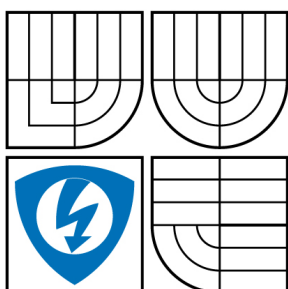




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

PRECIZNÍ REGULOVATELNÝ ZDROJ

PRECISE ADJUSTABLE POWER SUPPLY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

ANDRZEJ PAWLAS

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JAROSLAV KADLEC, Ph.D.

BRNO 2008

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Andrzej Pawlas
Bytem: Obvodová 602/18, 73564, Havířov - Prostřední
Suchá
Narozen/a (datum a místo): 9.7.1985, Havířov

(dále jen "autor")

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 244/53, 60200 Brno 2
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
Ing. Zdenka Rozsívalová

(dále jen "nabyvatel")

Článek 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: Precizní regulovatelný zdroj

Vedoucí/školicitel VŠKP: Ing. Jaroslav Kadlec, Ph.D.

Ústav: Ústav mikroelektroniky

Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

- ☒ tištěné formě - počet exemplářů 1
- ☒ elektronické formě - počet exemplářů 1

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.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užívat, 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:

.....

Nabyvatel

.....

Autor

Abstrakt:

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem precizního spínaného zdroje. Tento spínaný zdroj pracuje s maximální střídou 99 %. Vstupní napětí je 12 V a výstupní je možno nastavit v rozsahu 1,2 V - 11,9 V. Proudově je možno zdroj zatížit 0 A - 20 A. Celý zdroj je řízen mikrokontrolérem. Při samotném řešení návrhu spínaného zdroje bylo vyvinuto pět prototypů. Poslední prototyp funguje dobře, avšak na výstupu se objevilo značné rušení.

Abstract:

This bachelor's thesis deals with the proposing precise switching power supply. This switching power supply works with a maximum of 99 % duty cycle. Input voltage is 12 V and output can be set in the range of 1.2 V - 11.9 V. Current can be a source of burden 0 A - 20 A. The entire power supply is controlled by microcontroller. While addressing the proposal switching power supply have been developed five prototypes. Last prototype works well, but the output appeared significant interference.

Klíčová slova:

Spínaný zdroj, DC-DC měnič, Snižující měnič, Mikrokontrolér, Teplotní čidlo.

Keywords:

Switching power supply, DC-DC converter, Buck converter, Microcontroller, Thermal sensor.

Bibliografická citace díla:

PAWLAS, A. *Precizní regulovatelný zdroj*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 38 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jaroslav Kadlec, 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 29. 5. 2008

.....

Poděkování:

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jaroslavu Kadlecovi, Ph.D. za odborné vedení a cenné rady při zpracovávání daného tématu a Ing. Jiřímu Šebestovi, Ph.D. za konzultace. Dále bych chtěl poděkovat firmám Texas Instruments, Analog Devices, Linear Technology, Maxim, Sipex, Coilcraft a National Semiconductor, které mi bezplatně zasílaly vzorky součástek. Také děkuji Tomáši Přikrylovi 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 s prací spojenými.

OBSAH

ÚVOD	10
2 TEORETICKÝ ÚVOD	11
2.1 SPÍNANÉ ZDROJE.....	11
2.1.1 Úvod do problematiky spínaných zdrojů	11
2.1.2 Snižující spínaný zdroj (Buck converter).....	12
2.1.3 Zvyšující spínaný zdroj (Boost converter).....	13
2.1.4 Snižující-zvyšující spínaný zdroj (buck-boost converter)	14
3 KONSTRUKCE SPÍNANÉHO ZDROJE.....	15
3.1 PWM VERZE 1	15
3.1.1 Popis funkce	15
3.1.2 Realizace.....	16
3.1.3 Výsledky	17
3.2 PWM VERZE 2	17
3.2.1 Popis funkce	18
3.2.2 Realizace.....	18
3.2.3 Výsledky	19
3.3 PWM VERZE 3	19
3.3.1 Popis funkce	20
3.3.2 Realizace.....	20
3.3.3 Výsledky	22
3.4 PWM VERZE 4	23
3.4.1 Popis funkce	23
3.4.2 Realizace.....	23
3.4.3 Výsledky	25
3.5 PWM VERZE 5.....	26
3.5.1 Popis funkce	26
3.5.2 Realizace.....	27
3.5.3 Výsledky	27
4 ŘÍZENÍ SPÍNANÉHO ZDROJE	30
4.1 MIKROKONTROLÉR	30

4.2	TEPLOTNÍ ČIDLO	32
4.3	DISPLAY	33
4.4	ZPĚTNÁ VAZBA	34
4.5	SOFTWARE	35
5	ZÁVĚR	36
6	POUŽITÁ LITERATURA	37

Seznam obrázků

OBR. 1: A) ZÁKLADNÍ SCHÉMA [1] B) VYOBRAZENÍ PROUDU V ZAPNUTÉM A VYPNUTÉM STAVU [1]	12
OBR. 2: A) ZÁKLADNÍ SCHÉMA [1] B) VYOBRAZENÍ PROUDU V ZAPNUTÉM A VYPNUTÉM STAVU [1]	13
OBR. 3: A) ZÁKLADNÍ SCHÉMA [1] B) VYOBRAZENÍ PROUDU V ZAPNUTÉM A VYPNUTÉM STAVU [1]	14
OBR. 4: SCHÉMA ZAPOJENÍ ZDROJE Č.1	16
OBR. 5: DPS ZDROJE Č.1	17
OBR. 6: SCHÉMA ZAPOJENÍ ZDROJE Č.2	18
OBR. 7: DPS ZDROJE Č.2	19
OBR. 8: SCHÉMA ZAPOJENÍ ZDROJE Č.3	20
OBR. 9: DPS ZDROJE Č.3	22
OBR. 10: SCHÉMA ZAPOJENÍ ZDROJE Č.4	23
OBR. 11: DOPORUČENÍ PRO SPRÁVNÝ LAYOUT DPS [2]	24
OBR. 12: DPS ZDROJE Č.4	24
OBR. 13: VYROBENÁ DPS ZDROJE Č.4	25
OBR. 14: ČASOVÝ PRŮBĚH SW A VÝSTUPU PRO ZDROJE Č.4	25
OBR. 15: ČASOVÝ PRŮBĚH VÝSTUPNÍHO NAPĚTÍ PRO ZDROJ Č.4	26
OBR. 16: SCHÉMA ZAPOJENÍ ZDROJE Č.5	26
OBR. 17: DPS ZDROJE Č.5	27
OBR. 18: HOTOVÁ DESKA ZDROJE Č.5	27
OBR. 19: ČASOVÝ PRŮBĚH ZDROJE VERZE 5	28
OBR. 20: ČASOVÝ PRŮBĚH ZDROJE VERZE 5	28
OBR. 21: VLASTNÍ MĚŘENÍ	29
OBR. 22: MIKROKONTROLÉR V REDUKCI	31
OBR. 23: MIKROKONTROLÉR V REDUKCI ZESPODU	31
OBR. 24: REDUKCE USB-RS232	31
OBR. 25: PROGRAMÁTOR MIKROKONTROLÉRU	31
OBR. 26: A) SCHÉMA TEPLTNÍHO ČIDLA B) NÁVRH DPS TEPLTNÍHO ČIDLA	33
OBR. 27: SCHÉMA ZAPOJENÍ ZPĚTNÉ VAZBY ZDROJE	34
OBR. 28: NÁVRH DPS ZPĚTNÉ VAZBY ZDROJE	34

Úvod

Spínané zdroje úspěšně konkurují klasickým lineárním zdrojům v oblasti napájení. Své místo si najdou v různých elektronických zařízeních počínaje počítači, mobily, 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 bakalářské práce je navržení regulovatelného precizního spínaného zdroje, který pracuje s maximální střídou 99 %. Vstupní napětí je 12 V a výstupní je možno nastavit v rozsahu 1,2 V - 11,9 V. Proudově můžeme zdroj zatížit 0 A - 20 A.

2 Teoretický úvod

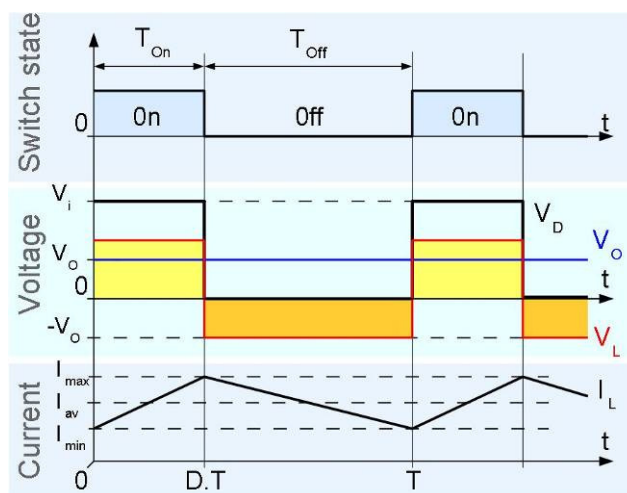
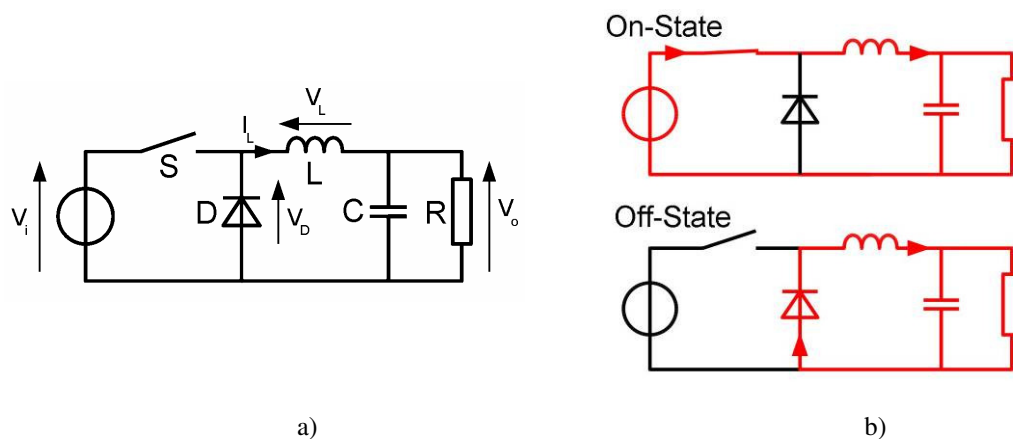
2.1 Spínané zdroje

2.1.1 Úvod do problematiky spínaných zdrojů

Spínaný zdroj se skládá ze spínacího tranzistoru, cívky, diody a kondenzátoru. Spínané zdroje nabízí vyšší účinnost než klasické lineární zdroje. Klíčovou součástí posouvající vývoj spínaného zdroje ku předu je tranzistor MOS. Na tyto tranzistory jsou kladeny vysoké nároky: malý odpor v sepnutém režimu, nízká vstupní kapacita a vysoká rychlost spínání. S vyšší spínací frekvencí se zmenšují cívky a kondenzátory. Řízení a návrh DPS (deska plošných spojů) je však složitější. Moderní spínané zdroje pracují na kmitočtech kolem 1 MHz. Mohou pracovat v různých režimech: step-up (boost), step-down (buck), invert (flyback), step-up/down (buck-boost).

2.1.2 Snižující spínaný zdroj (Buck converter)

U tohoto měniče musí být vstupní napětí větší než výstupní. Při sepnutí spínače se nabíjí kondenzátor a roste proud tekoucí cívkou. Až napětí dosáhne potřebné výstupní úrovně, spínač se rozepte. Proud tekoucí cívkou se začne uzavírat přes rekuperační diodu. Proud cívkou klesá, kondenzátor se vybíjí do zátěže. Až výstupní napětí klesne, řídicí logika opět sepne spínač a celý cyklus se opakuje.



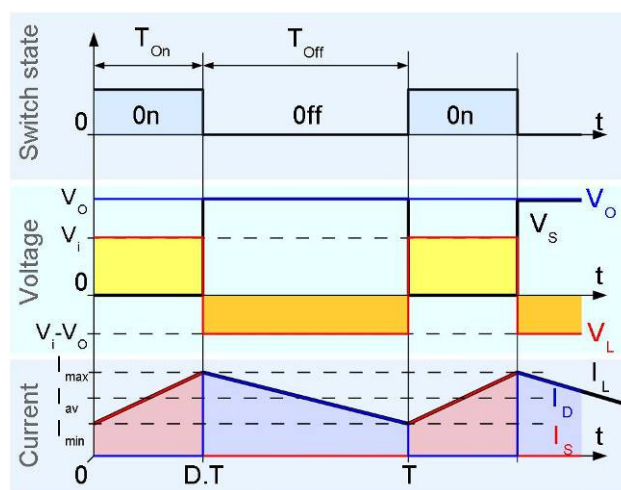
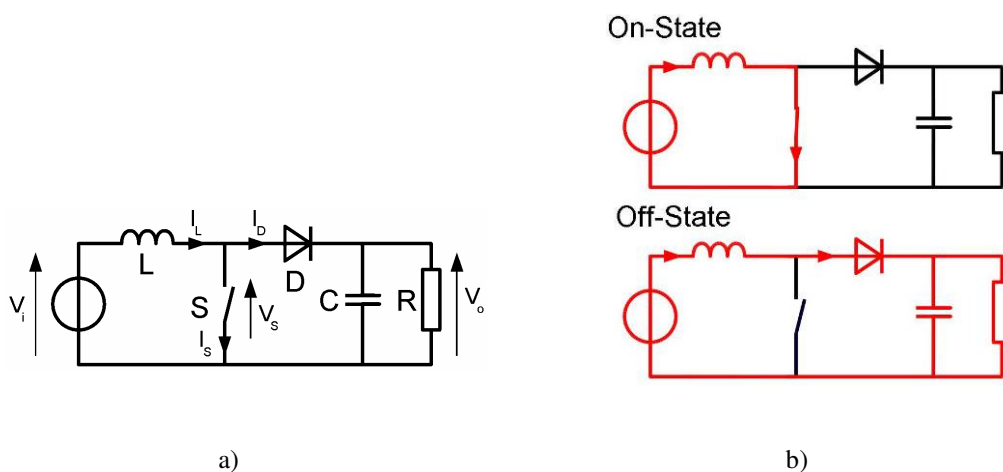
c)

Obr. 1: a) Základní schéma [1] b) Vyobrazení proudu v zapnutém a vypnutém stavu [1]

c) Časový průběh [1]

2.1.3 Zvyšující spínaný zdroj (Boost converter)

U tohoto měniče je důležitou podmínkou velikost vstupního napětí, která je menší než výstupní napětí. Nejprve se kondenzátor při rozepnutí spínače nabije na vstupní napětí U_1 . Při sepnutí spínače roste proud tekoucí cívkou. Po určité době, aby se cívka nepřesýtila, se spínač rozepne. Na cívce se indukuje napětí, které se přičítá ke vstupnímu napětí U_1 . Proud tekoucí cívkou potom musí téct přes diodu, nabíjí kondenzátor a teče do zátěže. Proud cívkou postupně klesá, kondenzátor se vybíjí do zátěže. Až napětí klesne pod předem nastavenou hodnotu, řídicí logika opět zapne spínač a celý cyklus se opakuje.



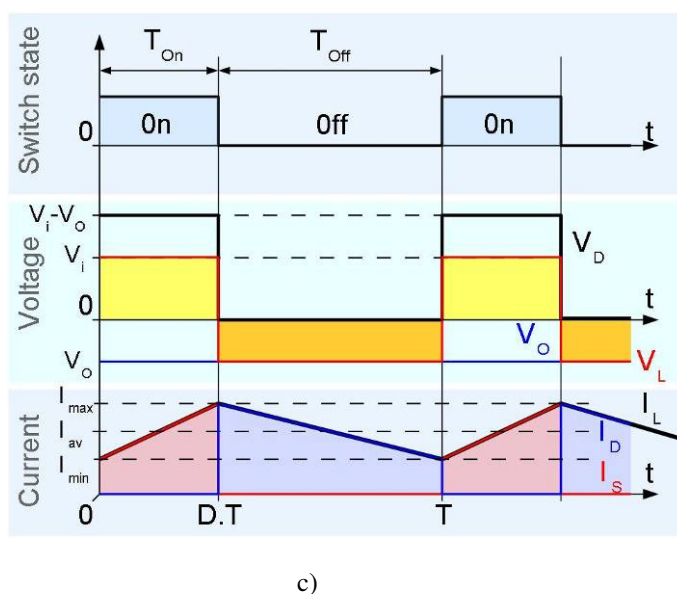
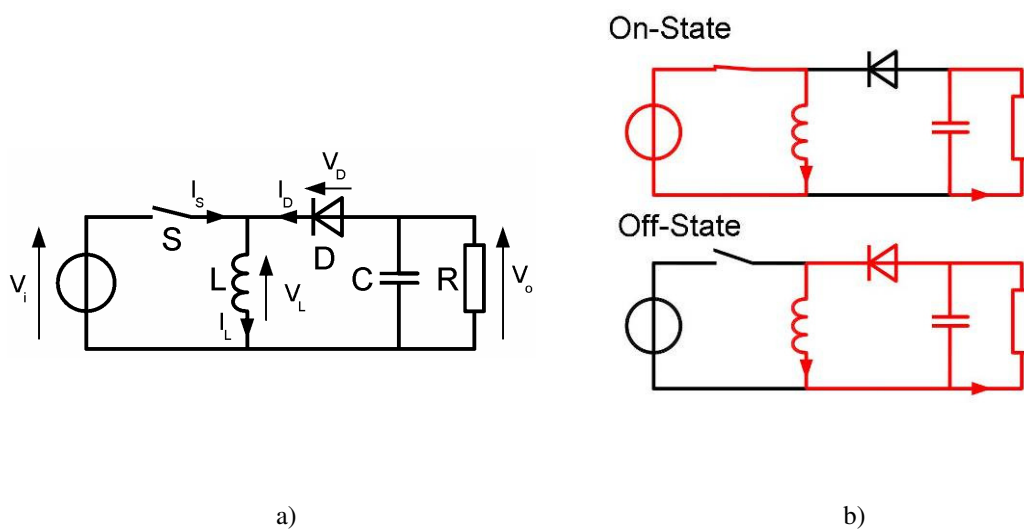
c)

Obr. 2: a) Základní schéma [1] b) Vyobrazení proudu v zapnutém a vypnutém stavu [1]

c) Časový průběh [1]

2.1.4 Snižující-zvyšující spínaný zdroj (buck-boost converter)

Tento měnič má úroveň napětí omezené pouze minimální a maximální mezí definovanou výrobcem. Při sepnutí spínače roste proud tekoucí cívkou. Potom se spínač rozezne. Na cívce se indukuje napětí opačné polaroty. Proud tekoucí cívkou se začne uzavírat přes rekuperační diodu. Kondenzátor se nabije záporným napětím. Účinnost tohoto měniče je maximálně 60 %.



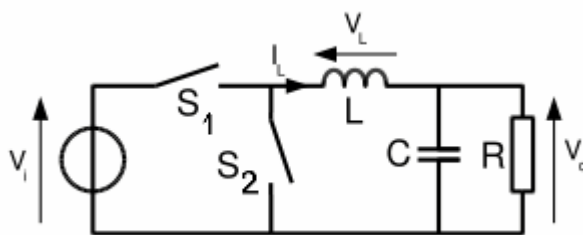
Obr. 3: a) Základní schéma [1] b) Vyobrazení proudu v zapnutém a vypnutém stavu [1]

c) Časový průběh [1]

3 Konstrukce spínaného zdroje

Při samotném řešení návrhu spínaného zdroje bylo vyvinuto pět prototypů. Při každém dalším řešení se vycházelo z předchozího, přičemž cílem bylo opravit nedostatky vůči ideálnímu stavu.

Pro všechny konstrukce bylo vycházeno ze zapojení snižujícího měniče (buck converter) Obr. 4. Kvůli vysokému proudovému zatížení (až 20 A) bylo zapotřebí použít zapojení s dvěma tranzistory MOS. Při zapojení tranzistoru MOS - dioda by docházelo na diodě ke značným ztrátám.



Obr. 4: Schéma zapojení snižujícího měniče [1]

3.1 PWM verze 1

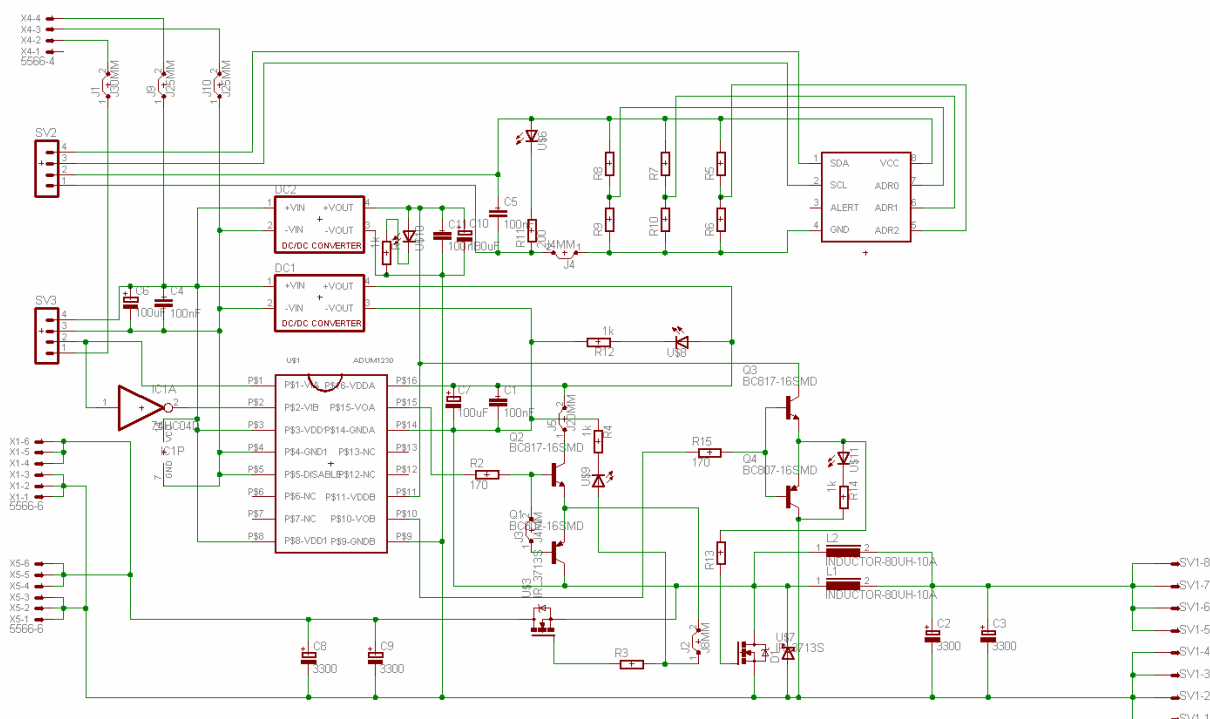
V tomto prvním řešení měly být oba tranzistory MOS řízeny pomocí mikrokontroléru. K řízení těchto tranzistorů byl použit galvanický oddělovač ADUM1230. Ten byl napájen galvanicky oddělenými zdroji DCH010512S. V závěru však docházelo k problému, kdy v době přepínání tranzistoru MOS byly krátce zapnuty oba tranzistory a docházelo ke zkratu. Proto bylo potřeba vyvinout druhý prototyp.

3.1.1 Popis funkce

Po přivedení napájení na galvanicky oddělené zdroje bylo možno napájet oddělovač ADUM1230. Díky galvanickému oddělení bylo možno spínat tranzistory MOS, které pracují v jiných napěťových úrovních. Na galvanický oddělovač byl přiveden PWM (pulzně šířková modulace) signál z mikrokontroléru, který pomocí změny střídy měnil výstupní napětí.

Ve výkonové části vše pracuje na principu snižujícího spínaného zdroje. Střídavě je spínán horní a dolní tranzistor MOS, přičemž na výstupu by měla být úroveň napětí korespondující k délce impulsu PWM. PWM signál pro druhý tranzistor MOS byl jednoduše negován. Bylo nutno počítat s mírným zpožděním. Zpoždění mělo být dostatečně malé, aby mohlo být zanedbáno. Celý obvod měl fungovat na kmitočtech v oblasti kolem 100 kHz.

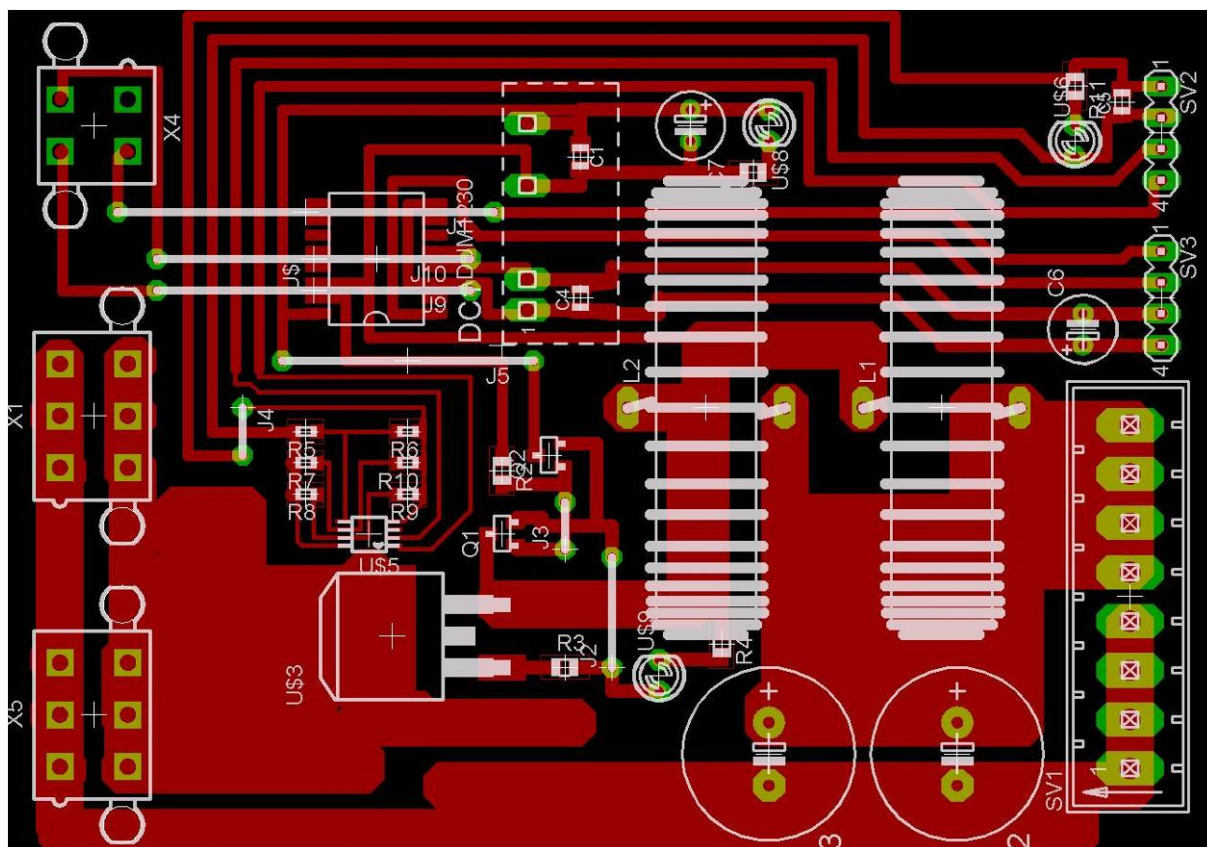
Také bylo vhodné na desku integrovat teplotní čidlo TMP275 pro měření pracovní teploty zdroje.



Obr. 4: Schéma zapojení zdroje č.1

3.1.2 Realizace

Při realizování projektu bylo velice obtížné vybrat vhodné součástky, které by splňovaly tak vysoké požadavky. Pro galvanické oddělení napájení byl použit obvod DCH010512S firmy Texas Instruments. V případě oddělení vstupního signálu byl použit ADUM1230 firmy Analog Devices zejména z důvodu převodu vstupního napětí z logické úrovně na napětí 12 V. Toto napětí je vhodnější pro spínání výkonových tranzistorů MOS. Na našem trhu je problém sehnat tyto tranzistory s odporem menším jak 15 mΩ, a proto bylo nutno používat tranzistory MOS například ze zničených základních desek.



Obr. 5: DPS zdroje č.1

3.1.3 Výsledky

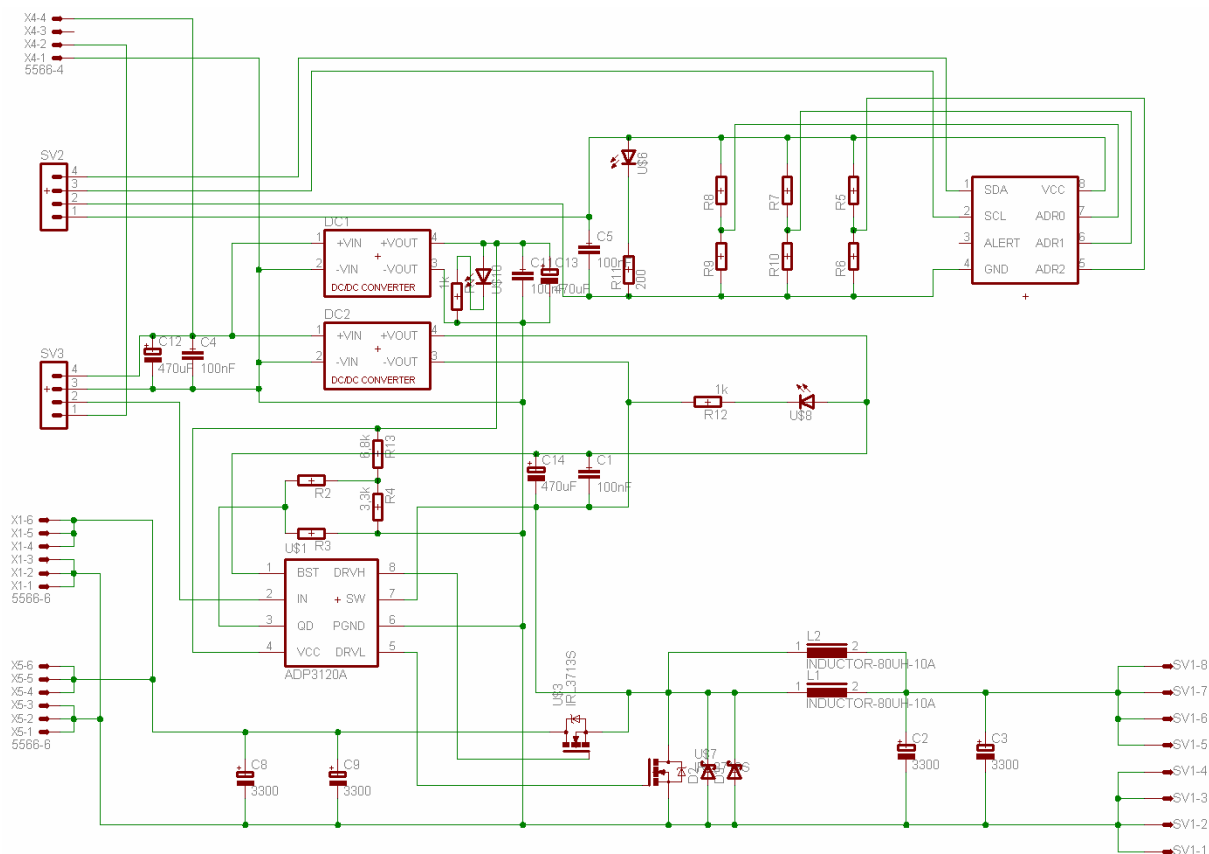
Po zapojení bylo zjištěno, že se tranzistory MOS zahřívají více než bylo předpokládáno. Pár z nich se také spálilo. Nakonec bylo zjištěno, že při přepínání jsou v jeden okamžik sepnuty oba tranzistory. Tudíž dochází ke zkratu, což ničí spínací tranzistory.

3.2 PWM verze 2

Ve druhé verzi měniče byl odstraněn zkrat, který vznikl při chvilkovém sepnutí obou tranzistorů v době jejich přepínání. Za tímto účelem byl použit obvod ADP3120A firmy Analog Devices. Jedná se o řadič dvou tranzistorů ve snižujícím zapojení pomocí PWM vstupu. Avšak po vytvoření prototypu se zjistilo, že je zapotřebí mnohem přesněji zvolit vstupní a výstupní filtraci napětí. V katalogovém listu výrobce nebyl dostatek informací ke správnému výpočtu součástek. Také obvod nedokázal pracovat s vysokou střídou (až 99 %), která je důležitá pro tuto aplikaci. Proto byly započaty práce na třetí verzi.

3.2.1 Popis funkce

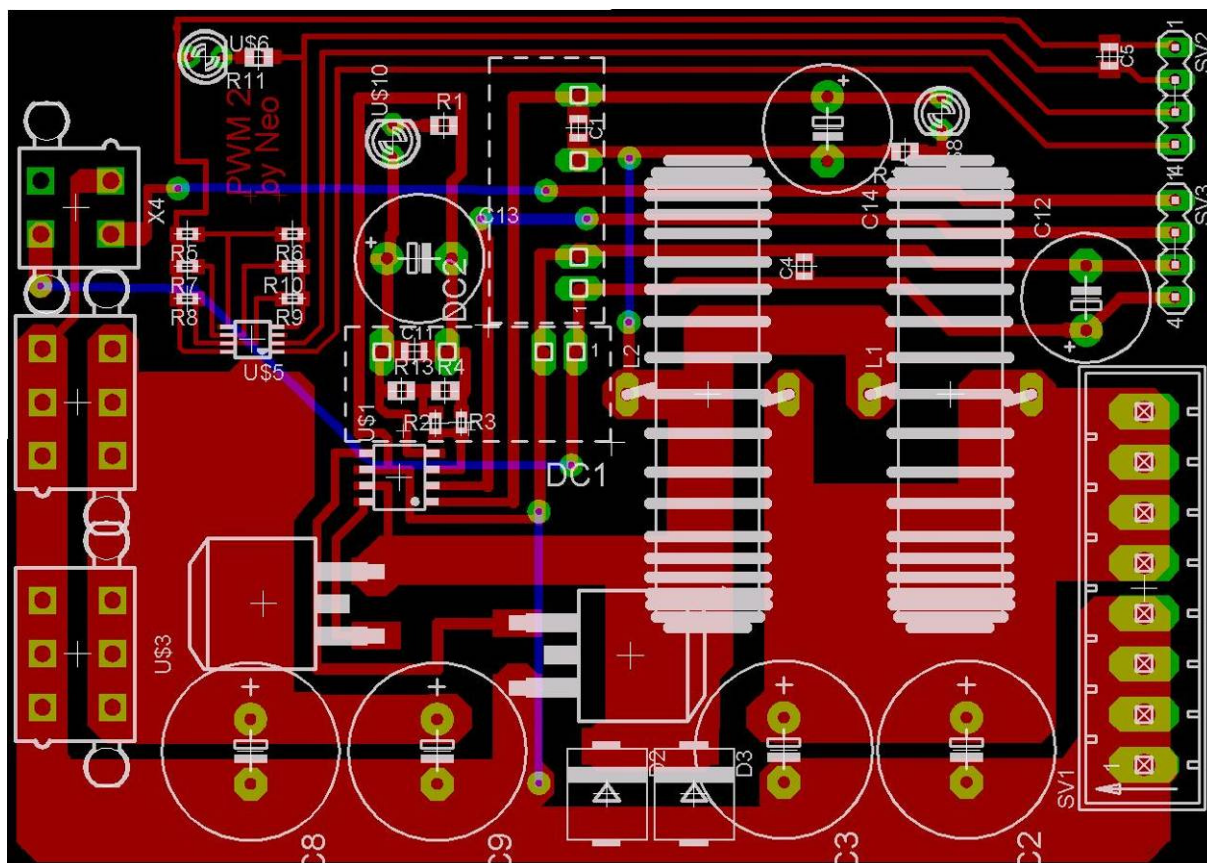
Jako v předchozí verzi bylo opět vstupní napětí pro tranzistory MOS galvanicky odděleno z důvodu posunutí napěťové úrovně. K řízení těchto tranzistorů byl použit obvod ADP3120A. Jedná se o integrovaný řadič snižujícího spínaného zdroje. Obvod disponuje mechanismem, který zabraňuje současnému sepnutí horního a dolního tranzistoru. Také automaticky posouvá PWM signál pro spodní tranzistor.



Obr. 6: Schéma zapojení zdroje č.2

3.2.2 Realizace

Realizace byla obdobná jako v první verzi. Opět byly použity galvanicky oddělené zdroje DCH010512S firmy Texas Instruments. Na desce bylo opět integrováno teplotní čidlo pro měření pracovní teploty. Ke spínání byly použity výkonové tranzistory MOS. Galvanický oddělovač signálu zaměněn byl za řadič snižujícího spínaného zdroje ADP3120A firmy Analog Devices.



Obr. 7: DPS zdroje č.2

3.2.3 Výsledky

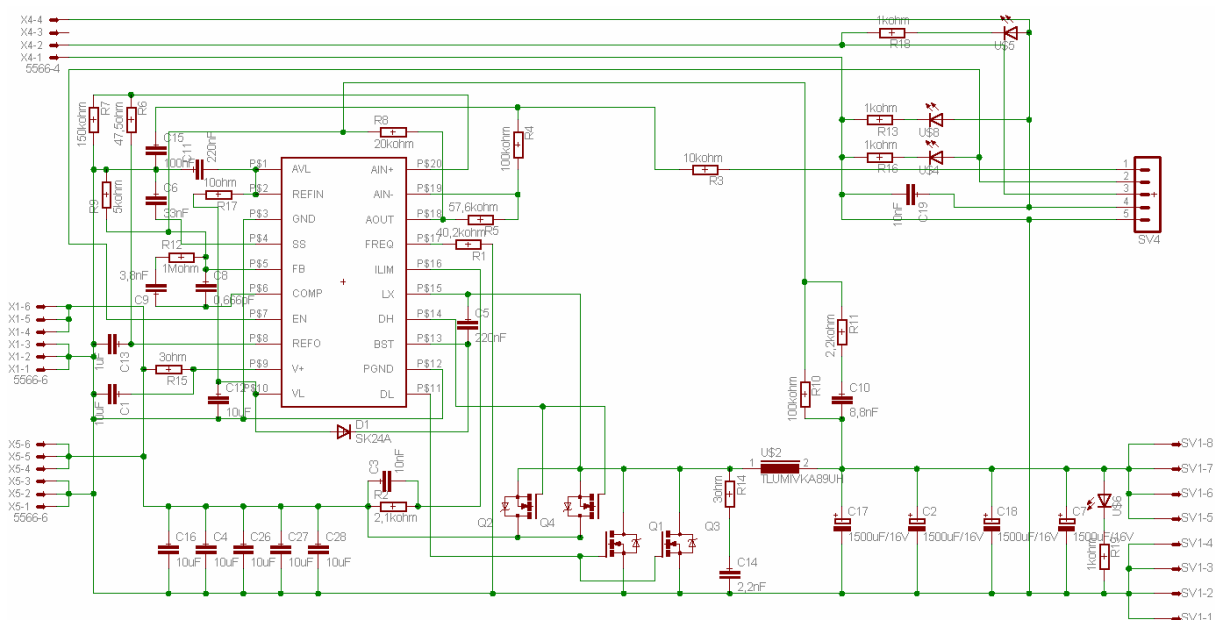
Výsledkem bylo přetížení galvanických oddělovačů napětí. Také nepřesnost výstupních filtrů byla značná. Důsledkem bylo hledání jiného řešení, ve kterém byly uvedeny přesnější výpočty součástek.

3.3 PWM verze 3

Ve třetí verzi byl použit specializovaný obvod MAX8597 firmy Maxim. Tento obvod byl velice vhodný z důvodu maximální 99,5 % střidy a integrovaného operačního zesilovače, který umožňuje řízení výstupního napětí pomocí vstupního signálu 0 V - 5 V. Také byl vhodný z důvodu převedení generování PWM signálu na specializovaný obvod, který automaticky mění střidu. V katalogovém listu výrobce byl také podrobný postup jak vypočítat hodnoty všech součástek a kompletní zapojení. Bohužel po vypočtení všech hodnot, navržení tištěného spoje a po výrobě prototypu opět následovalo zklamání. Obvod nebyl vůbec schopen funkce. Po konzultacích bylo zjištěno, že na vině je pravděpodobně příliš velká složitost návrhu tištěného spoje, nedostupnost mnoha vypočtených součástek a také obrovská měkkost zdroje, který pracoval pouze při nízkém zatížení.

3.3.1 Popis funkce

Jako řídicí prvek byl použit specializovaný obvod, který již obsahuje zpětnou vazbu a dokáže tak sám generovat a měnit střidu PWM v závislosti na zátěži. Hlavními přednostmi je však maximální střida až 99,5 %. Pracovní kmitočet může být použit v rozsahu 200 kHz - 1,4 MHz. Díky vysokým kmitočtům se zmenšují rozměry indukčnosti a kondenzátorů. Integrovaný obvod také obsahuje operační zesilovač, který při vhodném zapojení reguluje požadované výstupní napětí v závislosti na napětí regulačním. Jedním z rozdílů vůči předchozím verzím bylo odstranění potřeby galvanicky oddělovat napájení horního tranzistoru MOS. V tomto případě využíváme doby, kdy spodní tranzistor je sepnut a nabijeme kondenzátor C5. Ten potom slouží k napájení horního tranzistoru v době jeho sepnutí. V návrhu je také použita kompenzační síť, která zajišťuje stabilitu zpětné vazby.



Obr. 8: Schéma zapojení zdroje č.3

3.3.2 Realizace

Při návrhu bylo třeba vycházet z katalogového listu výrobce. Nejdříve byly stanoveny požadované hodnoty výstupního napětí (0,7 V - 11,94 V) a požadované hodnoty řídicího napětí (0 V - 5 V). Potom bylo zvoleno výstupní napětí operačního zesilovače (0,1 V - 3 V), které se následně dosadilo do vzorce (1). Pak bylo spočítáno referenční napětí pro operační zesilovač.

$$V_{AIN+} = \frac{V_{AOUT_MAX} \times V_{ADJ_MAX} - V_{AOUT_MIN} \times V_{ADJ_MIN}}{(V_{ADJ_MAX} - V_{ADJ_MIN}) + (V_{AOUT_MAX} - V_{AOUT_MIN})} \quad (1)$$

Poté byl zvolen odpor R7 a vypočítal se odpor R6 podle vzorce (2).

$$R6 = R7 \times [(2,5V / V_{AIN+}) - 1] \quad (2)$$

Následně byl zvolen odpor R4 a vypočítal se odpor R5 podle vzorce (3).

$$R5 = \frac{(V_{AIN+} - V_{AOUT_MIN}) \times R4}{(V_{ADJ_MAX} - V_{AIN+})} \quad (3)$$

Pak byl zvolen odpor R9 a spočítalo se odpory R8 a R10 podle vzorce (4).

$$R8 = \frac{[(V_{OUT_MIN} - V_{FB}) \times (V_{FB} - V_{AOUT_MIN}) + (V_{OUT_MAX} - V_{FB}) \times (V_{AOUT_MAX} - V_{FB})]}{[(V_{OUT_MAX} - V_{FB}) - (V_{OUT_MIN} - V_{FB})] \times V_{FB}} \times R9 \quad (4)$$

Následně bylo zapotřebí provést korekci zvolených odporů z důvodu minimalizace chyby vzorcem (5).

$$\frac{R6 \times R7}{R6 + R7} = \frac{R4 \times R5}{R4 + R5} \quad (5)$$

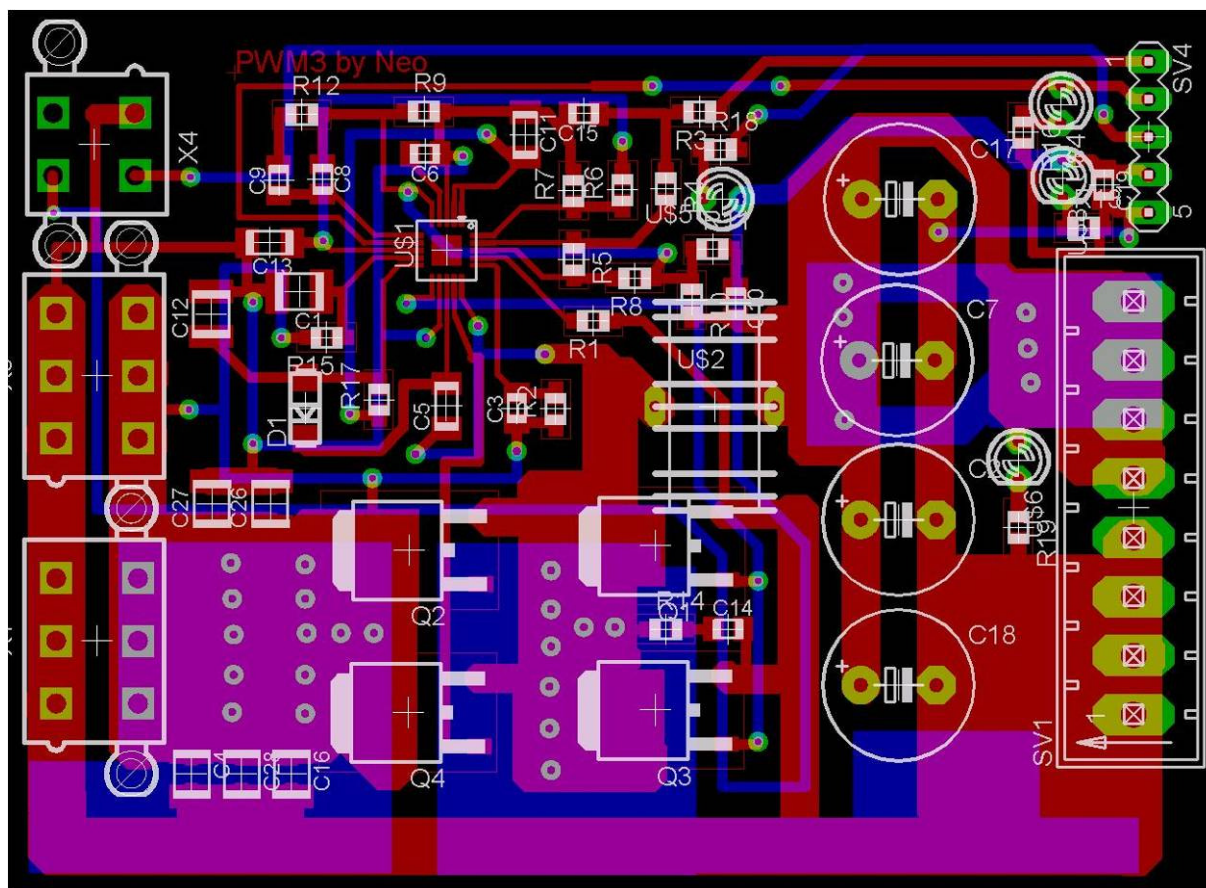
Poté se vypočetla indukčnost cívky vzorcem (6).

$$L = \frac{V_{OUT} \times (V_{IN} - V_{OUT})}{V_{IN} \times f_s \times I_{LOAD(MAX)} \times LIR} \quad (6)$$

Vypočítal se také špičkový proud, který musí vyfiltrovat vstupní kondenzátor vzorcem (7).

$$I_{RMS} = \frac{I_{LOAD} \times \sqrt{V_{OUT} \times (V_{IN} - V_{OUT})}}{V_{IN}} \quad (7)$$

Tranzistor MOS musel být zvolen tak, aby splňoval následující parametry. Vstupní napětí musí být logické úrovně. R_{DS-ON} musí být menší než 15 mΩ, aby nedocházelo k vysokým tepelným ztrátám. Celkový náboj hradla by neměl přesáhnout 30 nC. Tranzistory MOS s následujícími parametry pak není potřeba chladit přídavným pasivním chladičem. Z důvodu vysokého pracovního kmitočtu byly zvoleny výstupní kondenzátory s nízkou sériovou rezistencí.



Obr. 9: DPS zdroje č.3

3.3.3 Výsledky

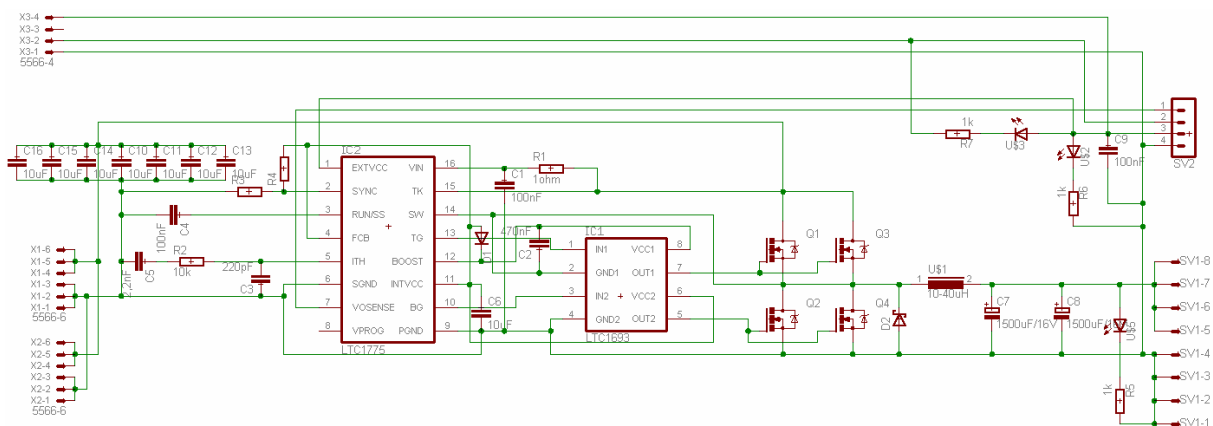
Celé zapojení fungovalo podle předpokladů, avšak zdroj se choval proudově velmi měkce. Při zatížení spotřebičem 20 A napětí výrazně kleslo. Nebylo možno zjistit proč. Jisté je, že se tak choval částečně z důvodu špatného návrhu DPS, který nebyl optimalizován pro vysoké pracovní kmitočty. Dalším důvodem bylo určitě také to, že součástky s vhodnými spočtenými hodnotami nebyly k dostání, a v podstatě bylo potřeba hodně improvizovat (náhrada nedostupných součástek jejich alternativami). Při testech byly prováděny různé úpravy, avšak bez úspěchu.

3.4 PWM verze 4

V této verzi byl použit obvod LTC1775. Jeho hlavní přednosti byly: žádný odpor k měření proudu (využívá se měření úbytku napětí na tranzistoru), max. 99 % střída a minimální počet externích prvků. Toto zařízení sice splňovalo veškeré nároky kladené výrobcem, avšak na výstupu se objevilo vysoké rušení.

3.4.1 Popis funkce

V tomto případě byl použit řídicí obvod LTC1775 firmy Linear Technology. Jeho hlavními výhodami byly: vysoká účinnost, žádný měřicí odpor a střída až 99 %. Obvod také vyžaduje minimum pasivních prvků, proto lze mnohem jednodušeji navrhnout DPS. Byl použit pomocný obvod LTC1693. Díky tomuto obvodu bylo možno používat i tranzistory MOS s vyšším celkovým nábojem hradla. Tyto tranzistory MOS disponují totiž nižší hodnotou odporu v sepnutém stavu, což snižuje ztráty.

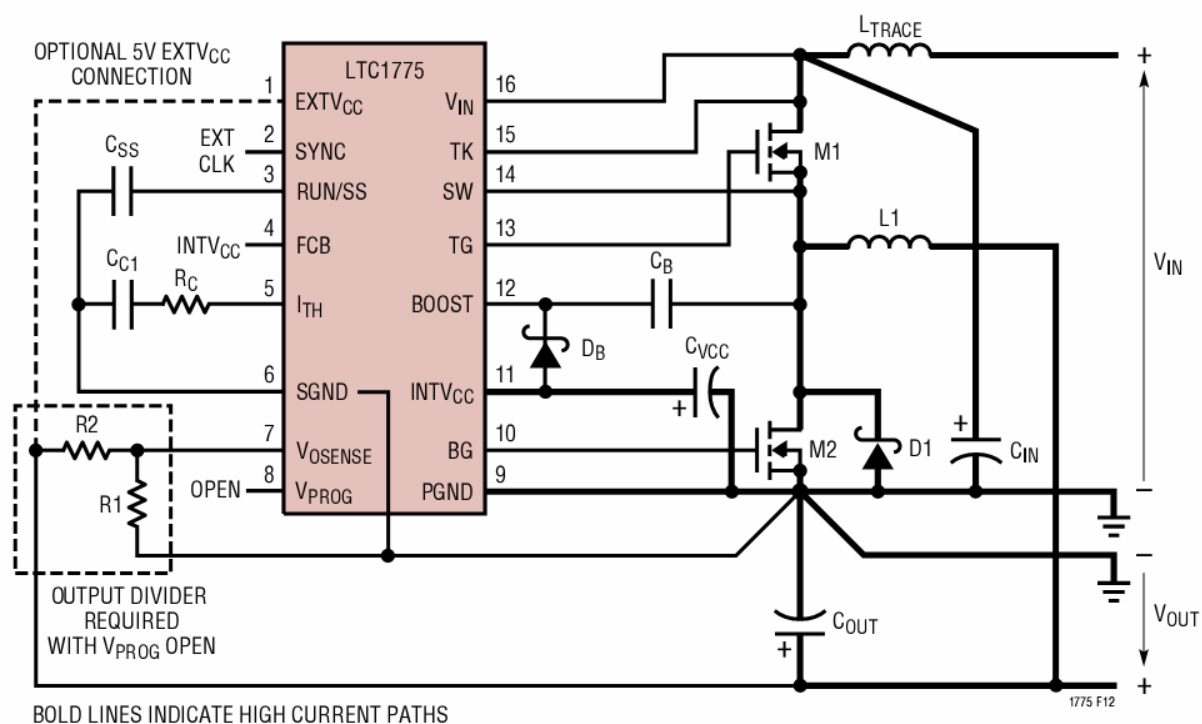


Obr. 10: Schéma zapojení zdroje č.4

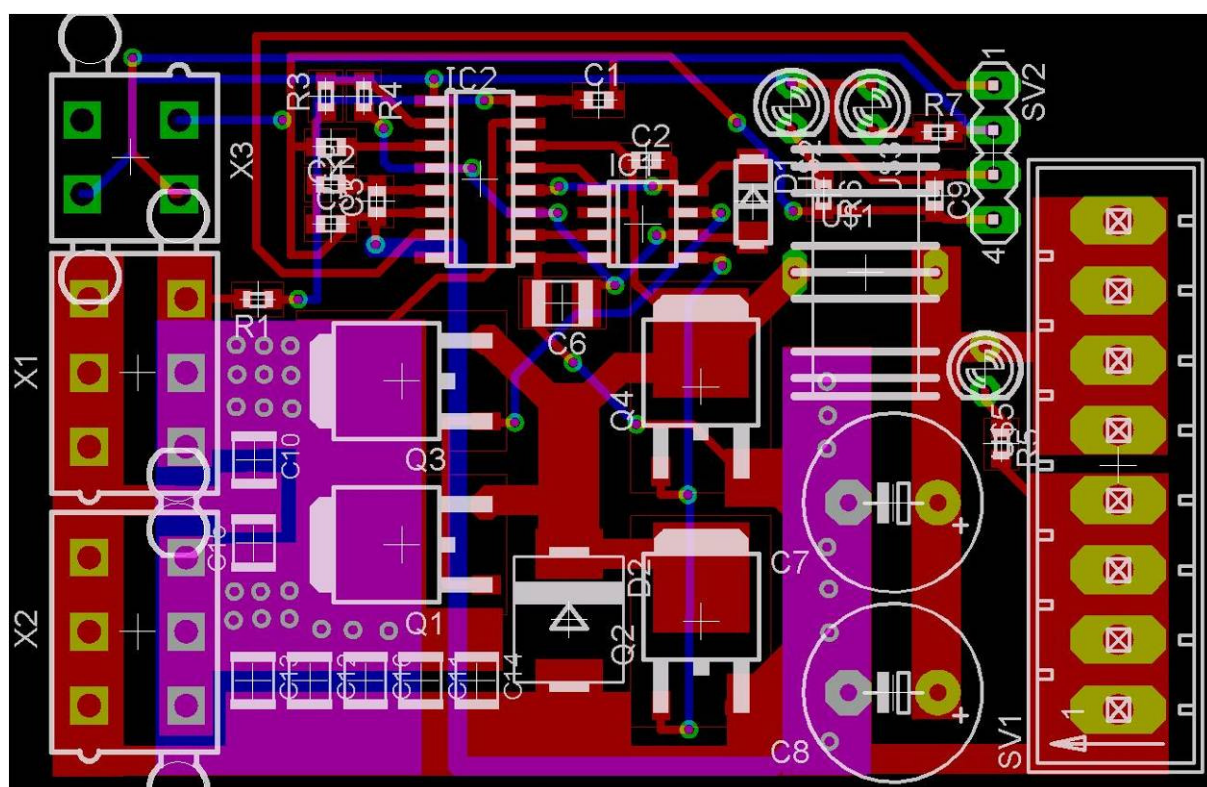
3.4.2 Realizace

Při návrhu DPS bylo zapotřebí splnit následující požadavky:

1. Připojení *TK* vývodu přímo ke tranzistoru MOS. Poté připojení horního tranzistoru MOS ke vstupnímu kondenzátoru.
2. Připojení zemního vývodu přímo ke spodnímu tranzistoru. Poté připojení anody diody ke vstupnímu kondenzátoru.
3. Signálová zem byla připojena k výstupnímu kondenzátoru.
4. *SW* vývod by měl být umístěn na opačné straně od signálových součástek.
5. Kondenzátor *C6* byl připojen v nejbližší možné vzdálenosti k *INTVcc* a *PGND* vývodu.
6. *Vosense* vývod byl připojen v nejbližší možné vzdálenosti k zátěži.



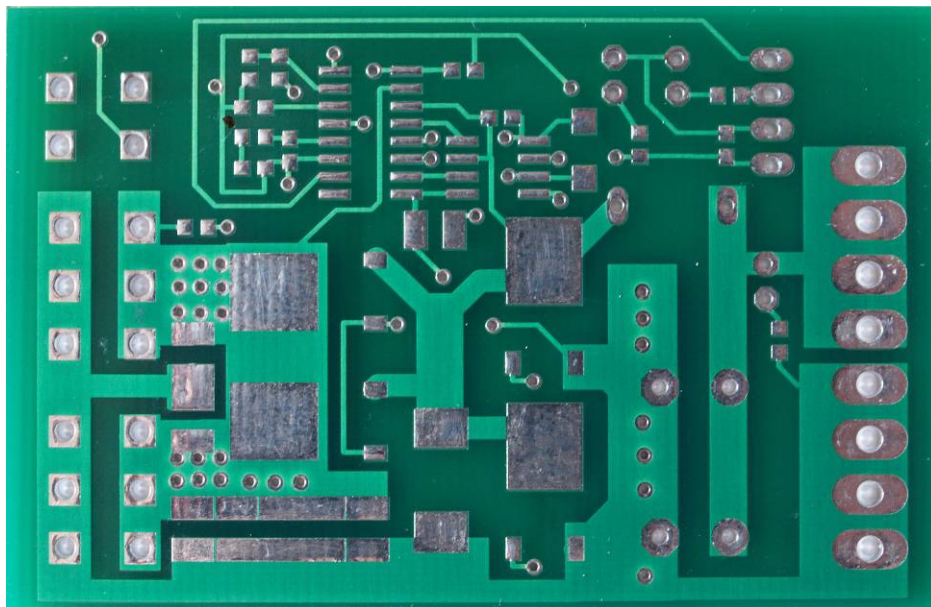
Obr. 11: Doporučení pro správný layout DPS [2]



Obr. 12: DPS zdroje č.4

3.4.3 Výsledky

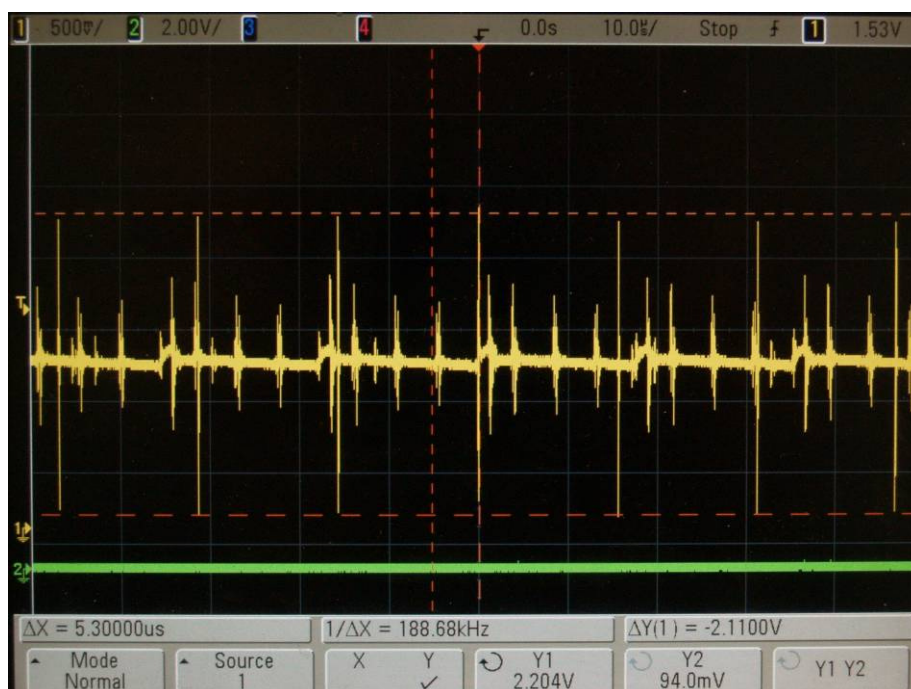
Zařízení fungovalo mnohem lépe než jeho třetí verze. Zdroj se choval proudově velice tvrdě, proto bylo toto zapojení ponecháno, avšak měření na osciloskopu odhalilo, že v konstrukci zdroje byla chyba. Na Obr. 14 byl zobrazen žlutý signál, tzn. spínání vůči zemi a zelený signál, tzn. výstup vůči zemi. Na Obr. 15 vidíme zvětšené napětí na výstupu.



Obr. 13: Vyrobená DPS zdroje č.4



Obr. 14: Časový průběh SW a výstupu pro zdroj č.4



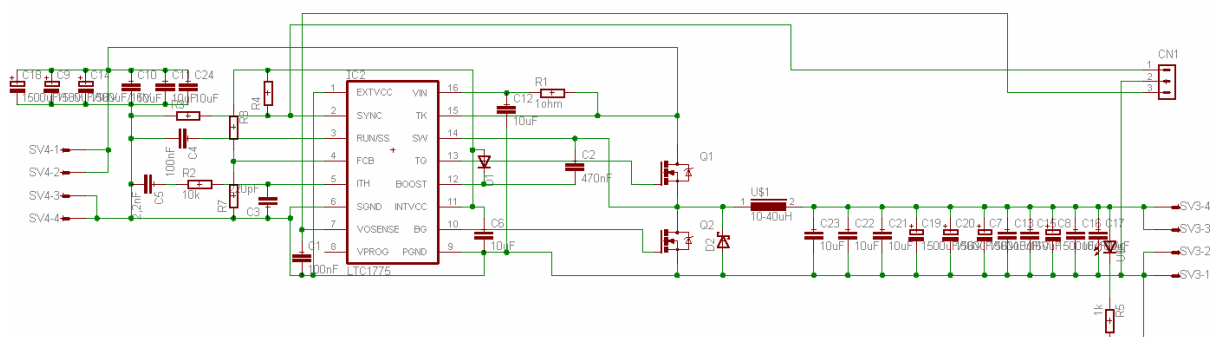
Obr. 15: Časový průběh výstupního napětí pro zdroj č.4

Z měření vyplývá, že zpětná vazba nefungovala dobře a také, že výstupní zvlnění bylo nepřípustné.

3.5 PWM verze 5

3.5.1 Popis funkce

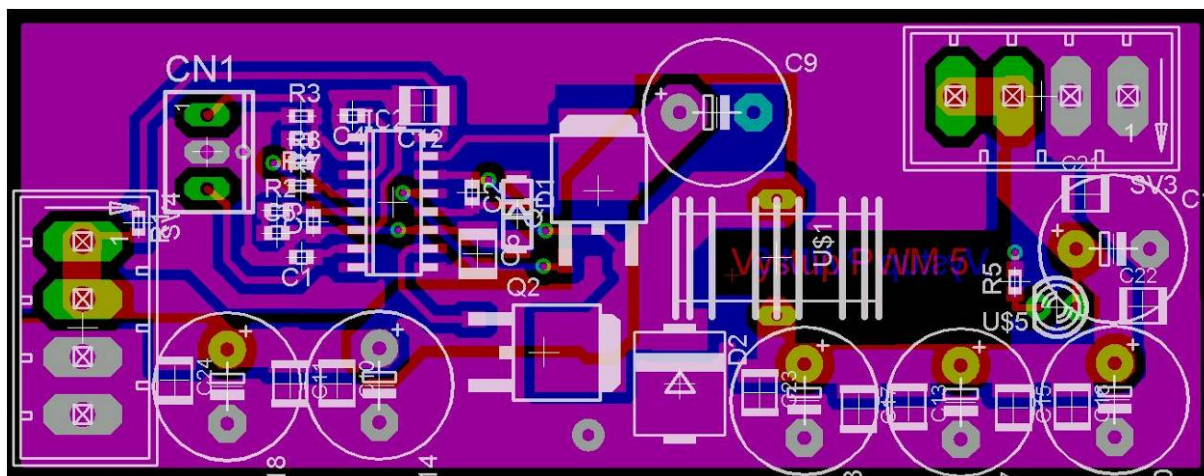
Verze pět byla takřka identická s verzí čtyři, avšak došlo zde k optimalizaci rozvržení desky a některých filtračních prvků, odstranění pomocného budícího obvodu, zlepšení filtrace vstupního napětí a napětí napájecího řídicí obvod. Také bylo potřeba zavést rozdělení zemí.



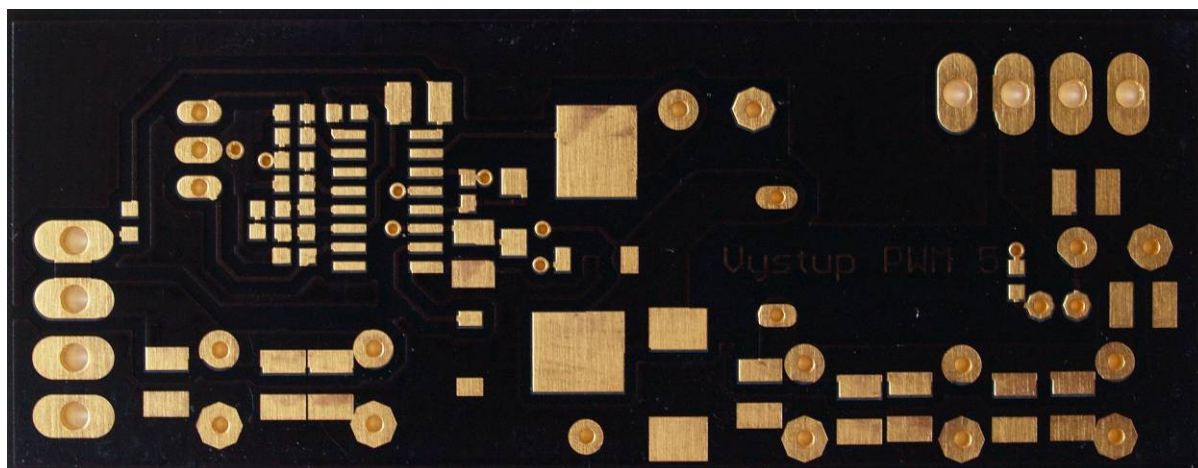
Obr. 16: Schéma zapojení zdroje č.5

3.5.2 Realizace

Celá DPS byla optimalizována z hlediska toku proudů při vysokofrekvenčním použití.



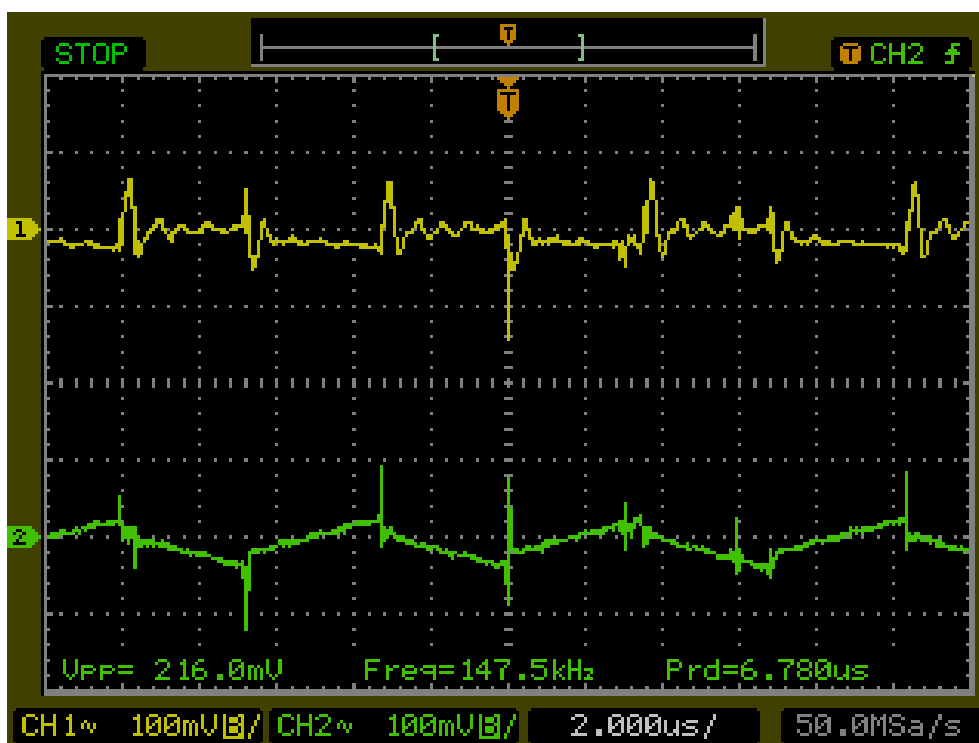
Obr. 17: DPS zdroje č.5



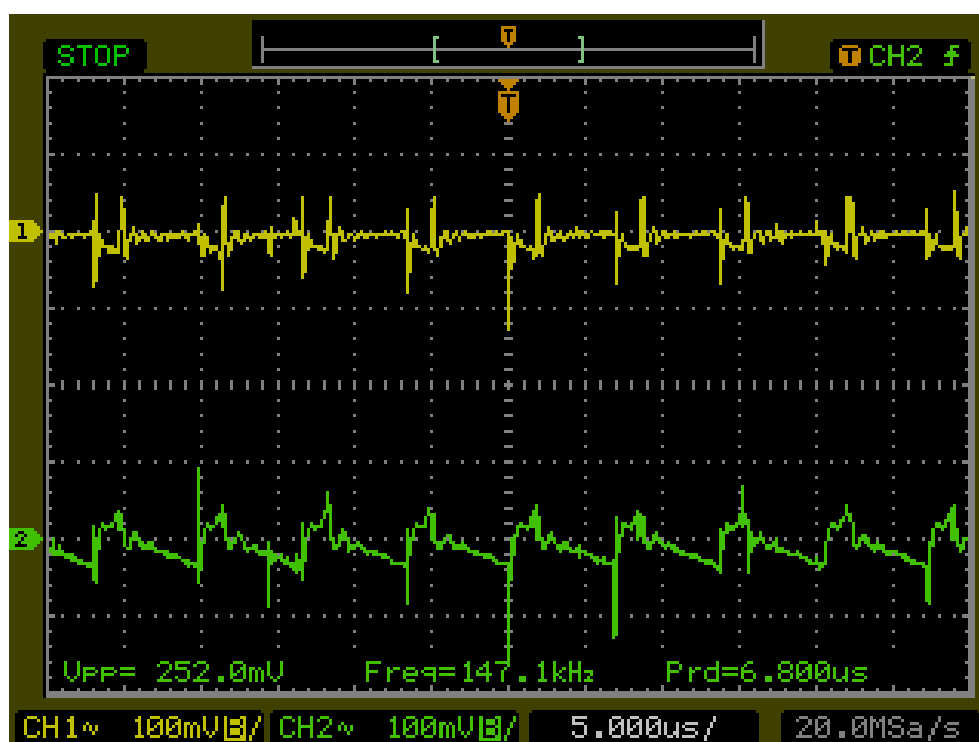
Obr. 18: Hotová deska zdroje č.5

3.5.3 Výsledky

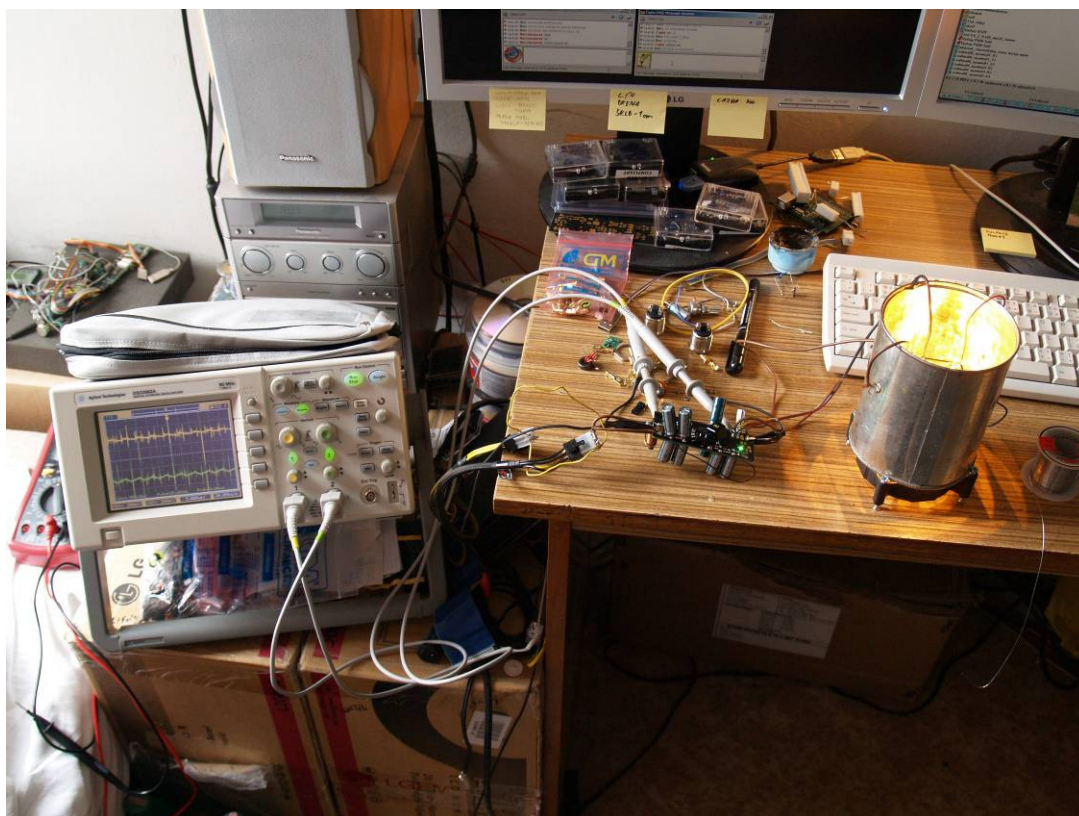
Celý zdroj byl proměřen na osciloskopu. První signál znázorňoval vstup do zdroje. Druhý znázorňoval výstupní napětí. Celý zdroj byl schopen pracovat s výstupním napětím 1,2 V - 11,4 V při maximálním zatížení 20 A. Na výstupu byly opět napěťové špičky. Nebylo však možno určit vznik těchto špiček, ani je účinně odfiltrovat.



Obr. 19: Časový průběh zdroje verze 5



Obr. 20: Časový průběh zdroje verze 5



Obr. 21: Vlastní měření

4 Řízení spínaného zdroje

4.1 Mikrokontrolér

Mikrokontrolér musel splňovat následující požadavky:

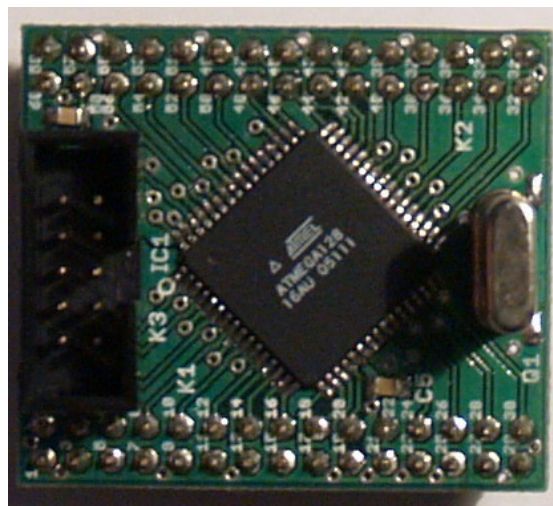
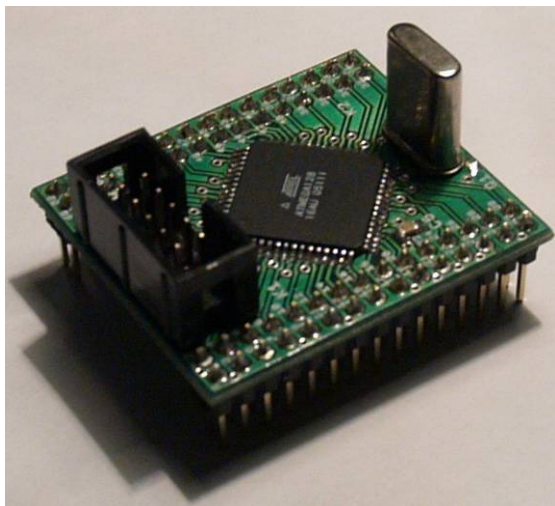
- programování v jazyce C,
- jednoduchý programátor z debuggingem,
- široké zastoupení na trhu,
- vysoký výkon a množství implementovaných funkcí,
- dostatek vstupně výstupních portů a velikost paměti,
- co možná nejnižší cenu.

Nejlépe vyhovoval mikrokontrolér firmy Atmel mega 128. Bylo ho možno jednoduše programovat v jazyce C nebo assembleru. Disponoval maximálním výpočetním výkonem až 16 MIPS při frekvenci 16 MHz. Měl 128 kB flash programové paměti. Obsahoval také JTAG rozhraní pro On-chip debugging a 53 programovatelných I/O portů. Měl 8 PWM výstupů, z čehož bylo 6 z programovatelným rozlišením 2 - 16 bitů, pak 10 A/D převodníků, sériové rozhraní a jiné.

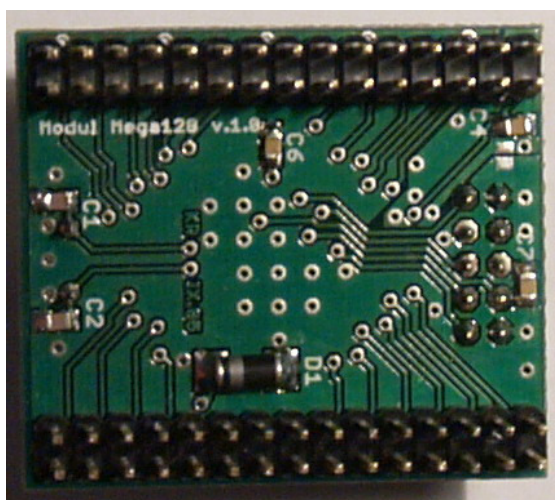
Pro mikrokontrolér byl vyroben programátor právě z JTAG rozhraním a debugging systémem. Programátor byl modifikovanou kopií JTAG ICE programátoru firmy ATMEL. Pracoval však zcela identicky.

Mikrokontrolér byl také v pouzdře TQFP, proto k němu byla vyrobena redukce pro použití v testovací aplikaci.

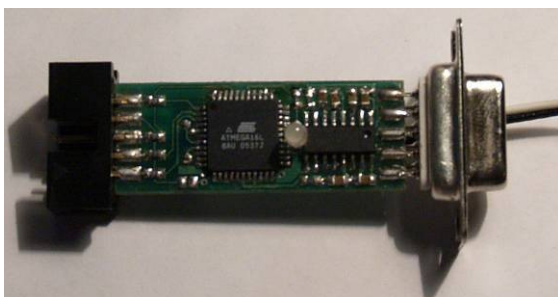
Byl sestaven převodník na základě čipu FT232BM, který byl celkem lehce dostupný v České republice. Ve firmě Gatema byl zhotoven čtyřvrstvý DPS. Převodník úrovně napětí SP213EHCA pro RS232 byl zaslán firmou Sipex. Tento převodník by měl být použit v budoucnu pro propojení výrobku a aplikace v počítači tak, aby komunikace probíhala přes USB rozhraní.



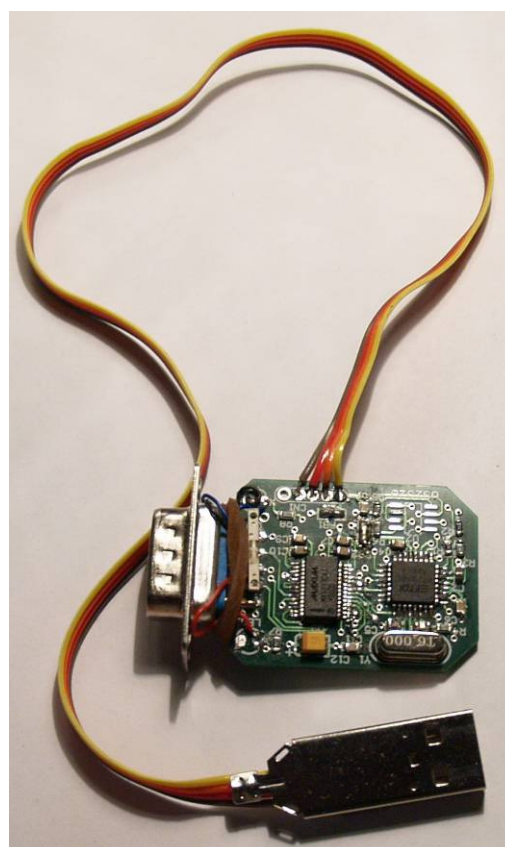
Obr. 22: Mikrokontrolér v redukci



Obr. 23: Mikrokontrolér v redukci zespodu



Obr. 25: Programátor mikrokontroléru



Obr. 24: Redukce USB-RS232

4.2 Teplotní čidlo

Důležité požadavky:

- rozsah teplot -20°C až 120°C ,
- přesnost $0,1^{\circ}\text{C}$,
- malé pouzdro,
- nízká cena.

Nejdříve bylo zvažováno použití použitím přesných platinových čidel, ty však byly zavrženy z důvodu jejich vysoké ceny. Pak se zvažovalo využití klasických odporových čidel, avšak ta nedosahovala požadované přesnosti. Dalším důvodem bylo, že by oba druhy čidel potřebovaly konstrukci převodníku odporu na napětí, což by projekt značně prodražilo a zkomplikovalo. Po dlouhém pátrání na internetu bylo objeveno řešení v podobě teplotního čidla z integrovaným A/D převodníkem. Toto řešení bylo velmi výhodné. Bylo totiž konstrukčně mnohem méně náročné. Čidla byla velice přesná, ovšem ty nejlepší bylo možno sehnat pouze jako vzorky.

Požadavky se pak specifikovaly na precizní 12 bitový převod a nejlepší přesnost.

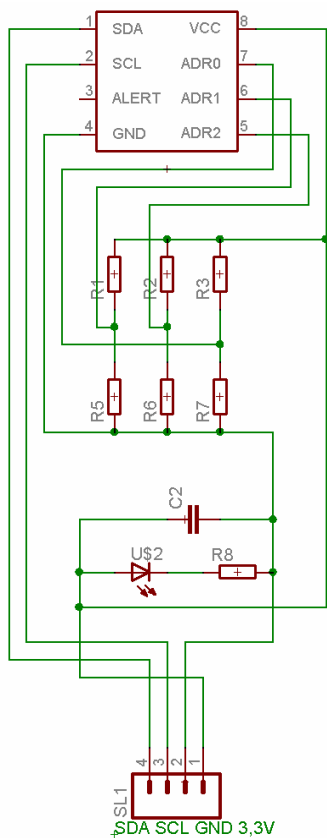
Výběr čidel byl zúžen na:

- TMP275 – asi nejpřesnější a nejrychlejší,
- DS1631 – pomalejší A/D převod,
- LM92 – firma zasílala vzorky, bylo však potřeba zaplatit poplatek 23 \$ za dopravu,
- DS620 – starší typ, který nebylo možno sehnat.

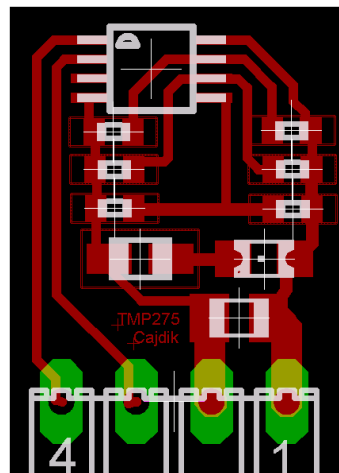
Po pečlivém studiu katalogových listů a nastudování příslušné problematiky nejvíce vyhovovalo čidlo TMP 275. Patnáct těchto čidel bylo zasláno firmou Texas Instruments. Bylo pracováno také se vzorky DS1631 firmy Maxim. Čidla pracovala velmi podobně.

Stručná charakteristika čidla TMP 275:

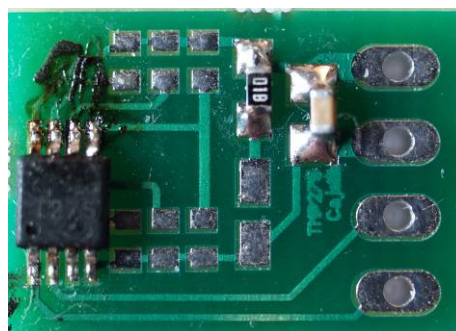
- 12 bitový A/D převodník,
- maximálně 300 ms doba převodu,
- maximální odchylka $0,5^{\circ}\text{C}$, typická však byla $\pm 0,0625^{\circ}\text{C}$,
- měřicí rozsah -40°C až 125°C ,
- komunikace po dvou vodičové I2C sběrnici,
- možnost připojení až 8 čidel na jednu sběrnici.



a)



b)



c)

Obr. 26: a) Schéma teplotního čidla b) Návrh DPS teplotního čidla

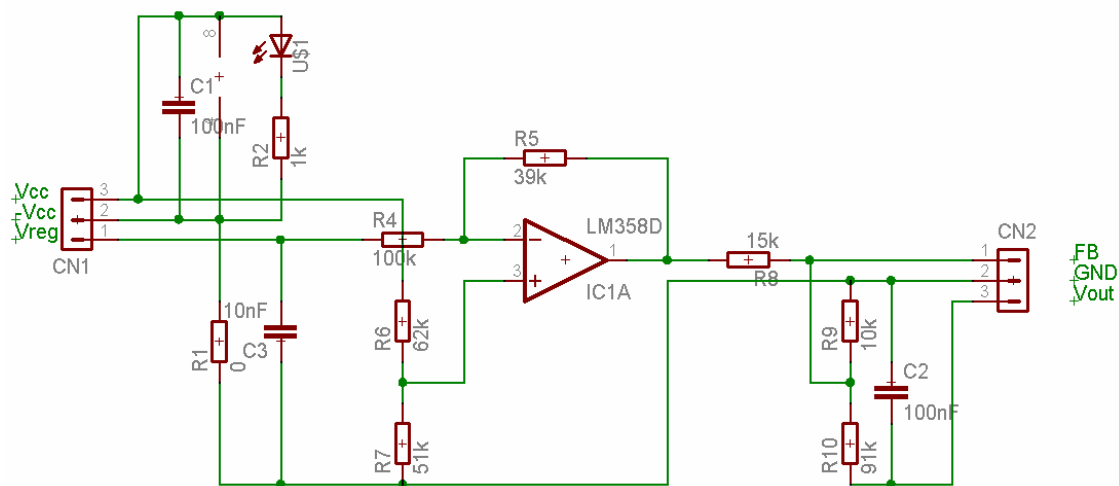
c) Hotové teplotní čidlo

4.3 Display

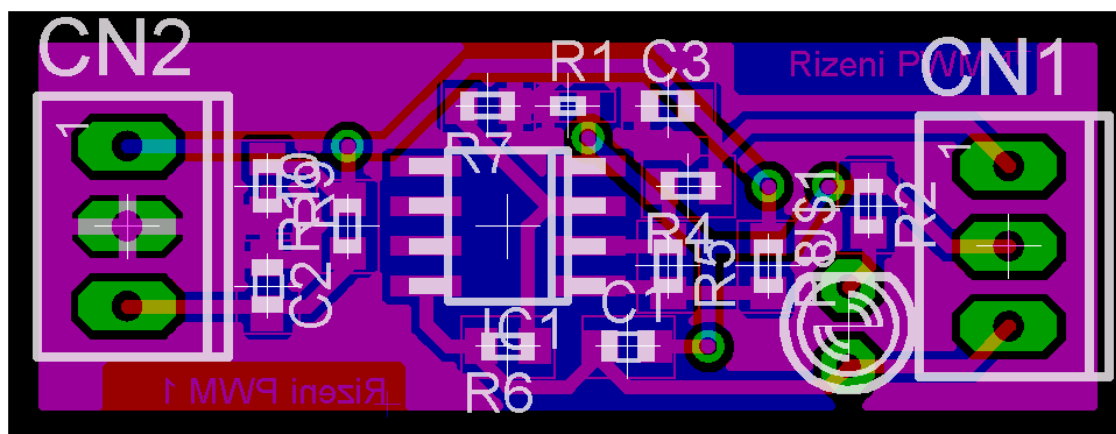
K zobrazení důležitých údajů byl použit displej 4 řádky x 20 znaků. V displeji byl implementován řadič kompatibilní s HD44870, a ten po nastavení komunikuje 4 bitově s mikrokontrolérem.

4.4 Zpětná vazba

Zpětná vazba byla převzata ze zdroje třetí verze. Výpočty zůstaly identické, pouze hodnoty napětí byly pozměněny.



Obr. 27: Schéma zapojení zpětné vazby zdroje



Obr. 28: Návrh DPS zpětné vazby zdroje

4.5 Software

Program zajišťoval měření a nastavování hodnot pro laboratorní zdroj. Byl vytvořen v prostředí C_vAVR v jazyce C pro mikrokontrolér ATMega 128.

Software se skládá z několika souborů, přičemž hlavním souborem byl „zdroj.c“. V tomto souboru byla implementována hlavní funkce main, která řídila posloupnost úkonů, které má software v jednom cyklu vykonat. Dále zde byly uvedeny funkce, které vykonávaly dílčí úkony. Jednalo se o tyto funkce:

- inicializace veškerých nastavovacích registrů, I2C sběrnice a LCD displeje,
- zobrazení hodnot – přepočet hodnot do formátu pro displej,
- detekce zmáčknutého tlačítka a vykonání příslušné akce,
- získání hodnoty teploty z čidla,
- čtení A/D převodníku.

Další součástí software je soubor knihovních funkcí pro práci s LCD displejem a soubor konstant, který umožňoval komfortní práci a úpravy v budoucnu. Dále zde byl ještě uveden soubor „typy.h“, který obsahoval definici uživatelem vytvořených typů a struktur, které zpřehledňovaly programování. V neposlední řadě zde byl k nalezení soubor „header.h“, ve kterém byly uvedeny definice funkcí. Soubor „global_prom.h“ deklaroval globální proměnné programu.

Uživatel měl možnost sledovat na LCD displeji skutečné napětí, proud na zdroji, nastavený proud a napětí na zdroji. Nastavování uživatel prováděl za pomoci čtyř tlačítek. Dvě pro napětí (+/-) a dvě pro proud (+/-). U obou veličin bylo možno v souboru konstant nastavit minimální a maximální možnou zadanou hodnotu a krok, se kterým se bude daná veličina inkrementovat při jednom stisku tlačítka. Při delším stisku (cca 2s) docházelo ke zrychlené inkrementaci (dekrementaci).

Výstupem byla pulzně šířková modulace, která byla úměrná žádanému napětí. Výstupní napětí se pohybovalo v rozmezí 0 V - 5 V. Pro nastavování výstupu bylo použito makro, uvedené v souboru konstant. Jeho vstupním parametrem bylo žádané napětí ve voltech a výstupem bylo nastavení příslušného registru časovače tak, aby bylo dosaženo potřebné střídý pulzně šířkového napětí.

5 Závěr

Celý projekt byl finančně a časově velice náročný. Problematice spínaných zdrojů se věnuji již několik let. Pro zrychlení vývoje jsem musel také zakoupit digitální osciloskop.

Poslední zdroj byl funkční, avšak na výstupu se objevilo značné rušení. Během vývoje byly provedeny různé úpravy, které měly rušení odstranit. Například tranzistory MOS byly měkce spínány a měnily se také jejich parametry, rozvržení DPS bylo optimalizováno, měnily se hodnoty součástek vstupních a výstupních filtrů. Na odrušení zdroje bude nadále pracováno.

Regulace zdroje byla navržena. Mikrokontrolér byl oživen. Byly simulovány vstupy a výstupy. Celá regulace fungovala bezchybně.

V závěru bylo zjištěno, že nejsložitější bylo zhotovení samotného návrhu zdroje. Obzvláště z hlediska specifických požadavků, které splňují pouze nejmodernější součástky, jež byly teprve nedávno dodány na trh. Tato oblast je velice moderní a stále se vyvíjí.

6 Použitá literatura

- [1] DC to DC converter. [cit. 2008-05-19]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org>
- [2] Katalogový list LTC 1775. [cit. 2008-05-19]. Dostupné z WWW: <http://www.linear.com/pc/downloadDocument.do?navId=H0,C1,C1003,C1042,C1032,C1092,P1724,D2940>
- [3] Atmel. ATmega 128. [cit. 2006-10-05]. Dostupné z WWW: <http://www.atmel.com/>
- [4] Interactive Power Electronics Seminar. [cit. 2008-05-26]. Dostupné z WWW: http://www.ipes.ethz.ch/ipes/e_index.html
- [5] DC-DC Converter Basics. [cit. 2008-05-26]. Dostupné z WWW: http://powerdesigners.com/InfoWeb/design_center/articles/DC-DC/converter.shtml
- [6] Buck Converter. [cit. 2008-05-26]. Dostupné z WWW: <http://engineering.dartmouth.edu/3Dcircuits/animations/buckanimation.shtml>
- [7] Buck-Converter Design Demystified. [cit. 2008-05-26]. Dostupné z WWW: http://powerelectronics.com/power_systems/dc_dc_converters/power_buckconverter_design_demystified/index1.htm
- [8] Step-down smps/buck converter: ideal circuit. [cit. 2008-05-26]. Dostupné z WWW: http://services.eng.uts.edu.au/~venkat/pe_html/ch07s1/ch07s1p1.htm
- [9] Switching-Mode Power Supply Design Tutorial. [cit. 2008-05-26]. Dostupné z WWW: <http://www.smpstech.com/tutorial/t03top.htm>
- [10] Layout Considerations for Non-Isolated DC-DC Converters. [cit. 2008-05-26]. Dostupné z WWW: http://www.maxim-ic.com/appnotes.cfm/an_pk/735
- [11] An Introduction to Switch-Mode Power Supplies. [cit. 2008-05-26]. Dostupné z WWW: http://www.maxim-ic.com/appnotes.cfm/an_pk/4087
- [12] Basic Switching-Regulator-Layout Techniques. [cit. 2008-05-26]. Dostupné z WWW: http://www.maxim-ic.com/appnotes.cfm/an_pk/2997
- [13] Power Supply Engineer's Guide to Calculate Dissipation for MOSFETs in High-Power Supplies. [cit. 2008-05-26]. Dostupné z WWW: http://www.maxim-ic.com/appnotes.cfm/an_pk/1832
- [14] Using Digital Potentiometers in Adjustable Step-Down DC-DC Converter Designs. [cit. 2008-05-26]. Dostupné z WWW: http://www.maxim-ic.com/appnotes.cfm/an_pk/225
- [15] Proper Layout and Component Selection Controls EMI. [cit. 2008-05-26]. Dostupné z WWW: http://www.maxim-ic.com/appnotes.cfm/an_pk/716
- [16] Input and Output Noise in Buck Converters Explained. [cit. 2008-05-26]. Dostupné z WWW: http://www.maxim-ic.com/appnotes.cfm/an_pk/986

- [17] DC-DC Converter Tutorial. [cit. 2008-05-26]. Dostupné z WWW: http://www.maxim-ic.com/appnotes.cfm/an_pk/2031
- [18] Spínané zdroje. [cit. 2008-05-26]. Dostupné z WWW: <http://hw.cz/Teorie-a-praxe/ART1876-Spinane-zdroje.html>