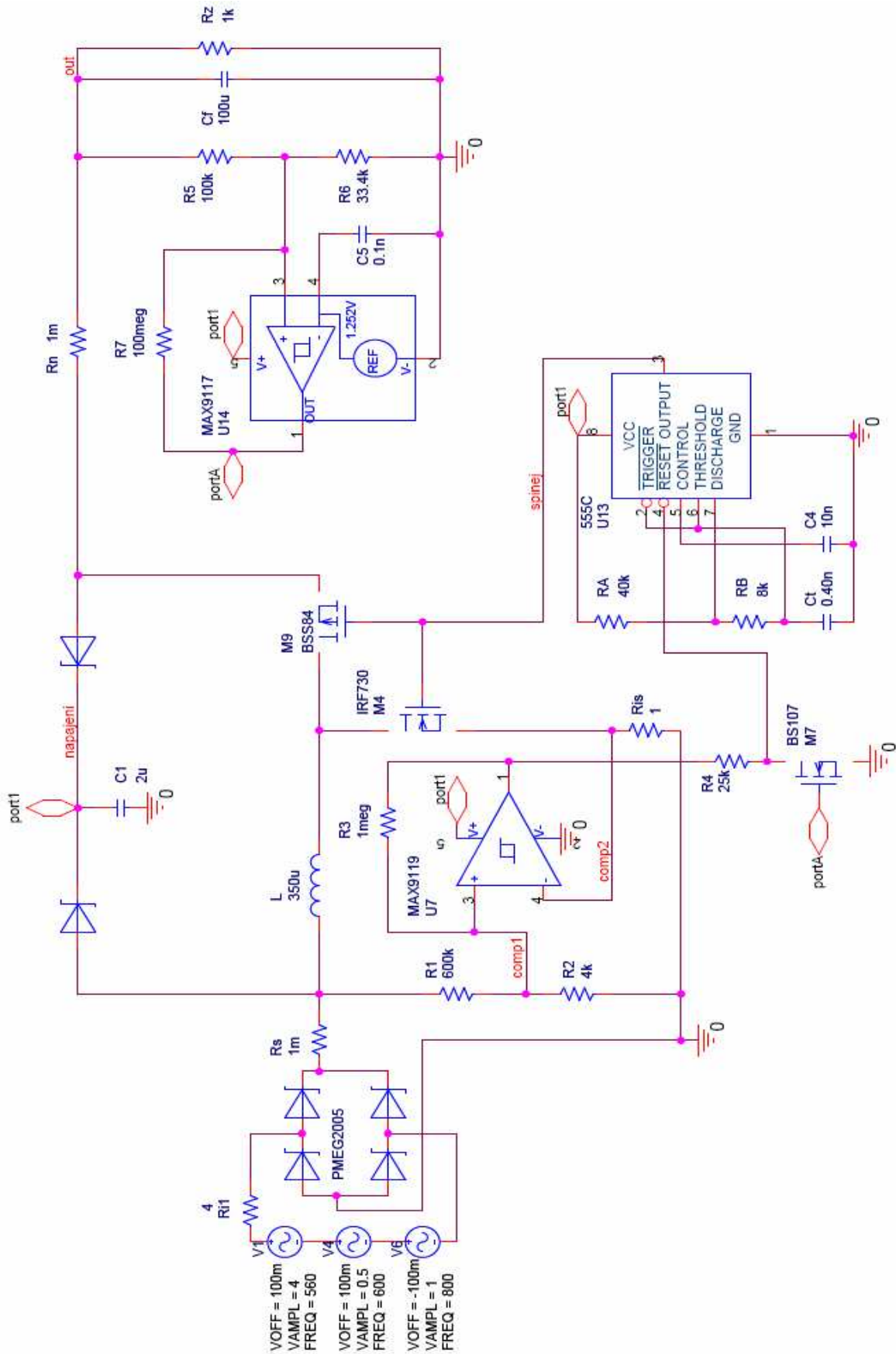
- [1] *Power factor*, Wikipedia, Květen 2007, http://en.wikipedia.org/wiki/Power_factor
- [2] “*Specifikace zdrojů ATX12V - Tolerance napětí, PFC*“. Svět hardware, Květen 2007 http://www.svethardware.cz/art_doc-B1EC249457260C28C1256E840045EA74.html
- [3] VLAD, G. *Topological issues in single-phase power factor correction*, Helsinki University of Technology, 2001. ISBN 951-22-5734-3
- [4] FIALA, P., JIRKŮ, T., STEINBAUER, M. *Research report VII/06 – Power generation*, GRP-Wise, Brno Vysoké učení technické UTEE, 2006.
- [5] MERHAV, Samuel. *Aerospace Sensor Systems and Applications*, Department of Aerospace Engineering Technion, Izrael Institute of Technology Haifa, Israel 1996, ISBN 0-387-94605-5.
- [6] GIURGIUTIU, V., EDWARD, S., Lyhevski. *Micromechatronics – Modeling, Analysis, and Design with Matlab®*, ISBN 0-8493-1593-X
- [7] EDWARD, Sergey, Lyhevski. *Electromechanical Systems, Electric Machines, and Applied Mechatronics*, ISBN 0-8493-2275-8
- [8] WIJKER, Jaap. *Mechanical Vibrations in Spacecraft Design*, Netherlands 2004, ISBN 3-540-40530-5
- [9] European power supply manufacturers association. *Guidelines to the standard EN 61000-3-2*. Wellingborough, Northants, 2004.
- [10] CANALES, F. *Power Factor Correction*. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 2001. An Undergraduate Instructional Module.
- [11] WUIDART, L. *Understanding power factor*. STMicroelectronics Group of companies, 2003.

8. Seznam obrázků

OBR. 1 ZÁKLADNÍ SCHÉMA	4
OBR. 2 VÝSTUPNÍ CHARAKTERISTIKY ZDROJE OBR. 3 POŽADOVANÁ CHARAKTERISTIKA	4
OBR. 4 VEKTOROVÝ DIAGRAM (PLATÍ PRO SINUSOVÉ PRŮBĚHY)	5
OBR. 5 PRŮBĚHY NAPĚTÍ A PROUDU JSOU VZÁJEMNĚ POSUNUTY O 90°, $\cos\phi = 0$; STŘEDNÍ VÝKON JE NULOVÝ [1].....	5
OBR. 6 NAPĚTÍ A PROUD JSOU VE FÁZI, $\cos\phi = 1$; STŘEDNÍ VÝKON JE MAXIMÁLNÍ [1].....	5
OBR. 7 SCHÉMA MŮSTKOVÉHO USMĚRŇOVAČE S VYHLAZOVACÍM FILTREM	7
OBR. 8 PRŮBĚHY U A I USMĚRŇOVAČE S VYHLAZOVACÍM FILTREM	7
OBR. 9 ZASTOUPENÍ JEDNOTLIVÝCH HARMONICKÝCH NA VSTUPU MŮSTKOVÉHO USMĚRŇOVAČE.....	7
OBR. 10 SCHÉMA JEDNODUCHÉHO PFC – SÉRIOVÉ ZAPOJENÍ CÍVKY PŘED USMĚRŇOVAČ	8
OBR. 11 PRŮBĚHY NAPĚTÍ A PROUDU - SÉRIOVÉ ZAPOJENÍ CÍVKY PŘED USMĚRŇOVAČ	8
OBR. 12 SCHÉMA JEDNODUCHÉHO PFC – CÍVKA ZA USMĚRŇOVAČEM.....	9
OBR. 13 PRŮBĚHY NAPĚTÍ A PROUDU – CÍVKA ZA USMĚRŇOVAČEM.....	9
OBR. 14 SCHÉMA USMĚRŇOVAČE SE SÉRIOVOU DOLNÍ PROPUSTÍ NA VSTUPU	10
OBR. 15 PRŮBĚHY NAPĚTÍ A PROUDU - USMĚRŇOVAČE SE SÉRIOVOU DOLNÍ PROPUSTÍ NA VSTUPU.....	10
OBR. 16 SCHÉMA USMĚRŇOVAČE S PARALELNÍ REZONANČNÍ PÁSMOVOU ZÁDRŽÍ NA VSTUPU	10
OBR. 17 PRŮBĚHY NAPĚTÍ A PROUDU - PARALELNÍ REZONANČNÍ PÁSMOVÁ ZÁDRŽÍ NA VSTUPU	11
OBR. 18 PFC S DVOJITÝM FILTREM VYŠŠÍCH HARMONICKÝCH NA VSTUPU	11
OBR. 19 FREKVENČNÍ CHAR. PFC S DVOJITÝM FILTREM VYŠŠÍCH HARMONICKÝCH NA VSTUPU.....	12
OBR. 20 PFC POMOCÍ KONDENZÁTORU NA VSTUPU	12
OBR. 21 PRŮBĚHY NAPĚTÍ A PROUDU - KONDENZÁTOR NA VSTUPU	13
OBR. 22 PFC S POTLAČENÍM VYŠŠÍCH HARMONICKÝCH	13
OBR. 23 PRŮBĚHY NAPĚTÍ A PROUDU - PFC S POTLAČENÍM VYŠŠÍCH HARMONICKÝCH	14
OBR. 24 NF AKTIVNÍ PFC ŘÍZENÝ TRIAKY.....	15
OBR. 25 PRŮBĚHY NAPĚTÍ A PROUDU - PFC ŘÍZENÝ TRIAKY.....	15
OBR. 26 NF AKTIVNÍ PFC „BOOST CONVERTER“	16
OBR. 27 PRŮBĚHY NAPĚTÍ A PROUDU – „BOOST CONVERTER“	16
OBR. 28 NF AKTIVNÍ PFC „BUCK CONVERTER“	17
OBR. 29 PRŮBĚHY NAPĚTÍ A ŘÍDÍCÍCH SIGNÁLŮ - „BUCK CONVERTER“	17
OBR. 30 SCHÉMA MĚNIČE PRVNÍHO ŘÁDU.....	18
OBR. 31 VF AKTIVNÍ PFC „BUCK CONVERTER“	18
OBR. 32 PRŮBĚHY NAPĚTÍ A PROUDU - „BUCK CONVERTER“	19
OBR. 33 VF AKTIVNÍ PFC „BOOST CONVERTER“	19
OBR. 34 PRŮBĚHY NAPĚTÍ A PROUDU - „BOOST CONVERTER“	20
OBR. 35 VF AKTIVNÍ PFC „BUCK-BOOST CONVERTER“	20
OBR. 36 PRŮBĚHY NAPĚTÍ A PROUDU - „BUCK-BOOST CONVERTER“ ZVYŠUJÍCÍ	21
OBR. 37 PRŮBĚHY NAPĚTÍ A PROUDU - „BUCK-BOOST CONVERTER“ SNIŽUJÍCÍ ZAPOJENÍ (DOSAŽENO 6X MENŠÍ DOBOU OTEVŘENÍ TRANZISTORU PŘI STEJNÉ FREKVENCI).....	21
OBR. 38 BLOKOVÉ SCHÉMA OBVODU [4]	22
OBR. 39 PŘEDPOKLÁDANÝ PRŮBĚH NAPĚTÍ NA VÝSTUPU MIKRO-GENERÁTORU [4].....	22
OBR. 40 SCHÉMA USMĚRŇOVAČE, PFC OBVODU A STABILIZÁTORU VÝST.NAPĚTÍ PRO SIMULACI [4]	23
OBR. 41 ČASOVÉ PRŮBĚHY NAPĚTÍ SIMULOVANÉHO OBVODU [4]	24
OBR. 42 SCHÉMA MĚŘENÉHO OBVODU [4]	24
OBR. 43 PRŮBĚHY MĚŘENÉHO OBVODU [4].....	25
OBR. 44 SCHÉMA GENERÁTORU [4].....	26
OBR. 45 VÝSTUPNÍ VÝKON, PROUD A NAPĚTÍ [4]	26
OBR. 46 SCHÉMA NAVRŽENÉHO OBVODU (TAKÉ V PŘÍLOZE)	27
OBR. 47 PRŮBĚHY SIMULOVANÉHO OBVODU	28
OBR. 48 DETAIL PRŮBĚHŮ	28
OBR. 49 PRŮBĚHY PŘI VYŠŠÍM ZATÍŽENÍ OBVODU	29
OBR. 50 PRŮBĚHY PŘI 10VYŠŠÍ FREKVENCI ZDROJŮ	29
OBR. 51 PRŮBĚHY PŘI 10XNIŽŠÍ FREKVENCI ZDROJŮ	30
OBR. 52 SCHÉM OBVODU PRO MALÝ VÝKON	31
OBR. 53 VÝSLEDKY SIMULACE OBVODU PRO MALÝ VÝKON	31
OBR. 54 SCHÉMA OBVODU PRO MALÝ VÝKON S VYUŽITÍM RESETU	32
OBR. 55 SIMULACE OBVODU S VYUŽITÍM RESETU	32
OBR. 56 DETAIL SIMULACE OBVODU S VYUŽITÍM RESETU	33

9. Přílohy

Schéma navrženého obvodu pro zdroje s malým vnitřním odporem:



LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Karel Sládek
Bytem: Mistřice 59, 68712
Narozen/a (datum a místo): 13.srpna 1986 v Uherském Hradišti

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací technika
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
 - diplomová práce
 - bakalářská práce
 - jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Řízení odběru výkonu nekonvenčních zdrojů energie

Vedoucí/ školitel VŠKP: doc. Ing. Pavel Fiala, Ph.D.

Ústav: Ústav teoretické a experimentální elektrotechniky

Datum obhajoby VŠKP: _____

VŠKP odevzdal autor nabyvateli*:

- v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.

4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

* hodící se zaškrtněte

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ihned po uzavření této smlouvy
 - 1 rok po uzavření této smlouvy
 - 3 roky po uzavření této smlouvy
 - 5 let po uzavření této smlouvy
 - 10 let po uzavření této smlouvy
(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 6. června 2008

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Řízení odběru výkonu nekonvenčních zdrojů energie jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 6. června 2008

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Pavlu Fialovi, Ph.D. a panu Ing. Tomášovi Jirků za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mého semestrálního projektu.

V Brně dne 6. června 2008

.....
podpis autora