



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

SPÍNANÝ NAPÁJECÍ ZDROJ S PLANÁRNÍM TRANSFORMÁTOREM

SWITCHING POWER SUPPLY WITH PLANAR TRANSFORMER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. ANDRZEJ PAWLAS

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ ŠEBESTA, Ph.D.

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Mikroelektronika

Student: Bc. Andrzej Pawlas

ID: 83378

Ročník: 2

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Spínaný napájecí zdroj s planárním transformátorem

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se principem činnosti spínaných zdrojů. Prostudujte možnosti aplikace planárních transformátorů pro spínané zdroje. Navrhněte blokové schéma malovýkonového spínaného zdroje (do 100 W) s nastavitelným výstupním napětím, který bude napájen z elektrorozvodné sítě. Proved'te návrh silových částí obvodu s využitím planárního transformátoru.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] KREJČIŘÍK, A. Napájecí zdroje I.-III. BEN - technická literatura, Praha, 1996-1998.

[2] FAKTOR, Z. Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje. BEN - technická literatura, Praha, 2002.

Termín zadání: 8.2.2010

Termín odevzdání: 27.5.2010

Vedoucí práce: Ing. Jiří Šebesta, Ph.D.

prof. Ing. Vladislav Musil, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt:

Tato diplomová práce se zabývá vývojem spínaného zdroje s planárním transformátorem. Zabývá se výběrem vhodného integrovaného obvodu spolu s topologií, zakoupením referenčního prototypu pro měření a hledání chyb vlastního zdroje. Dále návrhem a realizací planárního transformátoru a ve finále realizací, laděním a proměřením vlastního prototypu. Zdroj byl plně funkční a dosahoval předpokládaných parametrů.

Abstract:

This master's thesis describes the development of switching power supply with planar transformer. Deals with selection of a suitable integrated circuit together with the topology, a purchase of prototype for the reference measurements and debugging its own power supply. Further design and implementation of planar transformer and in the final implementation, debugging, and measurement's its own prototype. Power supply was fully functional and reached the expected parameters.

Klíčová slova:

Planární transformátor, Spínaný zdroj, Flyback, UCC28600.

Keywords:

Planar transformer, Switching power supply, Flyback, UCC28600.

Bibliografická citace díla:

PAWLAS, A. *Spínaný napájecí zdroj s planárním transformátorem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 58 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Šebesta, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové 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 27. 5. 2010

.....

Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Jiří Šebestovi, Ph.D. za odborné vedení a cenné rady při zpracovávání daného tématu a Ing. Pavlu Šteffanovi, Ph.D. za zapůjčení termokamery a čtyřkanálového osciloskopu. Dále bych chtěl poděkovat firmám Texas Instruments a Coilcraft, které mi bezplatně zasílaly vzorky součástek. Také děkuji Bc. Tomáši Přikrylovi, Radku Chlupovi a firmě Gatema za výrobu DPS. V neposlední řadě děkuji firmě GHV trading a Bc. Dušanu Zošiakovi za pomoc s osciloskopem. Na závěr bych chtěl poděkovat rodině a blízkým za značnou psychickou a finanční podporu při překonávání problémů spojenými s prací.

OBSAH

| | |
|---|-----------|
| ÚVOD | 11 |
| 1 TEORETICKÝ ÚVOD | 12 |
| 1.1 SPÍNANÉ ZDROJE..... | 12 |
| 1.1.1 <i>Úvod do problematiky síťových spínaných zdrojů</i> | 12 |
| 1.1.2 <i>Flyback topologie</i> | 13 |
| 1.1.3 <i>Forward topologie</i> | 13 |
| 1.1.4 <i>Half-Bridge topologie</i> | 14 |
| 1.1.5 <i>Full-Bridge topologie</i> | 14 |
| 1.1.6 <i>Push-Pull topologie</i> | 15 |
| 1.2 PLANÁRNÍ TRANSFORMÁTOR | 16 |
| 2 PARAMETRY SPÍNANÉHO ZDROJE | 17 |
| 2.1 UC3842 | 18 |
| 2.2 NCP1651 | 19 |
| 2.3 UCC28600..... | 20 |
| 3 PROTOTYP FIRMY TEXAS INSTRUMENTS S UCC28600 | 25 |
| 4 NÁVRH A REALIZACE SPÍNANÉHO ZDROJE S PLANÁRNÍM TRANSFORMÁTOREM | 26 |
| 4.1 NÁVRH PLANÁRNÍHO TRANSFORMÁTORU | 26 |
| 4.1.1 <i>Výpočet klíčových parametrů</i> | 26 |
| 4.1.2 <i>Návrh DPS</i> | 28 |
| 4.1.3 <i>Realizace ve firmě Gatema</i> | 29 |
| 4.1.4 <i>Kontrola polarity planárního transformátoru</i> | 30 |
| 4.1.5 <i>Testování na prototypu firmy Texas Instruments</i> | 31 |
| 4.2 NÁVRH VLASTNÍHO PROTOTYPU | 32 |
| 4.2.1 <i>Výpočet klíčových parametrů</i> | 32 |
| 4.2.2 <i>Návrh DPS</i> | 34 |
| 4.2.3 <i>Realizace ve firmě Gatema</i> | 35 |
| 4.2.4 <i>Ladění</i> | 35 |
| 4.3 NÁVRH A REALIZACE AKTIVNÍ ZÁTĚŽE..... | 38 |
| 4.4 MĚŘENÍ | 39 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.4.1 | <i>Měření spínaného zdroje firmy TI</i> | 40 |
| 4.4.2 | <i>Měření vlastního prototypu</i> | 42 |
| 4.4.3 | <i>Měření termokamerou</i> | 48 |
| 4.4.4 | <i>Porovnání zdroje firmy TI a zdroje řešeného v diplomové práci</i> | 50 |
| 5 | ZÁVĚR | 51 |
| 6 | POUŽITÁ LITERATURA | 52 |
| 7 | POUŽITÉ ZKRATKY | 54 |
| 8 | PŘÍLOHY | 55 |

Seznam obrázků

| | |
|--|----|
| OBR. 1 BLOKOVÉ SCHÉMA SÍTOVÉHO SPÍNANÉHO ZDROJE [1]..... | 12 |
| OBR. 2 A) ZÁKLADNÍ SCHÉMA (PŘEVZATO Z [2]) B) ČASOVÝ PRŮBĚH (PŘEVZATO Z [2]) | 13 |
| OBR. 3 A) ZÁKLADNÍ SCHÉMA (PŘEVZATO Z [2]) B) ČASOVÝ PRŮBĚH (PŘEVZATO Z [2]) | 13 |
| OBR. 4 A) ZÁKLADNÍ SCHÉMA (PŘEVZATO Z [2]) B) ČASOVÝ PRŮBĚH (PŘEVZATO Z [2]) | 14 |
| OBR. 5 A) ZÁKLADNÍ SCHÉMA (PŘEVZATO Z [2]) B) ČASOVÝ PRŮBĚH (PŘEVZATO Z [2]) | 14 |
| OBR. 6 A) ZÁKLADNÍ SCHÉMA (PŘEVZATO Z [2]) B) ČASOVÝ PRŮBĚH (PŘEVZATO Z [2]) | 15 |
| OBR. 7 PLANÁRNÍ TRANSFORMÁTOR..... | 16 |
| OBR. 8 BLOKOVÉ SCHÉMA S PFC [3]..... | 17 |
| OBR. 9 BLOKOVÉ SCHÉMA UC3842 (PŘEVZATO Z [4])..... | 18 |
| OBR. 10 BLOKOVÉ SCHÉMA NCP1651 (PŘEVZATO Z [5]) | 19 |
| OBR. 11 NCP1651 V 18,4V 4,86A ADAPTÉRU (ZVLNĚNÍ 800mV PK-PK) (PŘEVZATO Z [6])..... | 20 |
| OBR. 12 BLOKOVÉ SCHÉMA UCC28600 (PŘEVZATO Z [7])..... | 21 |
| OBR. 13 NAPĚTÍ NA TRANZISTORU PŘI QR SPÍNÁNÍ [9] | 22 |
| OBR. 14 VÝVOJOVÝ DIAGRAM UCC28600 [7]..... | 23 |
| OBR. 15 PŘEPÍNÁNÍ MEZI REŽIMY OPERACE [7]..... | 24 |
| OBR. 16 SCHÉMA PFC VE ZDROJI (PŘEVZATO Z [8]) | 25 |
| OBR. 17 SCHÉMA SPÍNANÉHO ZDROJE S UCC28600 (PŘEVZATO Z [8])..... | 25 |
| OBR. 18 DPS PLANÁRNÍ TRANSFORMÁTOR | 28 |
| OBR. 19 PLANÁRNÍ TRANSFORMÁTOR – VRSTVY | 29 |
| OBR. 20 STRUKTURA DPS | 30 |
| OBR. 21 TESTOVÁNÍ POLARITY TRANSFORMÁTORU | 31 |
| OBR. 22 TESTOVÁNÍ TRANSFORMÁTORU NA PROTOTYPU FIRMY TEXAS INSTRUMENTS | 31 |
| OBR. 23 SCHÉMA SPÍNANÉHO ZDROJ S PLANÁRNÍM TRANSFORMÁTOREM..... | 33 |
| OBR. 24 DPS VRCHNÍ STRANA | 34 |
| OBR. 25 DPS PRO SPÍNANÝ ZDROJ | 35 |
| OBR. 26 MĚŘICÍ A LADICÍ PRACOVÍŠTĚ | 36 |
| OBR. 27 ČASOVÝ PRŮBĚH POMOCNÉHO VINUTÍ TRANSFORMÁTORU A NAPÁJECÍHO NAPĚTÍ UCC28600 | 37 |
| OBR. 28 ČASOVÝ PRŮBĚH VÝSTUPNÍHO ZVLNĚNÍ PŘI VÝSTUPNÍM NAPĚTÍ 19 V A PROUDU 6 A. 37 | 37 |
| OBR. 29 SCHÉMA AKTIVNÍ ZÁTĚŽE | 38 |
| OBR. 30 DPS AKTIVNÍ ZÁTĚŽE..... | 39 |
| OBR. 31 OSCILOSKOPICKÁ SONDA UPRAVENA PRO MINIMALIZACI PROUDOVÉ SMYČKY [18].... | 39 |

| | |
|--|----|
| OBR. 32 ZVLNĚNÍ VÝSTUPNÍHO NAPĚTÍ MĚŘENO PŘI $V_{OUT} = 19,4 \text{ V}$, $I_{OUT} = 0 \text{ A}$ | 40 |
| OBR. 33 ZVLNĚNÍ VÝSTUPNÍHO NAPĚTÍ MĚŘENO PŘI $V_{OUT} = 19,4 \text{ V}$, $I_{OUT} = 0,5 \text{ A}$ | 40 |
| OBR. 34 ZVLNĚNÍ VÝSTUPNÍHO NAPĚTÍ MĚŘENO PŘI $V_{OUT} = 19,4 \text{ V}$, $I_{OUT} = 6 \text{ A}$ | 41 |
| OBR. 35 ZTĚŽOVACÍ CHARAKTERISTIKA PRO $V_{OUT} = 19,4 \text{ V}$ | 41 |
| OBR. 36 ZVLNĚNÍ VÝSTUPNÍHO NAPĚTÍ MĚŘENO PŘI $V_{OUT} = 19,4 \text{ V}$, $I_{OUT} = 0 \text{ A}$ | 42 |
| OBR. 37 ZVLNĚNÍ VÝSTUPNÍHO NAPĚTÍ MĚŘENO PŘI $V_{OUT} = 19,4 \text{ V}$, $I_{OUT} = 0,5 \text{ A}$ | 43 |
| OBR. 38 ZVLNĚNÍ VÝSTUPNÍHO NAPĚTÍ MĚŘENO PŘI $V_{OUT} = 19,4 \text{ V}$, $I_{OUT} = 6 \text{ A}$ | 43 |
| OBR. 39 ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTIKA PRO $V_{OUT} = 12 \text{ V}$ | 44 |
| OBR. 40 ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTIKA PRO $V_{OUT} = 19,4 \text{ V}$ | 44 |
| OBR. 41 ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTIKA PRO $V_{OUT} = 25 \text{ V}$ | 45 |
| OBR. 42 ÚSPORNÝ REŽIM, SÉRIE 40 KHZ PULZŮ ($V_{OUT}=19,4 \text{ V}$; $I_{OUT}=0,2 \text{ A}$)..... | 46 |
| OBR. 43 „FREQUENCY FOLDBACK MODE“, SPÍNACÍ KMITOČET 115 KHZ ($V_{OUT}=19,4 \text{ V}$; $I_{OUT}=1,6 \text{ A}$)..... | 46 |
| OBR. 44 „DISCONTINUOUS CURRENT MODE“, SPÍNACÍ KMITOČET 130 KHZ ($V_{OUT}=19,4 \text{ V}$; $I_{OUT}=4,6 \text{ A}$)..... | 47 |
| OBR. 45 „QUASI-RESONANT MODE“, SPÍNACÍ KMITOČET 116 KHZ ($V_{OUT}=19,4 \text{ V}$; $I_{OUT}=5,6 \text{ A}$) . | 47 |
| OBR. 46 REFERENČNÍ TI ZDROJ PŘI ZATÍŽENÍ 100 % PO UPLYNUTÍ 3 MINUT | 48 |
| OBR. 47 VLASTNÍ PROTOTYP PŘI ZATÍŽENÍ 0 % PO UPLYNUTÍ 5 MINUT | 48 |
| OBR. 48 VLASTNÍ PROTOTYP PŘI ZATÍŽENÍ 50 % PO UPLYNUTÍ 5 MINUT | 49 |
| OBR. 49 VLASTNÍ PROTOTYP PŘI ZATÍŽENÍ 100 % PO UPLYNUTÍ 10 MINUT | 49 |
| OBR. 50 FINÁLNÍ VERZE SPÍNANÉHO ZDROJ S PLANÁRNÍM TRANSFORMÁTOREM | 50 |
| OBR. 51 MOTIV DPS SPÍNANÉHO ZDROJE STRANA TOP 1:1 | 55 |
| OBR. 52 MOTIV DPS SPÍNANÉHO ZDROJE STRANA BOTTOM 1:1 | 55 |
| OBR. 53 OSAZOVACÍ PLÁN DPS SPÍNANÉHO ZDROJE STRANA TOP 1:1 | 56 |
| OBR. 54 OSAZOVACÍ PLÁN DPS SPÍNANÉHO ZDROJE STRANA BOTTOM 1:1 | 56 |

Seznam tabulek

| | |
|---|----|
| TAB. 1 PRVNÍ VÝPOČET PARAMETRŮ PLANÁRNÍHO TRANSFORMÁTORU | 27 |
| TAB. 2 DRUHÝ VÝPOČET PARAMETRŮ PLANÁRNÍHO TRANSFORMÁTORU | 28 |
| TAB. 3 MĚŘENÍ VLASTNÍHO PROTOTYPU PŘI VÝSTUPNÍM NAPĚTÍ NASTAVENÉM NA 12 V..... | 57 |
| TAB. 4 MĚŘENÍ VLASTNÍHO PROTOTYPU PŘI VÝSTUPNÍM NAPĚTÍ NASTAVENÉM NA 19,4 V..... | 57 |
| TAB. 5 MĚŘENÍ VLASTNÍHO PROTOTYPU PŘI VÝSTUPNÍM NAPĚTÍ NASTAVENÉM NA 25 V..... | 58 |
| TAB. 6 MĚŘENÍ PROTOTYPU TI PŘI VÝSTUPNÍM NAPĚTÍ NASTAVENÉM NA 19,4 V | 58 |

Úvod

Spínané zdroje úspěšně konkurují v oblasti napájení klasickým lineárním zdrojům. Své místo si najdou v různých elektronických zařízeních počínaje počítači, mobilními telefony, televizory, nabíječkami a konče svářečkami, družicemi.

Vysoká účinnost, nízká hmotnost a malé rozměry jsou jejich hlavními výhodami. Nevýhodou je však složitost návrhu, konstrukce a často vyšší obsah rušení.

Cílem diplomové práce je navržení regulovatelného spínaného zdroje s využitím planárního transformátoru. Vstupní napětí je síťové napětí v rozsahu $85 V_{\text{RMS}} - 265 V_{\text{RMS}}$ a výstupní je možno nastavit v rozsahu $12 V - 25 V$. Proudově můžeme zdroj zatížit $0 A$ až $6 A$.

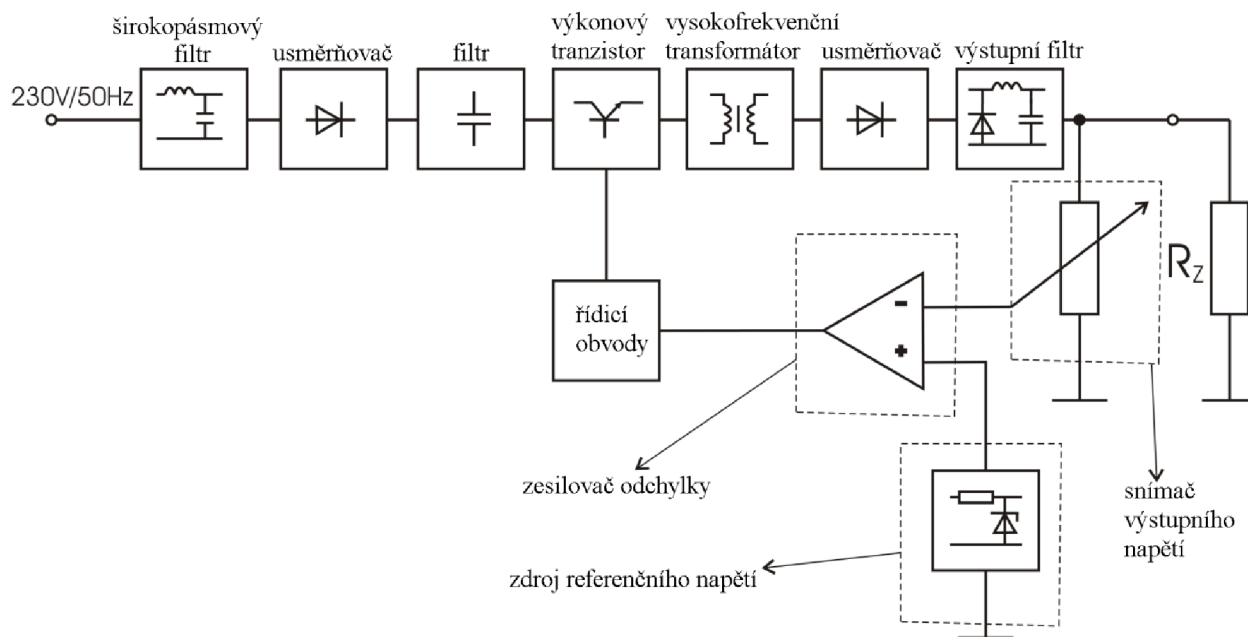
1 Teoretický úvod

1.1 Spínané zdroje

1.1.1 Úvod do problematiky síťových spínaných zdrojů

Vstupní síťové napětí je usměrněno a jednoduše filtrováno - širokopásmový filtr na vstupu zabraňuje pronikání rušivých signálů ze zdroje do sítě. Mezi usměrňovač a filtr se vkládá PFC (power factor corector – upravovač hodnoty účinníku) z důvodů zvýšení hodnoty účinníku. Elektronický spínač je řízen ve smyčce zpětné vazby tak, aby výstupní napětí bylo konstantní. Za spínačem je obdélníkové napětí o frekvenci desítek kHz, toto napětí je transformováno impulsním transformátorem s feritovým jádrem na potřebnou velikost. Transformované napětí se usměrňuje Schottkyho diodami a dále je filtrováno výstupním filtrem. Zdroj zpětné vazby je stejný jako u lineárních zdrojů, navíc je zde obvod buzený spínačem, který mění stejnosměrné napětí na obdélníkové. Spínané zdroje nabízí vyšší účinnost než klasické lineární zdroje. Řízení a návrh je však složitější.

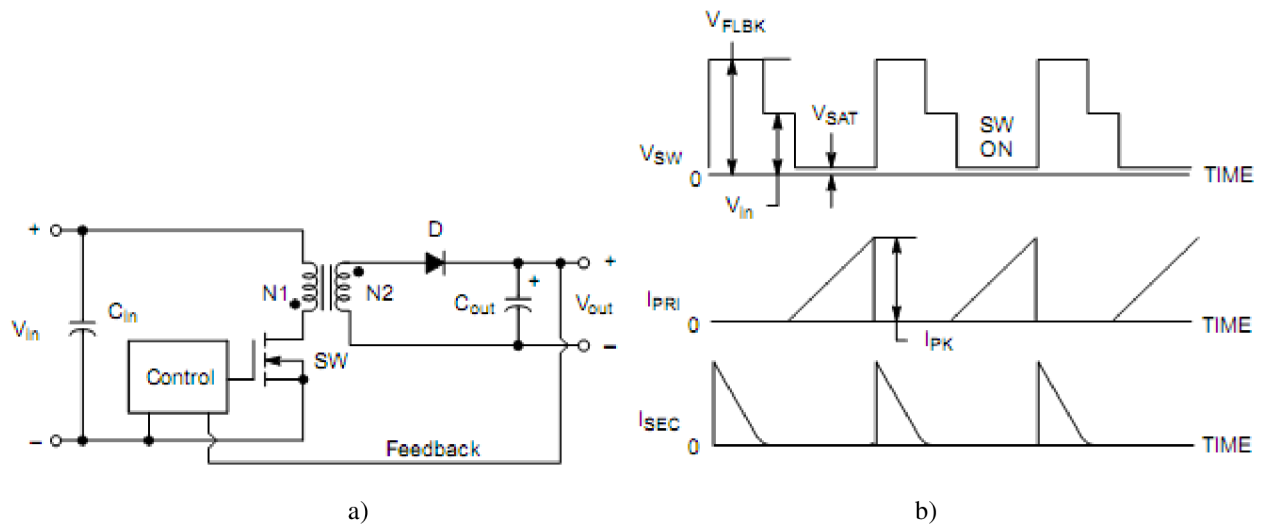
Používají se různé topologie: Flyback, Forward, Half-Bridge, Full-Bridge, Push-pull.



Obr. 1 Blokové schéma síťového spínaného zdroje [1]

1.1.2 Flyback topologie

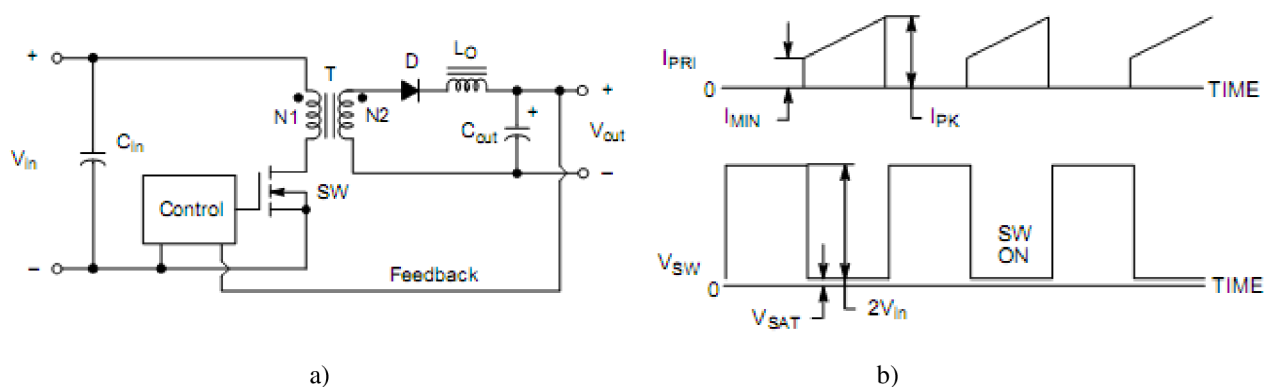
Výhodami této topologie je nízký počet součástek, jednoduchý transformátor, široký rozsah vstupních napětí a malý výstupní výkon. Nevýhodami je nízká účinnost při vysokých výstupních výkonech, velké proudové špičky a vysoké napětí na spínacím tranzistoru. Topologii se doporučuje používat pro výkony do 200 W. Cena je nízká.



Obr. 2 a) Základní schéma (převzato z [2]) b) Časový průběh (převzato z [2])

1.1.3 Forward topologie

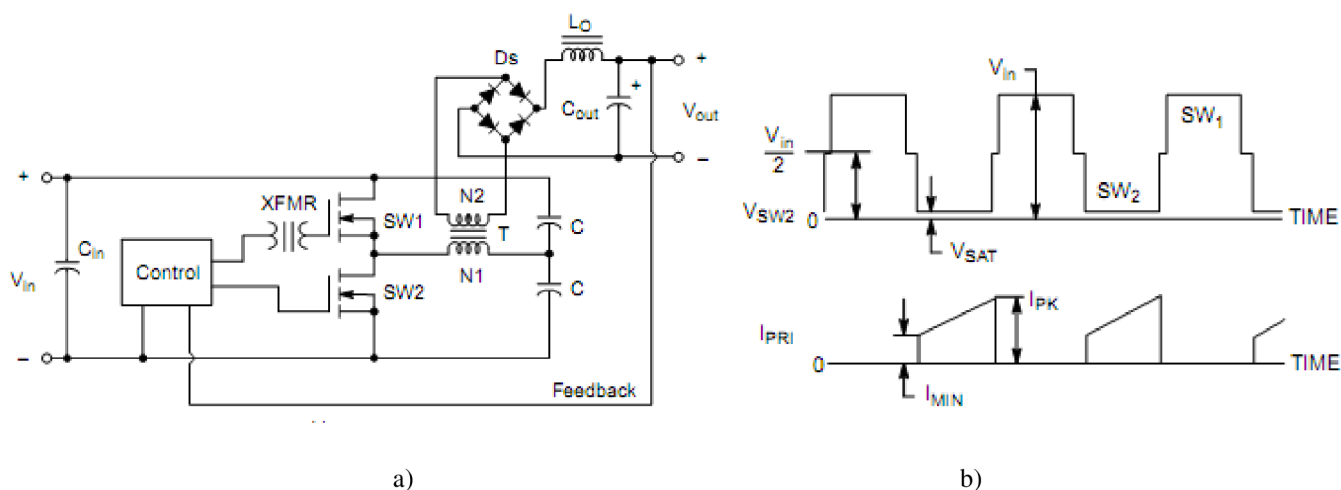
U této topologie je výhodou střední rozsah výstupních výkonů. Nevýhodou je omezený rozsah vstupních napětí, reset transformátoru a vysoké napětí na tranzistoru. Používá se od 100 W do 500 W. Topologie se rozlišuje na zapojení s jedním nebo se dvěma tranzistory. Cena je střední.



Obr. 3 a) Základní schéma (převzato z [2]) b) Časový průběh (převzato z [2])

1.1.4 Half-Bridge topologie

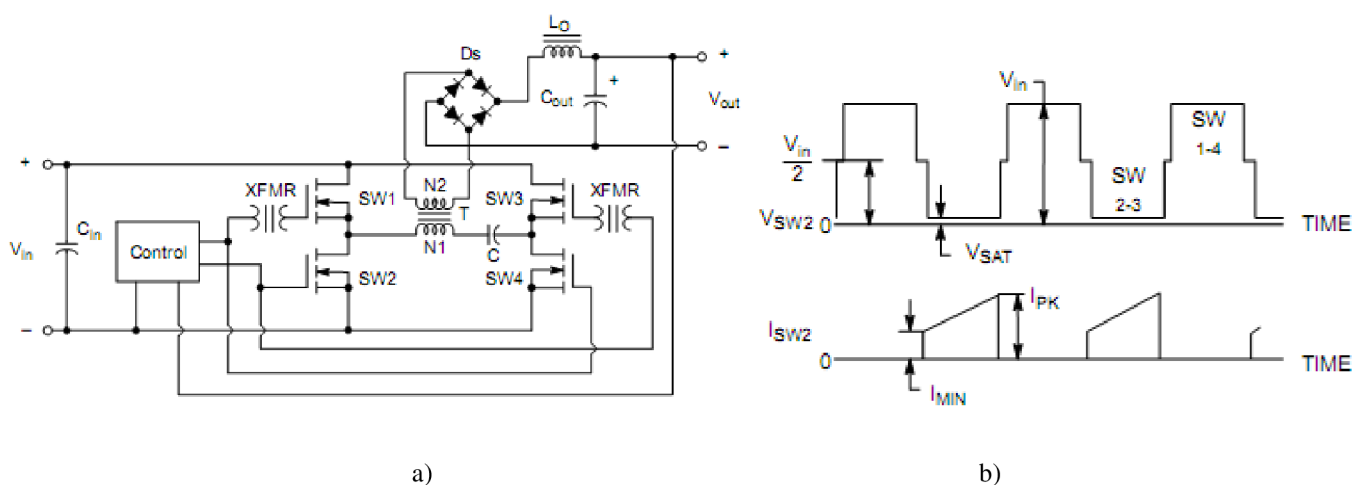
Jedná se o zapojení pro střední výkony od 100 W do 500 W. Výhodou je malé napětí na spínacím tranzistoru, maximální střída blíží se 100 %. Nevýhodou je omezený vstupní rozsah, řízení horního tranzistoru, sekundární vinutí transformátoru se společným středem. Cena je střední.



Obr. 4 a) Základní schéma (převzato z [2]) b) Časový průběh (převzato z [2])

1.1.5 Full-Bridge topologie

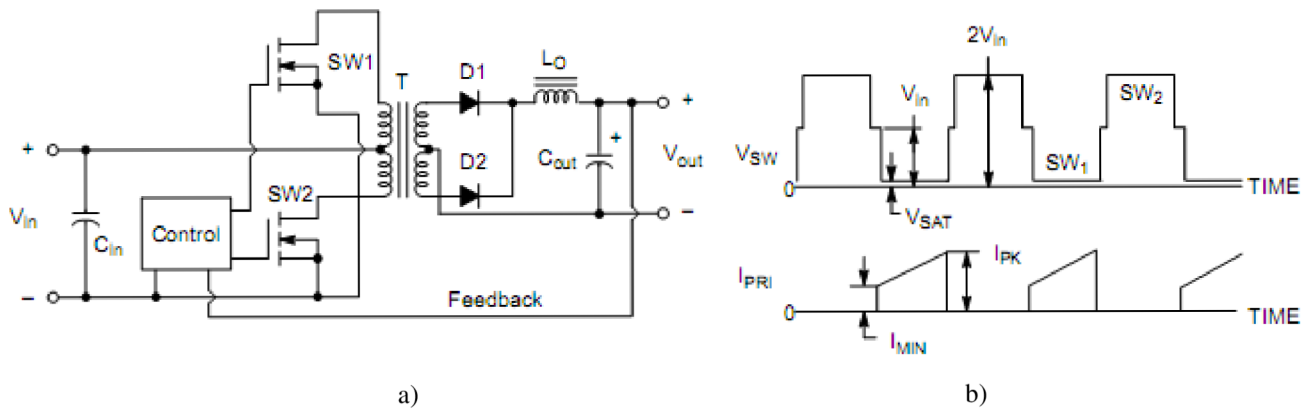
Je použitelná pro oblast vysokých výkonů, větších než 500 W. Výhodami je efektivní návrh transformátoru, maximální střída až 100 % a malé napětí na spínacím tranzistoru. Nevýhodou jsou čtyři spínací tranzistory a složitější řízení horních tranzistorů. Cena je vysoká.



Obr. 5 a) Základní schéma (převzato z [2]) b) Časový průběh (převzato z [2])

1.1.6 Push-Pull topologie

Používá se pro oblast středních výkonů (25 W - 200 W). Výhodami je maximální střída až 100 %, malá výstupní indukčnost, řízení tranzistorů. Nevýhodou je vysoké napětí na tranzistorech, omezený rozsah vstupních napětí, transformátor s vyvedeným středem. Cena je průměrná.



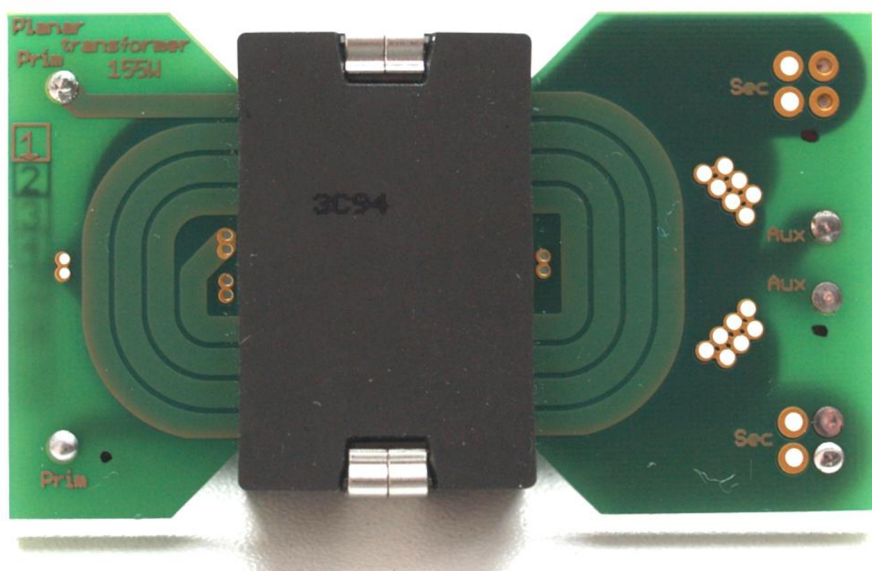
Obr. 6 a) Základní schéma (převzato z [2]) b) Časový průběh (převzato z [2])

1.2 Planární transformátor

Planární transformátory jsou zajímavou alternativou ke klasickým transformátorům používaným především ve spínaných zdrojích. Můžeme je použít jako samostatné součástky, nebo jsou integrovány přímo do vícevrstvé DPS (deska plošného spoje) ve spínaném zdroji. V podstatě se jedná o výrobu cívek pomocí technologie vícevrstvných plošných spojů nebo měděných výlisků oddělených izolační fólií. Takto vytvořená vinutí jsou umístěna do EE nebo E/PLT nízkoprofilových feritových jader. [10]

Výhody planárních transformátorů:

- Vysoká účinnost, typicky 98 %
- Malá rozptylová indukčnost, typicky méně než 0,2 % primární indukčnosti
- Malé rozměry, váha
- Velké rozpětí pracovních kmitočtů, 20 kHz – 2 MHz
- Dobrý rozvod tepla
- Velká výkonová zatížitelnost až 20 kW
- Výborná reprodukovatelnost parametrů



Obr. 7 Planární transformátor

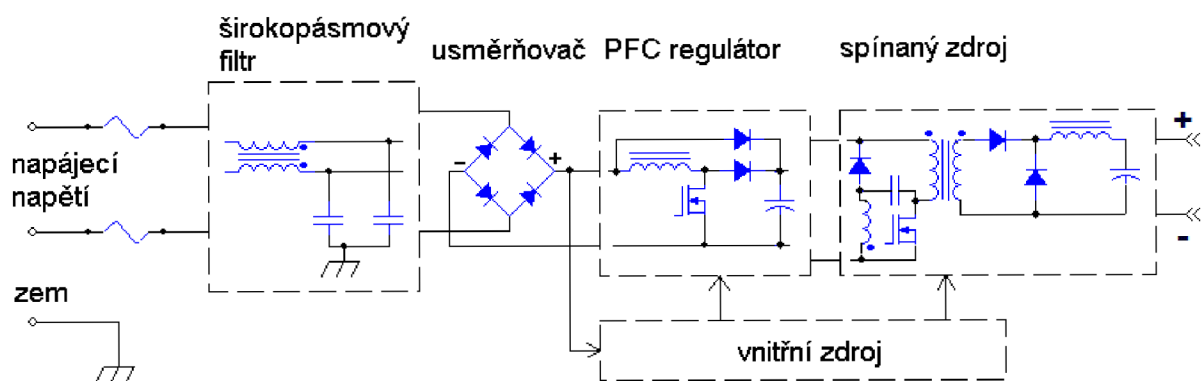
2 Parametry spínaného zdroje

Při samotném řešení návrhu spínaného zdroje byla prostudována nabídka firem Analog Devices, Maxim, National Instruments, On semiconductor, Texas Instruments, Linear Technology. Nakonec byly vybrány tyto tři integrované obvody.

- UC3842 firmy Fairchild semiconductor
- NCP1651 firmy On semiconductor
- UCC28600 firmy Texas Instruments

Parametry zdroje:

- Napájení z rozvodné sítě
- Výstupní napětí 10 V – 25 V
- Maximální výstupní proud 6 A
- Planární transformátor
- Výstupní zvlnění do 200 mV
- Vysoká účinnost a možnost použití PFC

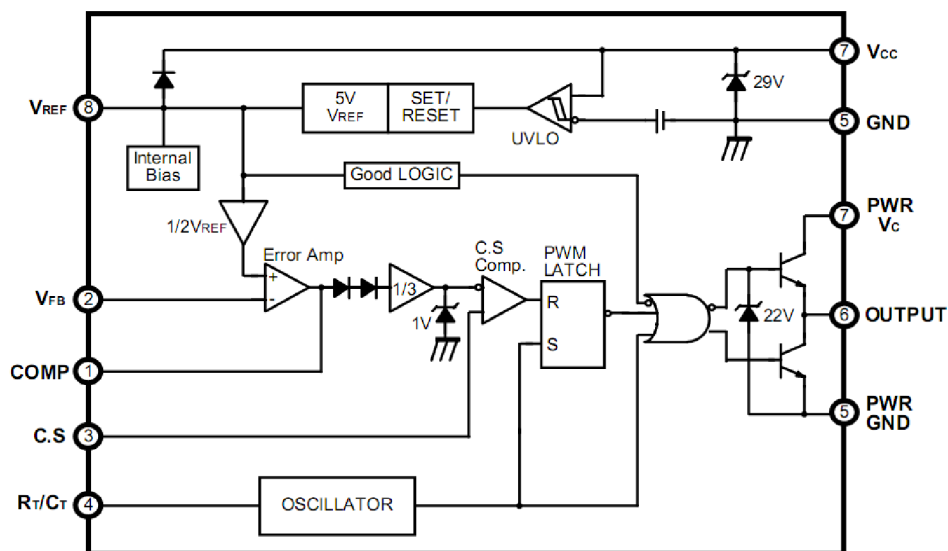


Obr. 8 Blokové schéma s PFC [3]

2.1 UC3842

Obvod UC3842 je určen pro realizaci DC-DC měničů a síťových zdrojů s impulsním transformátorem pracujících s pevnou frekvencí a řízením proudu primárního vinutí. Obvod obsahuje vlastní oscilátor, u kterého se frekvence nastavuje pomocí externě připojené kombinace kondenzátoru C_T a rezistoru R_T . Oscilátor lze také synchronizovat vnějším signálem, a to z důvodu potlačení rušení. Dále jsou zde obvody pro řízení impulsů pomocí externího spínače. Dalšími součástmi tohoto obvodu jsou budič výkonového tranzistoru, vnitřní napěťová reference vypínaná při podpětí a obvod detekce podpětí s hysterezí. Obvod pracuje na principu řízení maximálního primárního vinutí podle odchylky výstupního napětí.

Obvod splňuje požadavky zadání, avšak nedosahuje tak vysoké účinnosti.



Obr. 9 Blokové schéma UC3842 (převzato z [4])

Legenda:

Internal bias – vnitřní stabilizátor

Oscillator – oscilátor

PWM latch – PWM modulátor

Good logic – detektor poruchy

UVLO – vypínač při podpětí

Set/reset – nastavovací, resetovací obvod

5 V Vref – 5 V reference

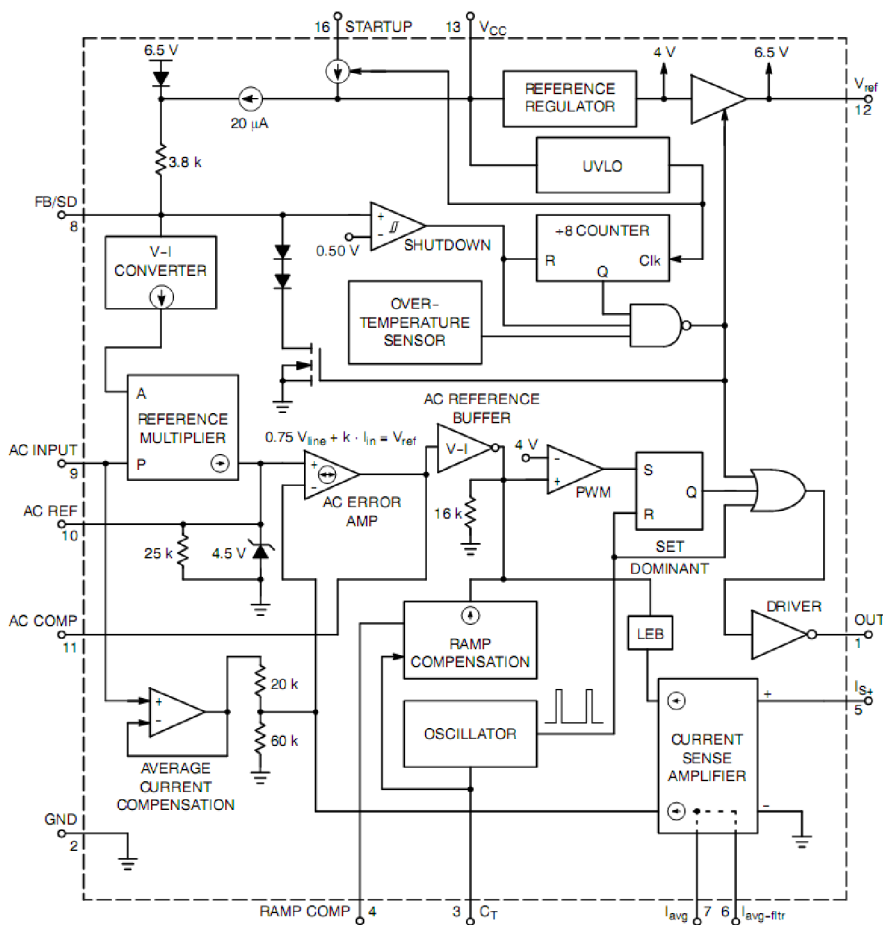
CS comp – proudový komparátor

Error amp – chybový komparátor

2.2 NCP1651

Jedná se o obvod pro síťový spínaný zdroj používající flyback topologii. Jeho největší výhodou je aktivní PFC obsažené přímo v obvodu. Obsahuje vlastní oscilátor umožňující nastavení frekvence v rozsahu 25 kHz – 250 kHz, proudovou zpětnou vazbu, funkci vypnutí v případě přehřátí, ochranu výstupu proti předpětí a podpětí. Dokáže pracovat v kontinuálním, nebo diskontinuálním režimu v závislosti na indukčnosti transformátoru.

NCP1651 by bylo možno použít, avšak díky integrovanému PFC obvod obsahuje na výstupu značné zvlnění (v řádech 100 mV). K jeho odfiltrování tak, aby odpovídalo zadání, by bylo zapotřebí značné filtrační kapacity (v řádech 10 mF). Celé zařízení by tak bylo velké.



Obr. 10 Blokové schéma NCP1651 (převzato z [5])

Legenda:

Reference regulator – stabilizátor referenčního napětí

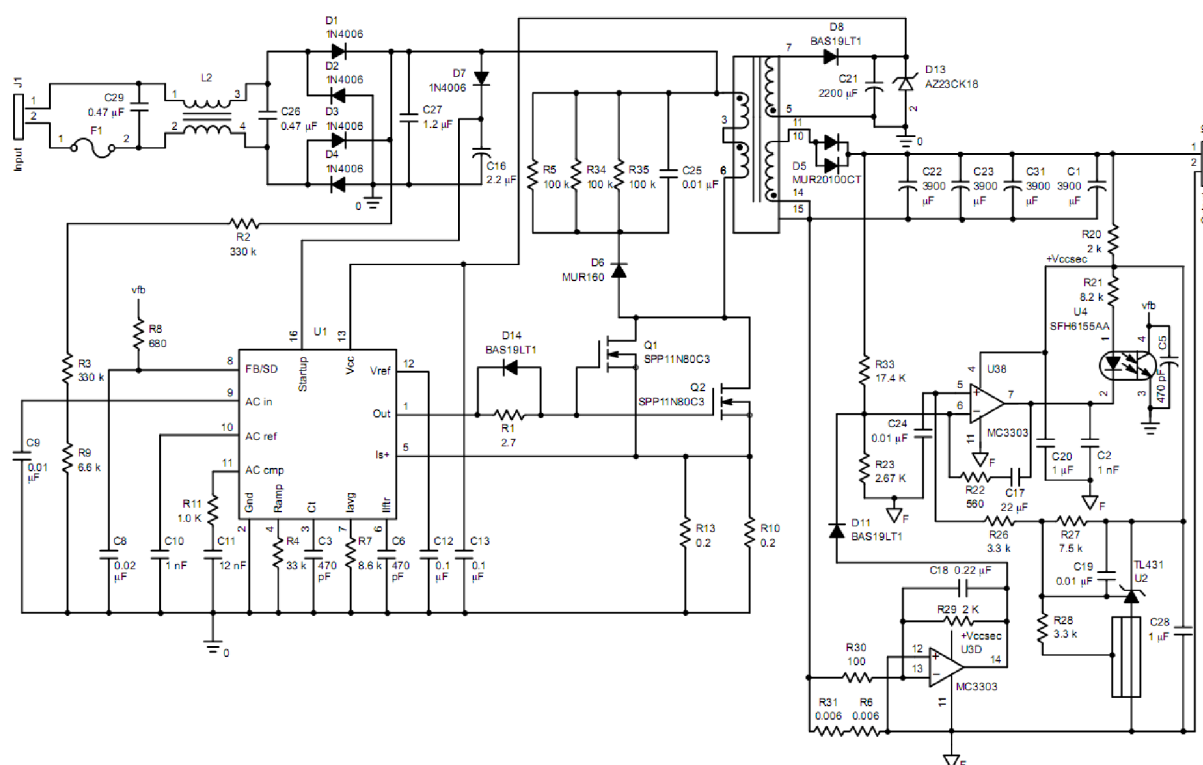
UVLO – vypínač při podpětí

8 counter – osmibitová čítačka

Over temperature sensor – čidlo přehřátí

Shutdown – vypínací obvod

- V-I converter – konvertor napětí na proud
- Reference multiplier – referenční násobička
- AC error amp – zesilovač chyby střídavého napětí
- AC reference buffer – zásobník reference střídavého napětí
- Oscillator – oscilátor
- Ramp compensation – kompenzace skoku
- LEB (Leading edge blanker) – odstraňovač počáteční smyčky
- Average current compensation – kompenzace průměrné hodnoty proudu



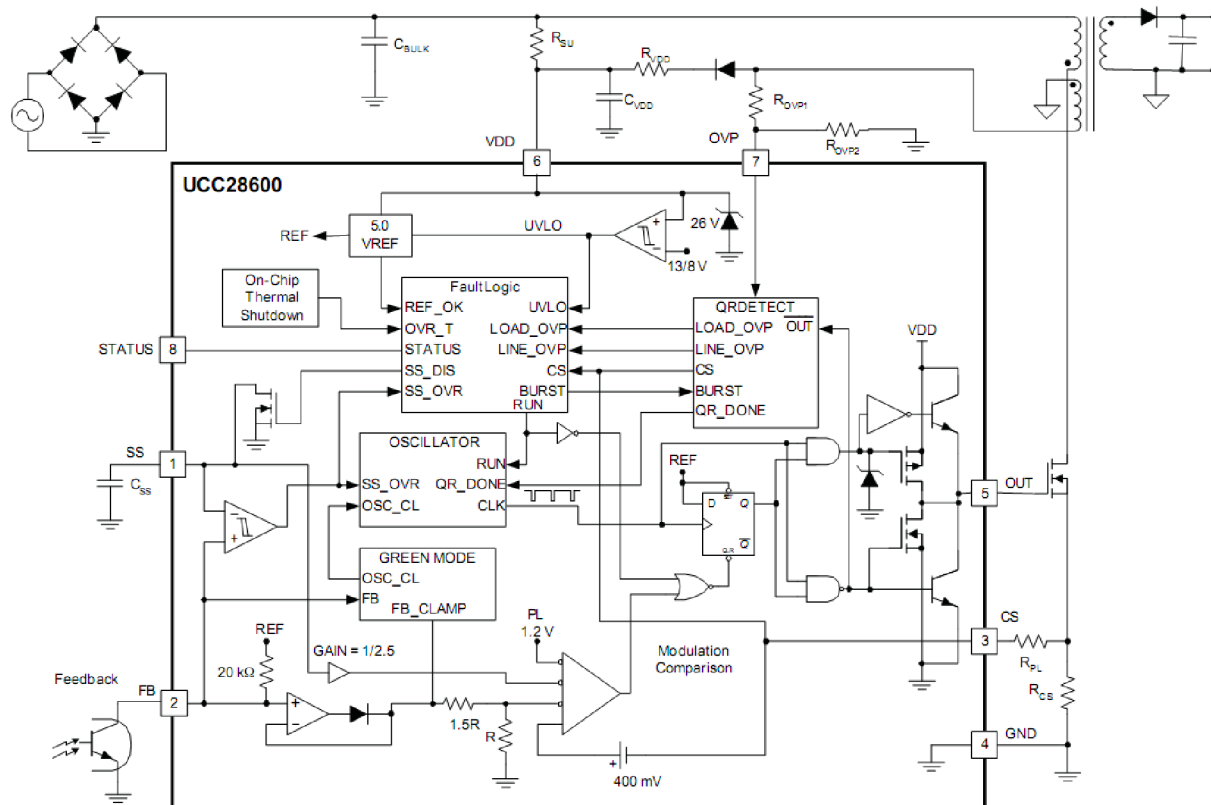
Obr. 11 NCP1651 v 18,4V 4,86A adaptéru (zvlnění 800mV pk-pk) (převzato z [6])

2.3 UCC28600

Jedná se o „Green-Mode” obvod s pokročilými funkcemi pro šetření energie. Obsahuje programovatelný soft-start, status pin, který vypíná externí PFC obvod při velice malé zátěži, malý startovní proud (max. 25 μ A), ochranu proti přehřátí, proudovou ochranu.

Obvod pracuje v takzvaném multi-mod režimu. Přepínání mezi režimy se provádí automaticky v závislosti na velikosti zátěže. Obvod přepíná mezi „Soft start mode”, „Green-Mode”, „Frequency Foldback Mode”, „Quasi-Resonant / Discontinuous conduction Mode” a „Fault Mode”.

UCC28600 vyhovuje veškerým parametrům zadání, proto bylo pokračováno v tvorbě zdroje s tímto řídicím obvodem.



Obr. 12 Blokové schéma UCC28600 (převzato z [7])

Legenda:

5.0 Vref – 5 V reference

UVLO – vypínač při podpětí

Fault logic – chybová logika

On-chip thermal shutdown – vypnutí při přehřátí

QR detect – detektor polo-rezonance

Oscillator – oscilátor

Green mode – ekologický režim

Modulation comparison – porovnání modulace

- Režim „Soft start“.

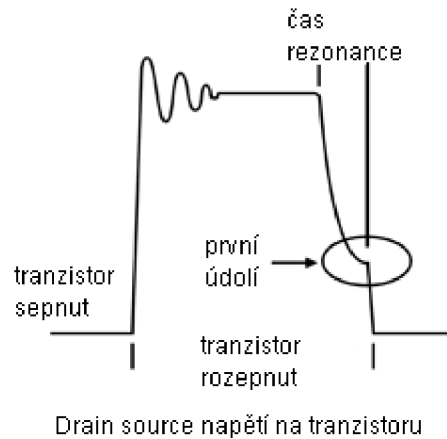
Jedná se o režim tzv. „tvrdého“ spínání, kdy obvod spíná s kmitočtem 40kHz, dokud V_{FB} bude menší než V_{SS} po prvním snížení napětí pod detekovanou úroveň.

- Režim „Quasi-Resonant / Discontinuous conduction Mode“.

Tyto režimy jsou aktivní při zátěži přibližně od 30 % do 100 % maximálního výkonu. V_{FB} se nachází mezi 2 V a 4 V. V_{CS} pak musí být mezi 0,4 V a 0,8 V.

QR (Quasi-Resonant) režim využívá přirozené rezonance primární cívky transformátoru a parazitních kapacit tak aby docházelo ke spínání, když je V_{DS} minimální.

DCM (Discontinious conduction Mode) režim pracuje stejně jako QR s tím rozdílem, že omezuje maximální kmitočet spínání na 130 kHz. K sepnutí dojde v prvním „údolí“ přirozené rezonance, která následuje po 7,7 μs (130 kHz). Tento režim značně zvyšuje účinnost zdroje.



Obr. 13 Napětí na tranzistoru při QR spínání [9]

- **Režim „Frequency Foldback Mode”.**

Tento režim je aktivní při zátěži přibližně od 10 % do 30 %. V_{FB} se nachází mezi 1,4 V a 2 V. V_{CS} pak musí být do 0,4 V.

Špičkový spínací proud je konstantní a k regulaci dochází pomocí změny spínacího kmitočtu.

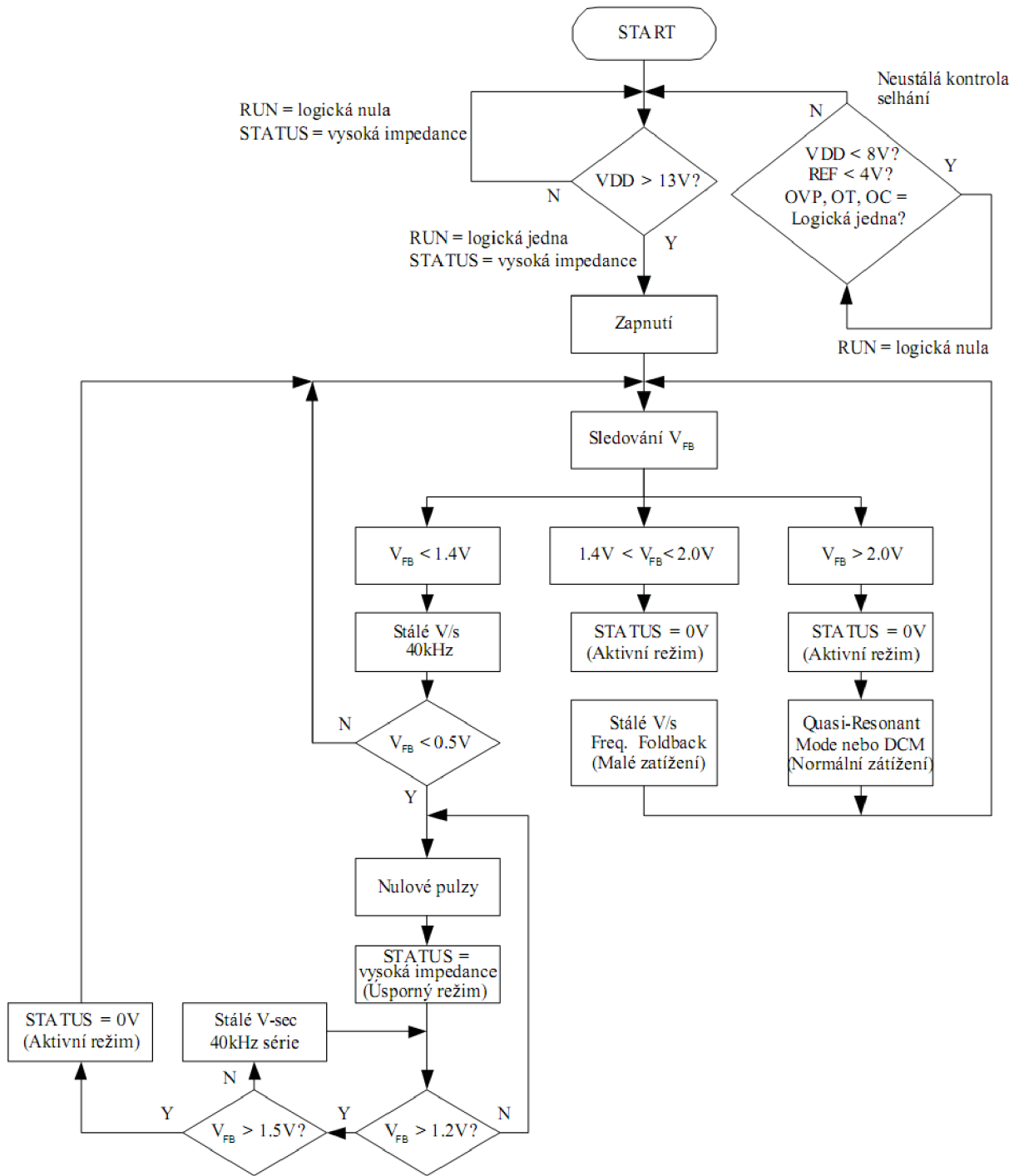
- **Režim „Green-Mode”.**

Tento režim je aktivní při zátěži přibližně pod 10 %. V_{FB} se nachází pod 1,4 V.

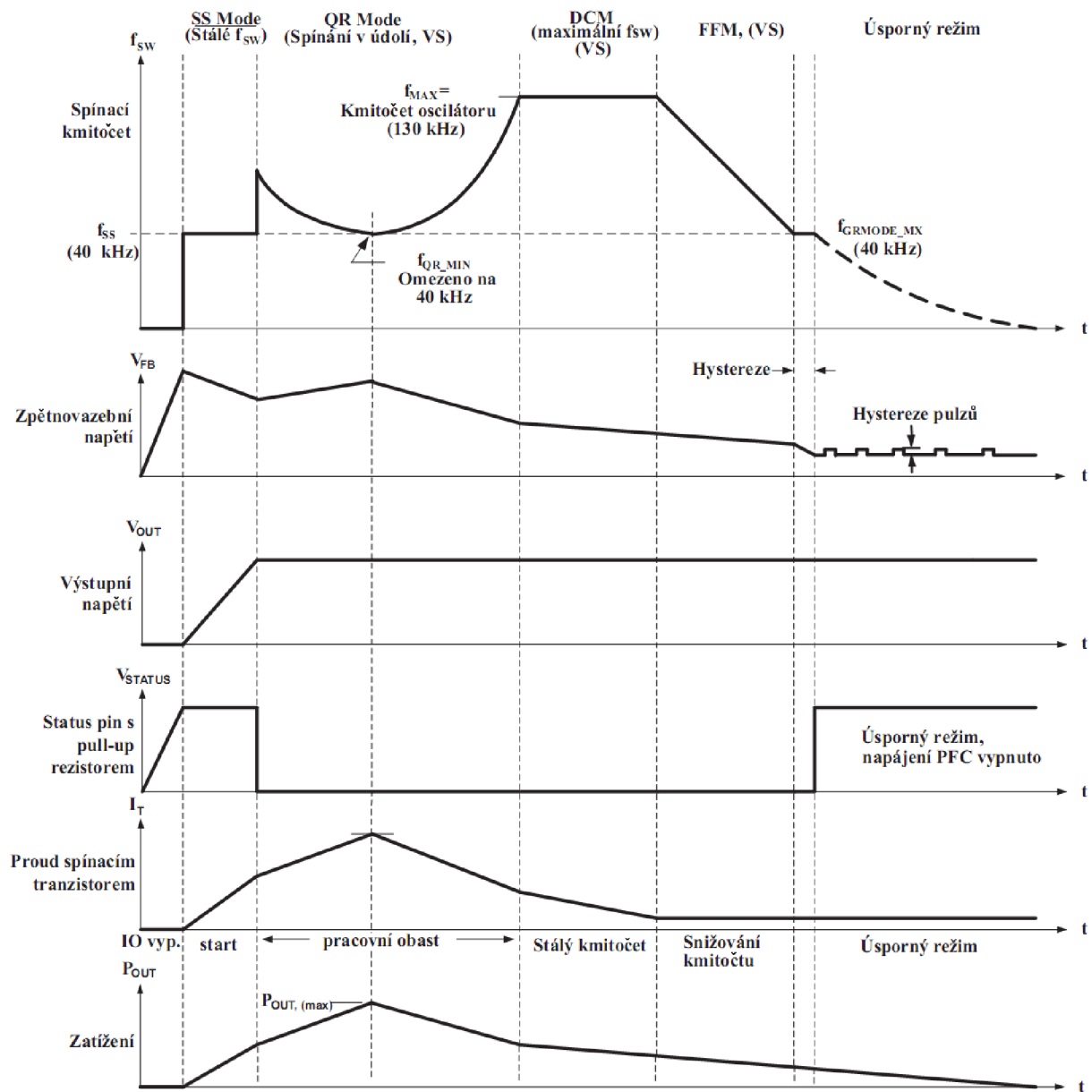
Při tomto režimu dochází k vysílání série 40 kHz impulzů.

- **Režim „Fault Mode”.**

Obvod disponuje teplotní ochranou, ochranou proti přetížení, přepětí a podpětí.



Obr. 14 Vývojový diagram UCC28600 [7]



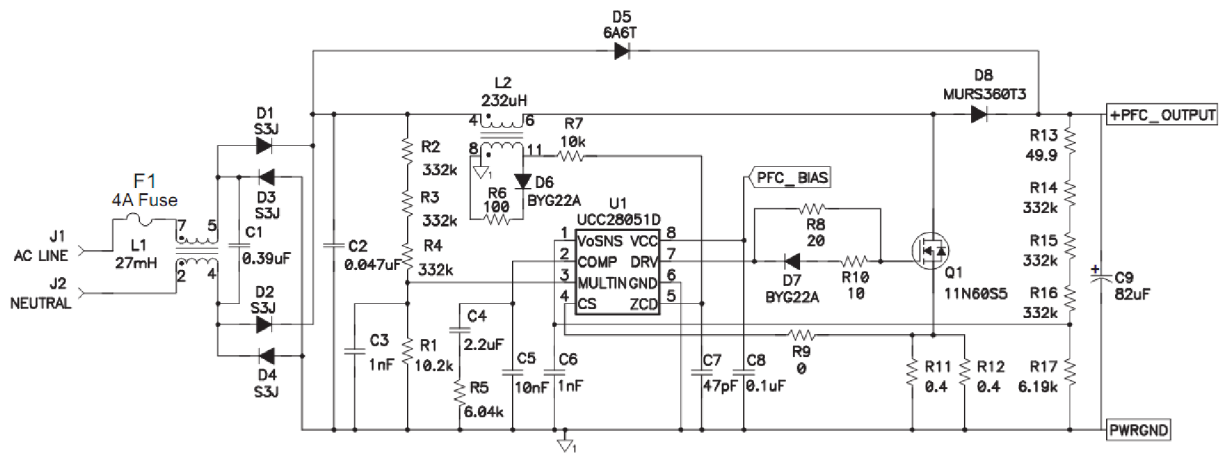
Obr. 15 Přepínání mezi režimy operace [7]

3 Prototyp firmy Texas Instruments s UCC28600

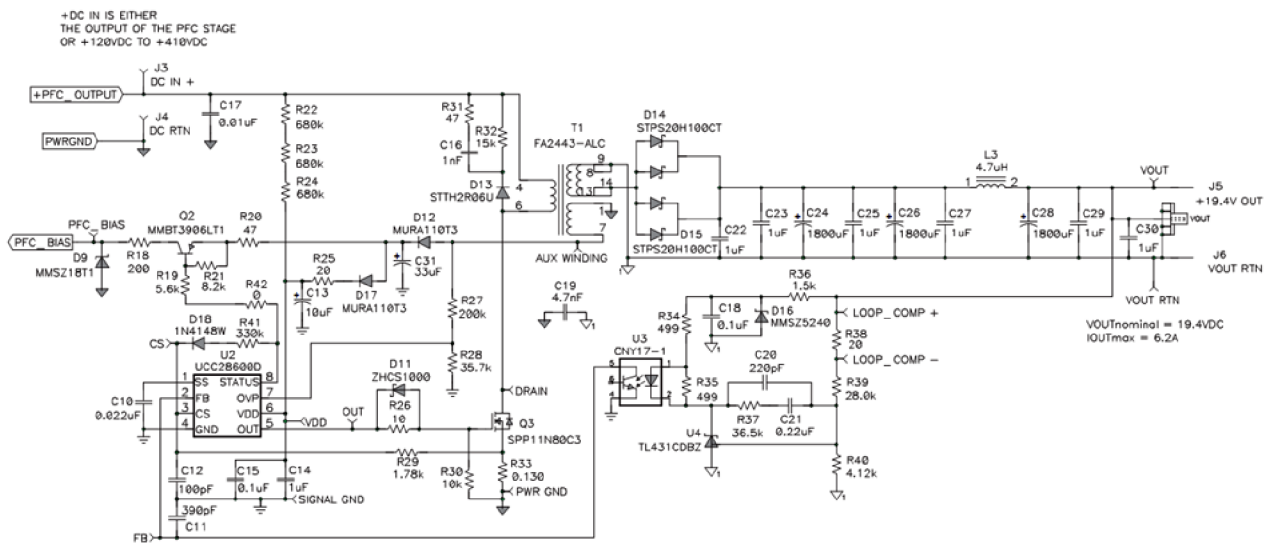
Jedná se o 120W spínaný zdroj s obvodem UCC28600.

Parametry zdroje:

- Napájecí napětí v rozsahu 85 V_{RMS} – 265 V_{RMS}
- Výstupní napětí 19,4 V
- Maximální výstupní proud 6,2 A
- Výstupní zvlnění do 190 mV
- Účinnost 75 % – 87 %
- Odběr bez připojené zátěže do 500 mW



Obr. 16 Schéma PFC ve zdroji (převzato z [8])



Obr. 17 Schéma spínaného zdroje s UCC28600 (převzato z [8])

4 Návrh a realizace spínaného zdroje s planárním transformátorem

Jedná se o 155 W spínaný zdroj s planárním transformátorem řízený obvodem UCC28600 a obvodem pro korekci účinníku UCC38051.

Parametry zdroje:

- Napájecí napětí v rozsahu 85 V_{RMS} – 265 V_{RMS}
- Výstupní napětí nastavitelné v rozsahu 12 V – 25 V
- Maximální výstupní proud 6,2 A
- Výstupní zvlnění do 190 mV
- Účinnost 75 % - 87 %
- Odběr bez připojené zátěže do 500 mW

4.1 Návrh planárního transformátoru

Prvotní návrh planárního transformátoru se opíral o výrobu prototypu formou vzorku. Návrhy byly zaslány firmám zabývajícím se výrobou planárních transformátorů, jako například Premo, Payton group international, Planar quality corporation. Odpověď zaslala pouze firma Coilcraft se sdělením nemožnosti dodání vzorku podle parametrů. Z tohoto důvodu došlo k návrhu a realizaci planárního transformátoru skládajícího se z vlastní vícevrstvé DPS s použitím vzorku feritového jádra firmy Ferroxcube.

4.1.1 Výpočet klíčových parametrů

Výpočet parametrů planárního transformátoru podle návrhu firmy Ferroxcube. [11]

$$N_1 = \frac{U_{imin} \delta_{prim}}{2 f B_{peak} A_e}, \quad (1)$$

$$N_2 = \frac{N_1 U_o \delta_{sec}}{U_{imin} \delta_{prim}}, \quad (2)$$

$$N_{IC} = \frac{U_{IC} N_1}{U_{imin}}, \quad (3)$$

$$L_{prim} = \frac{(U_{imin} \delta_{prim})^2}{2 P_{max} f}, \quad (4)$$

$$G = \frac{\mu_0 N_1^2 A_e}{L_{\text{prim}}}, \quad (5)$$

$$I_{\text{o(RMS)}} = \frac{P_{\text{max}}}{U_o} \sqrt{\frac{4}{3 \delta_{\text{sec}}}}, \quad (6)$$

$$I_{\text{p(RMS)}} = \frac{U_{\text{imin}} \delta_{\text{prim}}}{f L_{\text{prim}}} \sqrt{\frac{\delta_{\text{prim}}}{3}}, \quad (7)$$

Prvním krokem bylo stanovení maximálního sycení jádra na 160 mT. Později ověříme, zda tento předpoklad je správný. Dosazením do vzorců a vypočítáním parametrů pro několik zvolených jader transformátorů jsme získali výsledky, na základě kterých byla pro přehlednost vytvořena tabulka.

Tab. 1 První výpočet parametrů planárního transformátoru

| Jádro | ER32/6/25-3C95-S | ER23/3.6/13-3C95-S | ER41/7,6/32-3C95-S |
|-----------------------------|------------------|--------------------|--------------------|
| U_{imin} (V) | 100 | 100 | 100 |
| U_o (V) | 19.4 | 19.4 | 19.4 |
| U_{pic} (V) | 19.4 | 19.4 | 19.4 |
| δ_{prim} (-) | 0.64 | 0.64 | 0.64 |
| δ_{sec} (-) | 0.64 | 0.64 | 0.64 |
| f (Hz) | 130000 | 130000 | 130000 |
| P_{max} (W) | 120 | 120 | 120 |
| T_{amb} (°C) | 50 | 50 | 50 |
| ΔT (°C) | 35 | 35 | 35 |
| B_{peak} (T) | 0.16 | 0.16 | 0.16 |
| A_e (m ²) | 0.000141 | 0.00005 | 0.000225 |
| μ_0 (Hm ⁻¹) | 1.25664E-06 | 1.25664E-06 | 1.25664E-06 |
| N_1 (-) | 10.91107474 | 30.76923077 | 6.837606838 |
| N_2 (-) | 2.1167485 | 5.969230769 | 1.326495726 |
| N_{ic} (-) | 2.1167485 | 5.969230769 | 1.326495726 |
| L_{prim} (H) | 0.000131282 | 0.000131282 | 0.000131282 |
| G (m) | 0.000160679 | 0.000453114 | 0.000100692 |
| $I_{\text{out(RMS)}}$ (A) | 8.928096946 | 8.928096946 | 8.928096946 |
| $I_{\text{p(RMS)}}$ (A) | 1.732050808 | 1.732050808 | 1.732050808 |

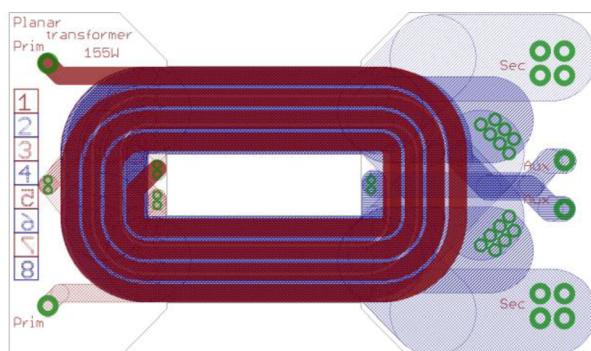
Zvolené jádro E32 mělo nejvhodnější počet závitů pro výrobu DPS. Pro toto jádro bylo vypracováno rozvržení DPS podle počtu vrstev, maximální tloušťky DPS a teplotního ohřevu. Teplotní ohřev byl příliš velký, proto došlo k přepočítání transformátoru na osmivrstvou DPS místo šestivrstvé. A také došlo ke změně jádra z EE na E-PLT.

Tab. 2 Druhý výpočet parametrů planárního transformátoru

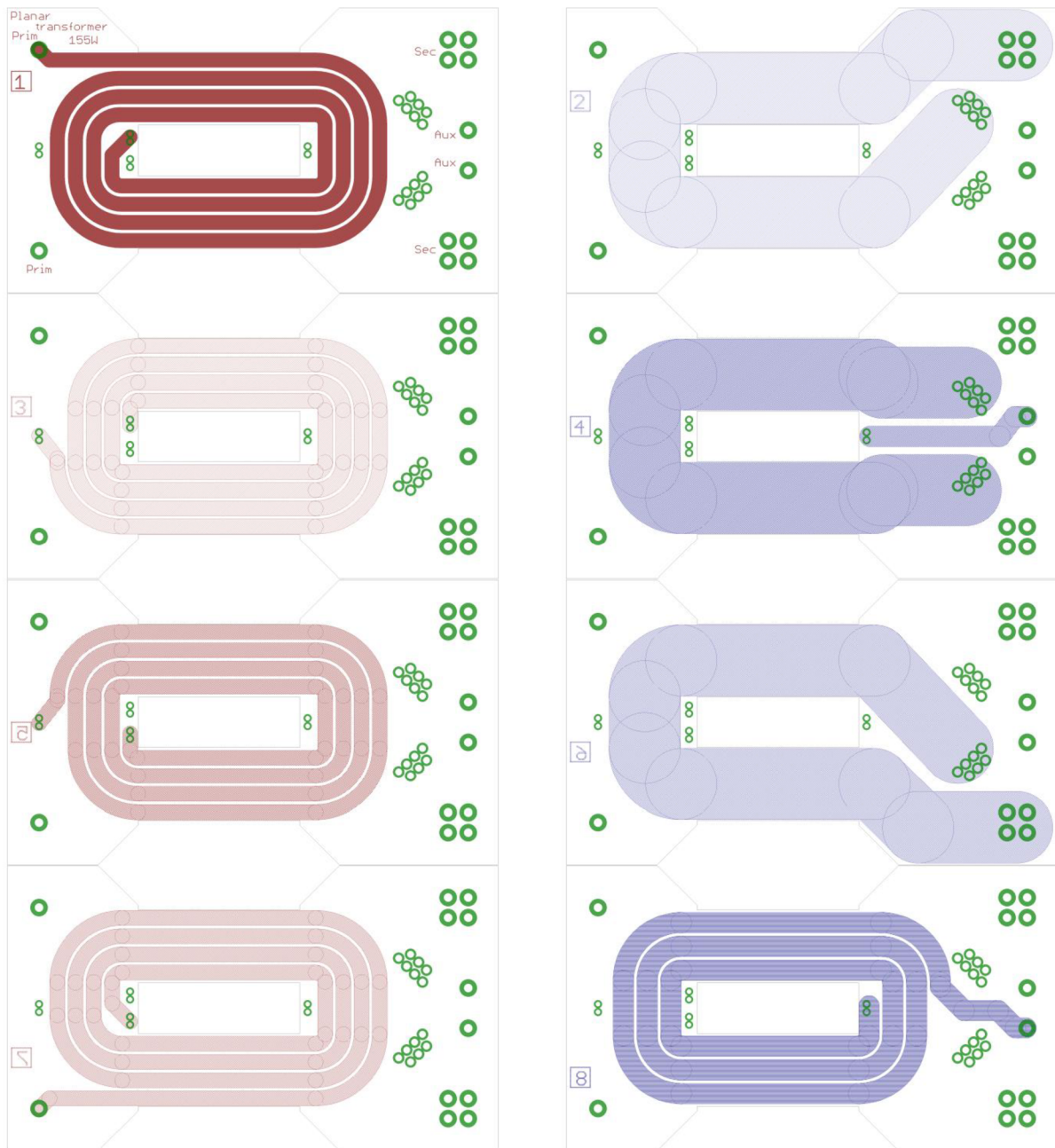
| Jádro | E32/6/20-3C94-A630-E | E32/6/20-3C94-A630-E | E32/6/20-3C94-A630-E |
|-----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| U_{imin} (V) | 100 | 100 | 100 |
| U_o (V) | 19.4 | 25 | 12 |
| U_{pic} (V) | 19.4 | 25 | 12 |
| δ_{prim} (-) | 0.64 | 0.85 | 0.8 |
| δ_{sec} (-) | 0.64 | 0.85 | 0.8 |
| f (Hz) | 130000 | 130000 | 130000 |
| P_{max} (W) | 120 | 155 | 75 |
| T_{amb} (°C) | 50 | 50 | 50 |
| ΔT (°C) | 35 | 35 | 35 |
| B_{peak} (T) | 0.118 | 0.2 | 0.09 |
| A_e (m ²) | 0.00013 | 0.00013 | 0.00013 |
| μ_0 (Hm ⁻¹) | 1.25664E-06 | 1.25664E-06 | 1.25664E-06 |
| b_w (mm) | 9 | 9 | 9 |
| s (mm) | 0.3 | 0.3 | 0.3 |
| N_1/PCB (-) | 4 | 4 | 4 |
| N_2/PCB (-) | 1 | 1 | 1 |
| N_{ic}/PCB (-) | 3 | 3 | 3 |
| N_1 (-) | 16.04653495 | 12.5739645 | 26.29848784 |
| N_2 (-) | 3.113027781 | 3.143491124 | 3.15581854 |
| N_{ic} (-) | 3.113027781 | 3.143491124 | 3.15581854 |
| L_{prim} (H) | 0.000131282 | 0.00017928 | 0.000328205 |
| G (m) | 0.000320413 | 0.000144067 | 0.000344246 |
| $I_{out(RMS)}$ (A) | 8.928096946 | 7.765181209 | 8.068715305 |
| $I_{p(RMS)}$ (A) | 1.732050808 | 1.941295302 | 0.968245837 |
| W_{tN1} (mm) | 1.875 | 1.875 | 1.875 |
| W_{tN2} (mm) | 8.4 | 8.4 | 8.4 |
| $W_{tN_{ic}}$ (mm) | 2.6 | 2.6 | 2.6 |

4.1.2 Návrh DPS

Návrh DPS byl proveden v programu Eagle. Vrstvy byly proloženy v pořadí primární vinutí a sekundární vinutí z důvodu snížení střídavých ztrát. [12]



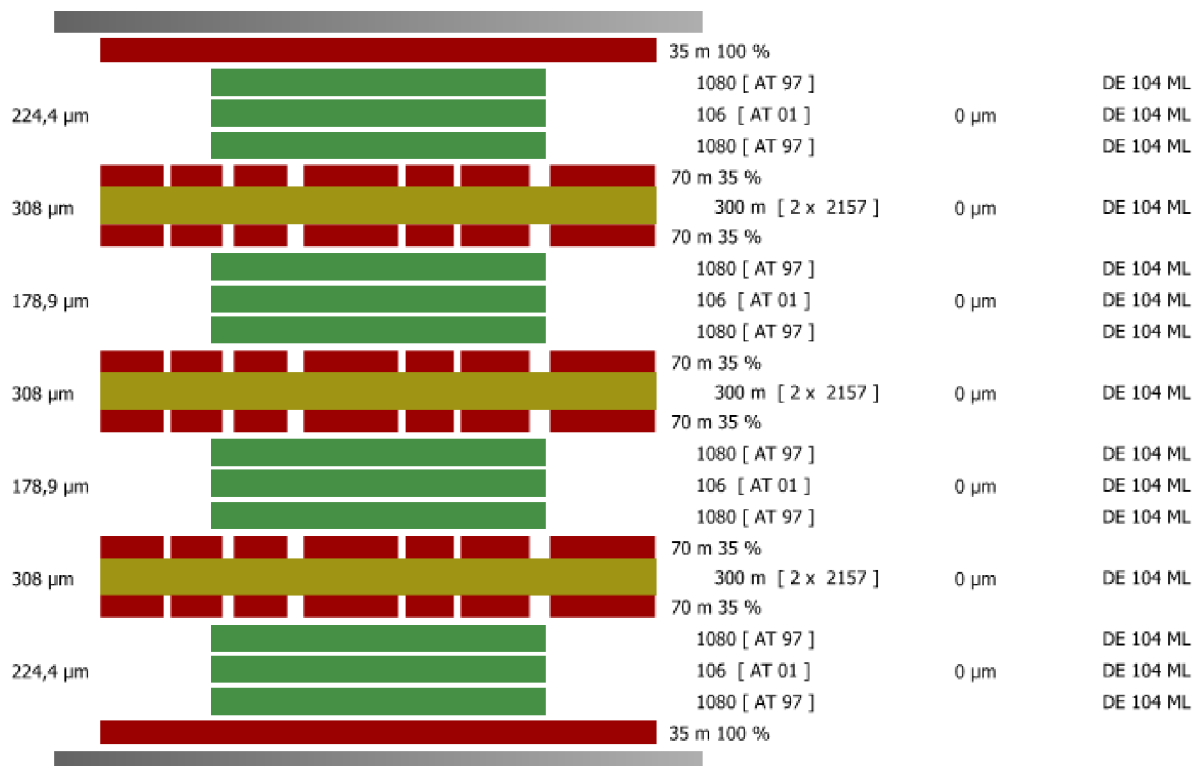
Obr. 18 DPS planární transformátor



Obr. 19 Planární transformátor – vrstvy

4.1.3 Realizace ve firmě Gatema

Realizace proběhla ve firmě Gatema, které byly zadány klíčové parametry DPS. Spolu s technologem bylo vypracováno složení vrstev a celková realizace tak, aby transformátor bylo možno vyrobit a zároveň splňoval veškeré požadavky. Výsledná tloušťka mědi byla 70 μm a celkové rozměry desky byly 62 x 36 x 2 mm.



Obr. 20 Struktura DPS

Legenda:

35 m 100% – tloušťka mědi 35 µm 100% pokrytí plochy (dodatečné nakovení na 70 µm)

224,4 µm – tloušťka tří prepregů slisovaných dohromady

1080 [AT 97] – prepreg vrstva 0,063 mm

106 [AT 01] – prepreg vrstva 0,05 mm

308 µm – vnitřní jádro

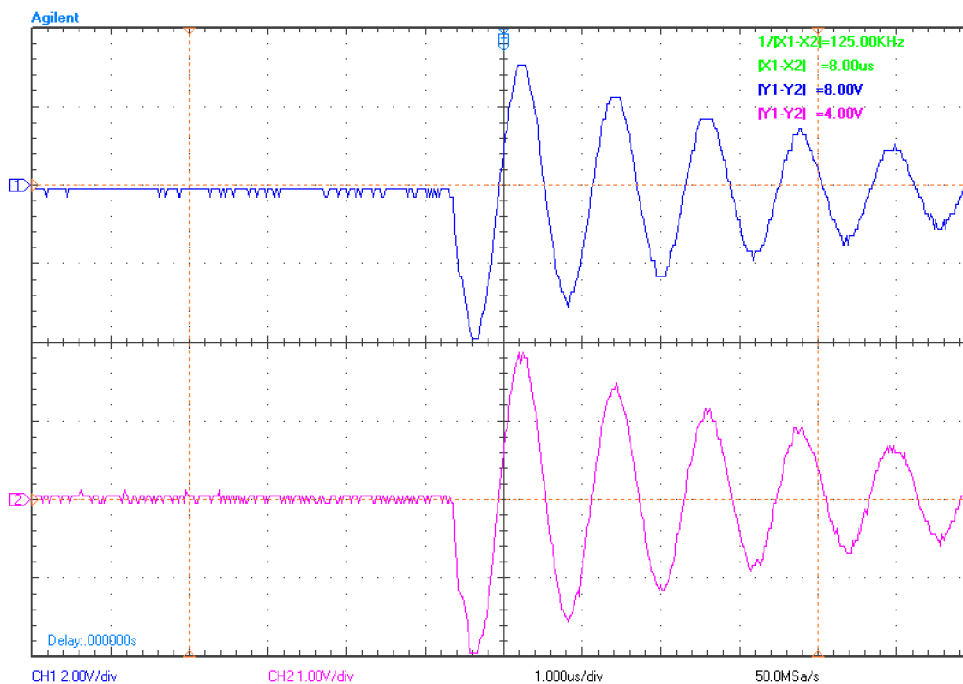
70 m 35% – tloušťka mědi 70 µm 35% pokrytí plochy

300 m [2x 2157] – dvě prepreg vrstvy 2157 tloušťky 0,150 mm

DE 104 ML – materiál prepregu, obdoba složení FR4

4.1.4 Kontrola polaritý planárního transformátoru

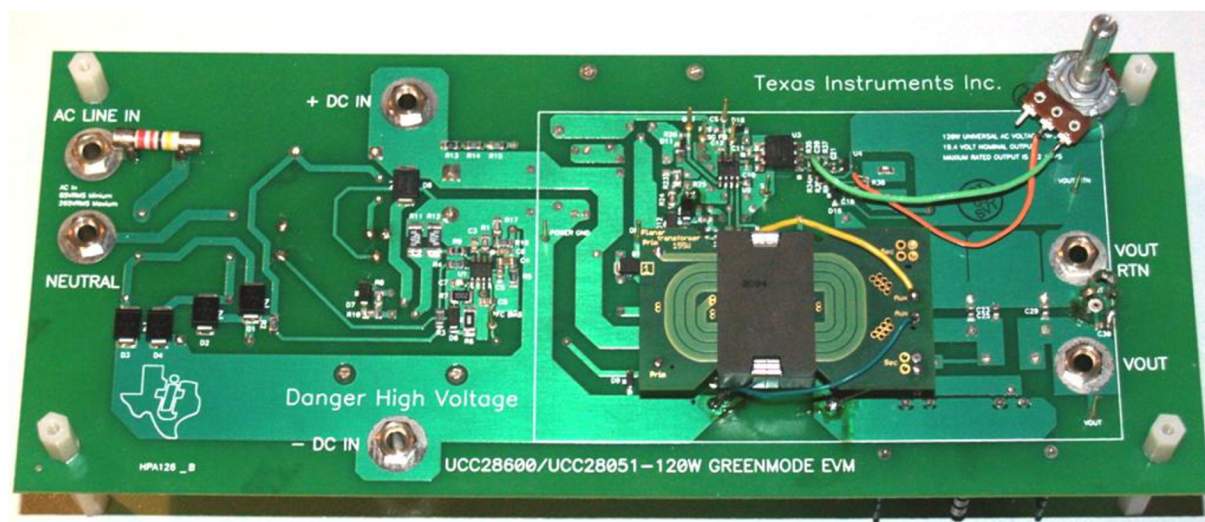
Funkčnost transformátoru byla vyzkoušena na jednoduchém testu polaritý. Polarita byla měřena pomocí připojení pulzů stejnosměrného napětí na vstup transformátoru a měřením výstupní polaritý vinutí pomocí osciloskopu. Modrý průběh na obr. 21 zobrazuje vstupní napětí transformátoru, fialový průběh znázorňuje výstupní napětí při správném zapojení polaritý. [13]



Obr. 21 Testování polarity transformátoru

4.1.5 Testování na prototypu firmy Texas Instruments

Z důvodu nedostupnosti výkonového vysokofrekvenčního generátoru byla reálná funkčnost zjištěna připojením transformátoru k prototypu od firmy Texas Instruments. Zařízení fungovalo korektně v celém rozsahu výkonů.



Obr. 22 Testování transformátoru na prototypu firmy Texas Instruments

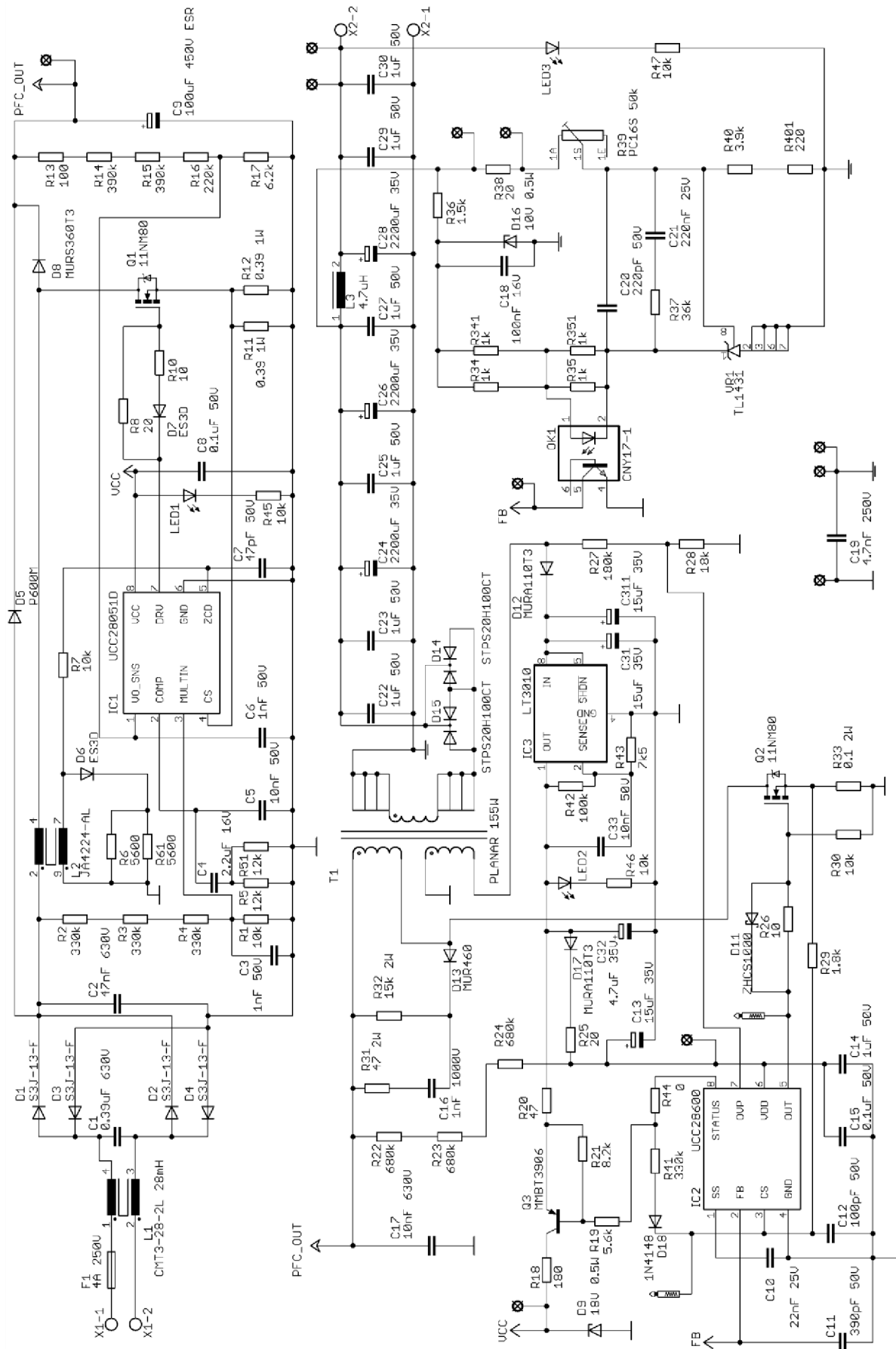
4.2 Návrh vlastního prototypu

4.2.1 Výpočet klíčových parametrů

K správnému vypočtení parametrů byla použita návrhářská kalkulačka. [7] [14] U všech použitých součástek bylo zapotřebí neustále kontrolovat jejich vhodnost s ohledem na kmitočtové zatížení, teplotní ztráty, parametry odporu, indukčnosti, kapacity, teplotní stability, velikostí pouzdra, ceny, dostupnosti apod. Doporučené schéma výrobce bylo nutno doplnit stabilizátorem pro snížení maximálního napájecího napětí řídicích obvodů. Stabilizátor LT3010 se jevil jako nejlepší volba z důvodu malého úbytku napětí, proudového zatížení až 50 mA a širokého rozsahu vstupních napětí. Pro vypočtení hodnoty výstupního napětí byl použit vztah

$$V_{\text{OUT}} = 1,275 \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + I_{\text{ADJ}} R_2. \quad (8)$$

Ostatní součástky byly zvoleny dle doporučení výrobce. [15]

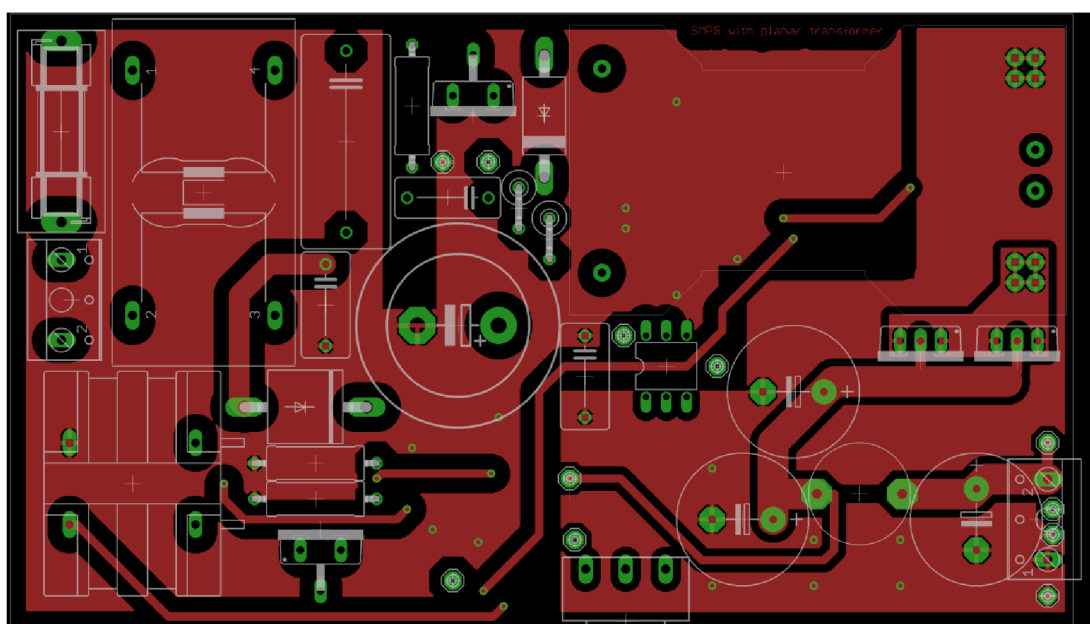


Obr. 23 Schéma spínaného zdroj s planárnym transformátorem

4.2.2 Návrh DPS

Během návrhu DPS bylo zapotřebí dodržovat pravidla pro návrh vysokofrekvenčních obvodů a doporučení výrobce. [16]

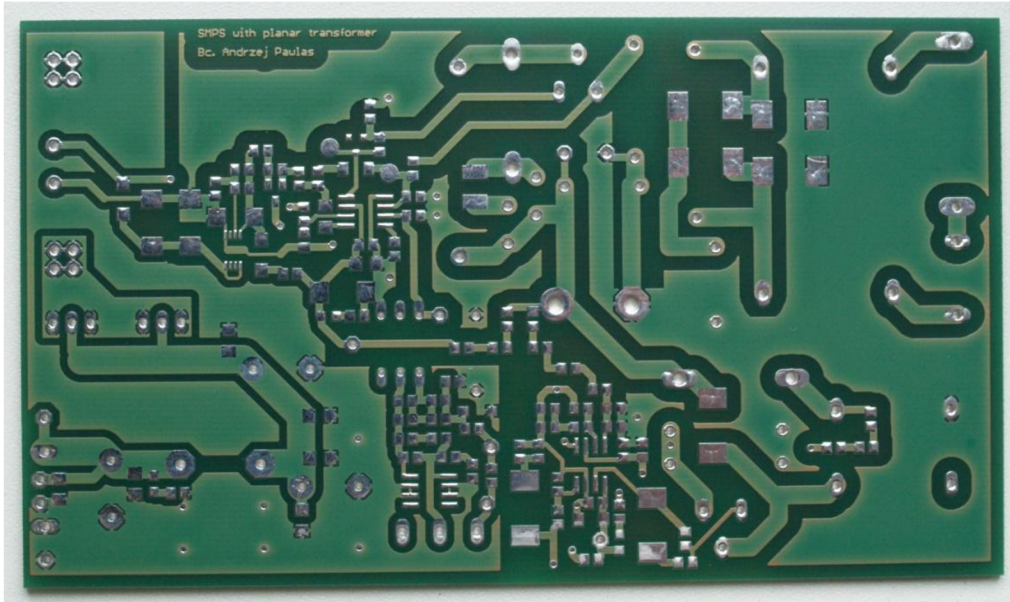
- V každém měniči je zapotřebí optimalizovat layout DPS z důvodu podání optimálních výkonů. Je nutno minimalizovat parazitní proudové smyčky, abychom zabránili vzniku parazitních indukčností a kapacit. Současně musíme dávat pozor, aby cesty s vysokou rychlostí přeběhu nebyly příliš široké. Tvoří potom velmi dobré antény.
- Je nutno oddělit signálovou zem od výkonové země z důvodu zabránění vzniku šumu v signálové části. Oddělené země by měly být spojeny ideálně v místě připojení hlavního napájecího kondenzátoru.
- Připojení měřicího odporu k hlavnímu napájecímu kondenzátoru místo k rozlité zemi je klíčové k úspěšnému návrhu.
- Filtrační kondenzátory řídicích obvodů musí být připojeny přímo k vývodům z integrovaného obvodu co nejkratší možnou cestou.
- Cesty pro hradla spínacích tranzistorů musí být širší než 0,6 mm. Je potřeba, aby cesty byly co nejkratší, nejlépe vedené v jedné vrstvě a bez pravých úhlů.
- K hradlu spínacího tranzistoru je potřeba připojit desetikiloohmový odpor na zem. Tímto odporem zabráníme nechtěnému sepnutí tranzistoru a vybijeme náboj na hradle.
- Připojením malé filtrační kapacity k pinu měřicímu průtok proudů spínacím tranzistorem, vytvoříme nízkofrekvenční filtr, který zlepší potlačení šumu.



Obr. 24 DPS vrchní strana

4.2.3 Realizace ve firmě Gatema

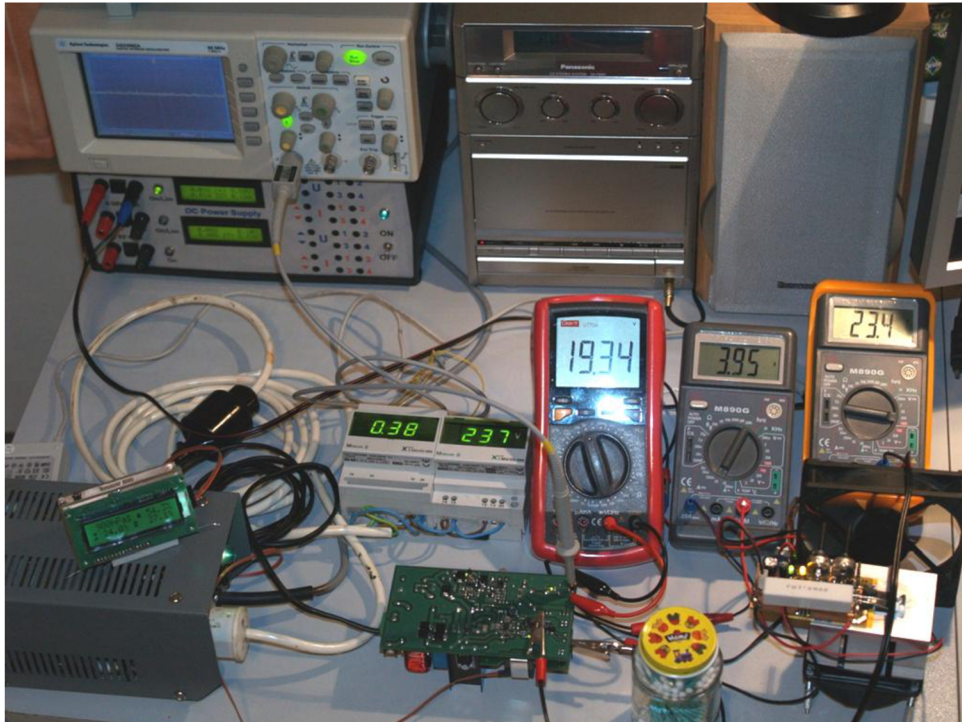
Realizace opět proběhla ve spolupráci s firmou Gatema. Výsledkem je dvouvrstvá DPS s 70 μm mědí. Základní materiál byl použit FR4 se zelenou nesnímatelnou maskou, bezolovnatým HALEm a bez servisního potisku. Rozměry výsledné desky jsou 133 x 76 x 2 mm.



Obr. 25 DPS pro spínaný zdroj

4.2.4 Ladění

Během osazování byla odhalena první chyba. Zjistilo se, že optočlen je chybně zapojen. Zpětná vazba UCC28600 byla připojena na bázi místo na kolektor optočlenu. Tato chyba byla jednoduše opravena ještě před prvním zapnutím.

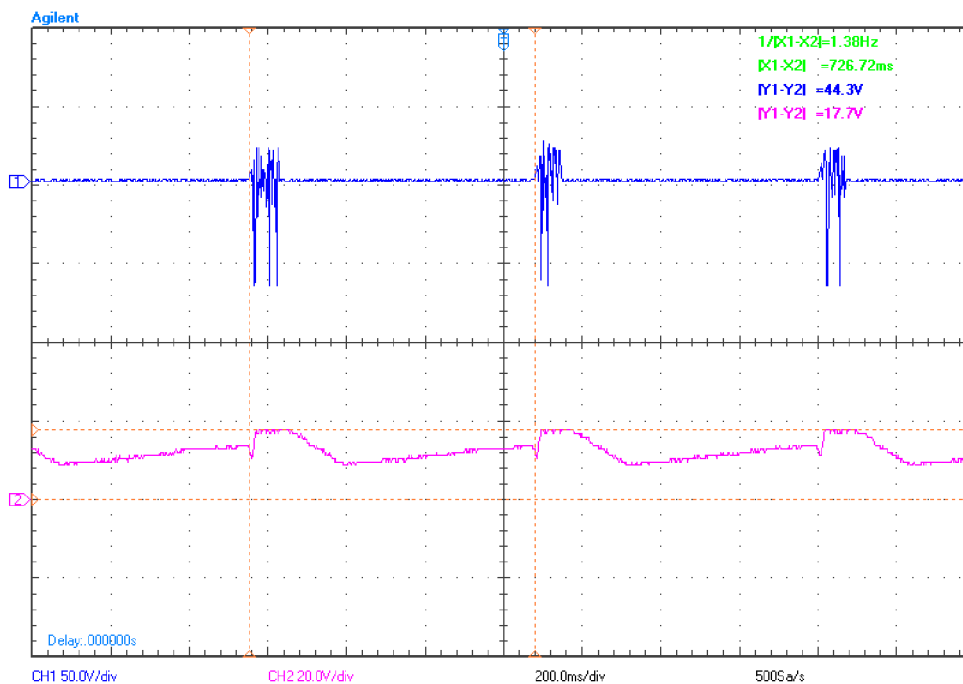


Obr. 26 Měřicí a ladící pracoviště

Druhá chyba byla opět zaviněna nedopatřením. V původním schématu byla zapojena indikační dioda s příslušným odporem přímo na napájecí pin UCC28600. Obvod však při připojení čerpá energii přímo z usměrněného síťového napětí přes sérii odporů. Ty jsou však navrženy pro zajištění startovacího napětí cca 15 V a proudu 25 μ A. Avšak odběr indikační diody je mnohonásobně větší. Proto obvod nebyl schopen nastartovat. Tato chyba byla zjištěna po prvním připojení do sítě a byla odstraněna přesunutím indikační diody přímo na výstup napájecího pomocného napětí.

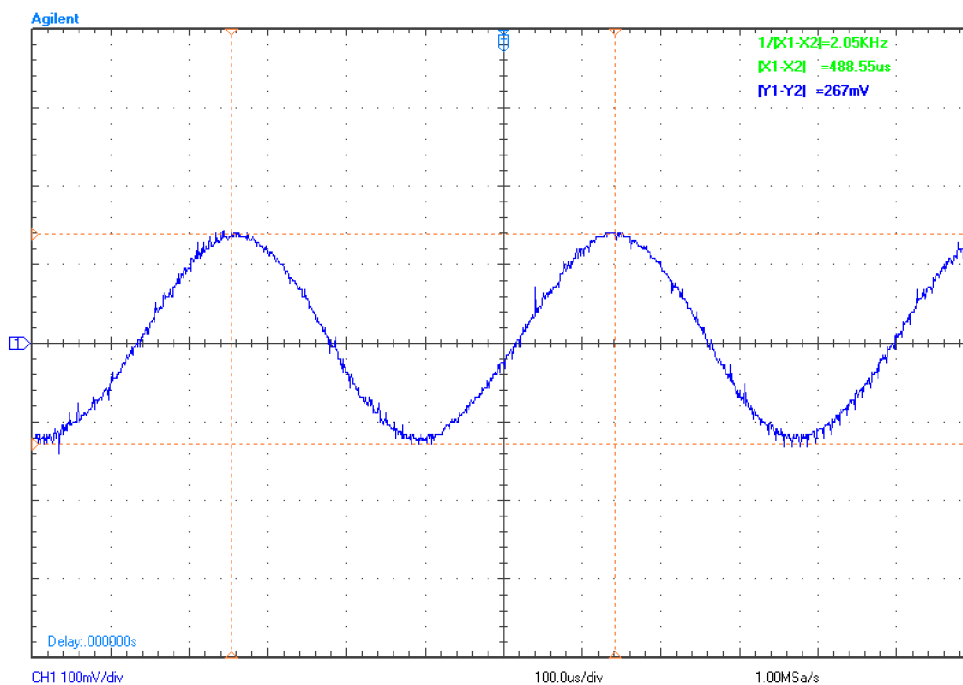
Třetí závada byla zjištěna v poměru vinutí cívky PFC obvodu. Podrobným zkoumáním problematiky PFC obvodů byl zjištěn používaný poměr cívek 10:1 nebo 12:1 a ne původně zvolený poměr 1:1.

Čtvrtou závadou bylo špatné zaokrouhlení vypočtených odporů zajišťujících ochranu proti přepětí. Zdroj z takto špatně zaokrouhlených odporů byl schopen funkce pouze do 10 % výkonu. Při větším zatížení došlo k vypnutí řízení a restartu funkce obvodu. Při měření bylo nastaveno výstupní napětí 19 V a byla připojená zátěž 6 A, viz obr. 27. Fialový průběh zobrazuje napájecí napětí UCC28600, modrý průběh zobrazuje napětí na pomocném vinutí transformátorů.



Obr. 27 Časový průběh pomocného vinutí transformátoru a napájecího napětí UCC28600

Pátá závada byla zaviněna špatným pochopením návodu výrobce. Výrobce doporučuje připojit zpětnou vazbu co nejdále na výstup, avšak již se nezmiňuje, že touto větou má na mysli část výstupu, filtrovanou pouze kondenzátory viz obr. 28.



Obr. 28 Časový průběh výstupního zvlnění při výstupním napětí 19 V a proudu 6 A

Šestou úpravou bylo vyměnění modifikované indukčnosti za indukčnost přímo určenou pro PFC obvody. Tato úprava značně zvýšila účinnost zdroje přibližně o 10 %.

4.3 Návrh a realizace aktivní zátěže

Pro měření byla vyrobena jednoduchá aktivní zátěž. Funkce celé zátěže je následující: první polovina OZ1 pracuje jako komparátor, který porovnává úbytek napětí vzniklý průchodem proudu na výkonovém rezistoru R1 s napětím nastaveným pomocí R23 a děliče R4, R5.

Zátěž má dva pracovní režimy volitelné přepínačem - konstantní proud nebo odpor.

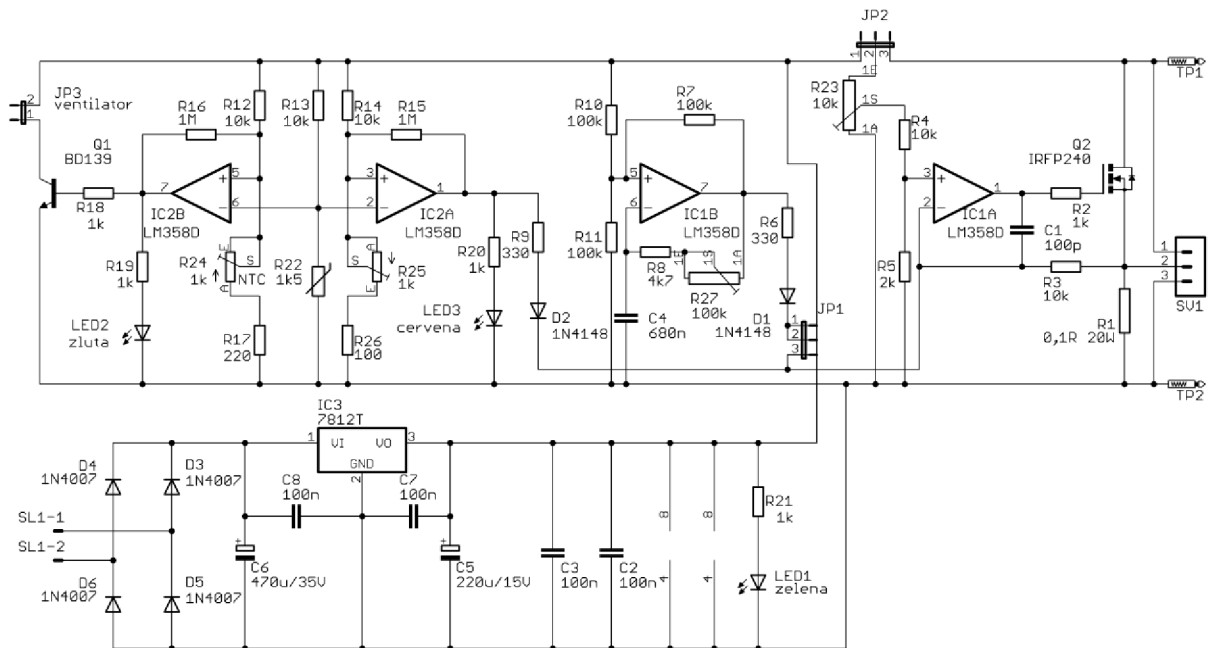
V režimu konstantního proudu se referenční napětí pro komparátor odvozuje od stabilizovaného napájecího napětí. Nezávisle na velikosti vstupního napětí se zátěž bude snažit dodržet nastavený proud snižováním nebo zvyšováním svého odporu.

V režimu konstantního odporu se referenční napětí odvozuje od napětí na zátěži. Zvyšující se napětí na zátěži zároveň zvyšuje referenční napětí, a tím i proud zátěži.

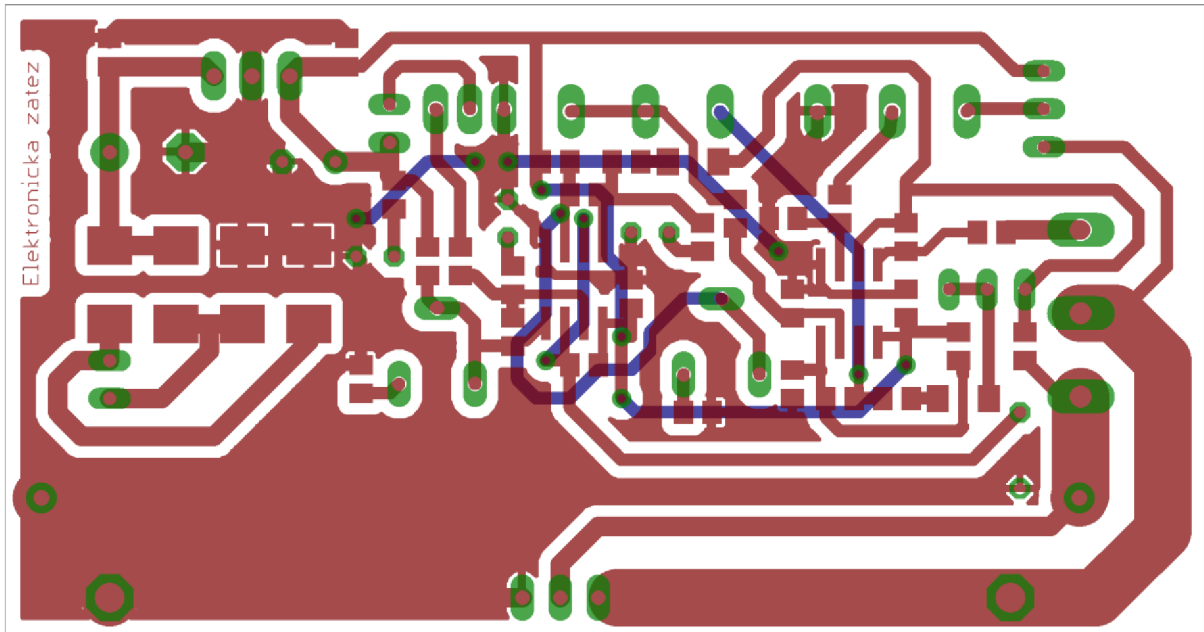
Druhá polovina OZ1 pracuje jako oscilátor s frekvencí danou součástkami R8, R27 a C4 (20 Hz - 220 Hz). Zátěž se dá přepínat na trvalý, nebo pulzní provoz. V pulzním režimu se výstup oscilátoru připojí přes diodu na invertující vstup OZ1. Každá kladná polovina pulzu způsobí uzavření T1, a tím v podstatě odpojení zátěže.

Celý OZ2 funguje jako teplotní ochrana, používá společný NTC termistor R22. Ochrana funguje tak, že nejdřív zapne ventilátor na chladiči a pak, když už chlazení není dostatečné, odpojí zátěž úplně. Princip odpojení je stejný jako u pulzního režimu. Obě teploty se nastavují pomocí odporů R24 a R25.

Maximální trvalý proud zátěží může být až 14 A v kontinuálním režimu a až 20 A v pulzním režimu. [17]



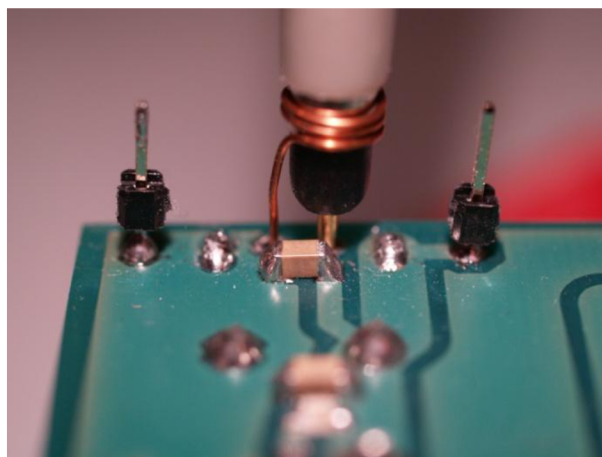
Obr. 29 Schéma aktivní zátěže



Obr. 30 DPS aktivní zátěže

4.4 Měření

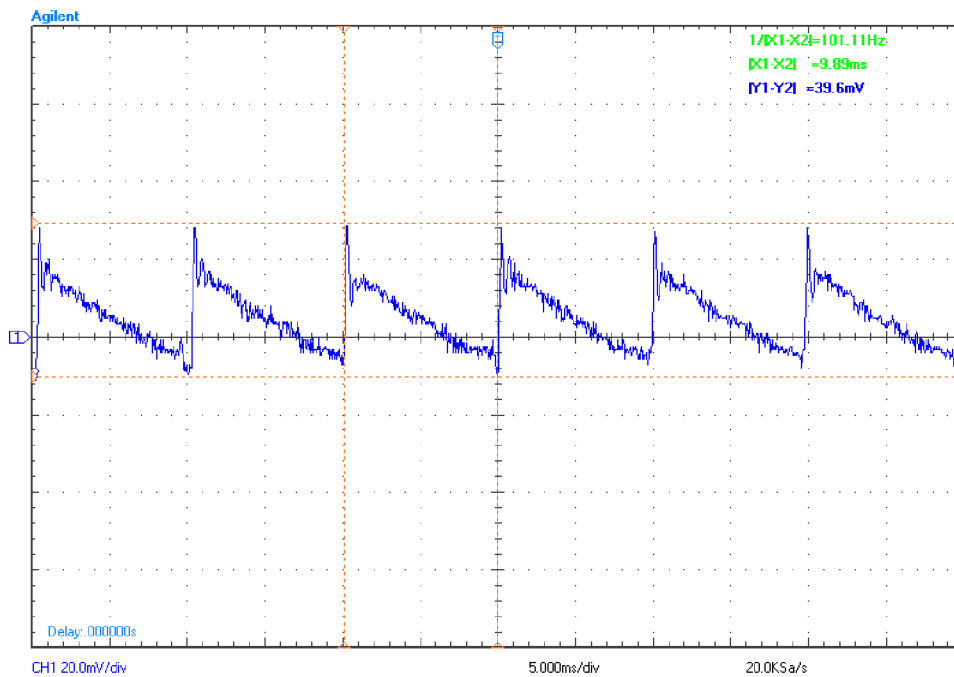
Během měření bylo potřeba zachovat vysokou opatrnost, jelikož ve zdroji se může vyskytovat napětí blížící se k 400 V. Bylo také nutné připojit oddělovací transformátor pro osciloskopická měření. K měření výstupního zvlnění byl použit přípravek na osciloskopickou sondu pro snížení okolních interferencí, jak je zobrazeno na obr. 31. [18] Samozřejmostí byla také kontrola teplot součástek. Veškerá měření probíhala při teplotě okolí.



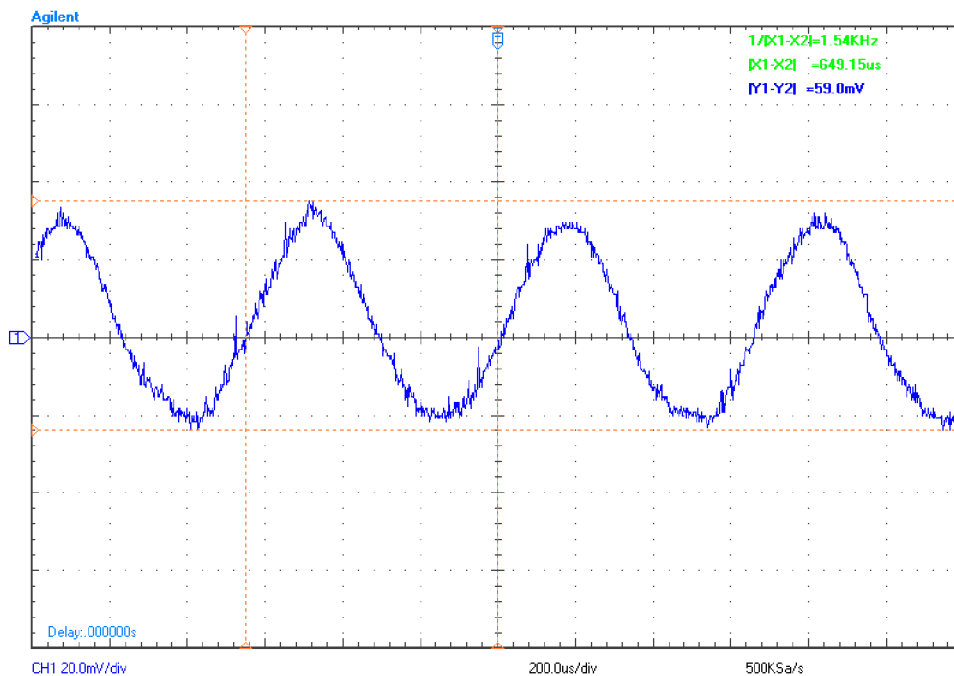
Obr. 31 Osciloskopická sonda upravena pro minimalizaci proudové smyčky [18]

4.4.1 Měření spínaného zdroje firmy TI

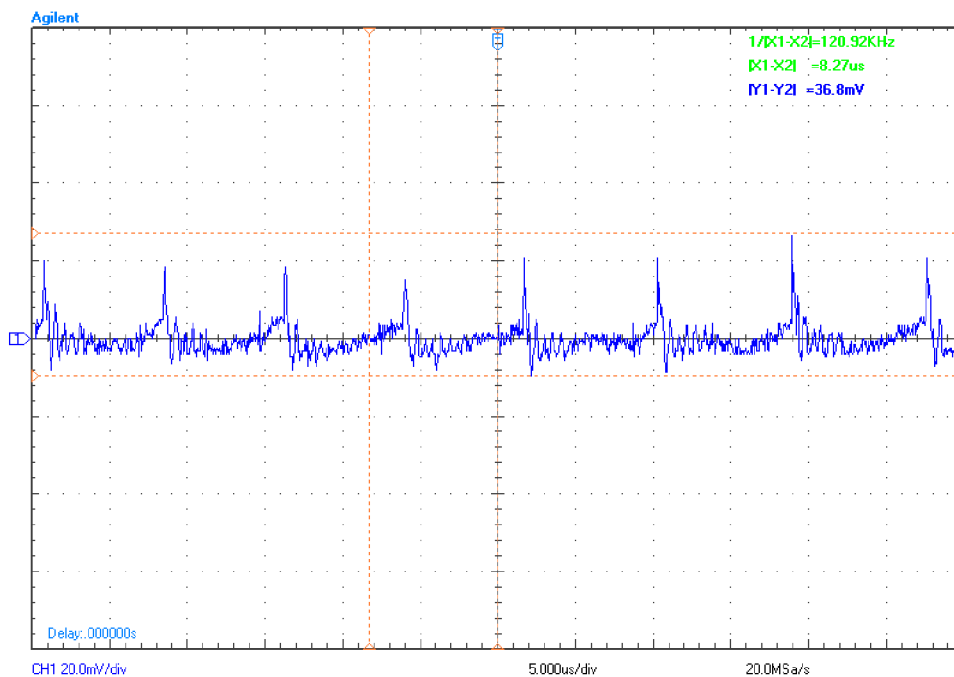
Měření výstupního zvlnění bylo provedeno na osciloskopu Agilent Technologies DSO3062A. Nejmenší zaznamenané zvlnění bylo 36,8 mV, největší bylo 59 mV.



Obr. 32 Zvlnění výstupního napětí měřeno při $V_{out} = 19,4 \text{ V}$, $I_{out} = 0 \text{ A}$



Obr. 33 Zvlnění výstupního napětí měřeno při $V_{out} = 19,4 \text{ V}$, $I_{out} = 0,5 \text{ A}$



Obr. 34 Zvlnění výstupního napětí měřeno při $V_{out} = 19,4 \text{ V}$, $I_{out} = 6 \text{ A}$

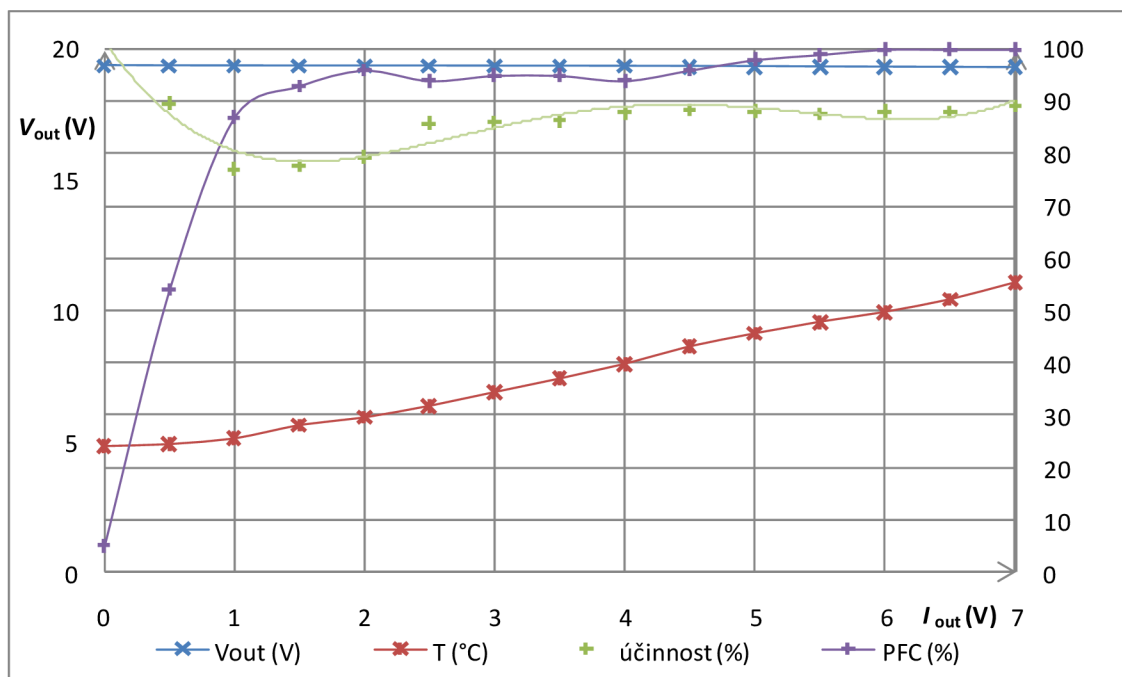
Při měření zatěžovací charakteristiky byly použity přístroje:

A-metr – Fluke 77

V-metr – Agilent 34410A

W-metr – Pagent trading model No.:9149

Teplotní senzor – DS18B20

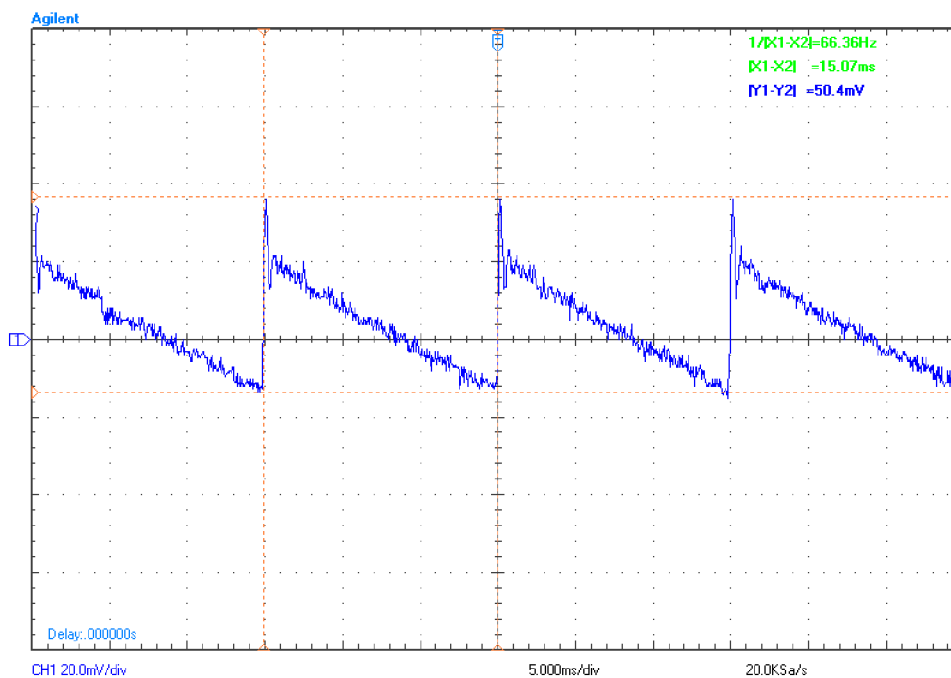


Obr. 35 Ztěžovací charakteristika pro $V_{out} = 19,4 \text{ V}$

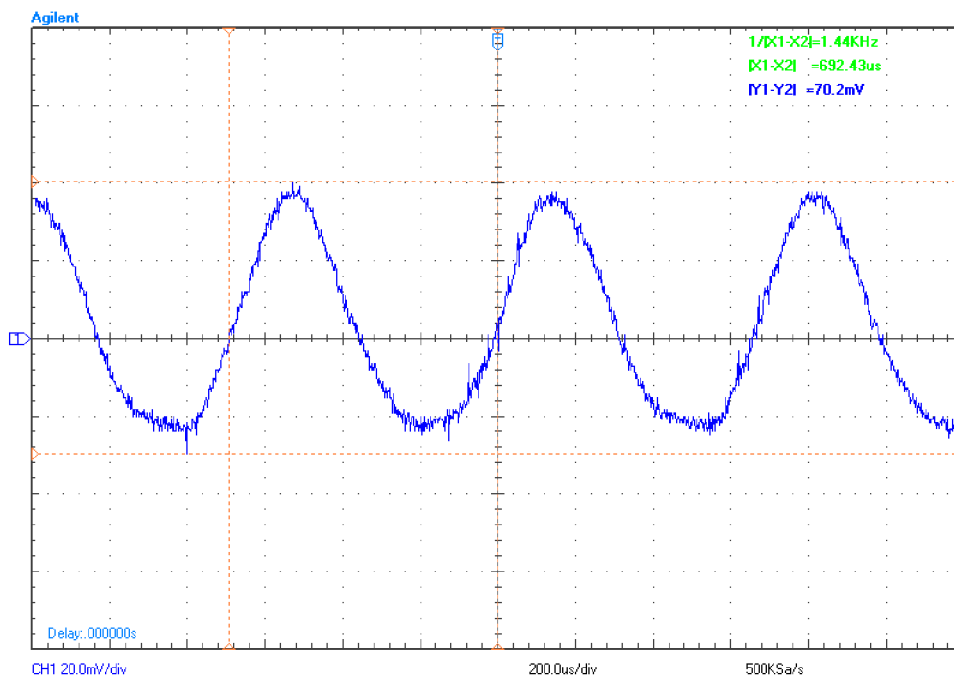
Na zdroji došlo k maximálnímu poklesu napětí o 36 mV. Účinník při vypnutém PFC se pohyboval okolo 0,55, při zapnutém PFC průměrně dosahoval hodnoty 0,96. Takto nízký účinník byl pravděpodobně způsoben chybně navrženou PFC částí. Účinnost zdroje se pohybovala mezi 77 % a 89 %. Průměrně zdroj dosáhl účinnosti 86 %. Maximální naměřená teplota na jádře transformátoru byla 55,3 °C.

4.4.2 Měření vlastního prototypu

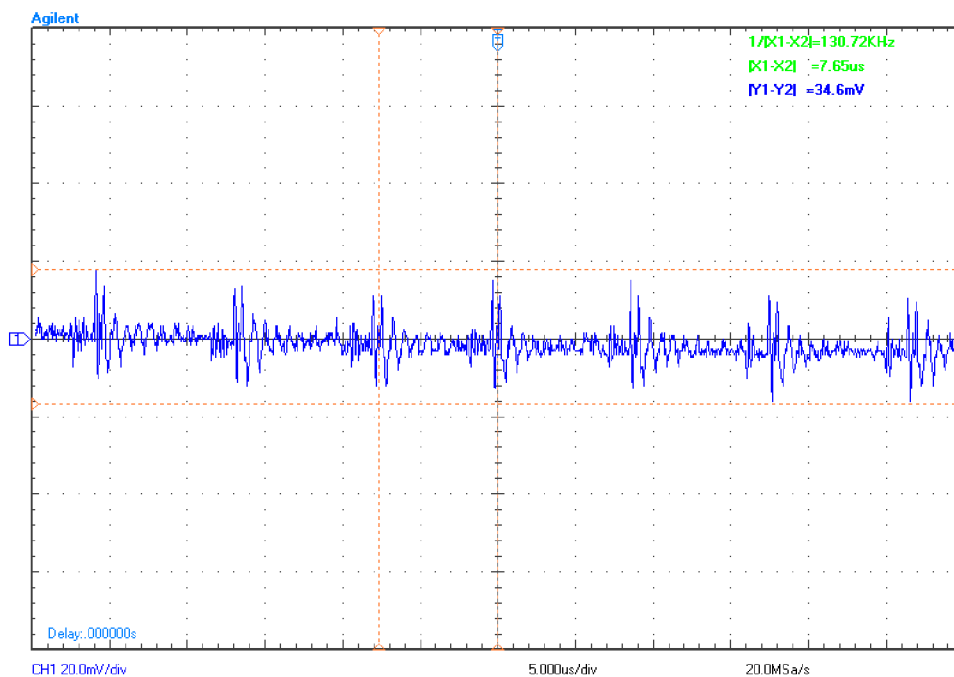
Měření výstupního zvlnění bylo provedeno na osciloskopu Agilent Technologies DSO3062A. Nejnižší zaznamenané zvlnění 26 mV bylo naměřeno při výstupním napětí 12 V a výstupní proud byl 6 A. Největší zvlnění dosáhlo hodnoty 70 mV, bylo naměřeno při výstupním napětí 19,4 V a výstupní proud byl 0,5 A.



Obr. 36 Zvlnění výstupního napětí měřeno při $V_{out} = 19,4$ V, $I_{out} = 0$ A

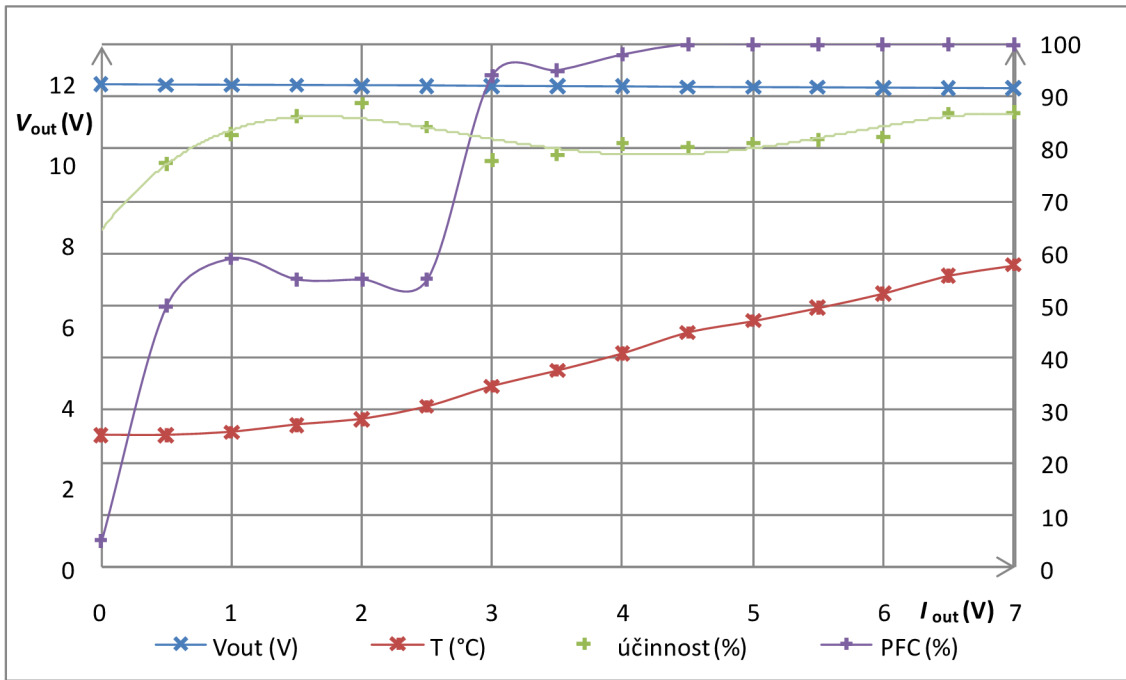


Obr. 37 Zvlnění výstupního napětí měřeno při $V_{out} = 19,4 \text{ V}$, $I_{out} = 0.5 \text{ A}$

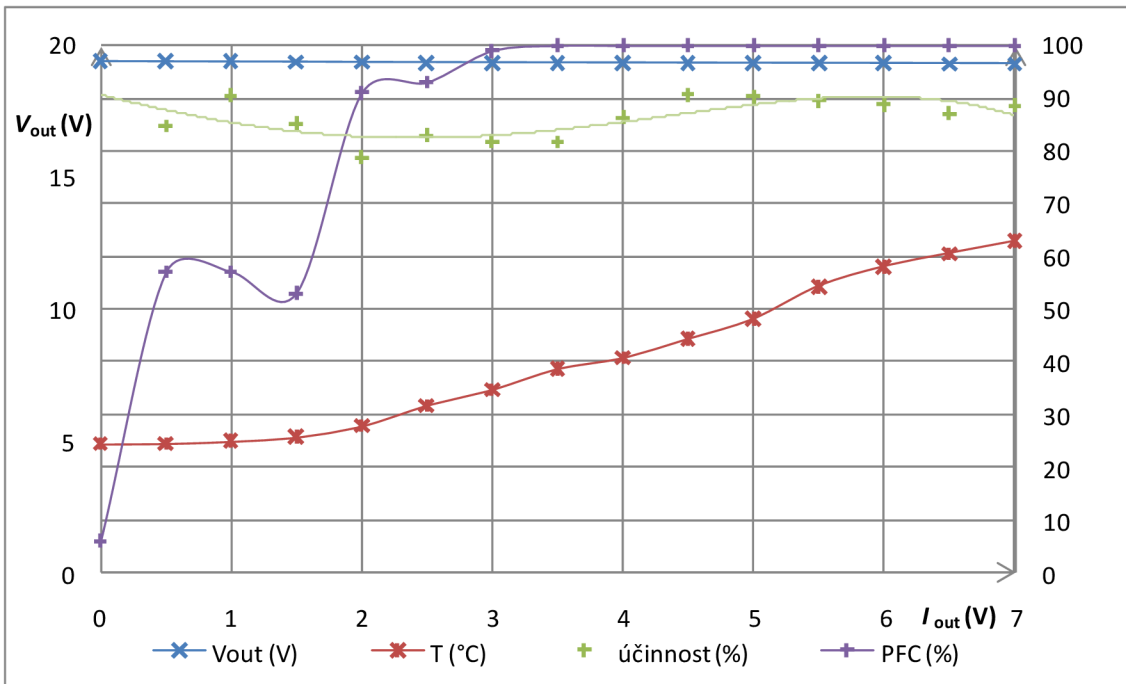


Obr. 38 Zvlnění výstupního napětí měřeno při $V_{out} = 19,4 \text{ V}$, $I_{out} = 6 \text{ A}$

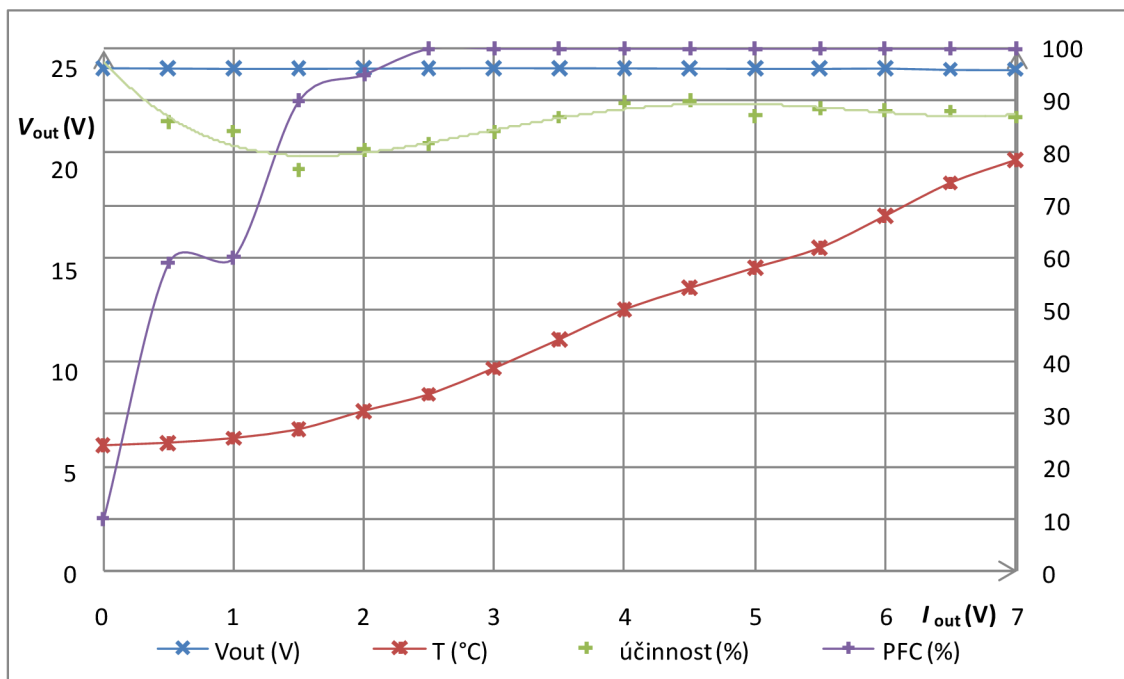
Při měření zatěžovací charakteristiky byly použity identické přístroje jako při měření prototypu TI.



Obr. 39 Zatěžovací charakteristika pro $V_{out} = 12\text{ V}$



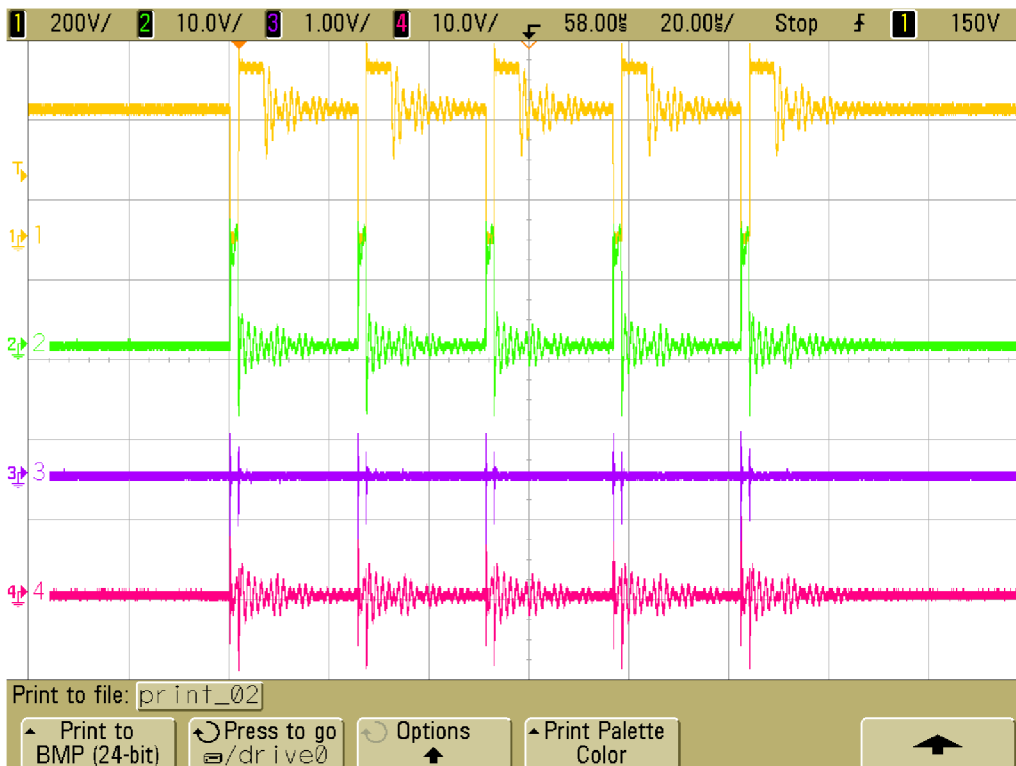
Obr. 40 Zatěžovací charakteristika pro $V_{out} = 19.4\text{ V}$



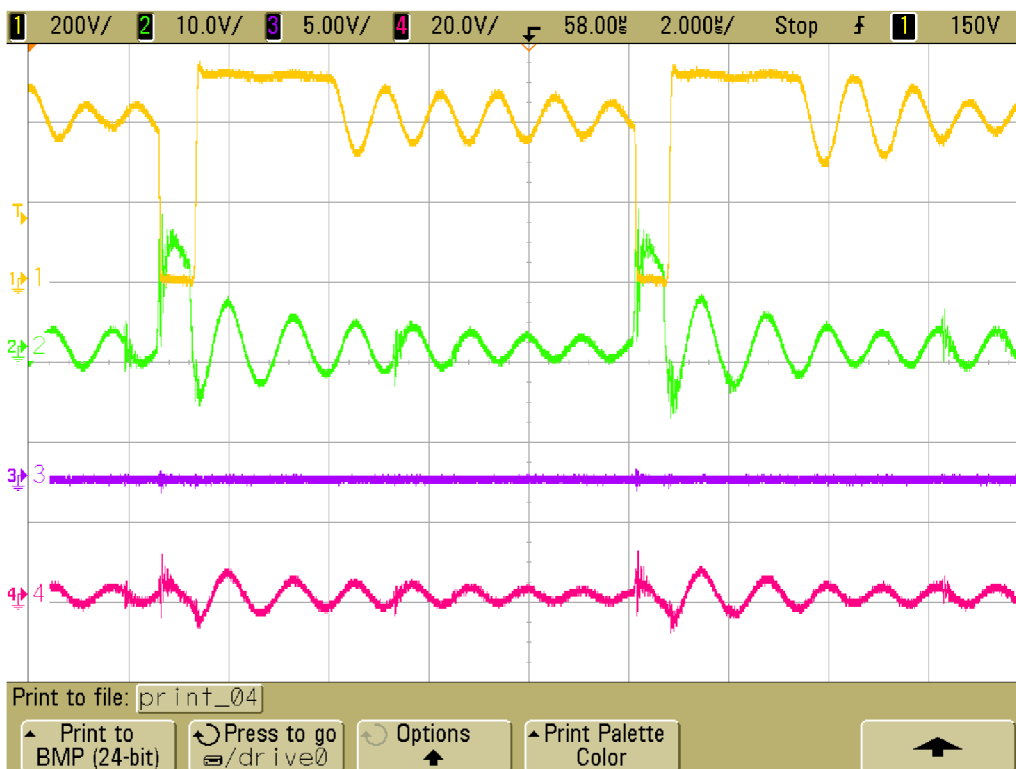
Obr. 41 Zatěžovací charakteristika pro $V_{out} = 25$ V

Na zdroji došlo k maximálnímu poklesu napětí o 100 mV. Tento pokles byl patrně způsoben použitím potenciometru místo 1% odporu. Účinník se při vypnutém PFC pohyboval okolo 0,55, při zapnutém PFC dosahoval hodnoty 1. Účinnost zdroje se pohybovala mezi 77 % a 90 %. Průměrně zdroj dosáhl účinnost 85 %. Maximální naměřená teplota na jádře planárního transformátoru byla 78,6 °C.

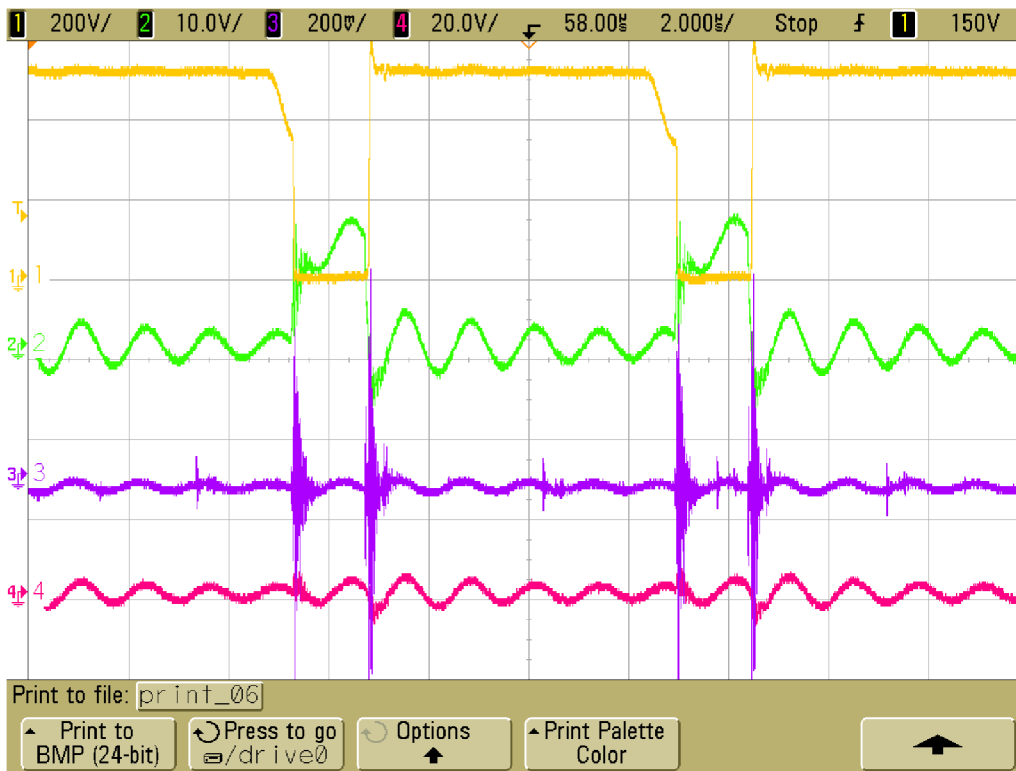
Další měření proběhlo na čtyř-kanálovém osciloskopu Agilent Technologies DSO6034A. Na první kanál osciloskopu byl připojen drain spínacího tranzistoru Q2. Druhý kanál byl připojen k hradlu tranzistoru Q2. Třetí kanál byl připojen na zpětnovazební pin UCC28600. Čtvrtý kanál měřil napětí na detektoru proudu UCC28600. Malé signály byly značně zkresleny indukovaným napětím na dlouhých vodičích použitých sond.



Obr. 42 Úsporný režim, série 40 kHz pulzů ($V_{out}=19,4$ V; $I_{out}=0,2$ A)



Obr. 43 „Frequency foldback mode“, spínací kmitočet 115 kHz ($V_{out}=19,4$ V; $I_{out}=1,6$ A)



Obr. 44 „Discontinuous current mode“, spínací kmitočet 130 kHz ($V_{out}=19,4$ V; $I_{out}=4,6$ A)



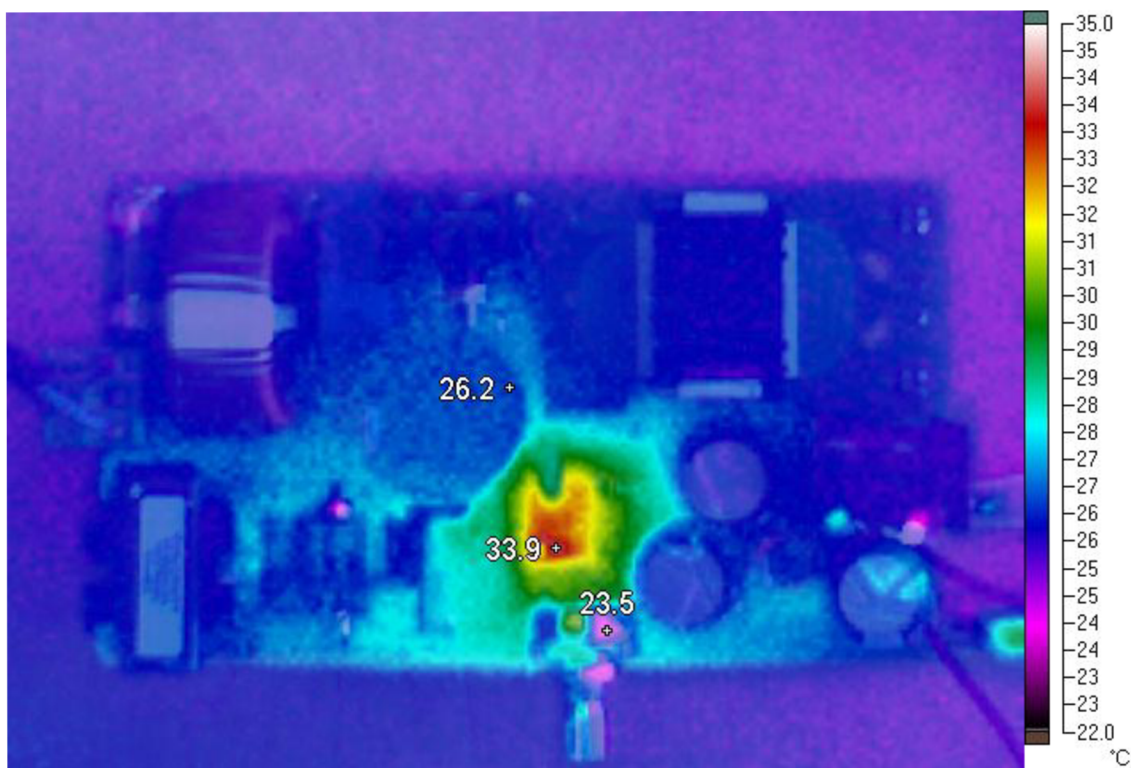
Obr. 45 „Quasi-resonant mode“, spínací kmitočet 116 kHz ($V_{out}=19,4$ V; $I_{out}=5,6$ A)

4.4.3 Měření termokamerou

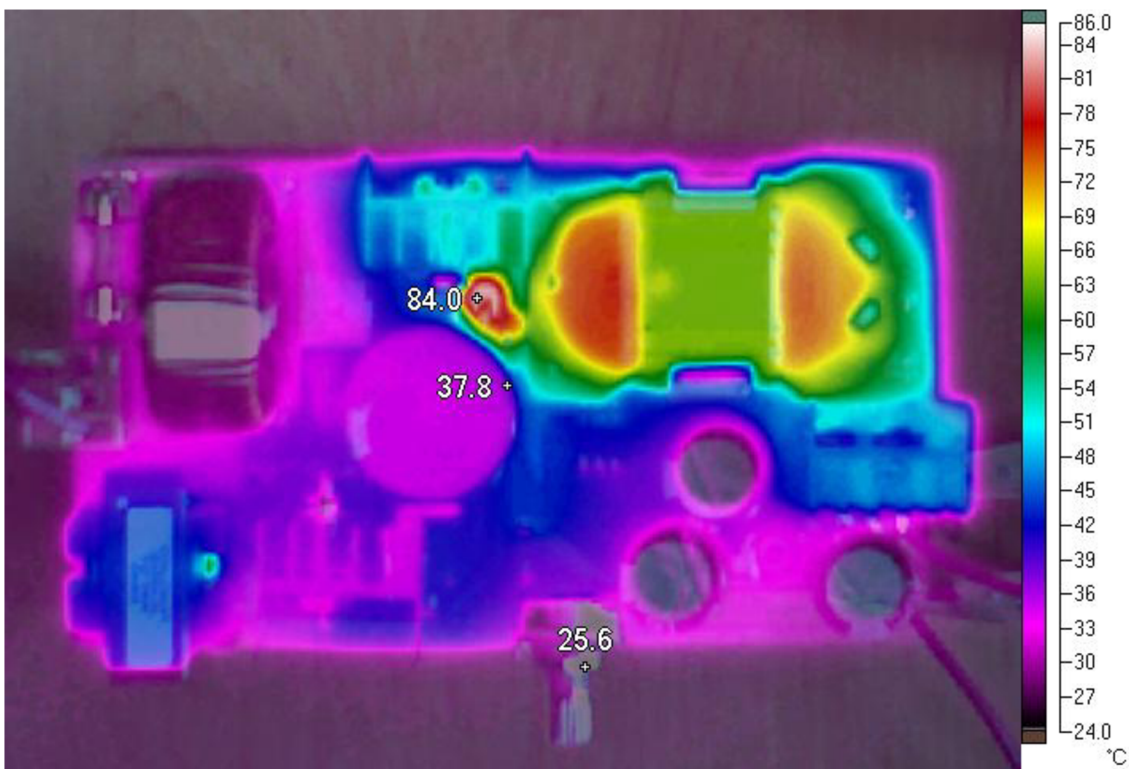
Při měření byla použita termokamera Fluke Ti25. Měří teploty v rozsahu $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+350\text{ }^{\circ}\text{C}$ s přesností $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ nebo $\pm 2\%$. Při těchto parametrech měří s citlivostí $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Obr. 46 Referenční TI zdroj při zatížení 100 % po uplynutí 3 minut



Obr. 47 Vlastní prototyp při zatížení 0 % po uplynutí 5 minut



Obr. 48 Vlastní prototyp při zatížení 50 % po uplynutí 5 minut

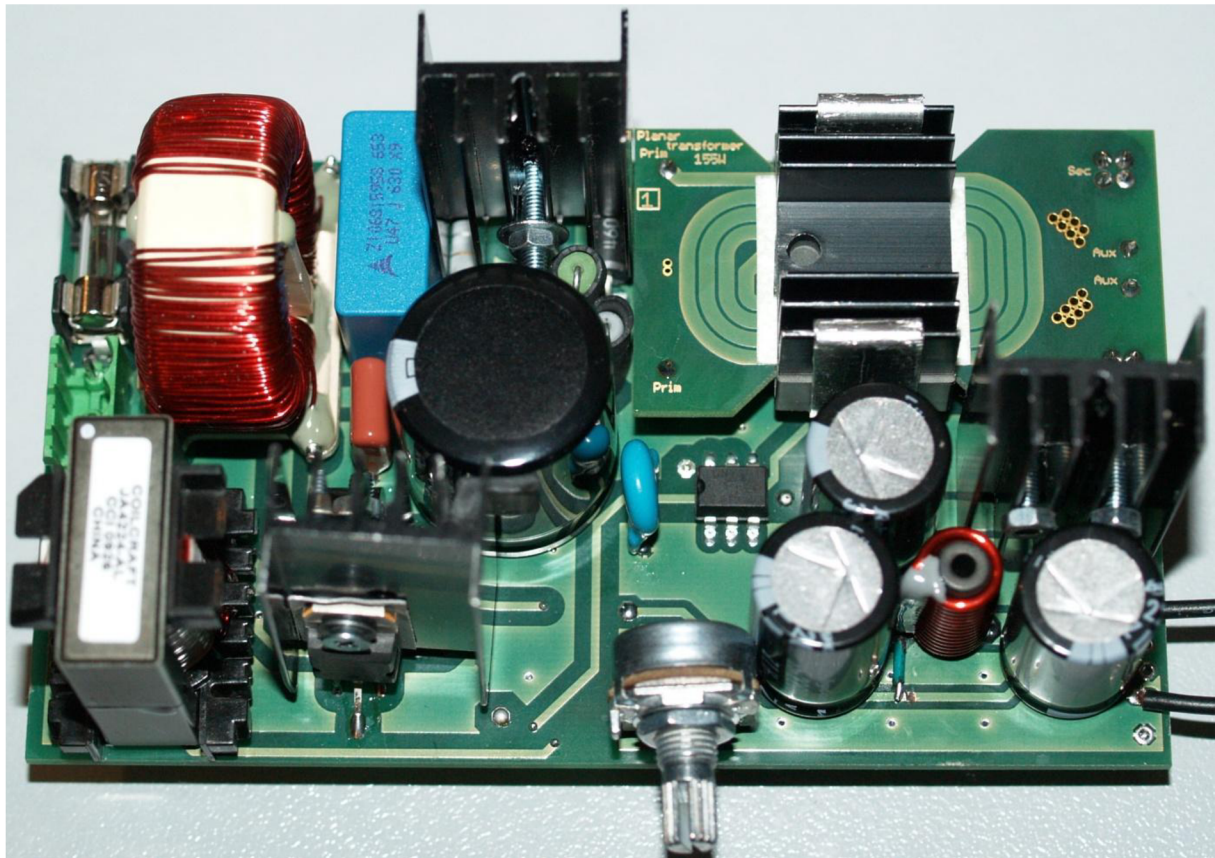


Obr. 49 Vlastní prototyp při zatížení 100 % po uplynutí 10 minut

Z měření je zřejmé, že planární transformátor lépe rozvádí teplo do okolí. V transformátoru klasické konstrukce se teplo uzavírá uvnitř, kde později může dojít k lokálnímu přehřátí a spálení transformátoru.

4.4.4 Porovnání zdroje firmy TI a zdroje řešeného v diplomové práci

Oba zdroje ve výsledném měření dosahují velmi podobných parametrů. Největším nedostatkem prototypu zdroje firmy TI byla nemožnost nastavení výstupních napětí. Také nedostatečně kompenzující PFC obvod může být brán jako chyba návrhu. Prototyp firmy TI je přibližně 2x větších rozměrů. Velmi těžké je porovnání transformátorů, jelikož planární transformátor dosahuje optimální účinnosti při teplotě kolem 110 °C. Vlastní prototyp obsahuje vyšší hodnotu hlučnosti, která se však velmi obtížně identifikuje.



Obr. 50 Finální verze spínaného zdroj s planárním transformátorem

5 Závěr

Diplomová práce se zabývá vývojem spínaného zdroje s planárním transformátorem. Zabývá se výběrem vhodného integrovaného obvodu spolu s topologií, zakoupením referenčního prototypu pro měření a hledání chyb vlastního zdroje. Dále návrhem a realizací planárního transformátoru a ve finále realizací, laděním a proměřením vlastního prototypu.

Vyrobený spínaný zdroj splňuje veškeré požadavky zadání. Jeho hlavními výhodami jsou vysoká účinnost, malé rozměry a malé výstupní zvlnění.

Během práce na spínaném zdroji byla vytvořena rozsáhlá databáze příloh obsahující výpočty, měření, fotografie a ostatní poznatky týkající se řešené problematiky. Pro větší přehlednost práce, jsou v textu uvedeny pouze vybrané části. Veškeré údaje získané v rámci práce jsou uloženy na přiloženém kompaktním disku.

Celý projekt byl časově a finančně velice náročný. Velké problémy během vývoje byly způsobeny nedostupností moderních součástek, napájecí a měřicí techniky. Pokud by měl být zdroj sériově vyráběn, bylo by potřeba provést důkladné měření a odladit veškeré nedostatky.

6 Použitá literatura

- [1] Spínaný zdroj. [cit. 2008-12-16]. Dostupné z WWW:
http://cs.wikipedia.org/wiki/Sp%C3%ADnan%C3%BD_zdroj
- [2] Power supply reference manual. [cit. 2008-12-15]. Dostupné z WWW:
http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/SMPSRM-D.PDF
- [3] Power Supply Design Tutorial. [cit. 2008-12-16]. Dostupné z WWW:
<http://www.smeps.us/power-supply.html>
- [4] UC3842 datasheet. [cit. 2008-12-16]. Dostupné z WWW:
<http://www.fairchildsemi.com/ds/UC/UC3842.pdf>
- [5] NCP1651 datasheet. [cit. 2008-12-15]. Dostupné z WWW:
http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/NCP1651-D.PDF
- [6] 90W notebook adapter. [cit. 2008-12-15]. Dostupné z WWW:
http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/AND8209-D.PDF
- [7] UCC28600 datasheet. [cit. 2008-12-16]. Dostupné z WWW:
<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/ucc28600.pdf>
- [8] UCC28600 120-W Evaluation module user's guide. [cit. 2009-5-5]. Dostupné z WWW:
<http://www.ti.com/litv/pdf/slou256a>
- [9] Reducing power usage in external power supply modules. [cit. 2009-5-5]. Dostupné z WWW: http://www2.electronicproducts.com/Reducing_power_usage_in_external_power_supply_modules-article-fa-fairchild-energyi-feb2007-html.aspx
- [10] The Benefits of Planar Magnetics in OF Power Conversion. [cit. 2010-5-8]. Dostupné z WWW: <http://www.payton.co.il/admin/editor/assets/benefits%20of%20planar.pdf>
- [11] Design of planar power transformers. [cit. 2010-5-8]. Dostupné z WWW:
<http://www.ferroxcube.com/appl/info/plandesi.pdf>
- [12] Modeling and Design of Planar Integrated Magnetic Components. [cit. 2010-5-8]. Dostupné z WWW: http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-08072003-141703/unrestricted/Thesis_Shen.pdf
- [13] Electrical Machines 1. [cit. 2010-5-10]. Dostupné z WWW: http://nptel.iitm.ac.in/courses/IIT-MADRAS/Electrical_Machines_I/pdfs/1_7.pdf
- [14] UCC28600 Design Calculator (Rev. F). [cit. 2010-5-12]. Dostupné z WWW:
<http://www.ti.com/litv/zip/slvc104f>

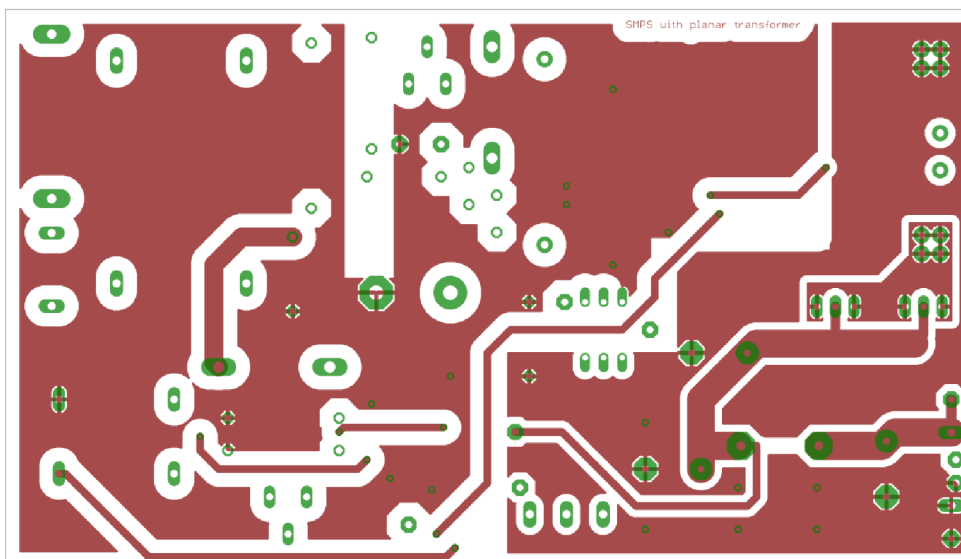
- [15] Datasheet LT3010/LT3010-5 - 50mA, 3V to 80V Low Dropout Micropower Linear Regulator. [cit. 2010-5-12]. Dostupné z WWW: <http://cds.linear.com/docs/Datasheet/30105fc.pdf>
- [16] Design Considerations for the UCC28600 (Rev. B). [cit. 2010-5-12]. Dostupné z WWW: <http://www.ti.com/litv/pdf/slva399b>
- [17] Elektronická zátěž. [cit. 2010-5-12]. Dostupné z WWW: <http://www.tosi.cz/elektro.html>
- [18] Ripple and Noise Measurements with DC/DC Switch-Mode Power Supplies [cit. 2009-7-8]. Dostupné z WWW: http://www.analogictech.com/resources/applications/appnotes/AN117_DCDCRipple.pdf

7 Použité zkratky

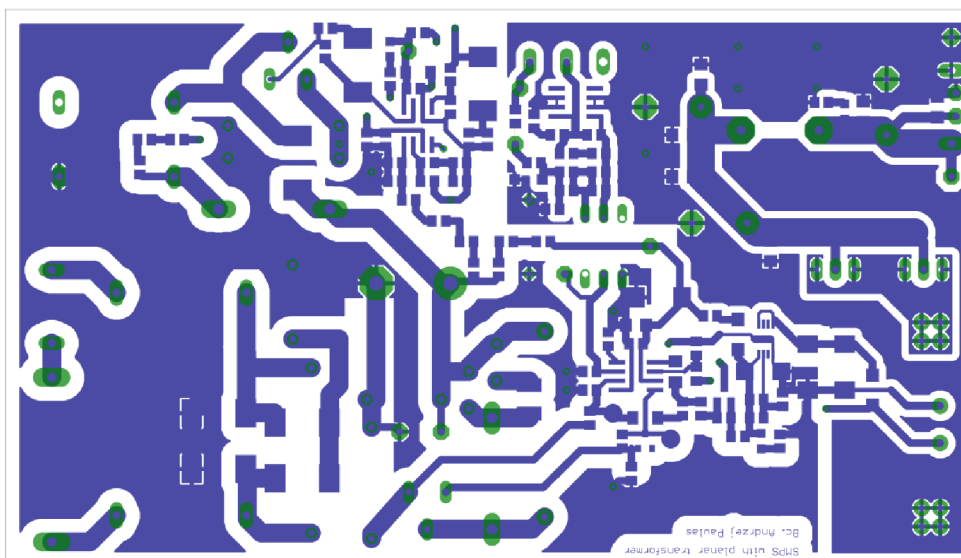
| | |
|---------------|---|
| PFC | power factor corector – upravovač hodnoty účinníku |
| DPS | deska plošného spoje |
| V_{SS} | soft start napětí |
| V_{CS} | napětí detekce proudu |
| V_{DS} | napětí na tranzistoru mezi drain a source |
| V_{FB} | zpěťnovazební napětí |
| TI | Texas Instruments |
| V_{out} | výstupní napětí |
| I_{out} | výstupní proud |
| V_{aux} | usměrněné napětí z pomocné cívky transformátoru |
| V_{ccaux} | usměrněné a stabilizované napětí z pomocné cívky transformátoru |
| V_{in} | vstupní střídavé napětí |
| I_{in} | vstupní střídavý proud |
| P_{in} | vstupní výkon změřený |
| P_{calc} | vstupní výkon vypočtený |
| T | měřená teplota |
| η_{mer} | účinnost vypočtena pomocí měřeného výkonu |
| η_{calc} | účinnost vypočtena pomocí vypočteného výkonu |

8 Přílohy

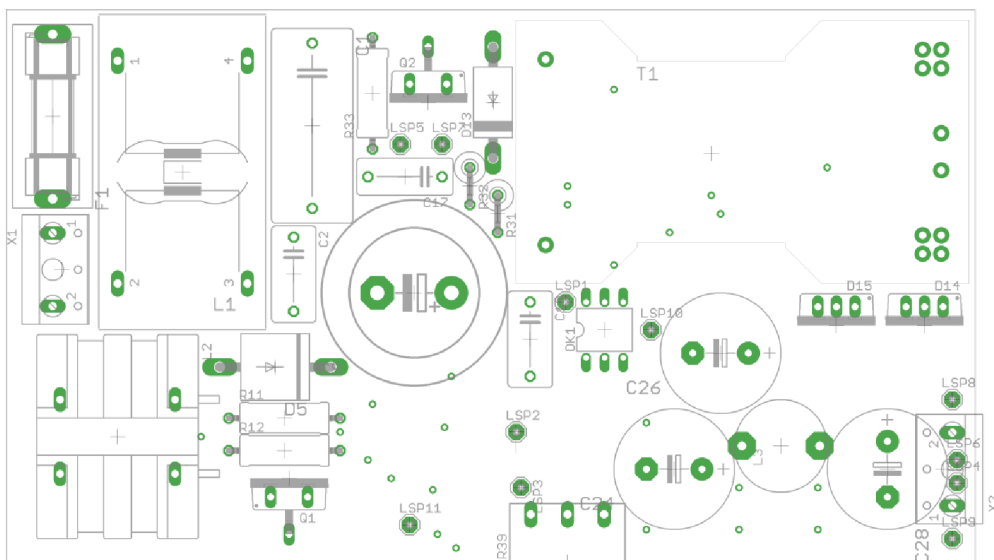
Příloha 1 – motiv DPS spínaného zdroje spolu s osazovacím plánem.



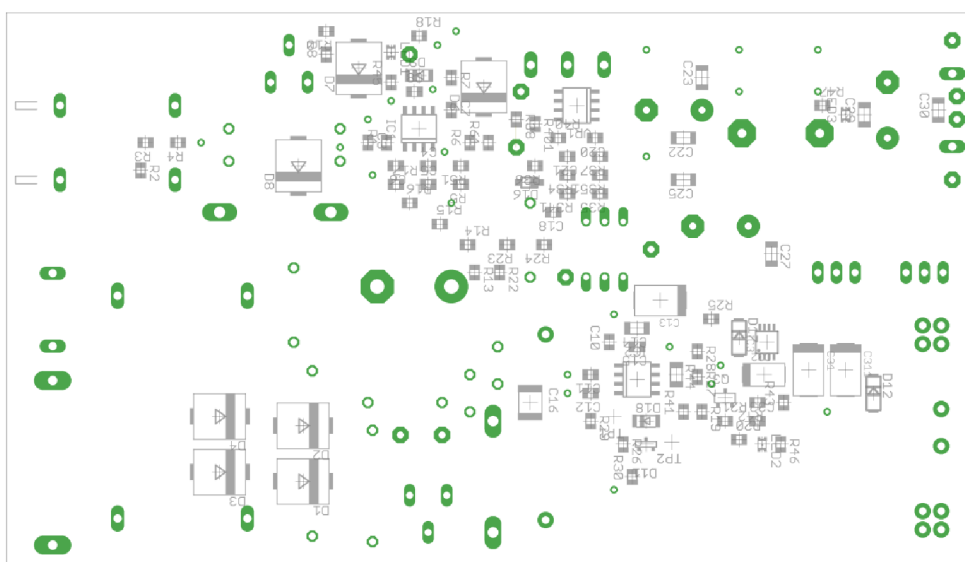
Obr. 51 Motiv DPS spínaného zdroje strana top 1:1



Obr. 52 Motiv DPS spínaného zdroje strana bottom 1:1



Obr. 53 Osazovací plán DPS spínaného zdroje strana top 1:1



Obr. 54 Osazovací plán DPS spínaného zdroje strana bottom 1:1

Příloha 2 – tabulky naměřených hodnot

Tab. 3 Měření vlastního prototypu při výstupním napětí nastaveném na 12 V

| I_{out} (A) | V_{out} (V) | V_{aux} (V) | V_{ccaux} (V) | V_{in} (V) | I_{in} (A) | PFC (-) | P_{in} (W) | P_{calc} (W) | T (°C) | η_{mer} % | η_{calc} % |
|---------------|---------------|---------------|-----------------|--------------|--------------|-----------|--------------|----------------|----------|----------------|-----------------|
| 0 | 11.996 | 11.03 | 11.00 | 223 | 0.04 | 0.05 | 0 | 0.45 | 25.2 | 0.00 | 0.00 |
| 0.5 | 11.989 | 16.49 | 16.40 | 222 | 0.07 | 0.50 | 7 | 7.77 | 25.2 | 85.64 | 77.15 |
| 1 | 11.984 | 17.40 | 17.24 | 223 | 0.11 | 0.59 | 14 | 14.47 | 25.8 | 85.60 | 82.80 |
| 1.5 | 11.980 | 17.70 | 17.56 | 223 | 0.17 | 0.55 | 21 | 20.85 | 27.2 | 85.57 | 86.18 |
| 2 | 11.975 | 17.90 | 17.73 | 223 | 0.22 | 0.55 | 29 | 26.98 | 28.3 | 82.59 | 88.76 |
| 2.5 | 11.970 | 17.99 | 17.81 | 223 | 0.29 | 0.55 | 35 | 35.57 | 30.7 | 85.50 | 84.13 |
| 3 | 11.960 | 13.75 | 13.56 | 223 | 0.22 | 0.94 | 46 | 46.12 | 34.6 | 78.00 | 77.80 |
| 3.5 | 11.954 | 14.03 | 13.83 | 223 | 0.25 | 0.95 | 55 | 52.96 | 37.6 | 76.07 | 79.00 |
| 4 | 11.948 | 14.39 | 14.18 | 223 | 0.27 | 0.98 | 61 | 59.01 | 40.9 | 78.35 | 81.00 |
| 4.5 | 11.939 | 14.53 | 14.31 | 223 | 0.30 | 1.00 | 68 | 66.90 | 44.9 | 79.01 | 80.31 |
| 5 | 11.932 | 14.71 | 14.50 | 223 | 0.33 | 1.00 | 74 | 73.59 | 47.1 | 80.62 | 81.07 |
| 5.5 | 11.928 | 15.09 | 14.85 | 223 | 0.36 | 1.00 | 80 | 80.28 | 49.6 | 82.01 | 81.72 |
| 6 | 11.922 | 15.86 | 15.65 | 223 | 0.39 | 1.00 | 87 | 86.97 | 52.4 | 82.22 | 82.25 |
| 6.5 | 11.915 | 16.38 | 16.14 | 223 | 0.40 | 1.00 | 90 | 89.20 | 55.8 | 86.05 | 86.82 |
| 7 | 11.909 | 16.85 | 16.58 | 223 | 0.43 | 1.00 | 98 | 95.89 | 57.8 | 85.06 | 86.94 |

Tab. 4 Měření vlastního prototypu při výstupním napětí nastaveném na 19,4 V

| I_{out} (A) | V_{out} (V) | V_{aux} (V) | V_{ccaux} (V) | V_{in} (V) | I_{in} (A) | PFC (-) | P_{in} (W) | P_{calc} (W) | T (°C) | η_{mer} % | η_{calc} % |
|---------------|---------------|---------------|-----------------|--------------|--------------|-----------|--------------|----------------|----------|----------------|-----------------|
| 0 | 19.402 | 19.04 | 18.17 | 224 | 0.03 | 0.06 | 0 | 0.40 | 24.4 | 0.00 | 0.00 |
| 0.5 | 19.392 | 24.70 | 18.17 | 223 | 0.09 | 0.57 | 12 | 11.44 | 24.5 | 80.80 | 84.76 |
| 1 | 19.383 | 25.40 | 18.17 | 221 | 0.17 | 0.57 | 21 | 21.41 | 24.9 | 92.30 | 90.51 |
| 1.5 | 19.376 | 25.20 | 18.17 | 222 | 0.29 | 0.53 | 33 | 34.12 | 25.7 | 88.07 | 85.18 |
| 2 | 19.361 | 21.00 | 18.17 | 225 | 0.24 | 0.91 | 50 | 49.14 | 27.8 | 77.44 | 78.80 |
| 2.5 | 19.354 | 21.40 | 18.17 | 224 | 0.28 | 0.93 | 61 | 58.33 | 31.7 | 79.32 | 82.95 |
| 3 | 19.344 | 22.00 | 18.17 | 224 | 0.32 | 0.99 | 72 | 70.96 | 34.7 | 80.60 | 81.78 |
| 3.5 | 19.338 | 22.90 | 18.17 | 224 | 0.37 | 1.00 | 82 | 82.88 | 38.6 | 82.54 | 81.66 |
| 4 | 19.335 | 23.40 | 18.17 | 224 | 0.40 | 1.00 | 91 | 89.60 | 40.7 | 84.99 | 86.32 |
| 4.5 | 19.327 | 23.70 | 18.17 | 223 | 0.43 | 1.00 | 98 | 95.89 | 44.3 | 88.75 | 90.70 |
| 5 | 19.321 | 24.50 | 18.17 | 223 | 0.48 | 1.00 | 109 | 107.04 | 48.1 | 88.63 | 90.25 |
| 5.5 | 19.316 | 25.30 | 18.17 | 224 | 0.53 | 1.00 | 120 | 118.72 | 54.3 | 88.53 | 89.49 |
| 6 | 19.310 | 25.90 | 18.17 | 225 | 0.58 | 1.00 | 132 | 130.50 | 58.0 | 87.77 | 88.78 |
| 6.5 | 19.304 | 26.40 | 18.17 | 225 | 0.64 | 1.00 | 143 | 144.00 | 60.5 | 87.75 | 87.14 |
| 7 | 19.298 | 27.00 | 18.17 | 224 | 0.68 | 1.00 | 153 | 152.32 | 62.8 | 88.29 | 88.69 |

Tab. 5 Měření vlastního prototypu při výstupním napětí nastaveném na 25 V

| I_{out} (A) | V_{out} (V) | V_{aux} (V) | V_{ccaux} (V) | V_{in} (V) | I_{in} (A) | PFC (-) | P_{in} (W) | P_{calc} (W) | T (°C) | η_{mer} % | η_{calc} % |
|---------------|---------------|---------------|-----------------|--------------|--------------|-----------|--------------|----------------|----------|----------------|-----------------|
| 0 | 25.005 | 24.90 | 18.17 | 224 | 0.04 | 0.10 | 0 | 0.90 | 24.0 | 0.00 | 0.00 |
| 0.5 | 24.998 | 29.80 | 18.17 | 224 | 0.11 | 0.59 | 15 | 14.54 | 24.5 | 83.33 | 85.98 |
| 1 | 24.990 | 30.30 | 18.17 | 225 | 0.22 | 0.60 | 28 | 29.70 | 25.4 | 89.25 | 84.14 |
| 1.5 | 24.991 | 26.50 | 18.17 | 226 | 0.24 | 0.90 | 50 | 48.82 | 27.1 | 74.97 | 76.79 |
| 2 | 24.996 | 27.00 | 18.17 | 225 | 0.29 | 0.95 | 64 | 61.99 | 30.6 | 78.11 | 80.65 |
| 2.5 | 25.002 | 27.80 | 18.17 | 225 | 0.34 | 1.00 | 77 | 76.50 | 33.8 | 81.18 | 81.71 |
| 3 | 25.005 | 28.30 | 18.17 | 223 | 0.40 | 1.00 | 90 | 89.20 | 38.8 | 83.35 | 84.10 |
| 3.5 | 25.003 | 29.20 | 18.17 | 224 | 0.45 | 1.00 | 101 | 100.80 | 44.3 | 86.64 | 86.82 |
| 4 | 25.001 | 30.10 | 18.17 | 223 | 0.50 | 1.00 | 112 | 111.50 | 50.0 | 89.29 | 89.69 |
| 4.5 | 24.996 | 31.00 | 18.17 | 223 | 0.56 | 1.00 | 127 | 124.88 | 54.1 | 88.57 | 90.07 |
| 5 | 24.991 | 31.60 | 18.17 | 224 | 0.64 | 1.00 | 143 | 143.36 | 58.0 | 87.38 | 87.16 |
| 5.5 | 24.990 | 32.70 | 18.17 | 225 | 0.69 | 1.00 | 156 | 155.25 | 61.8 | 88.11 | 88.53 |
| 6 | 24.997 | 35.00 | 18.17 | 224 | 0.76 | 1.00 | 170 | 170.24 | 67.9 | 88.22 | 88.10 |
| 6.5 | 24.967 | 36.70 | 18.17 | 225 | 0.82 | 1.00 | 188 | 184.50 | 74.2 | 86.32 | 87.96 |
| 7 | 24.960 | 37.40 | 18.17 | 226 | 0.89 | 1.00 | 201 | 201.14 | 78.6 | 86.93 | 86.86 |

Tab. 6 Měření prototypu TI při výstupním napětí nastaveném na 19,4 V

| I_{out} (A) | V_{out} (V) | V_{in} (V) | I_{in} (A) | PFC (-) | P_{in} (W) | P_{calc} (W) | T (°C) | η_{mer} % | η_{calc} % |
|---------------|---------------|--------------|--------------|-----------|--------------|----------------|----------|----------------|-----------------|
| 0 | 19.357 | 222 | 0.03 | 0.05 | 0 | 0.33 | 24.1 | 0.00 | 0.00 |
| 0.5 | 19.352 | 222 | 0.09 | 0.54 | 12 | 10.79 | 24.5 | 80.63 | 89.68 |
| 1 | 19.351 | 222 | 0.13 | 0.87 | 27 | 25.11 | 25.6 | 71.67 | 77.07 |
| 1.5 | 19.349 | 223 | 0.18 | 0.93 | 38 | 37.33 | 28.1 | 76.38 | 77.75 |
| 2 | 19.349 | 221 | 0.23 | 0.96 | 49 | 48.80 | 29.6 | 78.98 | 79.30 |
| 2.5 | 19.349 | 222 | 0.27 | 0.94 | 58 | 56.34 | 31.8 | 83.40 | 85.85 |
| 3 | 19.347 | 222 | 0.32 | 0.95 | 68 | 67.49 | 34.4 | 85.35 | 86.00 |
| 3.5 | 19.346 | 223 | 0.37 | 0.95 | 80 | 78.38 | 37.0 | 84.64 | 86.38 |
| 4 | 19.345 | 223 | 0.42 | 0.94 | 90 | 88.04 | 39.8 | 85.98 | 87.89 |
| 4.5 | 19.342 | 223 | 0.46 | 0.96 | 100 | 98.48 | 43.1 | 87.04 | 88.39 |
| 5 | 19.339 | 224 | 0.50 | 0.98 | 113 | 109.76 | 45.6 | 85.57 | 88.10 |
| 5.5 | 19.333 | 223 | 0.55 | 0.99 | 123 | 121.42 | 47.8 | 86.45 | 87.57 |
| 6 | 19.329 | 223 | 0.59 | 1.00 | 132 | 131.57 | 49.7 | 87.86 | 88.15 |
| 6.5 | 19.325 | 223 | 0.64 | 1.00 | 142 | 142.72 | 52.1 | 88.46 | 88.01 |
| 7 | 19.321 | 223 | 0.68 | 1.00 | 152 | 151.64 | 55.3 | 88.98 | 89.19 |