

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra mikroelektroniky

Číslicově řízený spínaný zdroj pro napájení výkonových LED

Bakalářská práce

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika

Studijní obor: Aplikovaná elektronika

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Teplý

Jan NOSEK

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Nosek** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **434638**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektronika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Číslicově řízený spínaný zdroj pro napájení výkonových LED

Název bakalářské práce anglicky:

Digitally Controlled Power LEDs Switching Power Supply

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte a realizujte číslicově řízený spínaný zdroj pro napájení výkonových LED. Zdroj bude umět regulovat výstupní proud od 0 A do 2 A a bude schopen poskytnout výstupní napětí v rozsahu od 0 V až do hodnoty napájecího napětí (uvažujte maximální hodnotu 30 V).

Postup vypracování:

- 1) Provedte rešerši z oblasti řízení výkonových LED.
- 2) Navrhněte obvodové zapojení včetně desek plošných spojů a vlastní návrh realizujte.
- 3) Ověřte funkčnost a změňte základní parametry realizovaného systému.
- 4) Zhodnoťte dosažené výsledky.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Joseph Yiu: The Definitive Guide to ARM Cortex-M3 and Cortex-M4 Processors Third Edition, Elsevier, 2014
- [2] Kernighan, B., W. - Ritchie, D., M.: Programovací jazyk C, Computer Press, a.s., Brno 2006
- [3] Záhlava V.: Návrh a konstrukce desek plošných spojů, BEN, Praha 2011

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Tomáš Teplý, katedra mikroelektroniky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **10.02.2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: **10.09.2018**

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu mé práce Ing. Tomáši Teplému za vstřícný přístup a cenné rady po celou dobu vedení mé práce, Ing. Tomáši Vítkovi za poskytnutí prototypu k porovnání, dále firmě STmicroelectronics za možnost získat cenné zkušenosti při práci v oblasti aplikace spínaných zdrojů a v neposlední řadě mé rodině za podporu během studia.

Anotace

Tato práce se zabývá teorií napájecích proudových zdrojů v elektronice. V úvodu práce je základní porovnání lineárních a spínaných zdrojů z hlediska funkce a elektrických parametrů. Dále v práci jsou zejména popisovány zdroje spínané. Jelikož mají spínané napěťové i proudové zdroje velice podobnou strukturu a liší se jen v regulaci, bude v této práci kladen zřetel spíše na teorii spínání než na výstupní parametry zdroje. Tato práce si dává za cíl nejen poskytnout základní přehled z teorie spínaných zdrojů od jednotlivých koncepcí a jejich vlastností, ale i výběr klíčových součástí vzhledem k optimalizaci celého zdroje. Druhá část práce se soustředí na tvorbu funkčního vzorku s parametry uvedenými v zadání. Tento zdroj je koncipován jako DC/DC neizolovaný s digitálním řízením pomocí mikrokontroléru.

Annotation

This bachelor thesis deals with current sources used as power supplies in electronics. There is a comparison in the introduction describing main differences of linear and switch mode power supplies in terms of function principles and electrical parameters. The main focus of this thesis is to describe switch mode power supplies. Voltage and current sources are very similar in their structure, the only difference is in the regulation loop. That is why further in the text there is no label as to whether the scheme is a voltage or current source. Instead, more attention is brought to the theory of operation of such power supplies. The goal of this thesis is not only to provide an overview of basic topologies with their pros and cons, but also to explain the component selection criteria and how a component can affect the electrical parameters of a power supply. The second part of this thesis describes a complete design of a functional prototype with parameters mentioned in the thesis assignment. The prototype is a DC/DC non isolated digitally controlled power supply using a microcontroller.

Klíčová slova

Spínaný zdroj, proudový zdroj, Buck, mikrokontrolér, ARM, STM32F373CC

Keywords

Switch mode power supply, SMPS, current source, microcontroller, ARM, STM32F373CC

Obsah

1 Úvod	5
2 Napájecí zdroje v elektronice	6
2.1 Srovnání klíčových vlastností lineárních a spínaných zdrojů	6
2.1.1 Velikost	6
2.1.2 Efektivita	6
2.1.3 Cena	7
2.1.4 Zvlnění výstupního napětí	7
2.1.5 Dynamické parametry	7
2.2 Lineární zdroje	7
2.3 Spínané zdroje	7
2.3.1 Buck	8
2.3.2 Boost	8
2.3.3 Flyback	9
2.3.4 Resonant	10
2.3.5 Metody spínání	10
3 Součástky pro návrh spínaného zdroje	13
3.1 Driver	13
3.2 Tranzistor	14
3.3 Cívka	15
3.4 Kondenzátor	15
4 Vybrané komerční zapojení	17
4.1 Seznámení s vybraným zapojením	17
4.2 Obvod LED6000 a jeho použití	17
5 Návrh funkčního vzorku	20
5.1 Řídící člen	20
5.1.1 ARM jádro	20
5.1.2 STM32F373CC	21
5.2 Program	23
5.2.1 ADC1	23
5.2.2 TIM4	23
5.2.3 TIM6	23
5.2.4 I2C	23
5.3 Uživatelské rozhraní	23
5.4 Zapojení proudového zdroje	24
5.5 Návrh DPS	25
5.6 Měření na výrobku	25
5.6.1 Měření účinnosti	26
5.6.2 Měření přesnosti nastavení proudu	27
5.6.3 Měření zvlnění proudu	28
5.7 Porovnání výrobku s lineárním řešením	29
5.7.1 Prototyp lineárního zdroje	29
5.7.2 Porovnání účinnosti	29

5.7.3	Porovnání přesnosti nastavení proudu	31
5.7.4	Porovnání zvlnění proudu	31
5.7.5	Porovnální snímků z termokamery	32
5.7.6	Zhodnocení	33
6	Závěr	34
7	Použitá literatura	35

1 Úvod

Zdroje proudu nacházejí uplatnění velmi často ve světelných aplikacích, kde jsou použity LED diody. Zde může malá odchylka napětí vyvolat velký výkonový rozdíl. Tento jev je daný VA charakteristikou LED diody, která má exponenciální tvar. Napětí, při kterém se charakteristika prudce lomí, závisí na technologických parametrech diody. Svoji roli hraje například i vlnová délka, červená dioda má zpravidla menší napětí zlomu oproti diodě modré. Pro účely napájení v oblasti LED aplikací se používají lineární i spínané zdroje. Pro tuto práci byla dána přednost spínané topologii. Důvody upřednostnění této koncepce jsou popsány dále v této práci.

2 Napájecí zdroje v elektronice

Každé elektronické zařízení potřebuje pro svoji činnost zdroj energie. K tomuto účelu se používají napájecí zdroje, které mohou čerpat energii ze sítě, elektromechanických a elektrochemických měničů nebo akumulátorů. Každý primární zdroj energie má svoje výhody a nevýhody. Výhodou u distribuční sítě je například možnost odebírat trvale i velmi vysoké výkony, nevýhodou je zase nepřenositelnost. V mobilních a nízkopříkonových aplikacích bychom naopak volili jako zdroj primární energie akumulátor. Napájecí zdroje se dále dělí podle tvaru výstupního napětí na stejnosměrné a střídavé. V této práci bude rozebrána teorie a návrh zdroje se stejnosměrným výstupním napětím.

2.1 Srovnání klíčových vlastností lineárních a spínaných zdrojů

2.1.1 Velikost

Lineární zdroje jsou rozměry podstatně větší oproti zdrojům spínaným a tento rozdíl se dále stupňuje se zvyšujícím výkonem daného zdroje. Důvodem je převážně velikost vstupního transformátoru, filtračních kondenzátorů a chlazení. Tyto rozdíly mají následující opodstatnění: Vstupní transformátor může být u spínaného zdroje podstatně menší kvůli vyšší spínací frekvenci.

$$X_L = 2\pi fL$$

Reaktance
cívky

Z tohoto vzorce vyplývá lineární závislost indukční reaktance na frekvenci a indukčnosti transformátoru. Pokud srovnáme frekvenci lineárních zdrojů: 50 Hz a frekvenci spínaných zdrojů: 30-1000 kHz, tak je zřejmé, že pro spínané zdroje bude stačit indukčnost o několik řádů nižší oproti lineárním zdrojům. Podobné opodstatnění má volba filtračního kondenzátoru.

$$\Delta U \approx \frac{I_L}{C \cdot f}$$

Výstupní
zvlnění pro
daný C

Nutnost chlazení vyplývá ze samotného principu lineárního zdroje, respektive funkce výkonového tranzistoru. Podrobnější vysvětlení je uvedeno v odstavci níže.

2.1.2 Efektivita

I tady mají spínané zdroje výrazně navrch. Důvodem je, že při regulaci výstupního napětí se u lineárních zdrojů musí vždy rozdíl mezi vstupním a požadovaným výstupním napětím někde „ztratit“ a toto se realizuje úbytkem napětí na nějakém výkonovém tranzistoru, což se projeví vyzařováním tepla. Problém však nastává při napájení nízkoodporové výkonové zátěže. V takovém případě se může stát, že na výkonovém tranzistoru bude většina vstupního napětí, a zároveň jím bude protékat vysoký proud, čímž může být tranzistor zničen. Oproti tomu spínané zdroje čerpají energii ze sítě pouze v časových úsecích, které odpovídají frekvenci a střídě spínání. Tímto se dá regulovat energie, která se akumuluje v reaktančních prvcích a tím i výstupní napětí. V tomto případě jsou celkové ztráty úměrné ztrátám vodivostním a spínacím. Vodivostní ztráty jsou dány odporem mezi drainem a sourcem v sepnutém stavu. Spínací ztráty jsou dány dobou sepnutí tranzistoru. Tato doba je ovlivněna parazitními kapacitami tranzistoru.

2.1.3 Cena

Už nějakou dobu mají výrazně navrch spínané zdroje i v tomto parametru. Polovodičové součástky stojí jednotky korun, a tak jediný podstatný rozdíl představuje transformátor, který je podstatně větší a těžší u lineárních zdrojů, jak bylo zmíněno dříve. Velikost transformátoru se samozřejmě projeví na ceně váhou železa, které tvoří elektrický a magnetický obvod.

2.1.4 Zvlnění výstupního napětí

u tohoto parametru máji navrch lineární zdroje. Je to dáno principem funkce spínaných zdrojů, kde tranzistor spíná vstupní napětí. Hodnota výstupního zvlnění může být snížena zvýšením spínací frekvence nebo použitím dražších a kvalitnějších filtračních součástek na výstupu měniče.

2.1.5 Dynamické parametry

Mírně navrch mají lineární zdroje i u dynamických parametrů, jako doba náběhu, odezva na skokovou změnu zátěže, a podobně. Toto je dáno zpožděním regulační smyčky, která řídí výstupní napětí u spínaných zdrojů.

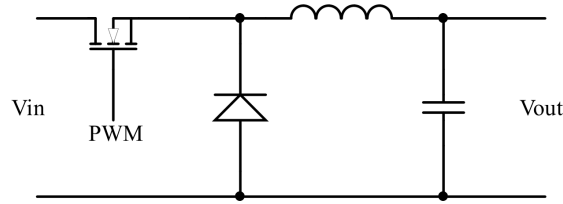
2.2 Lineární zdroje

Lineární zdroje jsou používány už od počátku vývoje elektroniky. Vyznačují se jednoduchou konstrukcí, princip regulace spočívá v přivírání výkonového tranzistoru, čímž vytvoříme potřebný úbytek napětí. Tento princip není příliš vhodný pro vysokopříkonové aplikace. Tyto zdroje jsou nenahraditelné v aplikacích, kde je třeba nízkého zvlnění nebo rušení. V ostatních odvětvích byly lineární zdroje nahrazeny s pokrokem ve vývoji polovodičové elektroniky zdroji spínanými.

2.3 Spínané zdroje

Hlavním rozdílem u této koncepcí oproti lineárním zdrojům je použití výkonových tranzistorů. U spínaných zdrojů je tranzistor použit pro spínání pulzně šířkovou modulací, a tím nabíjení akumulárního prvku. Tato metoda umožňuje odebírání energie z primárního zdroje v nespojitých okamžicích, doba sepnutí je regulovaná podle požadavků na výstupní parametry zdroje. Nevýhodou této metody je vznik rušení o frekvenci spínací frekvence tranzistorů. Spínané zdroje jsou používány i pro svoji univerzálnost. V tomto článku budou popsána nejčastější zapojení.

2.3.1 Buck



Buck

Buck konvertor je nejpoužívanějším snižujícím neizolovaným spínaným zdrojem. Jeho výhodou je jednoduchá konstrukce a možnost využití pro širokou škálu výkonů. Nevýhodou je plovoucí source spínacího tranzistoru, čímž se komplikuje spínání tranzistoru. Topologie Buck má dvě varianty, zapojení s diodou, která je vidět na obrázku a zapojení s tranzistorem. Tato zapojení se liší svými vlastnostmi při různých zátěžích. Obě konfigurace úzce souvisí s řízením v CCM a DCM, což je zkratkou pro spojité a nespojité vedení proudu. Blíže se na obě varianty zaměřím v kapitole o řízení spínaných zdrojů. Buck konvertor pracuje ve dvou krocích, v prvním je tranzistor sepnut, proud protéká cívkou a kondenzátorem, a tím se v nich akumuluje energie. Na kondenzátoru vzniká napětí

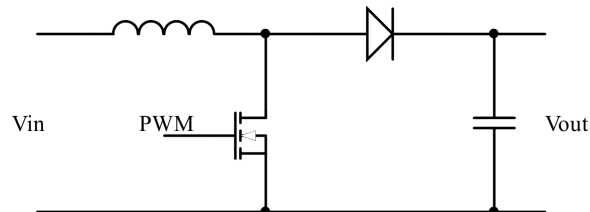
$$u(t) = \frac{1}{C} \int i(\tau) d\tau + u(0). \quad (1)$$

V době vypnutí tranzistoru se akumulovaná energie v cívce vybíjí přes kondenzátor a diodu. Opakováním těchto dvou kroků vzniká na výstupu konstantní napětí se zvlněním úměrným spínací frekvenci a parametrům kondenzátoru a cívky. Buck konvertor má velice jednoduchou přenosovou funkci, která je v ideálním případě rovna

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = D \quad (2)$$

kde D je střída spínání tranzistoru. V praxi je tato rovnice využitelná je pro orientační účely, jelikož se přenosová funkce liší v CCM a DCM módech a s rostoucím zatížením zdroje stoupají ztráty na jednotlivých komponentech, což způsobí snížení výstupního napětí oproti předpokládané hodnotě.

2.3.2 Boost



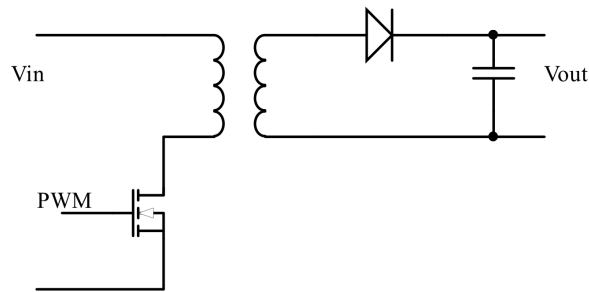
Boost

Boost konvertor je další elementární neizolované zapojení, tentokrát zvyšující. Oproti Buck konvertoru se téměř neliší, také jsou tu dvě fáze, a to doba, kdy je tranzistor sepnut a vypnut. Rozdíl však najdeme při řízení PWM modulace Boost konvertoru. Jelikož má tato topologie source tranzistoru spojený se zemí, je jeho sepnutí jednodušší, než

u topologie Buck. Ve spínaných zdrojích nachází tato topologie uplatnění velmi často v PFC obvodech, které slouží ke snížení rušení. PFC obvody se používají v AC/DC zdrojích, kde je nutné dodržet podmínky ohledně rušení dané legislativou. Další oblast pro použití Boost konvertoru jsou aplikace s akumulátory, kde je nutné poskytnout vyšší napětí, než jmenovité napětí akumulátoru. Jeden z příkladů této aplikace může být audio zesilovač do auta. Pro orientační výpočet výstupního napětí lze opět využít znalosti přenosové funkce Boost konvertoru

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1 - D} \quad (3)$$

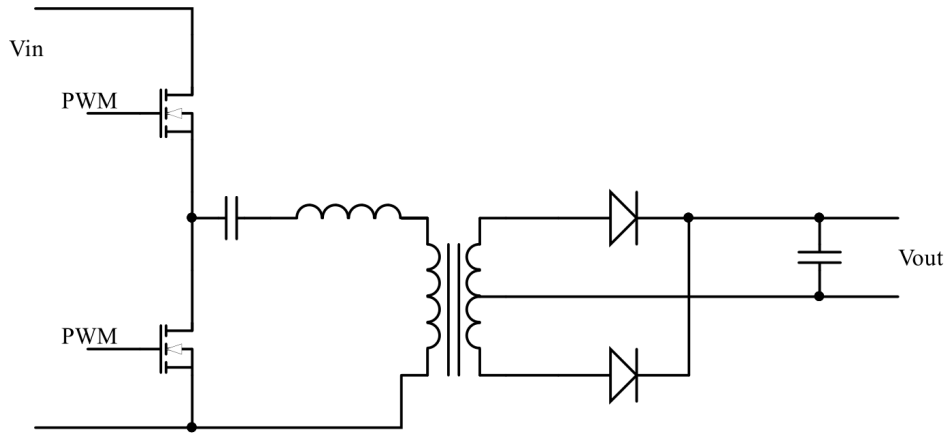
2.3.3 Flyback



Flyback

Nejčastěji používaným izolovaným spínaným zdrojem je topologie Flyback. Tento měnič najdeme ve většině aplikací do 100W, kde je potřeba galvanické oddělení, například v adaptérech pro notebooky a mobily. Jeho výhodou je jednoduchá konstrukce, univerzálnost z hlediska velikosti vstupního napětí a možnost volby mezi snižujícím, nebo zvyšujícím provedením jednoduše pomocí poměru závitů primární a sekundární cívky. Flyback může být izolovaný i neizolovaný. Pokud je použita izolovaná varianta, je nutné zavést primární regulaci, nebo použít izolovanou regulační smyčku. K tomu se nejčastěji používá optron. Na obrázku je uvedeno elementární zapojení, které není vhodné pro všechny aplikace. Pro použití této topologie například u nabíječek mobilních telefonů (5V/2A) by jen na usměrňovací diodě mohl být ztrátový výkon přibližně 1W, to je po přepočtu 10%. V těchto aplikacích se místo diody může použít spínací tranzistor, který má menší úbytek napětí mezi elektrodami drain a source. Přidáním tohoto tranzistoru se však komplikuje řízení a regulace. Pro tento účel jsou proto na trhu již integrovaná řešení buď s integrovaným mosfetem, nebo driverem pro externí mosfet. Z hlediska řízení hlavního spínacího tranzistoru může být použita jednoduchá PWM regulace s konstantní frekvencí, další variantou je implementace spínání v nule napětí. Tomuto druhu řízení bude věnovám odstavec v kapitole Metody spínání. Přenosová funkce je v tomto případě složitější. Opět zde hraje roli, v jakém módu konvertor pracuje, jaká je doba sepnutí tranzistoru, ale oproti Buck a Boost konvertorům jsou zde důležité i parametry transformátoru.

2.3.4 Resonant



Resonant

Rezonanční měnič je nejnovější metodou spínaných zdrojů. Jeho výhodou je velká variabilita vstupního napětí, dobré vlastnosti přes celé spektrum výstupních výkonů a nejlepší účinnost ze všech představených topologií. Mezi nevýhody patří vyšší nároky na řízení. Jako rezonanční obvod může být použita kombinace prvků L a C, ale nejčastěji se používá tzv. LLC rezonanční obvod, který je zobrazen na ilustračním obrázku. Narozdíl od předchozích topologií, u rezonančního měniče se nemění výstupní napětí v závislosti na střídě, ale na spínací frekvenci. Čím blíže je frekvence spínání k rezonanční frekvenci, tím vyšší je výstupní napětí. Tento přístup má také svoji nevýhodu. Jelikož řízení probíhá změnou frekvence, nemohou být filtrační obvody navrženy speciálně na jednu frekvenci, jako tomu mohlo být u ostatních měničů. Z tohoto důvodu vykazují rezonanční měniče vyšší rušení. Přenosová funkce LLC rezonančního měniče je frekvenčně závislá na přenosové funkci LLC obvodu.

2.3.5 Metody spínání

Metoda spínání je velice důležitá součást návrhu spínaného zdroje, protože ovlivňuje účinnost i chování výsledného zapojení. Jsou zde dvě základní rozdělení, soft switching a hard switching. Tyto metody se dále dělí do podskupin. V tomto článku budou jednotlivé způsoby popsány spolu s příkladem implementace do nějaké topologie měniče zmíněné výše v článku.

Soft switching

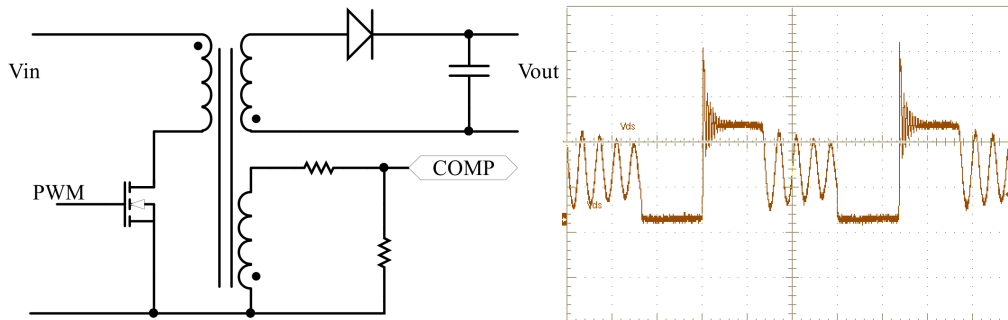
V překladu měkké spínání je moderní metoda řízení spínaných zdrojů, která byla vyvinuta s cílem zvýšení účinnosti a tím i snížení velikosti spínaných zdrojů. Jak napovídá rozdělení tvrdé a měkké spínání, princip snížení ztrát a zvýšení účinnosti spočívá v omezení spínacích ztrát zmíněných výše v textu. Měkké spínání se dále dělí do podskupin rezonanční mód a kvazirezonanční mód. Jak již bylo zmíněno, rezonanční mód využívá rezonance LC nebo LLC obvodu. Oproti tomu kvazirezonanční mód nevyužívá LC obvod k rezonanci, zde se používají metody zvané spínání v nule napětí, respektive proudu.

ZVS

Zero voltage switching, neboli spínání v nule napětí funguje na principu snímání napětí na tranzistoru a je založeno na základě vzorce

$$P_z = \frac{U_{DS}^2}{R_{DS_{on}}} \quad (4)$$

Je zřejmé, že v případě sepnutí tranzistoru při nulovém napětí mezi drainem a sourcem jsou spínací ztráty nulové. Alespoň tak je tomu v ideálním případě. V praxi nelze tyto ztráty zcela eliminovat, ale s použitím této metody se tyto ztráty velmi omezují. Příklad implementace spínání v nule napětí u topologie Flyback je uvedena na obrázku.



ZVS Flyback a průběh V_{ds}

Oproti standardnímu zapojení je zde přidáno pomocné vinutí, které sleduje napětí na drainu tranzistoru a při stanovené hodnotě, dané dělicím poměrem rezistorů a prahu komparátoru, dává řídicímu obvodu signál k sepnutí. Přestože se této metodě říká spínání v nule napětí, lze na průběhu vpravo vidět, že napětí nulové není. Co tedy toto zapojení dělá, je, že sleduje minima v průběhu oscilace. V klasickém režimu by kontrolér sepnul již v prvním minimu, na obrázku vpravo je vidět průběh při odlehčeném chodu, takzvaný Valley skipping mode. Do tohoto módu přejde kontrolér ve chvíli, kdy po dosažení maximální spínací frekvence stále potřebuje snížit sledovanou veličinu.

ZCS

Zero current switching, v překladu spínání v nule proudu, je velice podobná metoda již zmíněné ZVS, ale s tím rozdílem, že je zde snímán proud cívkou. Vztah (4) lze pak pro tento případ upravit do podoby

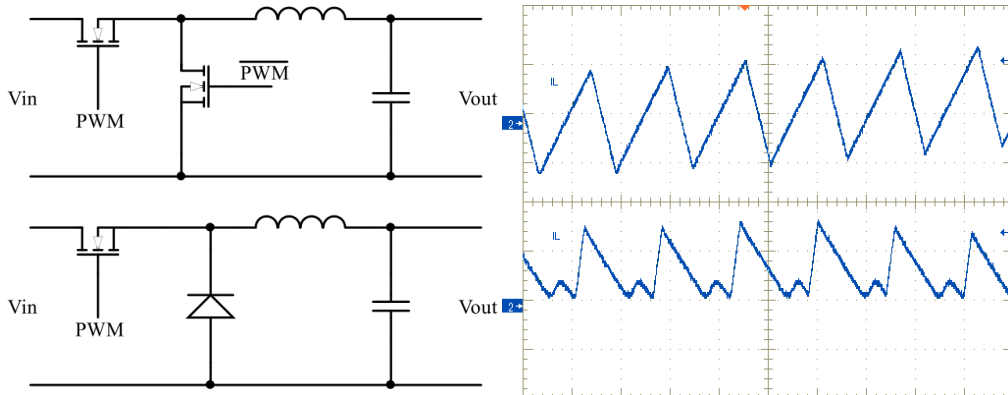
$$P_z = R_{DS_{on}} I_L^2 \quad (5)$$

Hard switching

Tvrdé spínání je původní metoda, která byla používána s nástupem spínaných zdrojů. Přestože je tato metoda tou starší, je nadále využívána především v jednodušších zapojeních, kde je kladen nárok na celkovou cenu zapojení. Hlavním představitelem tvrdého spínání je CCM a DCM.

CCM

Kontinuální vodivostní režim je stav, kdy cívkou teče neustále proud, ať už jedním, nebo druhým směrem. To, zda bude měnič pracovat v CCM, nebo DCM, je závislé jednak na výstupním proudu, tak i na zapojení měniče. Pro příklad zde uvedu topologii Buck ve dvou variantách, se synchronním a asynchronním usměřováním.



Proud cívku
DCM vs CCM

Obě zapojení se liší pouze v tom, jakým způsobem se uzavírá proud tekoucí cívkou při vypnutém vstupním tranzistoru. V případě dostatečně velkého výstupního proudu pracují obě zapojení v CCM módu. Rozdíl nastává, poklesne-li proud cívkou k nule. Tento případ je zobrazen na obrázku vpravo. K odhadnutí tohoto stavu lze použít vzorec

$$\Delta I_L = \frac{t_{on} U_L}{L} \quad (6)$$

kde ΔI_L je velikost zvlnění proudu induktorem, t_{on} doba sepnutí, U_L napětí na cívce, neboli rozdíl vstupního a výstupního napětí a L indukčnost cívky. Pro minimální výstupní proud bude potom platit

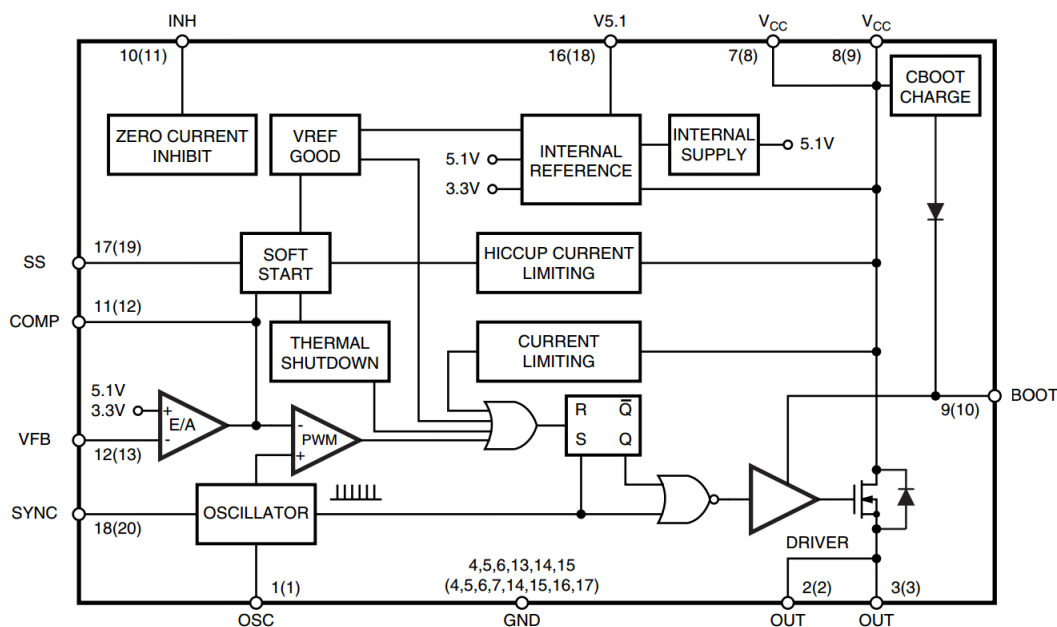
$$I_{out} > \frac{\Delta I_L}{2} \quad (7)$$

Tento vztah tedy slouží pro zajištění operace v CCM módů pro zapojení s diodou. Při poklesu výstupního proudu pod tuto mez je dioda v závěrném stavu a brání tak průchodu proudu. Použitím tranzistoru místo diody, jak je uvedeno na obrázku, je možné přivedením signálu na gate tento tranzistor sepnout. Tím je smyčka uzavřena a proud může téct opačným směrem. Ze značení na obrázku je zřejmé, že buzení tranzistorů v případě synchronního usměrňování musí být v negaci, to znamená, nesmějí být oba tranzistory sepnuty ve stejný čas. K tomu se v praxi používají budiče, které mají tuto logiku již implementovanou v sobě. Kvůli prodlevě vypnutí tranzistoru od přivedení signálu z důvodu parazitních kapacit se navíc zavádí krátká pauza mezi vypnutím jednoho tranzistoru a sepnutím dalšího, zvaná dead time.

3 Součástky pro návrh spínaného zdroje

3.1 Driver

Veškerá zapojení, která byla zmíněna v kapitole spínané zdroje, obvykle obsahují nějaký integrovaný obvod, který se stará jednak o spínání tranzistorů na základě informace z regulační smyčky, dále pak obvykle obsahuje různé ochrany, například proti nadproudu, zkratu nebo podpětí v části napájecího napětí driveru. Tyto integrované obvody se liší i rozsahem vstupního a výstupního napětí a dodávaným proudem. Pro názornost je na obrázku uveden příklad vnitřní struktury integrovaného Buck kontroléru.



L4973 Buck
[1]

Tento kontrolér od firmy STMicroelectronics umožňuje regulaci výstupního napětí v rozsahu 0.5-50V a dodání výstupního proudu až 3.5 A. Jak je vidět z blokového schématu, výkonový tranzistor je zde integrován již v samotném kontroléru, čímž se zjednodušuje a zlevňuje celé zapojení. Taková struktura je velice podobná pro většinu integrovaných DC/DC měničů, proto zde rozeberu některé bloky i jejich případné alternativy.

E/A

Error amplifier zesiluje rozdíl požadované od skutečné hodnoty výstupního napětí. Toto napětí je dále přivedeno na napěťový dělič, na který je připojen pin VFB. Poměrem těchto rezistorů se nastavuje výstupní napětí.

OSCILLATOR

Jedná se o zdroj hodin pro celý obvod. Frekvence oscilátoru určuje také frekvenci spínání. Z bloku oscilátor mohou být dále vyvedeny piny pro regulaci frekvence nebo přivedení externího hodinového signálu.

CBOOT CHARGE

Tento blok je nutný, je-li použit N kanálový tranzistor. V tomto případě bývá source tranzistoru spojen s cívkou a je tedy plovoucí. Pro správnou funkci tohoto bloku je nutné na piny BOOT a OUT připojit kondenzátor, který bude uchovávat konstantní napětí k napájení driveru tranzistoru.

DRIVER

Driver je blok, který dokáže poskytnout dostatečný pulzní proud pro rychlé sepnutí tranzistoru.

ZERO CURRENT INHIBIT

Tento blok slouží pro úsporu energie. Pokud je na pin INH přiveden příslušný signál, přejde zařízení do úsporného módu.

CURRENT LIMITING

Slouží k ochraně tranzistoru vůči nadproudu, nebo zkratu. V různých zapojeních je tento blok buď pevně nastaven, nebo může být vyveden pin k nastavení maximálního proudu drainem tranzistoru. K nastavení tohoto proudu obvykle stačí připojit z tohoto pinu rezistor na zem. Hodnota odporu potom stanoví tuto mez.

HICCUP CURRENT LIMITING

slouží k omezení proudu v době soft startu.

THERMAL SHUTDOWN

implementuje ochranu obvodu proti přehřátí.

3.2 Tranzistor

Na trhu v dnešní době existují tři hlavní kategorie tranzistorů pro spínací aplikace.

BJT – V době, kdy rozvoj polovodičové elektroniky teprve začínal, byl tento typ tranzistorů používán téměř ve všech aplikacích. V nízkopříkonových díky nižší ceně, ve vysokopříkonových, jelikož v té době MOSFET tranzistory nebyly schopny spínat takový výkon. Dnes jsou v běžných aplikacích převážně nahrazeny výše zmíněnými MOSFET tranzistory.

IGBT – Tato technologie vznikla kombinací dvou příchozích. Z MOSFET technologie má IGBT izolované hradlo, na kolektorové straně má zase vytvořený PN přechod, který je typický pro BJT tranzistory. IGBT je v dnešní době používána na vysokopříkonové spínání například u motorů v lokomotivách nebo tramvajích.

MOSFET – Unipolární tranzistory v posledních letech zaujaly pozici nejrozšířenější technologie tranzistorů. Neustálý vývoj této technologie umožnil i využití v oblastech dříve dominujících BJT. Jednalo se například o maximální napětí mezi elektrodami Drain a Source. Díky využití nových materiálů, jako SiC nebo GaAs, je možné použít MOSFET tranzistory pro napětí nad 1000V. Pro účely spínání u spínaných zdrojů, tzn. do 230VAC se téměř jiná technologie nepoužívá. Toto je dáno hned několika klíčovými parametry, ve kterých MOSFET tranzistory vynikají. První je nejnižší odpor v sepnutém režimu. Na trhu jsou k dostání tranzistory s RDSon pod 1 mOhm. Další předností je rychlost spínání. Díky rychlému náběhu hran je možné tyto tranzistory použít i na frekvencích přesahující 1MHz. Jelikož bude v mé práci použit právě MOSFET, budu se zde věnovat jeho vlastnostem trochu více.

[2]

[3]

[4]

Jak již bylo zmíněno, odpor v sepnutém stavu a doba náběžné, popřípadě sestupné hrany při spínání jsou vlastnosti, které se návrhář snaží minimalizovat. Při výběru takového tranzistoru však vychází najevo, že tranzistory s minimálním odporem mají ve srovnání s tranzistory s vyšším odporem delší náběžné hrany a naopak. Tyto protichůdné vlastnosti jsou dány stavbou tranzistoru. Chceme-li tranzistor s minimálním odporem, znamená to tedy, že budeme hledat nějaký s většími hradly drain a source, tím se ale zvyšují elektrody parazitních kapacit přechodů G-D a G-S. Optimální volba tranzistoru tedy bude vždy nějakým kompromisem.

3.3 Cívka

[5]

slouží ve spínaných zdrojích jako akumulční prvek. Při přivedení napětí na induktor lineárně stoupá protékající proud. Při odpojení induktor uvolňuje nahromaděnou energii a proud jím klesá opět lineárně. Pro účel spínaných zdrojů se používají buď feritová jádra, nebo jádra vyrobená spečením kovového prášku. Tyto dvě jádra se liší především tvarem křivky saturace. Feritové jádro má v jeho pracovní oblasti velmi stabilní hodnotu indukčnosti, jakmile ale stoupne proud nad jmenovitou hodnotu, dochází k prudkému poklesu indukčnosti a možnému zničení zařízení. Jádra vyrobená spečením kovového prášku mají pozvolný pokles indukčnosti už od počátku charakteristiky, nemají ale žádné zlomový bod, proto zde tolik nehrozí poškození nadproudem. Pro výběr induktoru jsou klíčové následující vlastnosti.

Indukčnost vyjadřuje schopnost materiálu vytvořit magnetické pole při protékajícím proudem.

Saturační proud je pojem, který se u jednotlivých výrobců mírně liší. V zásadě ale vždy udává, při jaké hodnotě proudu dojde k definovanému poklesu indukčnosti. Může se jednat o pokles od 10 do 50 procent.

Stejnoseměrný odpor je nedílnou součástí impedance induktoru a ve spínaných aplikacích je jednou z příčin ztrát. Obecně platí pravidlo: čím větší indukčnost, tím větší stejnosměrný odpor.

3.4 Kondenzátor

[5]

Kondenzátor má v obvodu jednak úlohu dočasně úschovy energie, zároveň tvoří s cívkou LC filtr. Rozhodující parametry při výběru kondenzátoru jsou kapacita, jmenovité napětí a v případě použití u spínaných zdrojů ještě ekvivalentní sériový odpor a maximální zvlnění proudu kondenzátorem. Na trhu je několik různých technologií, které v tomto odstavci porovnáme vzhledem k použití u spínaných zdrojů.

Keramický - Tento druh kondenzátoru je používán pro malé kapacity do desítek μF a vyznačuje se velmi nízkým ESR. V aplikaci spínaných zdrojů se jako LC filtr používají spíše pro nízkopříkonové zapojení do desítek wattů. Další možností aplikace je přidání tohoto kondenzátoru co nejbližší k výstupním svorkám pro lepší vyfiltrování výstupního signálu.

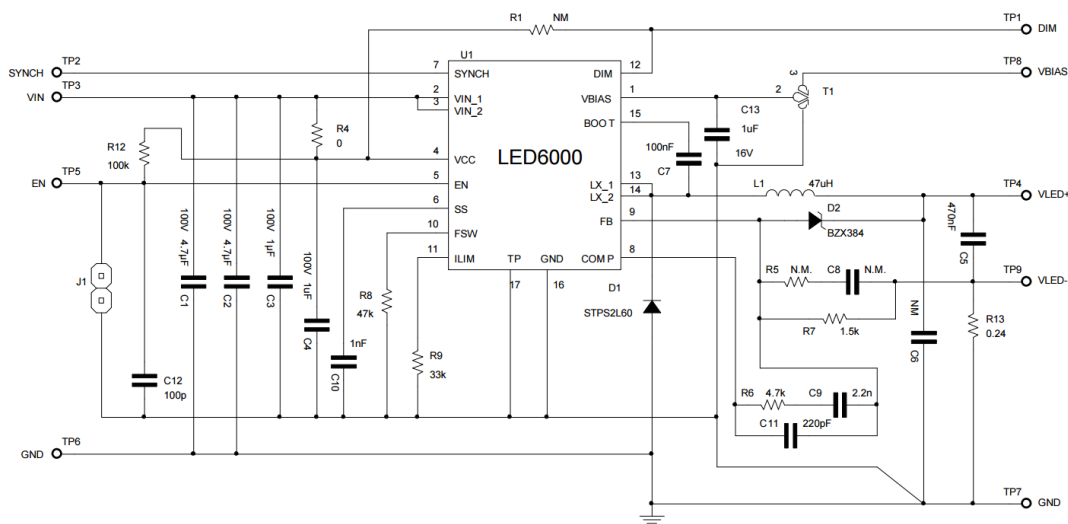
Tantalový - Oproti keramickým kondenzátorům jsou tantalové použitelné i pro kapacity v řádu stovek μF . Oproti Keramickým mají podstatně vyšší ESR. Pro využití ve spínaných zdrojích se tedy příliš nehodí.

Elektrolytický - Jedná se o polarizovaný druh kondenzátoru, který dosahuje nejvyšší kapacity – jednotky mF . Podobně jako tantalový, mají tyto kondenzátory vysoké ESR. Jsou však vyráběny vylepšené, tzv. hliníkové elektrolytické kondenzátory, které mají nižší ESR, což z nich dělá možnou volbu v aplikacích spínaných zdrojů. Jediné omezení zůstává v podobě malého maximálního zvlnění proudu.

Polymerový - Má velice podobné vlastnosti elektrolytickému kondenzátoru s rozdílem omezení velikosti zvlnění proudu. Polymerové kondenzátory se vyrábí i na 6A maximálního zvlnění, což je pro naprostou většinu aplikací dostatečné.

4 Vybrané komerční zapojení

4.1 Seznámení s vybraným zapojením



LED6000
[6]

Na obrázku je návrh funkčního zapojení vyvinutý firmou STMicroelectronics. Řídícím obvodem je zde Buck kontrolér od téže firmy, který je přímo vyvinut k účelům napájení LED diod. Tyto Evaluation návrhy slouží potencionálním zákazníkům pro jednodušší vývoj vlastního zapojení, jejich finální zapojení často právě z těchto návrhů vychází. Uvedený obvod je nastaven pro dodání konstantního proudu 1A. Na schématu je možné vidět několik součástek s popiskem NM - Not Mounted. Tyto součástky nejsou na desce osazeny, ale je pro ně na desce vyhrazeno místo. Jejich účelem bývá optimalizace zapojení, na samotnou funkci ale vliv nemají. Jelikož se toto zapojení používá i parametry podobá mému zapojení, pokusím se trochu jednotlivé bloky obvodu vysvětlit. Nejprve zde budou uvedeny funkce jednotlivých pinů pro lepší orientaci, poté se zaměřím na celé zapojení.

4.2 Obvod LED6000 a jeho použití

SYNCH je synchronizační pin. Tento pin může zůstat nezapojen, nebo se jím nastaví, zda bude kontrolér pracovat v Master, nebo Slave módu. Toto se aplikuje propojením SYNCH pinů více obvodů LED6000. Ten s nejvyšší frekvencí je Master, ostatní přejdou do módu Slave a řídí se spínací frekvencí Master kontroléru.

EN slouží pro ovládání zapnuto/vypnuto celého zařízení. Obvod je aktivní po přivedení napětí, vypnuto je uzemněním. Pro zajištění správné činnosti při nepřipojeném vstupu EN je externě přidán pull-up rezistor.

SS je zkratkou pro Soft Start. Po aktivaci obvodu se kondenzátor zapojený k tomu pinu nabíjí pomocí interního zdroje proudu, napětí na něm lineárně roste a je sledováno řídicím blokem. Po nabití kondenzátoru na hodnotu interní reference 0.25V je funkce Soft Start vypnuta a kontrolér přechází do normální funkce.

FSW udává spínací frekvenci, obvod je schopný pracovat v rozmezí 250-1500 kHz. Nastavení spínací frekvence se provádí připojením rezistoru z tohoto pinu k zemi.

ILIM umožňuje omezit maximální proud drainem tranzistoru. Rozsah je 0.85-4A. Nastavení meze se provede připojením rezistoru k zemi. Pokud tento pin zůstane nezapojen, je nastavena nejvyšší možná mez.

COMP je výstup ze zesilovače odchytky výstupního a požadovaného proudu. Výstup tohoto operačního zesilovače je vyveden k zavedení kompenzační sítě pro zajištění stability systému.

FB slouží pro snímání výstupního proudu, vnitřně je přiveden na invertující vstup zesilovače odchytky. Na druhý vstup zesilovače je připojena interní reference.

LX je připojen na source interního tranzistoru a je určen k připojení cívky.

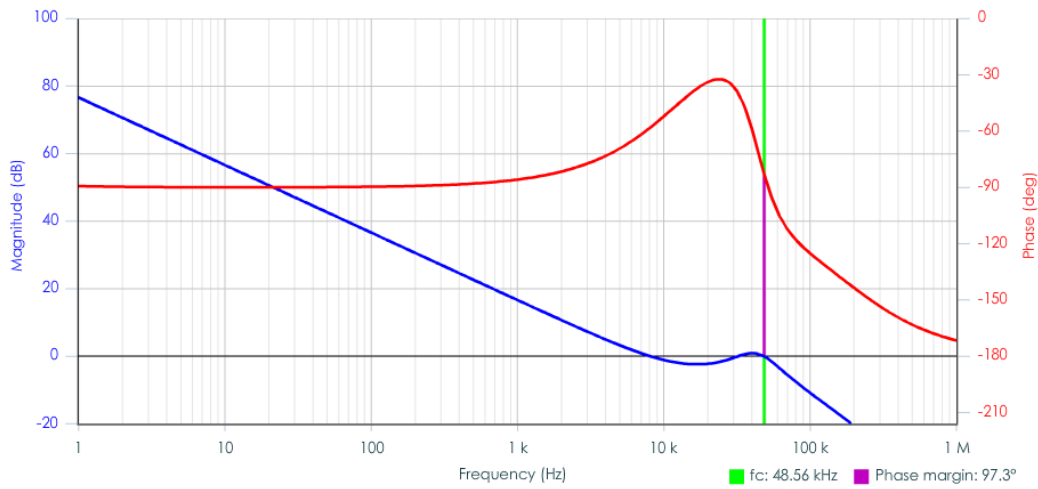
BOOT slouží, jak již bylo zmíněno, pro napájení interního driveru tranzistoru. Pro správnou funkci musí být připojen kondenzátor mezi LX a tento pin.

VBIAS není v desce v základu použit. Slouží ke zlepšení efektivity při malé zátěži.

DIM umožňuje regulaci výstupního proudu. Přestože se jedná o zapojení s konstantním výstupním proudem, implementací Dimmingu, v češtině stmívání, je možno původně nastavený výstupní proud snížit, respektive jeho střední hodnotu.

Tímto jsem popsal vnitřní zapojení a funkci kontroléru LED6000 i některých dalších součástek. V této části článku popíšu zbytek obvodu a některé části z předchozích odstavců doplním.

Nejprve se zaměřím na již zmíněnou kompenzační síť, která je mezi piny FB a COMP. Druhů kompenzačních sítí je hned několik, na schématu je zvolena ta s běžným označením typu II s přidaným kondenzátorem. Toto schéma umožňuje také implementaci sítě typu III přidáním součástek R5 a C8. Tyto různé typy sítí mají odlišné amplitudové frekvenční charakteristiky, které se dají dohledat na internetu. V tomto odstavci bych se proto radši zaměřil všeobecně na význam výběru hodnot součástek při návrhu nějaké kompenzační sítě. Přesné charakteristiky na základě zadání hodnot součástek je možné získat na internetu, často to nabízí samotní výrobci součástek. Po vykreslení grafu získáme frekvenční závislost zesílení a fáze zesilovače odchytky. Příklad, jak může vypadat takový graf, je na obrázku dole. Pro vykreslení byly zadány stejné součástky a výstupní parametry, jako v zapojení popsaném nahoře v textu.



Graf
kompenzační
sítě
[7]

Tento graf byl vykreslen ze stránek výrobce obvodu LED6000. Při výběru součástek je nutné dodržet jednu zásadní podmínku: v celé části charakteristiky, kde je hodnota zesílení v dB nula a více, musí být fázový posun menší než 180 stupňů. Tato hranice je na grafu znázorněna svislou fialovou čarou. Při návrhu kompenzační sítě je nutné počítat i s fázovou rezervou. Ta je v tomto případě 97.3 stupňů, jak je uvedeno pod grafem. Z toho vyplývá, že zesílení je nutné vhodnou volbou součástek včas utlumit, aby se předešlo nestabilitě systému. Čím dříve ale bude amplitudová charakteristika na grafu utlumena pod hranici 0dB, tím pomalejší se systém stává v odezvě na změnu výstupní veličiny. Proto je nutné navrhovat kompenzační síť i s přihlédnutím k aplikaci, kde je obvod použit.

5 Návrh funkčního vzorku

Pro praktickou část bakalářské práce jsem se rozhodl navrhnout a postavit spínaný proudový zdroj, schopný dodat výstupní proud až 2A. V zadání této bakalářské práce je uvedena spodní hranice rozsahu 0A, čehož není možno z hlediska regulace dosáhnout. Touto hranicí je myšleno schopnost zapojení detekovat odpojení zátěže. Jelikož je toto zapojení určeno pro napájení výkonových LED diod, je skutečná spodní hranice nastavena na 10 mA. V následujících odstavcích bude popsán výběr jednotlivých součástí zapojení a celkové vlastnosti zapojení.

5.1 Řídící člen

V teoretickém úvodu byla popsána běžná struktura DCDC kontroléru. Výše popsané zapojení by se daly označit jako analogově řízené. Zapojení popsáno dále v článku je naopak řízené digitálně. Rozdíl spočívá ve způsobu vyhodnocování sledované veličiny. U analogového řízení je informace z výstupu prostřednictvím nějakého zesilovače odchytky přímo přivedena k bloku ovládající PWM modulaci. V případě digitálního řízení je k vyhodnocení výstupní veličiny často použit AD převodník, který posílá výstupní data do logického bloku, který tuto informaci vyhodnotí a v případě odchytky změní střídu PWM modulace. Tímto logickým blokem může být například mikrokontrolér.

V mé práci je jako řídicí člen použit právě mikrokontrolér, který již obsahuje AD převodník a další periferie.

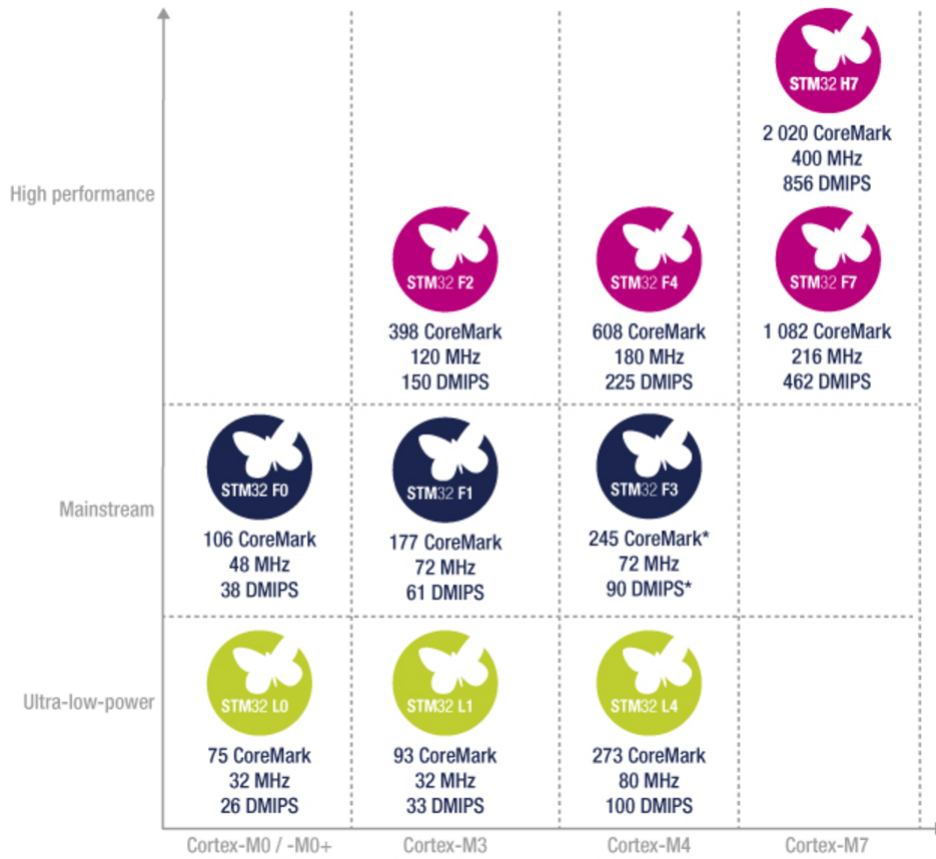
Při volbě mikrokontroléru byla zohledněna dostupnost dokumentace a vzorových kódů, rozšířenost daného čipu a také cena. Volba tedy padla na ARM mikrokontrolér od firmy ST, konkrétně STM32F373CC. Tento článek bude dále pojednávat o vlastnostech tohoto mikrokontroléru.

5.1.1 ARM jádro

ARM je zkratkou pro Acorn RISC Machine. Ze zkratky vyplývá, že se jedná o procesor s redukováným instrukčním setem. Počátky ARM technologie sahají do poloviny devadesátých let minulého století, kdy firma ARM vyvinula svůj první produkt. Jednalo se o 3 um technologii a v celém čipu bylo integrováno 25 000 tranzistorů. V současné době firma ARM své produkty nevyrábí, ale pouze vyvíjí. Tyto produkty pak nabízí výrobcům za licenční poplatky. ARM architektura je dnes velmi populární a nechybí v nabídce většiny výrobců zabývajících se mikrokontroléry. Nejčastěji se můžeme setkat s procesory z řady Cortex, která se dále dělí do podskupin. Pro výkonově náročné aplikace se používají Cortex-A procesory. Tyto procesory jsou používány třeba výrobci telefonů jako Samsung nebo Apple. Procesory pracující v reálném čase se označují Cortex-R. Posledním případem jsou aplikace vestavěných systémů. Zde se používají mikrokontroléry s jádrem Cortex-M. Právě tento typ je použit i v mém zařízení. Cortex-M procesory se dále dělí podle výkonu vzestupně od M0, M1, M3, M4, M7. Existuje i verze pro malou spotřebu s označením M0+.

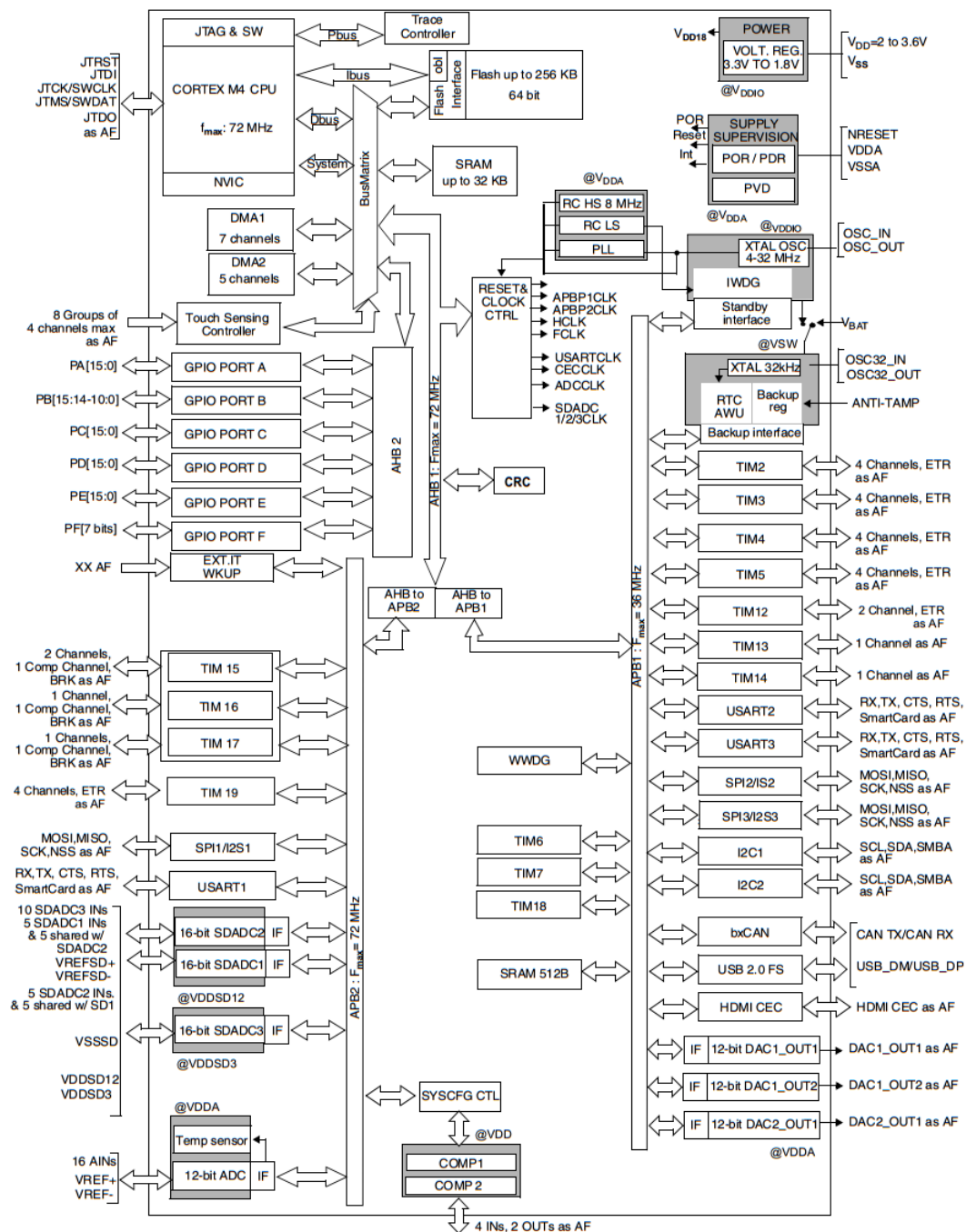
[8]

5.1.2 STM32F373CC



Mikrokontrolér STM32F373CC je ze středně výkonné řady F3. Nutno dodat, že značení firmy ST neodpovídá použitému jádru. Jinými slovy, Řada F3 neobsahuje jádro Cortex M3. V současné době nabízí firma ST více než 1000 mikrokontrolérů z řady ARM, které se liší počtem pinů, velikostí Flash paměti, periferiemi a dalšími vlastnostmi. Jeden typ mikrokontroléru bývá dostupný v několika modifikacích, lišících se právě počtem pinů a velikostí programovatelné paměti Flash. K rozeznání jednotlivých modifikací slouží poslední dva znaky ve jménu mikrokontroléru. U STM32F373CC udává první C počet pinů 48, druhé C paměť 256 kB. Pro lepší orientaci v nabídce je na obrázku uveden kompletní sortiment 32-bitových mikrokontrolérů firmy ST.

Mikrokontroléry
ARM od ST
[9]



Na obrázku je znázorněna struktura mikrokontrolérů řady STM32F373. Od ostatních mikrokontrolérů firmy ST se liší implementací Sigma-delta AD převodníku. Rozlišovací schopnost tohoto převodníku je 16 bitů, neboli 65536 úrovní signálu. Zbylé periferie jsou běžně k nalezení i u ostatních mikrokontrolérů. Je zde několik timerů, které se

Strukturra
STM32F373CC
[10]

dělí rozlišením na 16 a 32-bitové a použitím na základní a speciální. Pro komunikaci slouží standardní protokoly jako USB, I2C, SPI nebo USART. Dále je zde obyčejný AD převodník, DA převodník, komparátor a další.

5.2 Program

Program je mozek celého zapojení, vhodná volba algoritmu hraje zásadní roli ve výsledném chování zapojení. V případě napájecího zdroje je klíčová především regulační smyčka. Pro realizaci proudového zdroje byly použity periferie popsané níže. Program pro navržené zapojení byl vyvinut v programu IAR, který nabízí bezplatnou verzi, omezenou pouze velikostí programu 32 kB.

5.2.1 ADC1

Informace o velikosti proudu je snímána měřením napětí na odporu R7, umístěným mezi zemí a konektorem LED-. Toto napětí je dále zesíleno operačním zesilovačem, kterého výstup měří AD převodník. K tomuto účelu byl použit kanál 0 u ADC1, namapován na port PA0. Původním důvodem pro výběr tohoto mikrokontroléru byl právě jeho Sigma-delta AD převodník, při měření prvního prototypu se však ukázalo být rozlišení 16 bitů zcela nepotřebných, jelikož je zde kvůli spínání rušení, které bylo vyšší než hodnota dvanáctého bitu, proto byla dána přednost již zmíněného 12 bitového ADC1 převodníku. Tento převodník nemá sice takové rozlišení, zato je však podstatně rychlejší.

5.2.2 TIM4

Pro generování PWM modulace byl zvolen 16-bitový TIM4 s výstupem na pinu PB6. Časová základna pro TIM4 byla nastavena na frekvenci 100 kHz, což udává frekvenci spínání tranzistorů.

5.2.3 TIM6

Dalším použitým timerem je TIM6, který pomáhá ke správnému detekování otočení enkodéru. Přejde-li od enkodéru signál o otočení, TIM6 je spuštěn. Po dosažení doby, která je daná nastavením TIM6, je obslouženo přerušení, kde je zpracována informace z enkodéru. Posledním krokem je povolení dalšího přerušení. Cílem tohoto zpoždění je eliminovat překmity, které vznikají v enkodéru.

5.2.4 I2C

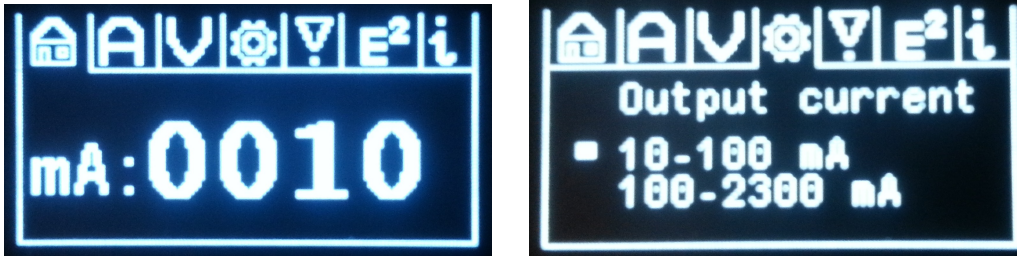
Pro komunikaci s displejem je použit I2C protokol nastavený na frekvenci 100 kHz. Tyto displeje jsou také schopné komunikovat po SPI a paralelním rozhraní, z hlediska menšího objemu dat však nebylo nutné použít některou z těchto rychlejších metod.

5.3 Uživatelské rozhraní

Pro ovládání celého zařízení byla zvolena kombinace displeje a rotačního enkodéru. Rotační enkodér má dvě hlavní části: tlačítko a otočný spínač generující pulsy. Těmito prvky je možné se v menu uživatelského prostředí pohybovat a upravovat například nastavený

[11]

proud. K zobrazení je použit OLED displej s uhlopříčkou 0.96". Jelikož se jedná o OLED technologii, je displej i přes svoji velikost dobře čitelný, a to i z různých úhlů. Záměrem celého zapojení je poskytnout co nejkompaktnější zařízení a tento OLED displej se pro tento účel velice hodí. Samotné uživatelské rozhraní je vidět na obrázku dole.

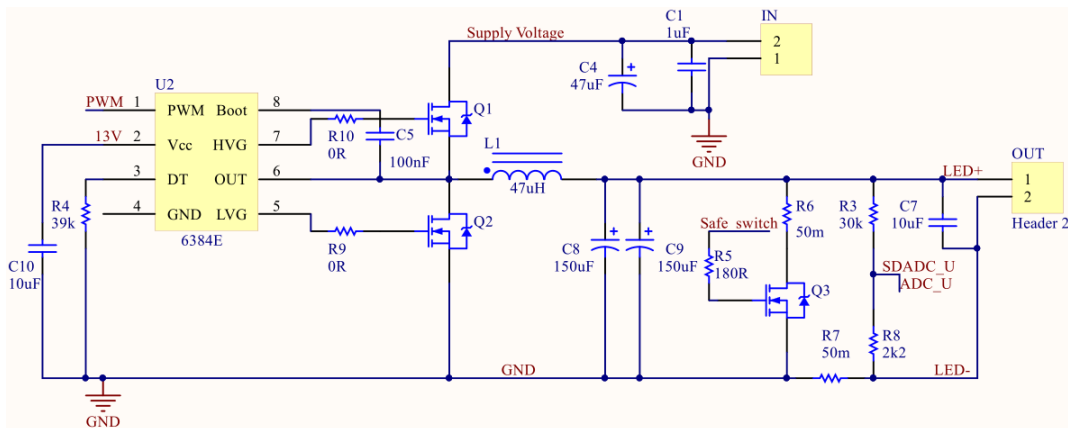


Na obrázcích jsou uvedené hlavní dvě karty uživatelského prostředí. První obrázek zobrazuje defaultní kartu, která se zobrazí po spuštění zařízení. V této kartě lze nastavit libovolnou hodnotu proudu v rozsahu daném nastavením ve čtvrté kartě z druhého obrázku. Takové rozdělení bylo nutné k dosažení přesnější regulaci výstupního proudu. Více o tomto rozdělení rozsahu bude v části popisu zapojení proudového zdroje.

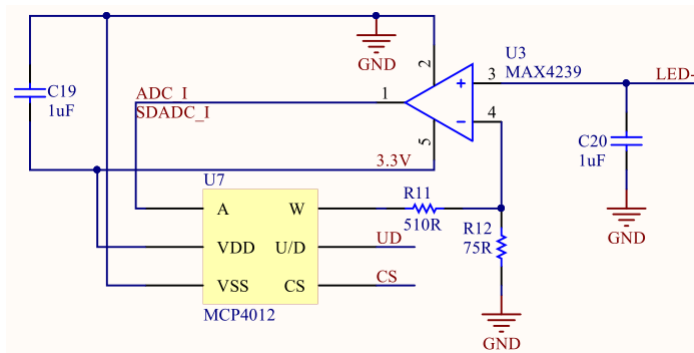
5.4 Zapojení proudového zdroje

Zapojení bylo navrženo v programu Altium Designer, který podporuje kreslení schématu i následný návrh desky. Balík Altium Designer toho ale obsahuje mnohem více, například generaci 3D modelu desky. Právě tento 3D model bude k dispozici v příloze této práce.

Samotné zapojení je rozděleno do několika bloků. Nejdůležitější bloky budou zobrazeny níže v textu, celkové zapojení pak bude k nahlédnutí v příloze.

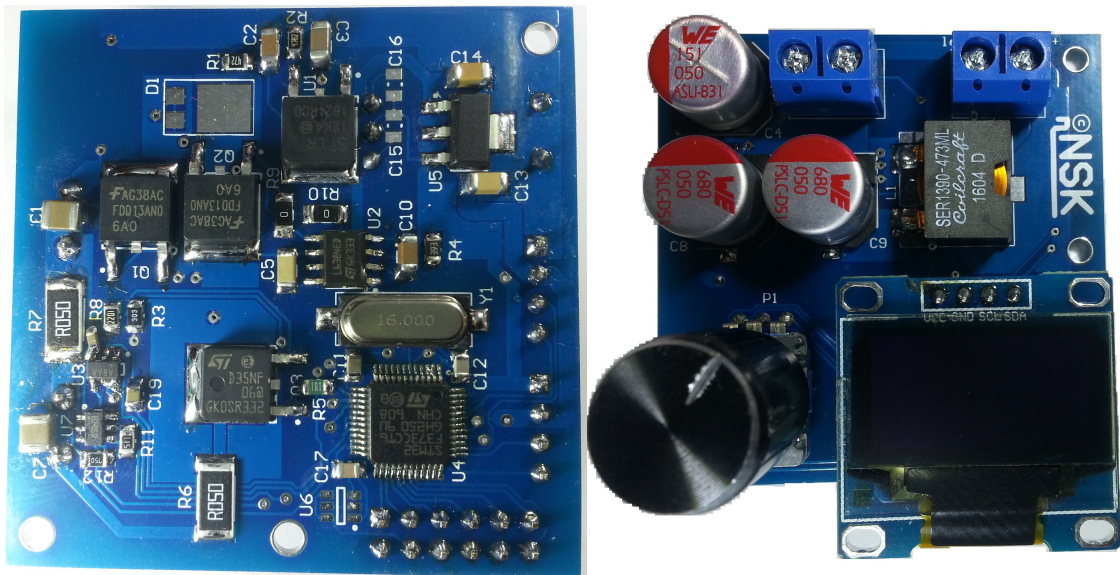


Na tomto obrázku je výkonová část celého zapojení. Jak je možné poznat z kapitoly o spínaných zdrojích, jedná se o synchronní Buck konvertor. Zařízení lze napájet vstupním napětím v rozsahu 25-35V. Součástka 6384E budí MOSFET tranzistory, čímž se střídavě přepíná cívka na napájecí napětí a zem. Kondenzátory C8 a C9 slouží k dočasnému uchování náboje, současně také tvoří LC filtr. K výstupu je navíc připojen keramický kondenzátor pro dosažení menšího zkreslení.



Napětí na rezistoru R7 z prvního obrázku se přivádí na vstup operačního zesilovače. Zesílení je určeno rezistory R11, R12 a digitálním potenciometrem MCP4012. Tento přístup musel být zvolen kvůli rušení, které vzniká spínáním tranzistorů. Původní myšlenkou byla možnost plynule měnit zesílení pro dosažení co nejvyššího napětí (až po 3.3 V) v celém rozsahu výstupního proudu. Tato možnost se ale neosvědčila kvůli ztrátě schopnosti regulace v době přeladění odporu. Proto byla v uživatelském prostředí vytvořena karta pro nastavení rozsahu výstupního proudu. V případě rozsahu 10-100 mA je odpor potenciometru nastaven na maximum, pro rozsah 100 - 2300 mA je odpor minimální. Tímto způsobem je měněno zesílení mezi hodnotami 21 a 405.

5.5 Návrh DPS

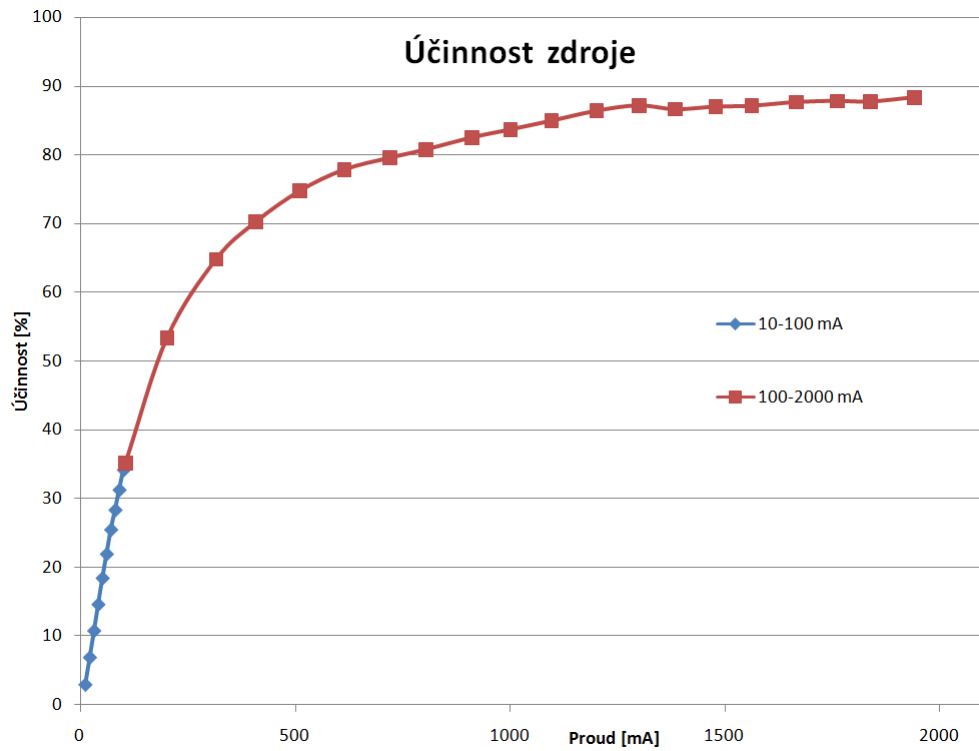


5.6 Měření na výrobku

Zapojení popsané výše bylo úspěšně postaveno a oživeno. V následujících kapitolách je popsáno měření nejdůležitějších parametrů zdroje.

5.6.1 Měření účinnosti

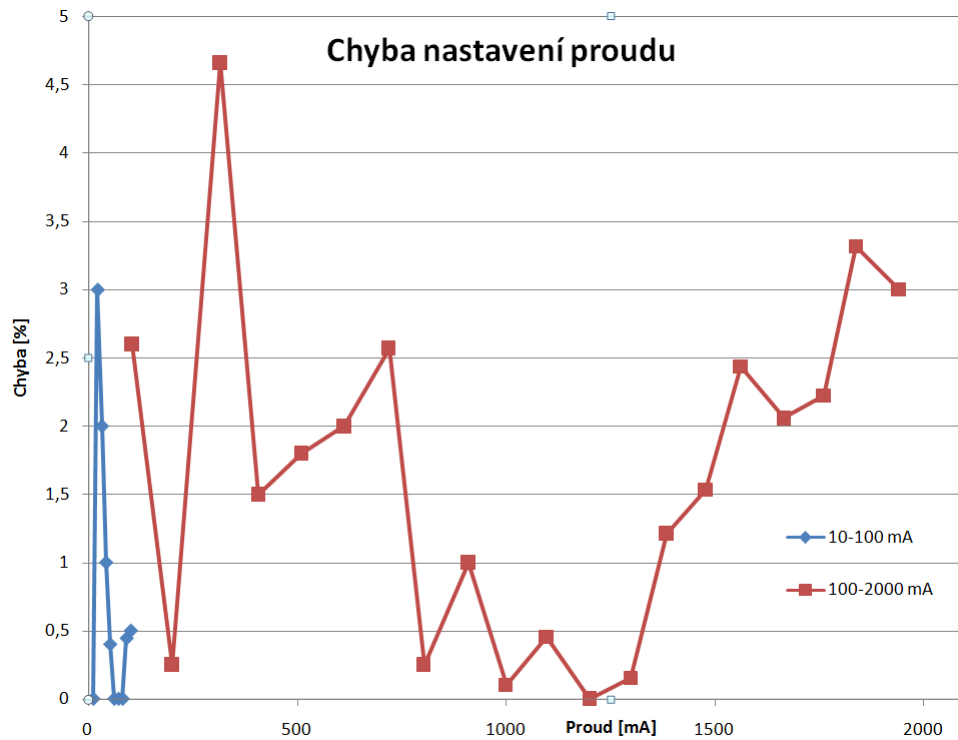
Zdroj byl měřen vždy deseti vzorky na rozsah, v rozsahu 10-100 mA s krokem 10 mA a v rozsahu 100-2000 mA s krokem 100 mA. K měření byly použity multimetry Fluke 189.



Účinnost

5.6.2 Měření přesnosti nastavení proudu

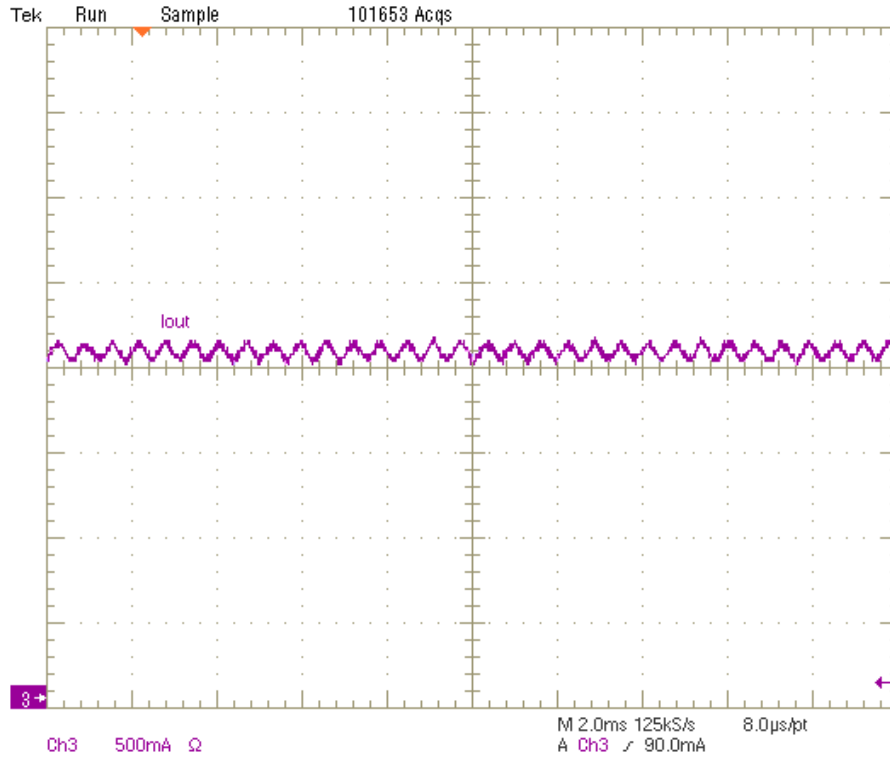
Pro měření přesnosti byl použit stejný postup jako u měření účinnosti, tedy 10 kroků na rozsah. Přesnost v jednotlivých bodech se velice liší, nepřesahuje však hodnotu 5%.



Přesnost

5.6.3 Měření zvlnění proudu

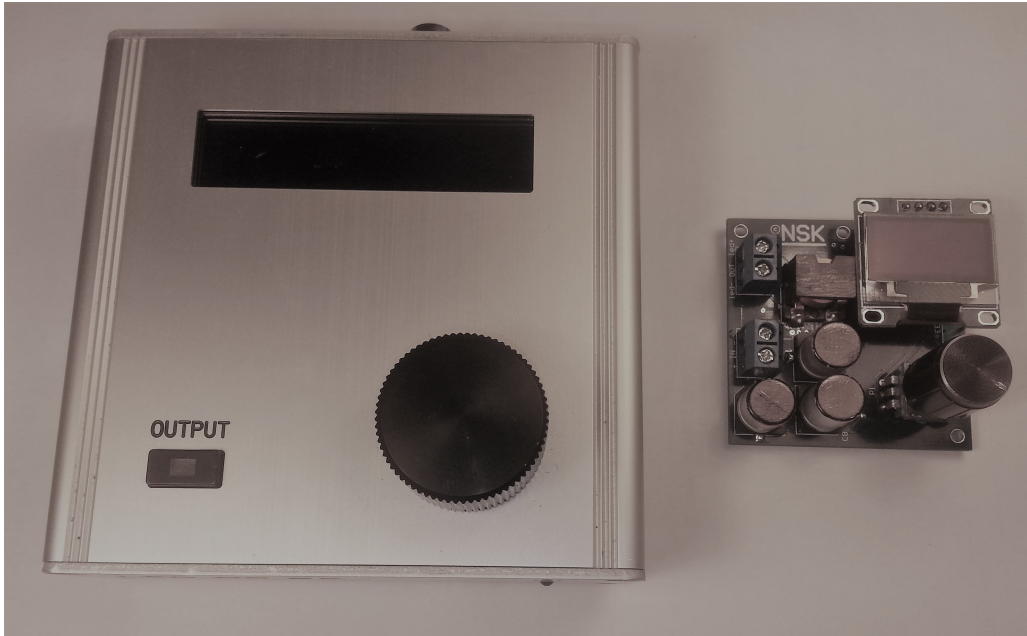
Pro měření výstupního proudu byla použita proudová sonda. V rozsahu 10-100 mA bylo zpočátku obtížné přesně změřit hodnotu zvlnění, jelikož byla hodnota výstupního proudu stejná s rozlišovací schopností sondy. Přesněji změřit zvlnění bylo tedy možno až od rozsahu 100-2000 mA. Na obrázku je průběh zvlnění při výstupním proudu 2 A. Hodnota zvlnění byla při tomto výstupním proudu 150 mA, neboli 7,5%. V rozsahu 100-2000 mA hodnota zvlnění nepřesáhla 10%.



Zvlnění pro
2000 mA

5.7 Porovnání výrobku s lineárním řešením

Námětem pro tuto práci mi bylo zadání projektu I od Ing. Tomáše Vítka, kterému bych chtěl zároveň poděkovat za poskytnutí jeho prototypu lineárního zdroje k porovnání klíčových vlastností. Porovnání bude opět spočívat v měření základních veličin, jako tomu bylo u spínaného zdroje. Navíc zde bude snímek z termokamery zachycující teplotu výrobku při plném výkonu.



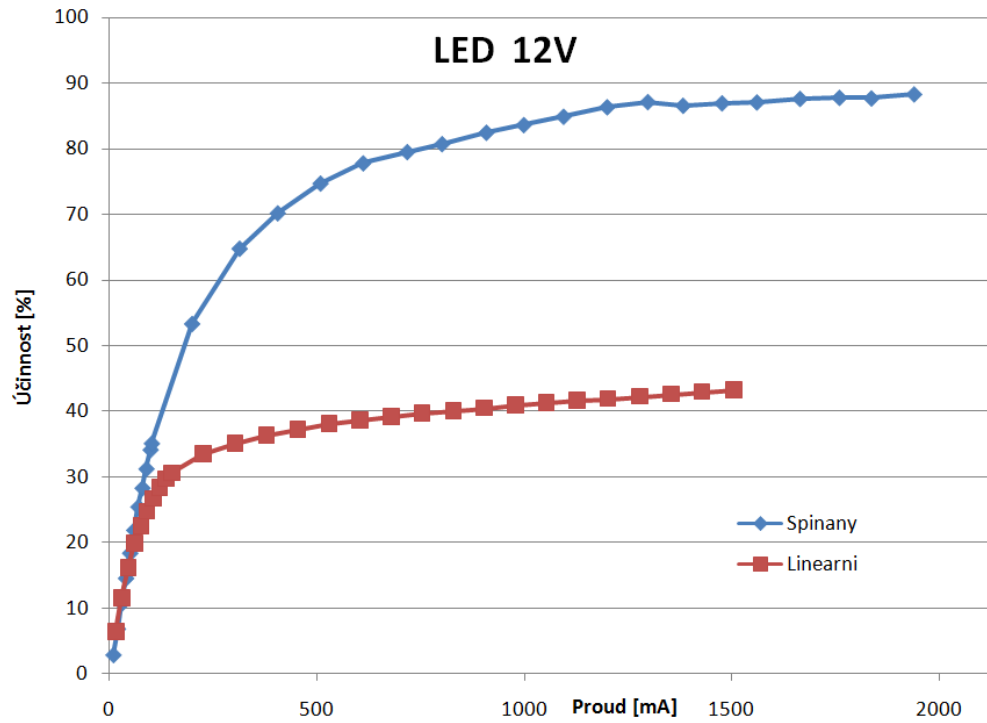
Velikost výrobků

5.7.1 Prototyp lineárního zdroje

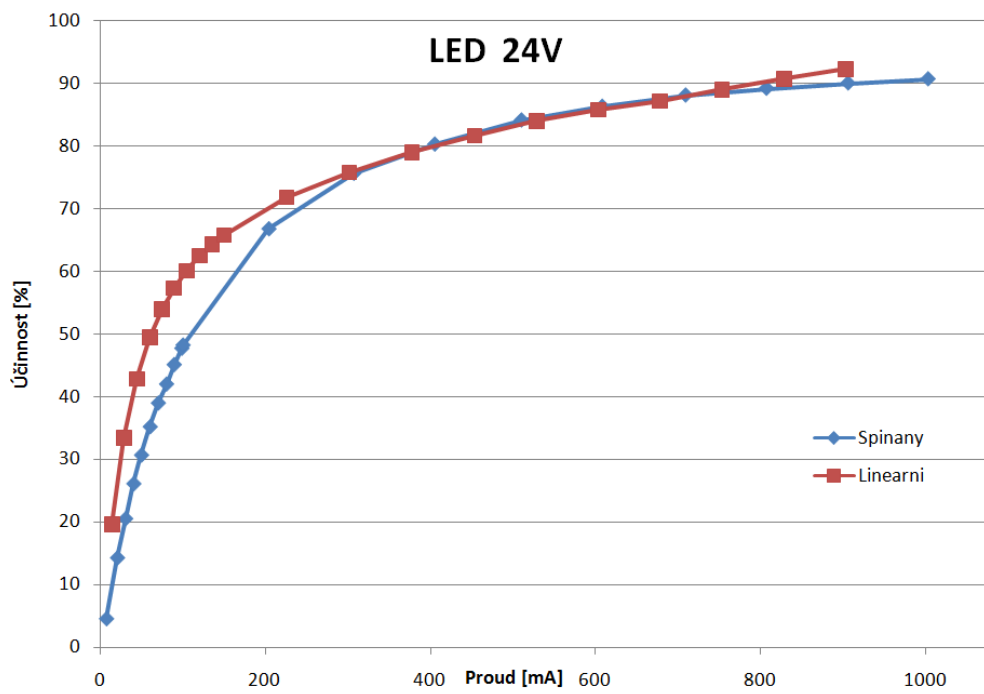
Tento zdroj je řešen jako lineární se spínanou předregulací. K napájení je třeba 24V zdroj schopného dodat 1.5 A. Ovládání je řešeno pomocí rotačního enkodéru a alfanumerického displeje. Tím je možno nastavení proudu v rozmezí 15 mA - 1500 mA s krokem 15 mA, neboli 1%.

5.7.2 Porovnání účinnosti

Měření bylo provedeno na LED diodách o jmenovitém napětí 12V. Napájecí napětí lineárního zdroje bylo nastaveno na 24V, u spínaného zdroje na 30V. Nutno dodat, že volbou těchto diod bylo lineární řešení znevýhodněné, proto bylo provedeno další měření, kde byly zapojeny dvě tyto LED diody sériově. Toto byl naopak ten nejlepší možný případ z hlediska účinnosti lineárního zdroje. Měření probíhalo pouze do 1A z důvodu použití 10W LED diod, u lineárního zdroje pouze do 900 mA z důvodu omezení napájecím napětím. Při této hodnotě tedy lineární zdroj dosahuje nejlepší možné účinnosti.

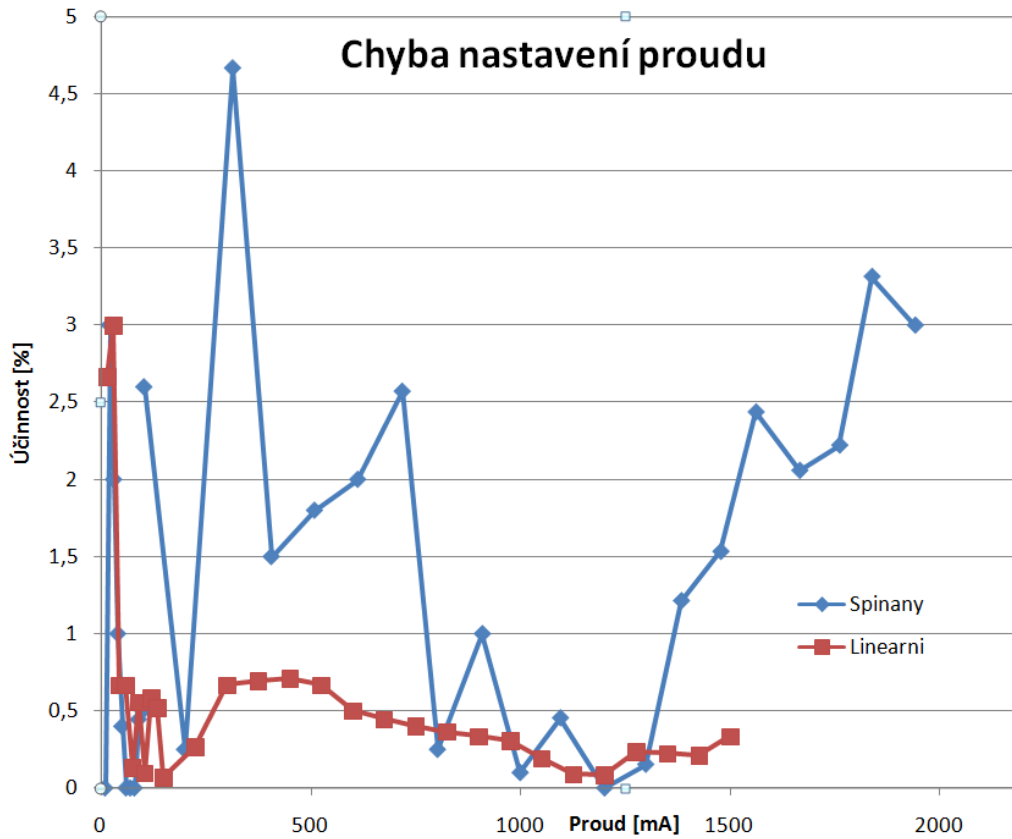


Spínaný vs
lineární při
12V



Spínaný vs
lineární při
24V

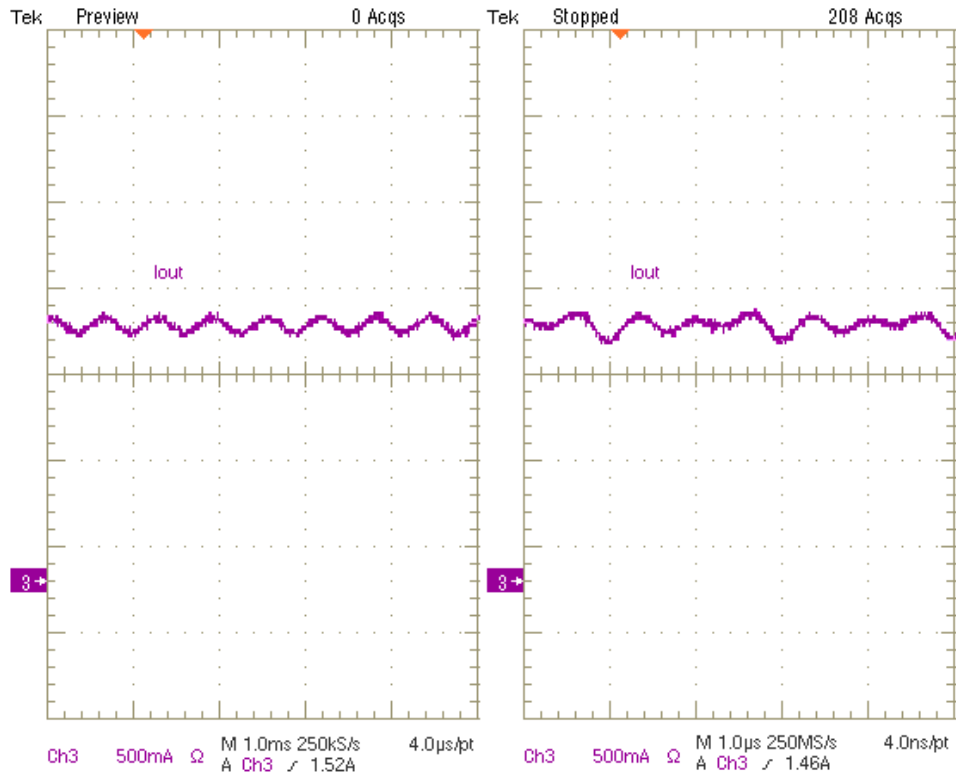
5.7.3 Porovnání přesnosti nastavení proudu



Spínaný vs
lineární

5.7.4 Porovnání zvlnění proudu

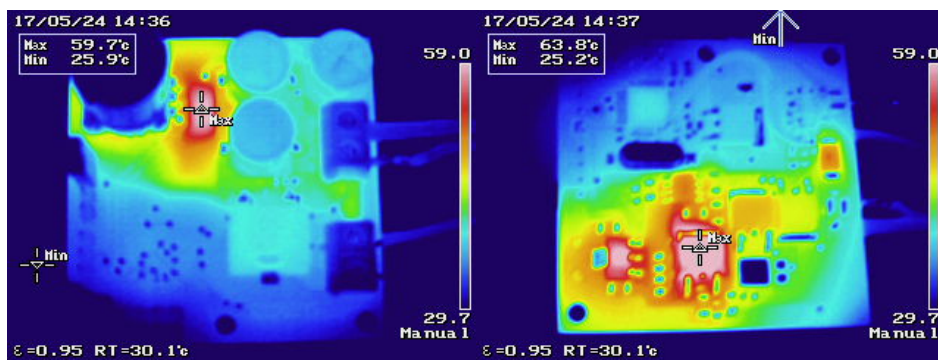
K porovnání byla zvolena maximální hodnota lineárního zdroje 1500 mA. Hodnota zvlnění je velice podobná, liší se však frekvencí. Zatímco u spínaného zdroje je nastavena časová základna na 1 ms/div, u lineárního je tisíckrát menší, tedy 1 us/div. Lineární zdroj má tedy lepší odezvu regulační smyčky. Průběh zvlnění je zobrazen na obrázku na další straně.



Spínaný vs
lineární při
1500 mA

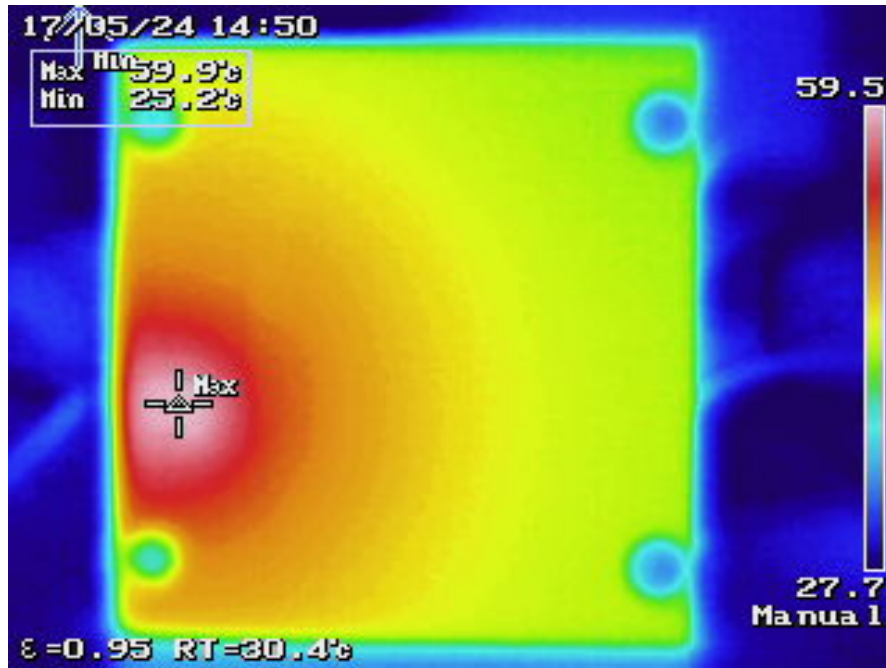
5.7.5 Porovnální snímků z termokamery

Snímky z termokamery srovnávají zdroje při jejich maximálním zatížení. U lineárního zdroje je to výstupní výkon 14W, u spínaného 21W. Zatímco u spínaného zdroje byla focena přímo deska plošných spojů s jednotlivými komponenty, u lineárního musela být ponechána hliníková krabice, jelikož sloužila jako chlazení výkonového tranzistoru. U obou zdrojů dosahuje maximální teplota hodnoty okolo 60 °C a v obou případech je stejná příčina - lineární zdroj.



Spínaný při
2300 mA

Na obrázku je deska spínaného zdroje z obou stran. První snímek zachycuje ohřev výstupních kondenzátorů a cívky. Druhý pak oba stabilizátory a spínací tranzistory. Z těchto obrávků lze usoudit, že jediný problém zde představují právě lineární stabilizátory. Tato skutečnost je však nezávislá na zatížení zdroje. Všechny součástky spínaného zdroje jsou dimenzovány tak, aby nedocházelo k velkému zahřátí. Ke snížení teploty stabilizátoru U1 by musel být zvolen stabilizátor jiný, s menším úbytkem napětí. Potom bude možné snížit vstupní napětí, a tím i ztrátový výkon na stabilizátoru.



Lineární při
1500 mA

U lineárního zdroje je tomu jinak, naměřená teplota je přímo úměrná zatížení zdroje.

5.7.6 Zhodnocení

Cílem porovnání obou koncepcí bylo ověřit rozdíly v základních vlastnostech. Z hlediska účinnosti v širokém spektru výstupního napětí vyšel dle předpokladů lépe zdroj spínaný. Zvlnění obou zdrojů byla velice podobná. Zde však spíše než topologie zdroje hrála roli regulační smyčka. Rozdíl v účinnosti je navíc patrný při pohledu na snímky z termokamery. Kde však měl lineární zdroj výrazně navrch, byla přesnost nastavení proudu. Zatímco u spínaného zdroje byla odchylka velice nestálá, u lineárního se konstantně držela na velmi nízkých hodnotách.

6 Závěr

Cílem práce bylo nejen prohloubení znalostí v oblasti spínaných zdrojů, ale i seznámení se ARM mikrokontroléry, které jsou dnes velmi rozšířené. Jelikož je oblast spínaných zdrojů velice obsáhlá, nebylo možné pokrýt v této práci vše. Opomenuta zůstala zapojení pro vyšší výkony, jako například Half Bridge a Full Bridge topologie. V praktické části bylo úspěšně postaveno a oživeno zařízení schopné dodat proud až 2300 mA. Přestože je zařízení funkční, je v něm několik věcí, které budou v příští verzi výrobku doladěny. Z hlediska návrhu schématu budou na piny BOOT a NRST přidány pull-down rezistor, respektive kondenzátor. Před napájecí a referenční piny AD převodníku bude přidán LC filtr pro dosažení přesnějších měření výstupního proudu. Optimalizován bude i layout desky na základě zkušeností z tohoto prototypu. Touto změnou si slibuji zmenšení rušení lepším rozestavením součástek tvořících spínaný zdroj. Nezměněn nezůstane ani software, kde bude zlepšena regulační smyčka použitím některého z regulátoru, pravděpodobně typu PS. Samotný kód poté bude upraven na přímý zápis do registrů místo použití stávajících HAL knihoven. Tato změna podstatně zrychlí chod programu.

7 Použitá literatura

- [1] STMicroelectronics, Buck regulators
http://www.st.com/content/st_com/en/products/power-management/dc-dc-switching-converters/buck-regulators/14973.html
- [2] Differencebetween.net, Difference Between BJT and MOSFET, 2011
<http://www.differencebetween.net/technology/difference-between-bjt-and-mosfet/>
- [3] Differencebetween.com, Difference Between IGBT and MOSFET, 2011
<http://www.differencebetween.com/difference-between-igbt-and-vs-mosfet/>
- [4] Microchip, SMPS Components and their effects on System Design, 2006
http://www.microchip.com/stellent/groups/SiteComm_sg/documents/Training_Tutorials/en528035.pdf
- [5] Texas Instruments, Output Ripple Voltage for Buck Switching Regulator, 2016
<http://www.ti.com/lit/an/slva630a/slva630a.pdf>
- [6] STMicroelectronics, Buck Current Regulators for LED
http://www.st.com/content/st_com/en/products/power-management/led-drivers/buck-current-regulators-for-led/led6000.html
- [7] STMicroelectronics, eDesignSuite
http://www.st.com/content/st_com/en/support/resources/edesign.html
- [8] Ing- Tomáš Vítek, Mikrokontroléry s jádrem ARM, 2016
https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/59248/mod_resource/content/1/13_MIK_2016.pdf
- [9] STMicroelectronics, STM32 32-bit ARM Cortex MCUs
http://www.st.com/content/st_com/en/products/microcontrollers/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus.html?querycriteria=productId=SC1169
- [10] STMicroelectronics, STM32F373CC
http://www.st.com/content/st_com/en/products/microcontrollers/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus/stm32f3-series/stm32f373/stm32f373cc.html
- [11] github.com, SSD1306 library
<https://github.com/4ilo/ssd1306-stm32HAL>