



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

LED DRIVER SE SYNCHRONNÍM USMĚRNĚNÍM

LED DRIVER WITH SYNCHRONOUS RECTIFICATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Adéla Hodáňová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Kubíček, Ph.D.

BRNO 2019

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**

Ústav radioelektroniky

Studentka: Bc. Adéla Hodáňová

ID: 173654

Ročník: 2

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

LED driver se synchronním usměrněním

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Z dostupných moderních integrovaných obvodů pro realizaci snižujících měničů vyberte dva porovnatelné typy, jeden s funkcí synchronního usměrnění a jeden bez této funkcionality. S vybranými obvody navrhnete schéma zapojení pro buzení LED v zadané konfiguraci. Pomocí simulace provedte optimalizaci alespoň jednoho navrženého obvodu a zjistěte očekávané parametry zapojení. Stanovte vliv parazitních vlastností klíčových součástek a plošného spoje v kritických místech zapojení.

Navrhnete plošný spoj pro obě zapojení a budiče realizujte. Provedte funkční testy obou budičů a výsledky měření porovnejte s výsledky simulací. Měniče podrobte základním klimatickým a EMC testům.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] MANIKTALA, Sanjaya. Switching power supply design & optimization. Second edition. New York: McGraw-Hill Education, 2014. ISBN 9780071798143.

[2] SANDLER, Steven M. Switchmode power supply simulation with PSpice and SPICE 3. New York: McGraw-Hill, c2006. McGraw-Hill electronic engineering series. ISBN 0071463267.

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 16.5.2019

Vedoucí práce: Ing. Michal Kubiček, Ph.D.

Konzultant:

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Cílem diplomové práce je praktické porovnání dvojice obvodů používaných pro buzení LED s výstupním proudem řádově jednotky ampér. Oba obvody jsou založeny na topologii snižujícího měniče, přičemž jeden využívá technologii synchronního usměrnění a druhý nikoliv. Vybraným integrovaným obvodům byly teoreticky napočítány obvodové prvky, vybrány komponenty a vyrobeny reálné vzorky. Všechny vybrané komponenty splňují kvalifikaci pro automobilový průmysl. Vyrobené vzorky byly porovnány z hlediska funkčnosti, účinnosti, EMC a teplotního zatížení.

Klíčová slova

LED, budič, měnič, driver, integrovaný obvod

Abstract

The main goal of this diploma thesis is to compare two circuits designed for LED powering with output current of units of Amperes. Both circuits are based on step-down converter topology, one with technology of synchronous rectifying and the other one without it. Calculations and selection of used components with real prototypes were made for both selected circuits. All selected components meet automotive qualification requirements for discrete products. Produced prototypes were compared in terms of functionality, efficiency, EMC and thermal radiation.

Keywords

LED, buck converter, driver, integrated circuit

Bibliografická citace:

HODÁŇOVÁ, A. *LED driver se synchronním usměrněním*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2019. 96 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Michal Kubíček, Ph.D..

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma LED driver se synchronním usměrněním jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autorka uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 16. května 2019

.....
podpis autorky

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Josefu Vochyánovi, Ph.D a Ing. Michalu Kubíčkov, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: 16. května 2019

.....

podpis autorky

Obsah

Seznam symbolů a zkratk	9
Seznam obrázků	11
Seznam tabulek	14
1. Úvod	15
2. Současný stav	16
2.1 Proces vzniku výrobku	16
2.2 LED světla v automobilech	17
2.2.1 LED	17
2.2.2 Technologie LED	17
2.2.3 Materiály pro výrobu LED čipů	18
2.2.4 VA charakteristika LED	19
2.2.5 Binování LED diod	20
2.2.6 Používané LED diody v automobilové technice	21
2.3 Napájecí obvody pro buzení LED	22
2.3.1 Lineární budič	22
2.3.2 Spínaný měnič	22
2.3.3 Snižující DC/DC měnič	22
2.3.4 Zvyšující DC/DC měnič	23
2.3.5 Invertující DC/DC měnič	24
2.3.6 Synchronní snižující měnič	24
3. Konstrukce LED driveru	25
3.1 Kvalifikace pro automobilový průmysl	25
3.2 Výběr LED diody	25
3.3 Výběr integrovaných obvodů	28
3.3.1 TPS92515	29
3.3.2 MAX20050	37
3.4 Kritické oblasti obvodu	40
3.5 Výběr jednotlivých komponent	40
3.6 Navržená schémata	42
3.6.1 Vstupní část	42
3.6.2 Hlavní výkonová část obvodu	43

3.6.3	Lineární snižování proudu LED	44
3.6.4	Výstupní blok.....	46
3.6.5	Obvodové zapojení LED modulu	46
3.7	Návrh desek plošných spojů.....	46
4.	Testy na vzorcích.....	48
4.1	Měření na obvodu TPS92515.....	48
4.1.1	Funkční testy.....	48
4.1.2	EMC testy	50
4.1.3	Teplotní analýza.....	52
4.2	Výsledky měření obvodu MAX20050	53
4.2.1	Funkční testy.....	53
4.2.2	EMC testy	55
4.2.3	Teplotní analýza.....	56
4.3	Teplotní testy LED modulu.....	56
4.4	Optimalizace vzorků	57
4.5	Optimalizace vzorku TPS92515	57
4.5.1	Optimalizace vzorku MAX20050.....	61
4.5.2	Optimalizace LED modulu	64
4.6	Měření v klimatické komoře	68
4.7	Srovnání vzorků	74
5.	Závěr.....	76
	Literatura.....	78
	Seznam příloh	80

Seznam symbolů a zkratek

Zkratky:

DRL	...	daytime running light – světlo pro denní svícení
POS	...	position light – poziční světlo
TI	...	turn indicator – směrové světlo
LED	...	light emitting diode – emitující světlo
DC	...	direct current – stejnosměrné napětí
LB	...	low beam – potkávací světlo
HB	...	high beam – dílkové světlo
AL	...	Automotive lighting
AEC	...	Automotive Electronics Council
AEC-Q	...	Automotive Electronics Council Qualification
DPS	...	deska plošných spojů
IC	...	integrated circuit – integrovaný obvod
DP	...	diplomová práce
ESD	...	Electro Static Discharge – elektrostatický výboj
EMC	...	Elektromagnetická kompatibilita
SFR	...	vlastní rezonanční kmitočet cívky
SMD	...	surface mount device

Symbols:

U;V	...	napětí	[V]
I	...	proud	[A]
f	...	frekvence	[Hz]
t	...	čas	[s]
L	...	indukčnost	[H]
C	...	kapacita	[F]
D	...	střída	[s]
r	...	zvlnění	[-]
R	...	odpor	[Ω]

T	...	teplota	[°C]
λ	...	tepelná vodivost	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
η	...	účinnost	[-];[%]
P	...	výkon	[W]

Seznam obrázků

Obr. 2-1 Světlo met BMW M3[2]	16
Obr. 2-2 Řez LED diody	18
Obr. 2-3 Vznik bílého světla	18
Obr. 2-4 Voltampérová charakteristika diody[5]	19
Obr. 2-5 Biny LED diody LUW CVBP.CE - propustné napětí[12]	20
Obr. 2-6 Biny LED diody LUW CVBP.CE - svítivost[12]	20
Obr. 2-7 Biny LED diody LUW CVBP.CE - škálování barev[12]	21
Obr. 2-8 Snižující DC/DC měnič	23
Obr. 2-9 Zvyšující DC/DC měnič	23
Obr. 2-10 Invertující DC/DC měnič	24
Obr. 2-11 Synchronní snižující měnič [19]	24
Obr. 3-1 LED KW CULNM1.TG[21]	26
Obr. 3-2 Voltampérová charakteristika vybrané LED diody při teplotě 25 °C [21].	26
Obr. 3-3 Závislost relativní změny napětí na teplotě při proudu 3 A[21]	27
Obr. 3-4 Biny LED diody KW.CULNM1.TG[21]	28
Obr. 3-5 Popis obvodu TPS92515[22]	30
Obr. 3-6 Typické zapojení TPS92515[22]	31
Obr. 3-7 Schéma zapojení TPS92515 v programu PSpice	33
Obr. 3-8 Průběh napětí a proudu při $U_{in} = 9 \text{ V}$	33
Obr. 3-9 Průběh napětí a proudu při $U_{in} = 13,5 \text{ V}$	34
Obr. 3-10 Průběh napětí a proudu při $U_{in} = 16 \text{ V}$	34
Obr. 3-11 Závislost frekvence na vstupním napětí[22]	35
Obr. 3-12 Výstupní napětí a proud v závislosti na čase při $V_{IN}=13,5 \text{ V}$	35
Obr. 3-13 Analýza Monte Carlo	36
Obr. 3-14 Popis obvodu MAX20050[23]	37
Obr. 3-15 Typické zapojení obvodu MAX20050[23]	38
Obr. 3-16 Snížení indukčnosti v závislosti na proudu[24]	41
Obr. 3-17 Vstupní část obvodu	42
Obr. 3-18 Hlavní výkonová část obvodu TPS92515	43
Obr. 3-19 Hlavní výkonová část obvodu MAX20050	43

Obr. 3-20 Závislost snímacího napětí na V_{IADJ} TPS92515[22]	44
Obr. 3-21 Dělič pro nastavení lineární regulace TPS92515	45
Obr. 3-22 Závislost snímacího napětí na V_{REFI} MAX20050[23].....	45
Obr. 3-23 Dělič pro nastavení lineární regulace MAX20050.....	45
Obr. 3-24 Výstupní blok vlevo TPS92515 a vpravo MAX20050	46
Obr. 3-25 Obvodové zapojení LED modulu.....	46
Obr. 3-26 Vyrobené vzorky v.01	47
Obr. 3-27 LED modul v.01	47
Obr. 4-1 Základní průběhy při U_{IN} 9 V.....	49
Obr. 4-2 Základní průběhy při U_{IN} 13,5 V.....	49
Obr. 4-3 Základní průběhy při U_{IN} 16 V.....	49
Obr. 4-4 Závislost účinnosti na změně vstupního napětí.....	50
Obr. 4-5 EMC měření bez použití filtru pro obvod TPS92515 verze 1.....	51
Obr. 4-6 EMC měření s použitím filtru pro obvod TPS92515 verze 1	51
Obr. 4-7 EMC měření s doladěným filtrem pro obvod TPS92515 verze 1	52
Obr. 4-8 Rozložení teplot na obvodu TPS92515 verze 1	52
Obr. 4-9 Základní průběhy při U_{IN} 9 V.....	53
Obr. 4-10 Základní průběhy při U_{IN} 13,5 V.....	54
Obr. 4-11 Základní průběhy při U_{IN} 16 V.....	54
Obr. 4-12 Závislost účinnosti na změně vstupního napětí.....	55
Obr. 4-13 EMC měření bez použití filtru pro obvod MAX20050 verze 1	55
Obr. 4-14 EMC měření s použitím filtru pro obvod MAX20050 verze 1	56
Obr. 4-15 Rozložení teplot na obvodu MAX20050 verze 1	56
Obr. 4-16 Rozložení teplot na LED modulu verze 1	57
Obr. 4-17 Vzorek TPS92515 verze 2.....	58
Obr. 4-18 Základní průběhy při U_{IN} 13,5 V.....	58
Obr. 4-19 Závislost účinnosti na změně vstupního napětí.....	59
Obr. 4-20 Náběh obvodu do ustáleného stavu TPS92515	59
Obr. 4-21 EMC měření s použitím filtru pro obvod TPS92515 verze2	60
Obr. 4-22 Rozložení teplot na obvodu TPS92515 verze 2	61
Obr. 4-23 Vzorek MAX20050 verze 2.	61
Obr. 4-24 Základní průběhy při U_{IN} 13,5 V	62

Obr. 4-25 Závislost účinnosti na změně vstupního napětí.....	63
Obr. 4-26 EMC měření s použitím filtru pro obvod MAX20050 verze 2	63
Obr. 4-27 Porovnání 1. a 2. vzorku obvodu MAX20050	64
Obr. 4-28 Rozložení teplot na obvodu MAX20050 verze 2	64
Obr. 4-29 Rozložení tepelných odporů[27]	65
Obr. 4-30 LED modul s chladičem 2,5 K/W	68
Obr. 4-31 Klimatická komora	69
Obr. 4-32 Vzorek TPS92515 s LED modulem s DPS FR4	70
Obr. 4-33 Vzorek MAX20050 s LED modulem s DPS FR4.....	71
Obr. 4-34 Vzorek TPS92515 s LED modulem s DPS Al.....	72
Obr. 4-35 Vzorek MAX20050 s LED modulem s DPS Al	73

Seznam tabulek

Tab. 2-1 Používané LED	21
Tab. 3-1 Tabulka rozsahů napětí.....	28
Tab. 3-2 Výběr integrovaných obvodů	29
Tab. 3-3 Vypočtené hodnoty pro IC TPS92515	32
Tab. 3-4 Odečtené hodnoty ze simulací.....	34
Tab. 3-5 Změna proudu v závislosti na změně indukčnosti	35
Tab. 3-6 Tabulka doporučených hodnot externích součástek[23].....	38
Tab. 3-7 Hodnoty externích součástek v závislosti na napětí.....	39
Tab. 3-8 Hodnoty externích součástek.....	39
Tab. 3-9 Rozptyl proudu	40
Tab. 4-1 Hodnoty dané simulací.....	60
Tab. 4-2 Naměřené hodnoty	60
Tab. 4-3 Teploty na komponentech vzorek TPS92515, LED modu s DPS FR4.....	70
Tab. 4-4 Teploty na komponentech vzorek MAX20050, LED modul s DPS FR4 ..	71
Tab. 4-5 Teploty na komponentech vzorek TPS92515, LED modul s DPS Al.....	73
Tab. 4-6 Teploty na komponentech vzorek MAX20050, LED module s DPS Al ...	74
Tab. 4-7 Srovnání vzorků	74

1. ÚVOD

Světlomety v automobilech prošly za dobu své existence velmi značným vývojem „od prapůvodních olejových lamp v prvních automobilech, přes klasické a halogenové žárovky až po dnešní komplexní zapojení i s desítkami LED diod”. Za poslední desetiletí se světlomety staly výrazně komplikovanějšími zařízeními, jež obsahují větší množství jak mechanických součástí, tak optických prvků a elektronických modulů. V dnešní době jsou nejpopulárnějším zdrojem světla LED diody. Jedná se o elektronické součástky na bázi polovodičů, které mají velmi výhodné světelné parametry. Na rozdíl od klasických či halogenových žárovek vynikají vyšší účinností a zároveň delší životností. Pro dosažení stabilních parametrů je nutné zajistit konstantní proud, který získáme realizací kvalitního proudového zdroje. Mezi poslední trendy patří využívání vysoko výkonových LED diod. Ty vyžadují buzení vysokým proudem v řádu jednotek ampér.

Tato diplomová práce se zabývá návrhem dvou budičů založených na snižující topologii měničů pro vysoko výkonové LED diody. Jeden z těchto budičů disponuje synchronním usměrňením, naopak druhý měnič je bez této funkcionality.

Diplomová práce nejdříve rozebírá teorii LED diod s následným výběrem LED pro konstrukci LED modulu.

V další kapitole jsou teoreticky rozebrány základní topologie budičů.

Následující část rozebírá výběr vhodných integrovaných obvodů, které splňují požadavky zadané v této diplomové práci. Pro jeden integrovaný obvod jsou provedeny simulace a optimalizace obvodu. Na návrh obou obvodů jsou kladeny kritéria pro použití v automobilovém průmyslu, z čehož vyplývají problémy v oblasti elektromagnetické kompatibility, odolnosti vůči širokému rozpětí teplot, odolnosti vůči vibracím a v nejdůležitější vlastnosti pro automobilový průmysl, tedy spolehlivosti zařízení.

Následně je popsán vývoj funkčních vzorků a popis řešení vzniklých problémů, optimalizace vzorků a detailní otestování z hlediska funkčnosti, účinnosti, EMC a teplotního zatížení.

Poslední kapitola si klade za cíl celkové srovnání obou navržených vzorků a zhodnocení dosažených výsledků.

2. SOUČASNÝ STAV

Moderní přední světlomet musí splňovat velice přísná pravidla především z důvodu bezpečnosti. Jedná se o velice důležitý prvek automobilu. Proto musí být výroba velice precizní a musí splňovat daná kritéria, jako například světelnost, účinnost, spolehlivost. Další parametry, které musí splňovat záleží hlavně na zákazníkovi a domluvě mezi ním a firmou.



Obr. 2-1 Světlomet BMW M3[2]

Základní funkce předního světlometu:

- DRL – daytime running light – denní světlo
- POS – position light – poziční světlo
- TI – turn indicator – blinkr
- HB – high beam – dálkové světlo
- LB – low beam – tlumené světlo

Rozšířené funkce předního světlometu:

- Dálkové přídavné světlo
- Noční vidění
- Rohové světlo
- Dynamický BiXenon dálkové
- Dynamický BiXenon tlumené
- Mlhové světlo

Složení světlometu:

- Xenonová výbojka pro potkávací a dálkové světlo
- LED denní / LED poziční světlo
- LED blinkr
- LED obrysové světlo
- Řídící jednotky
- Chladiče LED diod

2.1 Proces vzniku výrobku

Proces vzniku výrobku lze stručně rozdělit do osmi bodů.

1. Představa zákazníka
2. Zadání zákazníka
3. Opticko-mechanický koncept světlometu

4. Zástavba světlometu
5. Virtuální prototyp
6. Kompletní modely (CAD)
7. Zkoušky, měření a certifikace
8. Sériová výroba

V porovnání se zadním světlometem je návrh složitější. Přední světlomet musí splňovat přísnější kritéria na bezpečnost, teplotní rozsah a jiné.

2.2 LED světla v automobilech

Jako zdroje světla v automobilových světlometech jsou využívány klasické žárovky, halogenové žárovky, xenonové výbojky, LED diody a nejnovějším zdrojem je i laserová dioda.

Žárovky se používají již velice zřídka. Nejčastěji jsou použity jako zdroj světla pro blinkry.

Vizí je, že se do pár let budou využívat pouze halogenové žárovky, LED osvětlení a pomocný laser. Jsou to ovšem prozatím jen předběžné vize. Xenonové výbojky jsou již na ústupu, a to z důvodů potřeby řídicí jednotky, kratší životnosti a dalších.

Budoucností je tedy hlavně LED osvětlení a nasazení full LED (plného LED) tedy celý světlomet jen s osvětlením pomocí LED a možného přidání laseru pro prodloužení dálkového světla.

V této práci bude dále řešeno pouze LED osvětlení, které je vizí budoucnosti a je nutné se touto problematikou více zabývat.

2.2.1 LED

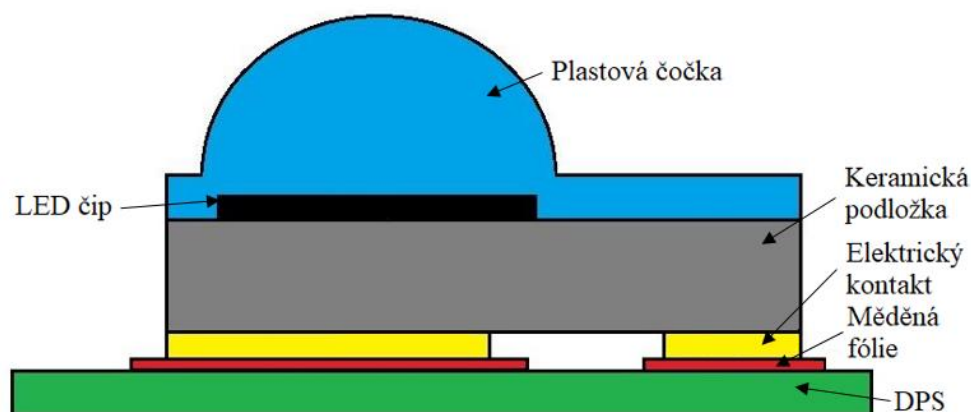
Technologie LED diod je stará více než 40 let, ale teprve v posledních letech se dostaly do popředí a hojně se využívají.

LED diody jsou moderní elektronické komponenty se širokým využitím od automobilového průmyslu po využití v domácnostech apod. Při předepsaných podmínkách jsou výkonným zdrojem světla s dlouhou životností.

Anglický název Light – Emitting Diode, ze kterého vznikla zkratka LED v českém překladu znamená elektroluminiscenční dioda, tedy dioda emitující světlo. Například oproti klasické žárovce dosahuje LED vysoké účinnosti, je vysoce odolná, levná na výrobu a tím i hojně využívaná v moderní elektrotechnice.[2]

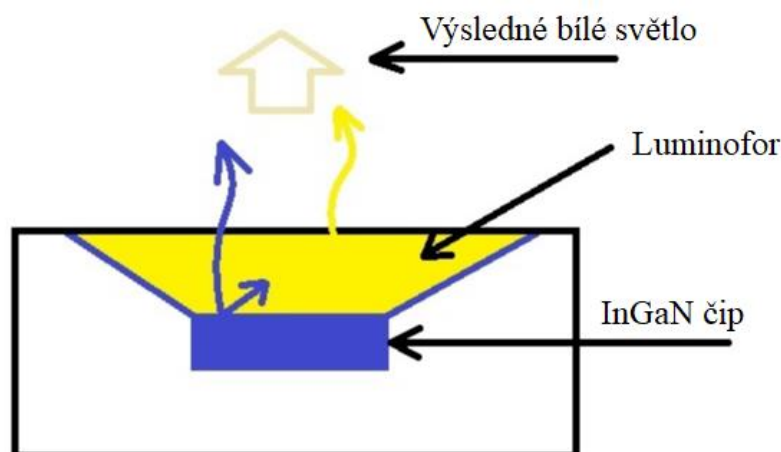
2.2.2 Technologie LED

LED je Elektronická součástka s polovodičovým PN přechodem, který při průchodu elektrického proudu produkuje optické záření. Spektrum závisí na chemickém složení polovodiče. Účinnost LED diody je větší než u klasické žárovky[4]. Na Obr. 2-2 je vidět řez LED diodou, která je upevněna na desce plošných spojů (DPS) přes měděnou fólii na elektrický kontakt. Na elektrickém kontaktu je keramická podložka a na ní už je samotný LED čip zalitý plastovou čočkou.



Obr. 2-2 Řez LED diody

U automobilových světlometů se nejvíce používá bílá LED dioda jak pro hlavní funkce, tak pro vedlejší (například denní svícení). Bílá barva světla vzniká kombinací modré a žluté barvy. Povrch čipu je pokryt luminoforem, který mění vlnovou délku vyzařovaného světla a tím i jeho barvu. InGaN čip emituje modré světlo, luminofor aktivovaný modrým světlem září žlutě a kombinace těchto dvou složek je výsledné bílé světlo.[2]



Obr. 2-3 Vznik bílého světla

2.2.3 Materiály pro výrobu LED čipů

Mezi nejznámější materiály pro výrobu LED čipů se řadí AlInGaP a InGaN.

AlInGaP (Aluminium indium gallium phosphide – fosfidy galia, india a hliníku)

- Starší technologie, úzké zakázané pásmo
- Nejdou realizovat krátké vlnové délky (modrá)
- Nelze získat bílé světlo
- Dostupné barvy: zelená, žlutá, oranžová, červená (podle procentuálního zastoupení jednotlivých prvků)

InGaN (Indium gallium nitride – nitrid galia a india)

- Nová technologie
- Čipy se vyvíjejí a roste světelný výstup (účinnost)
- Dostupné barvy: modrá, zelená, bílá, ve vývoji oranžová
- Použití: tlumené i dálkové světlo, denní světlo (DRL)

K dispozici jsou různé druhy bílých LED, obvykle značené jako cool white, warm white. Blinky obsahují žlutou LED s luminoforem.

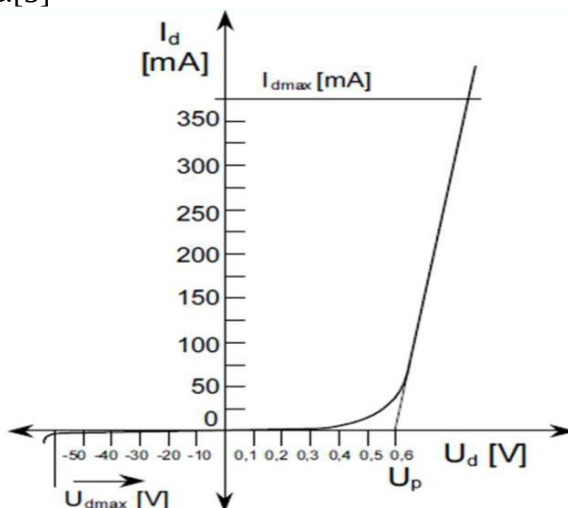
Pro výrobu výkonných čipů se využívá polovodičový materiál InGaN.[2]

2.2.4 VA charakteristika LED

VA charakteristika znázorňuje závislost protékajícího stejnosměrného proudu na přiloženém stejnosměrném napětí. Průběh diody je viditelný v prvním a třetím kvadrantu.

Ve třetím kvadrantu je dioda v závěrném směru až do napětí U_{BR} , po překročení tohoto napětí dochází k destruktivnímu průrazu diody. Nastanou trvalé (nevratné) změny v krystalové mřížce a dioda se zničí.

V propustném směru značíme U_P jako prahové napětí, po jehož překročení začne diodou protékat proud.[5]



Obr. 2-4 Voltampérová charakteristika diody[5]

Pro návrh LED budiče je důležité propustné napětí a proud dané LED diody. Dle těchto parametrů je známý výstup budiče a můžeme dále zvolit jak konfiguraci zapojení, tak typ integrovaného obvodu.

Znatelný vliv na tyto parametry má změna teplot. S narůstající teplotou se napětí na přechodu snižuje, naopak při snižování teploty propustné napětí narůstá. Určuje se proto referenční napětí při teplotě 25 °C.

K degradaci LED diody dochází vlivem příliš vysoké teploty. Životnost LED je daná poklesem svítivosti (obvykle o 20 – 30 % oproti nominální hodnotě), nebo celkovým selháním (zkrat, přerušený obvod). Při krátkodobých teplotních výkyvech se svítivost LED vrátí na požadovanou hodnotu a bude mít dále stejné vlastnosti.

Životnost dnešních LED je závislá především na jejím způsobu provozu, tedy na velikosti průchodu elektrického proudu a na velikosti provozní teploty. Předpokládána

životnost bývá udávána 50 až 100 tisíc hodin provozu, přičemž může být značně zkrácena při příliš vysokém pracovním proudu, nebo nesprávným chlazením.[1][2]

2.2.5 Binování LED diod

Výroba LED čipů je složitý technologický proces, při kterém vždy nelze vyrobit LED čipy se stejnými parametry. Vyrobené LED čipy se dále rozdělují do skupin dle svých dominantních vlastností a tyto skupiny se nazývají biny. Každý bin má své toleranční pásmo. [10]

LED bin tedy upřesňuje parametry dané LED diody. Konkrétní bin se skládá z informací o napětí na přechodu, svítivosti a barvě. Biny jsou vždy uvedeny v katalogovém listu. Při sériové výrobě je nezbytné nastavit vhodný proud na základě použitého LED flux binu tak, aby byla dosažena vždy stejná žádaná svítivost. K tomu se používá tzv. binovací rezistor, který je dán kódovací tabulkou.

Na Obr. 2-5 je rozdělení binů LED diody LUW CVBP.CE dané katalogovým listem [12]. Obr. 2-6 poukazuje na binování z hlediska svítivosti a Obr. 2-7 udává chrominanční binování.

Group	Forward Voltage ⁴⁾	Forward Voltage ⁴⁾
	$I_F = 350 \text{ mA}$ min. V_F	$I_F = 350 \text{ mA}$ max. V_F
8E	2.75 V	3.00 V
8F	3.00 V	3.25 V
8G	3.25 V	3.50 V

Obr. 2-5 Biny LED diody LUW CVBP.CE - propustné napětí[12]

Group	Luminous Flux ¹⁾	Luminous Flux ¹⁾	Luminous Intensity ⁶⁾
	$I_F = 350 \text{ mA}$ min. Φ_V	$I_F = 350 \text{ mA}$ max. Φ_V	$I_F = 350 \text{ mA}$ typ. I_v
5L	112 lm	125 lm	39 cd
6L	125 lm	140 lm	44 cd
7L	140 lm	159 lm	49 cd
8L	159 lm	180 lm	56 cd

Obr. 2-6 Biny LED diody LUW CVBP.CE - svítivost[12]

Group	Cx	Cy	Group	Cx	Cy	Group	Cx	Cy
GM	0.3178	0.3004	HM	0.3258	0.3154	IM	0.3338	0.3304
	0.3086	0.3057		0.3166	0.3207		0.3246	0.3357
	0.3086	0.3097		0.3166	0.3247		0.3246	0.3397
	0.3166	0.3247		0.3246	0.3397		0.3326	0.3547
	0.3198	0.3267		0.3278	0.3417		0.3358	0.3567
	0.3290	0.3214		0.3370	0.3364		0.3450	0.3514

Group	Cx	Cy	Group	Cx	Cy
JM	0.3418	0.3454	KM	0.3498	0.3604
	0.3326	0.3507		0.3406	0.3657
	0.3326	0.3547		0.3406	0.3697
	0.3406	0.3697		0.3486	0.3847
	0.3438	0.3717		0.3518	0.3867
	0.3530	0.3664		0.3610	0.3814

Obr. 2-7 Biny LED diody LUW CVBP.CE - škálování barev[12]

2.2.6 Používané LED diody v automobilové technice

Dostupných LED diod je v dnešní době velké množství. Používají se i vysoce svítivé LED s proudy okolo 1 A. V tabulce číslo Tab. 2-1 je malý přehled nejpoužívanějších LED diod, které se objevují v projektech firmy AL. Parametry diod byly sepsány dle katalogových listů, které lze dohledat v [6][7][8][9].

Tab. 2-1 Používané LED

Výrobce	Název	Maximální proud [mA]	Testovací proud [mA]	Světelný tok [lm]	Rozsah teplot na čipu [°C]
Lumileds	Luxeon FX Plus Cool White	1500	1000	270÷340	-40÷130
Osram	OSLON Black Flat LUW HWQP	1500	1000	280÷450	-40÷125
Nichia	NCSW170B T	1200	1000	350÷300	-40÷125
Seoul	SZ5-P series	1000	350	118,5 ÷ 160	-40÷125

2.3 Napájecí obvody pro buzení LED

Napájecí obvody pro buzení LED jsou elektronické obvody, které z proměnného vstupního napětí vytvoří na výstupu konstantní proud, nezbytný pro napájení LED. Dále jsou kladeny požadavky i na výstupní napětí, které může být galvanicky oddělené, nižší, vyšší, nebo invertované oproti napětí vstupnímu. Tyto parametry závisí na druhu topologie, které budou probrány dále v této kapitole.[13]

V automobilovém průmyslu se využívají lineární budiče nebo spínané měniče (snižující, zvyšující, invertující). Vše se odvíjí dle zadání projektu. Základním požadavkem je výstupní proud.

2.3.1 Lineární budič

Jedná se o lineární regulátor, který dodává konstantní proud žádané hodnoty. Je výhodný hlavně kvůli jednoduchosti zapojení. Použitá polovodičová součástka funguje pouze v lineární oblasti převodní charakteristiky. Nevýhod je více, jsou jimi například nízká účinnost, velký ztrátový výkon při větších výstupních výkonech. Bohužel, při vyšších požadavcích na zmíněné parametry je i rapidně vyšší cena zařízení. [14][15]

2.3.2 Spínaný měnič

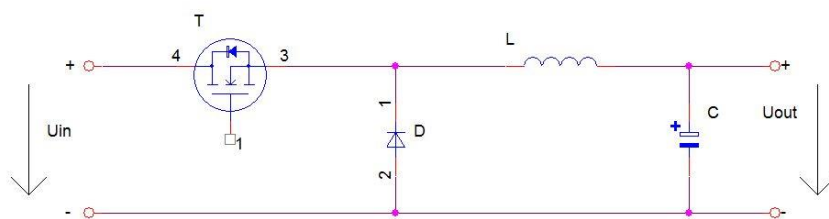
Základem spínaného měniče je přeměna energie s využitím akumulčního prvku (typicky cívky) a řízeného spínače.

Spínané měniče oproti lineárním měničům dosahují ve většině případů vyšší účinnosti. Výstupní proud může dosahovat relativně vysokých hodnot, také rozsah napětí může být v širokých mezích. Nevýhodou je složitost zapojení, tedy i nutnost použití více součástek, což vytváří složitost návrhu. Dále budou vysvětleny základní druhy spínacích měničů. [14][15]

2.3.3 Snižující DC/DC měnič

Snižující DC/DC měnič se v anglické i české literatuře označuje jako „buck“ nebo „step down“. Na výstupu dodává napětí menší než na jeho vstupu. Spínač T může být realizován například pomocí tranzistoru. V obvodu tedy mohou nastat dva stavy. Pokud je spínač T sepnut, cívkou L prochází proud a na zátěži roste napětí. Doba nabíjení je tím menší, čím je větší kapacita a indukčnost. Pokud dojde k rozepnutí spínače, snaží se cívka udržet směr a velikost svého proudu. Při sepnutém spínači byla energie akumulována do cívky. Tato energie se teď mění na dobíjecí proud kondenzátoru C. Aby mohl tento proud protékat obvodem, musí zde být zapojena dioda D, jak je vidět na schématu zapojení.

Regulaci napětí provedeme dobou spínání. Budeme-li při stejné zátěži prodlužovat dobu, kdy je spínač sepnut (označení t_{ON}), výstupní napětí může teoreticky vzrůst až blízko k hodnotě U_{in} . Stejně pokud se bude doba vypnutí spínače zkracovat (označení t_{OFF}) výstupní napětí také poroste. Pokud je ale požadavek na snížení výstupního napětí, musíme snížit dobu t_{ON} , případně zvýšit dobu t_{OFF} . [14][15]

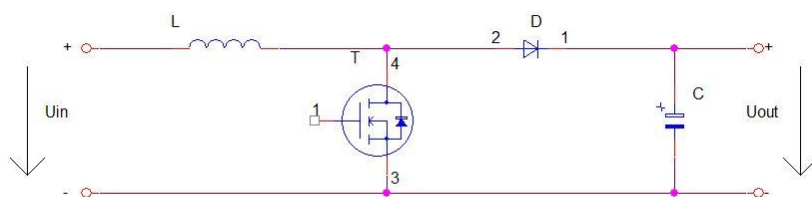


Obr. 2-8 Snižující DC/DC měnič

2.3.4 Zvyšující DC/DC měnič

V zahraniční i české odborné literatuře lze zvyšující DC/DC měnič nalézt pod názvy „step-up“ nebo „boost“. Cívka L je i zde zapojena se vstupem do série, ale spínač S je zapojen paralelně a k zemi tak, že přizemňuje střední uzel. I v tomto obvodu nastávají dva stavy jako u předešlého měniče, a to doba t_{ON} (spínač je sepnut) a t_{OFF} (spínač je rozepnut). Během doby t_{ON} se kondenzátor C vybíjí do zátěže, dioda v obvodu slouží k tomu, aby se kondenzátor nevybíjel i přes sepnutý spínač. Dioda je při sepnutém spínači polarizována v závěrném směru a nemůže přes ni protékat proud. Ze zdroje U_{IN} teče proud I_1 přes cívku a spínač. Energie je akumulována v magnetickém poli cívky, proud I_1 indukčností cívky narůstá až do okamžiku, kdy je spínač rozepnut. Při této změně se cívka snaží udržet směr a velikost proudu I_1 a vzniká na ní indukované napětí. Indukované napětí závisí na hodnotě indukčnosti cívky L , na velikosti proudu I_1 a na rychlosti spínání spínače. Proto indukované napětí není amplitudově omezeno a může teoreticky nabývat libovolně vysokých hodnot. Když je tedy sečteno vstupní napětí a indukované napětí je výsledkem výstupní napětí, které je vždy vyšší než vstupní napětí.

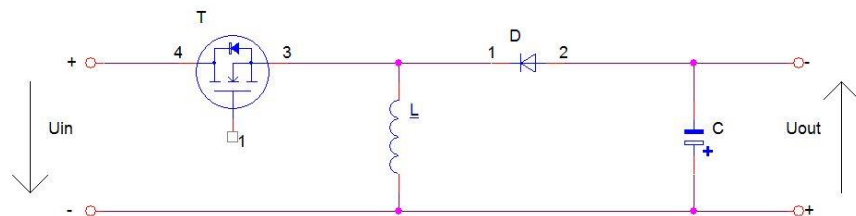
Pokud roste doba t_{ON} , roste proud I_1 i indukované napětí, ale zároveň klesá výstupní napětí U_{out} dlouhým vybíjením kondenzátoru. Pokud roste doba t_{OFF} , je kondenzátor déle nabíjen, ale pouze za podmínky, že velikost vstupního napětí plus indukované napětí $U_{IN} + U_{ind}$ je větší než součet výstupního napětí s napětím na diodě v propustném směru $U_{out} + U_F$. [14][15]



Obr. 2-9 Zvyšující DC/DC měnič

2.3.5 Invertující DC/DC měnič

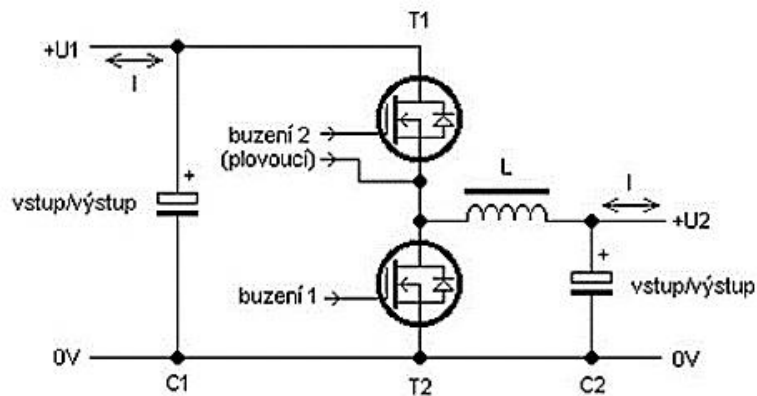
Invertující DC/DC měnič bývá v odborné literatuře označován jako „buck-boost“. Schéma zapojení obsahuje stejné komponenty jako předchozí DC/DC měniče. Při sepnutém spínači je dioda polarizovaná záporně a na cívce se akumuluje energie. V druhé fázi, tedy po rozeznutí spínače, se na cívce otočí polarita napětí, dioda je polarizovaná propustně a nabije kondenzátor. Výstupní napětí je invertované. [14][15]



Obr. 2-10 Invertující DC/DC měnič

2.3.6 Synchronní snižující měnič

V tomto zapojení je dioda nahrazena dalším tranzistorem, zvaným synchronním. Zapojení je na Obr. 2-11. Výhodou je omezení úbytku napětí, které je na sepnutém tranzistoru menší než na diodě, a tedy zvýšení celkové účinnosti obvodu. Nevýhodou je, že při nesprávném řízení může nastat okamžik, kdy jsou oba tranzistory otevřeny, což vytváří zkrat zdroje proti zemi. Proto se při nastavení řízení vytváří prodleva, kdy jsou na chvíli oba tranzistory uzavřeny. To ale vytváří problém pro nemožnost protékání proudu, pokud je proud na cívce větší, než dokáže přenést integrovaná dioda tranzistoru. V tomto případě se zapojuje do obvodu další dioda paralelně se synchronním tranzistorem. [19]



Obr. 2-11 Synchronní snižující měnič [19]

3. KONSTRUKCE LED DRIVERU

Navrhovaný LED driver je obvodem, který dodává stabilní výstupní proud (označován jako I_{LED}).

Hotový LED driver je podroben různým elektrickým, teplotním, EMC a dalším testům, které jsou dané projektem. Každá komponenta použitá do takového zařízení musí splnit automobilovou kvalifikaci, která bude vysvětlena v následující podkapitole. Zařízení musí být robustní, na odolnost jsou kladeny velké požadavky.

LED driver musí být odolný na rušení a sám nesmí být zdrojem rušení. Musí být splněna norma EMC CISPR 25, což je norma, která udává, že navrhované zařízení nesmí být zdrojem rádiového signálu. Proto se nejčastěji používá vstupní spínací frekvence 400 kHz až 500 kHz nebo frekvence vyšší jak 1,9 MHz. Důvod je ten, že v daných pásmech jsou normou dány volnější limity na úroveň šumu. Při konstrukci LED driveru bude použita spínací frekvence 400 kHz.

3.1 Kvalifikace pro automobilový průmysl

Označení AEC z anglického Automotive Electronics Council – rada automobilového průmyslu.

Dokumenty AEC obsahují materiály, které byly připraveny, přezkoumány a schváleny prostřednictvím AEC technické komunity.

V automobilovém průmyslu je nutné tyto požadavky na kvalifikaci splňovat. Především při výrobě předních světlometů je požadováno pravidla Automotive Qualification znát a do návrhu LED driveru použít právě komponenty, které tuto kvalifikaci splňují.

Díky zkouškám a testování je dané, že je komponenta AEC-QXXX kvalifikována. Pro ESD kvalifikaci se doporučuje, aby bylo napájecí napětí specifikováno v dodacím listu. Tento dodací list umožní dodavatelům klasifikovat komponentu jako např.: AEC-Q100 kvalifikovaný pro klasifikaci ESD2.

Pro tuto práci je relevantní se seznámit se čtyřmi kategoriemi této kvalifikace. [17]

AEC-Q100: Kvalifikace je určena pro integrované obvody

AEC-Q101: Kvalifikace pro polovodičové součástky

AEC-Q102: Kvalifikace pro LED

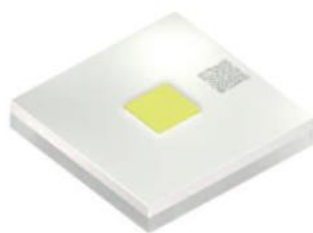
AEC-Q200: Kvalifikace pro pasivní komponenty

3.2 Výběr LED diody

Pro výběr LED diody byla zvolena firma Osram, která patří mezi dodavatele firmy AL. Jejich nabídka je opravdu široká, proto byla nutná další specifikace a filtrace dostupných LED diod a samozřejmě splnění automobilové kvalifikace.

Dle zadání byla hledána LED s dovoleným proudem minimálně 1,8 A. Tato LED dioda byla vybírána z interní databáze AL.

Byla vybrána LED dioda KW CULNM1.TG, která je na Obr. 3-1.

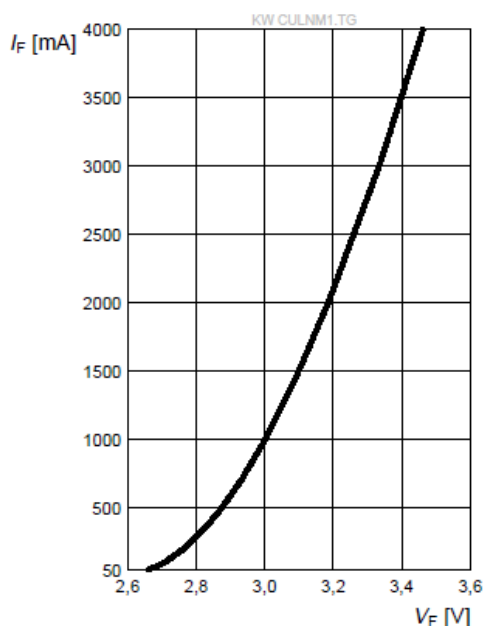


Obr. 3-1 LED KW CULNM1.TG[21]

Parametry LED diody dané katalogovým listem je nutné přepočítat. Katalogový list uvádí hodnoty vztažené k proudu 3 A, ale v této práci je požadován proud 1,8 A. Jak již bylo uvedeno v teorii, je nutné se zaměřit i na změny parametrů součástek při změně teplot.

Prvním krokem bylo vyhledání napětí na přechodu při proudu 1,8 A, dále byly dopočítány mezní hodnoty.

$$I_F = f(V_F); T_J = 25\text{ °C}$$



Obr. 3-2 Voltampérová charakteristika vybrané LED diody při teplotě 25 °C [21]

Na Obr. 3-2 je závislost proudu v propustném směru na napětí na přechodu. Dle toho bylo zjištěno, že pro proud 1,8 A odpovídá propustnému napětí 3,15 V (za teploty 25 °C). Dalším krokem bylo dopočítání mezních hodnot při teplotě 25 °C. Výpočty jsou odvozeny z hodnot pro proud 3 A, které udává katalogový list dané LED diody.

Je nutné zjistit jaký je rozdíl mezi minimální a typickou hodnotou a mezi maximální a typickou hodnotou. Tyto výpočty udávají rovnice číslo (3.1) a (3.2).

$$\Delta U_{\min} = U(\text{typ.}) - U(\text{min.}) = 3,35 - 3,00 = 0,35\text{ V} \quad (3.1)$$

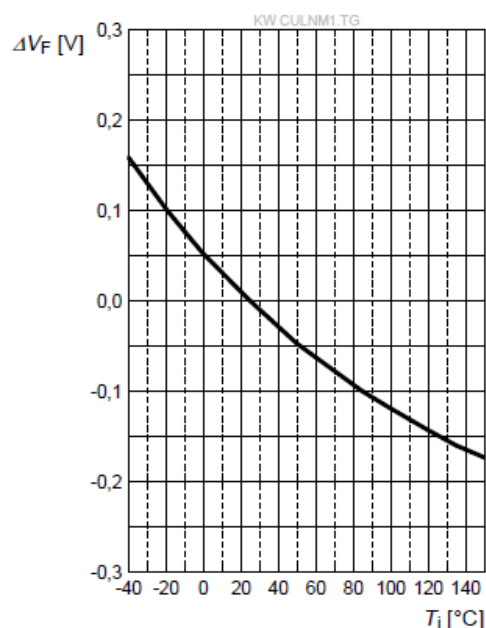
$$\Delta U_{max} = U(typ.) - U(max.) = 3,35 - 3,75 = -0,40 \text{ V} \quad (3.2)$$

Po spočtení těchto rozdílů bylo možné dopočítat maximální a minimální možné napětí na přechodu pro proud 1,8 A při teplotě 25 °C. Příklad je ukázán v rovnicích (3.3) a (3.4).

$$U(min.) = U(typ.) - \Delta U_{min} = 3,15 - 0,35 = 2,80 \text{ V} \quad (3.3)$$

$$U(max.) = U(typ.) + \Delta U_{max} = 3,15 + 0,40 = 3,55 \text{ V} \quad (3.4)$$

$$\Delta V_F = V_F - V_F(25^\circ\text{C}) = f(T_J); I_F = 3000 \text{ mA}$$



Obr. 3-3 Závislost relativní změny napětí na teplotě při proudu 3 A[21]

Na Obr. 3-3 je závislost změny propustného napětí na teplotě při proudu 3 A. Nejdříve bylo nutné z tohoto grafu odečíst hodnoty pro teploty -40 °C a 125 °C. Dále byly hodnoty podle rovnice dané katalogovým listem připočteny k hodnotě napětí při 25 °C. Výpočet je ukázán v rovnicích (3.5) a (3.6) (pro změnu hodnoty typického napětí).

$$U(-40^\circ\text{C}) = U(25^\circ\text{C}) + \Delta U_{-40^\circ\text{C}} = 3,35 + 0,15 = 3,5 \text{ V} \quad (3.5)$$

$$U(125^\circ\text{C}) = U(25^\circ\text{C}) + \Delta U_{125^\circ\text{C}} = 3,35 - 0,15 = 3,2 \text{ V} \quad (3.6)$$

Další hodnoty byly dopočítány dle tohoto principu a výsledky jsou zaznamenány v tabulce 3-1.

Tab. 3-1 Tabulka rozsahů napětí

T [°C]	-40	25	125	-40	25	125
I _F [A]	3	3	3	1,8	1,8	1,8
U _{min.} [V]	3,15	3	2,85	2,95	2,8	2,65
U _{typ.} [V]	3,5	3,35	3,2	3,3	3,15	3
U _{max.} [V]	3,9	3,75	3,6	3,7	3,55	3,4

Hlavním účelem výpočtu všech těchto hodnot bylo zjištění nejhoršího možného případu, který by mohl na LED diodě nastat. To znamená, jaké se na ní při zvoleném pracovním proudu může objevit největší napětí. Největší napětí může nastat při teplotě – 40 °C, a to o hodnotě 3,7 V.

LED dioda má svůj rozsah napěťových i ostatních binů. Tato LED dioda má tři napěťové biny jejich rozsahy jsou ukázány na Obr. 3-4.

Group		
Gruppe	(min.) V _F [V]	(max.) V _F [V]
65	3.00	3.25
B5	3.25	3.50
G5	3.50	3.75

Obr. 3-4 Biny LED diody KW.CULNM1.TG[21]

3.3 Výběr integrovaných obvodů

Dle zadání diplomové práce bylo nutné vybrat dva integrované obvody. Jeden se synchronním usměrněním a druhý bez této funkcionality. Při výběru se tedy z pohledu relevantnosti dbá na to, aby bylo konečné porovnání struktur co nejprůkaznější a smysluplné. Zadané parametry:

- Vstupní napětí: 9-16 V
- Výstupní proud: 1,8 A
- Frekvence: 400 kHz
- Topologie: snižující (buck)
- AEC-Q
- Teplotní rozsah: -40 až +125 °C

Výběr integrovaných obvodů byl zaměřen na různé dodavatele spolupracující s firmou AL. Problém, který se nejčastěji vyskytoval, byl malý dovolený výstupní proud 1 A, proto byla většina dodavatelů zavrhnuta, a nakonec byly vybrány integrované obvody od firem Maxim integrated a Texas instrument, které mají široké portfolio integrovaných obvodů, a z nich byl vytvořen užší výběr. Dle zadaných parametrů bylo obtížnější najít dva porovnatelné integrované obvody. Bez synchronního usměrnění byl větší výběr. Se synchronním usměrněním byl výběr omezenější a složitější.

V předposledním výběru zůstaly čtyři integrované obvody dané Tab. 3-2. V konečném výběru zůstaly pouze dva integrované obvody TPS92515 a MAX20050 (v tabulce jsou zvýrazněny červeně). Parametry těchto dvou integrovaných obvodů budou vysvětleny dále v textu.

Tab. 3-2 Výběr integrovaných obvodů

Integrovaný obvod	MAX20003	MAX20050	LM3409	TPS92515
U_{IN(min)} [V]	3,5	4,5	6	5,5
U_{IN(max)} [V]	36	65	75	42
I_{OUT max} [A]	3	2	5	2
Synchronní usměrnění	ano	ano	ne	ne
T_{j min} [°C]	-40	-40	-40	-40
T_{j max} [°C]	+125	+125	+125	+125
Automotive kvalifikace	ano	Ano	ano	ano
F_{min} [Hz]	220k	400k	-	-
F_{max} [Hz]	2,2M	2,1M	2M	2M

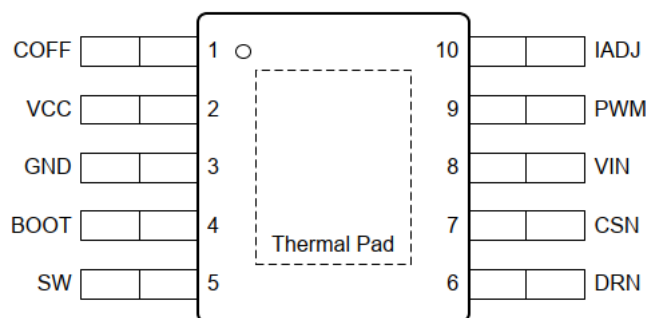
Společnou vlastností pro oba obvody jsou integrované tranzistory. Zde se vyskytují jak výhody, tak i nevýhody této funkcionality. Například výhodou integrovaného spínacího tranzistoru je menší, kompaktnější zapojení a tím i lepší vlastnosti EMC. Naopak nevýhodou je vyšší cena z důvodu integrovaných prvků. Po zvážení těchto parametrů byly zvoleny oba IC s integrovaným tranzistorem.

3.3.1 TPS92515

Integrovaný obvod TPS92515 obsahuje integrovaný NFET tranzistor, rozsah napětí je 5,5 V až 65 V, teplotní rozsah -40 °C až +125 °C, splňuje AEC kvalifikaci, má nastavitelnou frekvenci dle Texas Instrument do 2000 kHz. Použití pro aplikace pro denní svícení, mlhová světla, poziční světlo, světlomet a blinkr.

Integrovaný obvod od firmy Texas Instrument splňuje všechny předem dané parametry. Tento obvod je bez synchronního usměrnění.

Velkou výhodou u tohoto integrovaného obvodu je možnost využití jeho modelu v programu PSpice a vytvoření základních simulací, ze kterých bude dále ukázaná funkčnost zapojení. V praktické části diplomové práce bude porovnání simulací a naměřených reálných hodnot. Popis obvodu a celkové doporučené zapojení je na Obr. 3-5a Obr. 3-6.



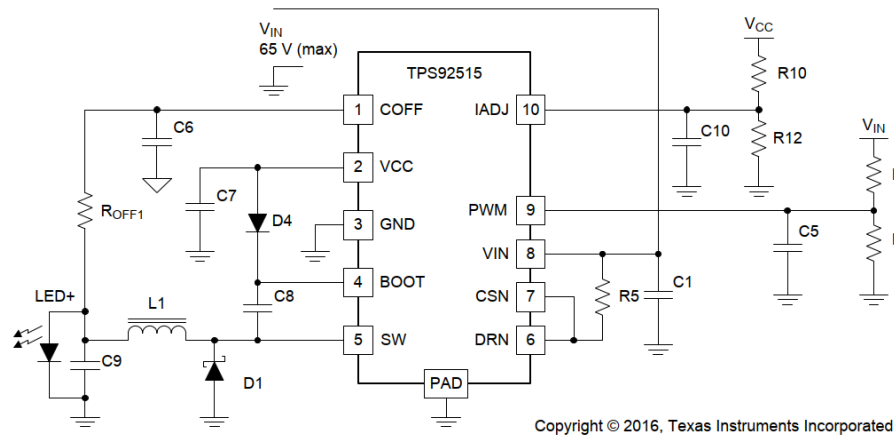
Obr. 3-5 Popis obvodu TPS92515[22]

COFF → připojení rezistoru z U_{OUT} a kondenzátoru do GND nastaví OFF čas
VCC → výstup 5 V regulátoru
GND → uzemnění
BOOT → nastavení vysoké úrovně FET tranzistoru
SW → interní FET zdroj, připojení cívky
IADJ → lineární nastavování výstupního proudu
PWM → regulace výstupního proudu pomocí pulsně šířkové modulace
VIN → připojení vstupního napětí
CSN → připojení snímacího rezistoru negativní pin
DRN → interní FET drain

Regulace doby vypnutí tranzistoru je řízena přes pin C_{OFF} . Na tento pin je připojen odpor, který vytváří zpoždění. Je-li dosaženo prahové hodnoty C_{OFF} 1 V, nebo je doba nabíjení kondenzátoru vyšší než hodnota t_{OFF} , vyprší maximální čas vypnutí a spustí se spínací cyklus. Lineární regulátor má výstup na pinu VCC, který generuje napětí 5 V a obsahuje podpětňové blokování. GND je nulový potenciál obvodu. Keramický kondenzátor by měl být připojen mezi piny BOOT a SW a dioda mezi piny BOOT a VCC, aby byla nastavena vysoká úroveň FET tranzistoru. Typická kapacita, která by měla být použita, je 0,1 μ F. Výstup tranzistoru FET je na pinu označeném SW, zde se také připojí cívka. Pin IADJ umožňuje lineární nastavení výstupního proudu. Je tedy možné, za použití napětňového děliče, regulovat proud do LED. Pokud chceme zvolit maximální možný proud do LED, připojí se tento pin k pinu VCC. Regulace je tedy možná, pokud přivedeme na pin IADJ napětí menší jak 2,2 V. Použití pulsně šířkové modulace je po připojení na pin PWM. Vstupní napětí se připojí k pinu VIN. Snímací rezistor je připojen k pinu CSN a pin DRN ukazuje výstupní drain FET tranzistoru. [22]

Do zapojení bude použit integrovaný s přesným označením TPS923515HV-Q1.

Na obrázku Obr. 3-6 je ukázáno základní zapojení tohoto obvodu.



Obr. 3-6 Typické zapojení TPS92515[22]

Dle katalogového listu [22] byly dopočítány hodnoty externích součástek.

Externí součástky byly napočítány pro všechny hraniční hodnoty vstupního napětí a to pro 9 V (zde musí zapojení neprodleně začít fungovat), 13,5 V (normálová hodnota) a pro 16 V (nejvyšší napětí pracovního rozsahu). Na výstupu budou dvě LED diody zapojené do série, proto bude výstupní napětí na LED v rozsahu 5,9 V až 7,4 V.

Výpočet střídavy:

$$D = \frac{U_{LED}}{U_{IN} \cdot \eta} \quad (3.7)$$

Kde U_{LED} je výstupní napětí na LED diodách, V_{IN} je vstupní napětí a η je účinnost, která je katalogovým listem doporučena na hodnotu 0,9.

$$t_{OFF} = \frac{1}{f_{SW}} \cdot [1 - D] \quad (3.8)$$

Spínací frekvence f_{SW} je 400 kHz.

Cívka:

$$\Delta I_{L-PP} = I_{OUT} \cdot r \quad (3.9)$$

$$L = \frac{U_{LED} \cdot t_{OFF}}{\Delta I_{L-PP}} \quad (3.10)$$

ΔI_{L-PP} je delta proudu pro zvlnění na cívce. Zvlnění r bude uvažováno 20 %.

$$R_{OFF} = \frac{t_{OFF}}{-C_{OFF} \left[\ln \left(1 - \frac{U_{OFF}}{U_{LED}} \right) \right]} \quad (3.11)$$

Výpočet snímacího rezistoru, který určuje proud do LED diod.

$$R_{SENSE} = \frac{\frac{U_{IADJ}}{10}}{I_{LED} + \frac{\Delta I_{L-PP}}{2}} \quad (3.12)$$

Špičková hodnota proudu protékajícího cívkou:

$$I_{L(PEAK)} = \frac{\frac{U_{IADJ}}{10}}{R_{SENSE}} \quad (3.13)$$

Minimální vstupní kapacita

$$C_{IN-MIN} = \frac{I_{LED} \cdot \left(\frac{1}{f_{SW}} - t_{OFF} \right)}{\Delta U_{IN-PP}} \quad (3.14)$$

Do tabulky Tab. 3-3 byly doplněny vypočítané hodnoty dle předchozích rovnic.

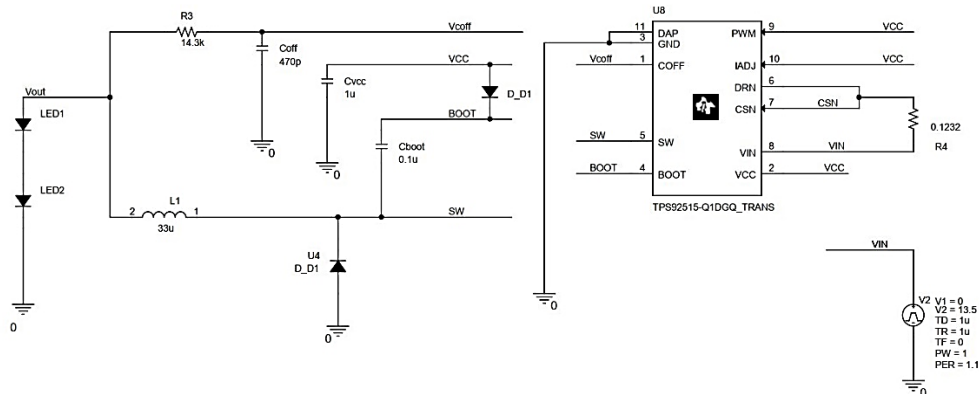
Tab. 3-3 Vypočtené hodnoty pro IC TPS92515

Veličina	U_{IN} = 9 V	U_{IN} = 13,5 V	U_{IN} = 16 V
D [-]	0,9	0,6	0,5
t_{OFF} [μs]	0,22	0,98	1,22
L [μH]	4,0	20,0	25,0
R_{OFF} [kΩ]	31,7	14,3	17,8
R_{SENSE} [Ω]	0,121	0,121	0,121
I_{L(PEAK)} [A]	1,98	1,98	1,98
C_{IN-MIN} [μF]	2,3	1,0	0,7

Volba hodnoty indukčnosti

Před spuštěním simulací je nutné si uvědomit, že cívka má nejčastěji toleranci 20 %, proto byla tato hodnota indukčnosti navýšena, jak je ukázáno v rovnici 3.15. Vychází cívka s indukčností 24 μH, pro typickou hodnotou napětí. S protékajícím proudem indukčnost ještě o něco poklesne a s přihlédnutím k indukčnosti při napětí 16 V byla vybrána cívka s indukčností 33 μH. Simulace budou provedeny s touto hodnotou.

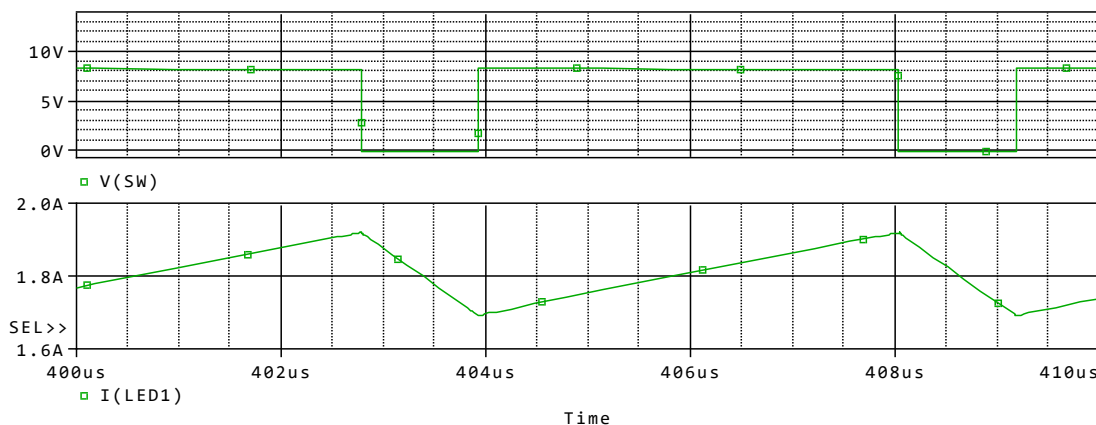
$$L_{20\%} = L \cdot 1,2 = 20 \cdot 1,2 = 24 \mu H \quad (3.15)$$



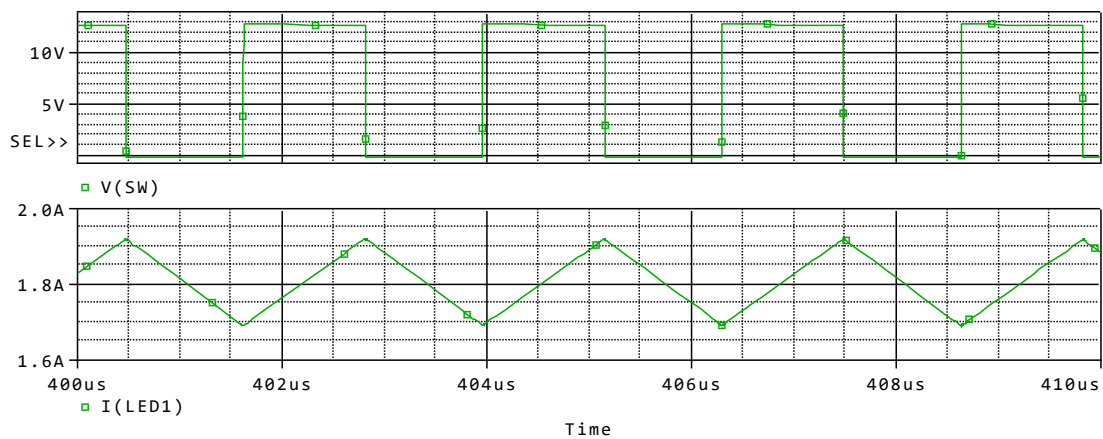
Obr. 3-7 Schéma zapojení TPS92515 v programu PSpice

V programu PSpice byly ověřeny základní principy. Ověření parametrů obvodu bylo pro krajní hodnoty vstupního napětí (9 V a 16 V) a pro hodnotu typického napětí 13,5 V. Na Obr. 3-8, Obr. 3-9 a Obr. 3-10 je vidět průběh napětí na výstupu tranzistoru a průběh proudu LED diodami. V Tab. 3-4 jsou zaznamenány hodnoty odečtené z grafů a spočtené programem PSpice. Důležité je si povšimnout změny frekvence v závislosti na vstupním napětí, což je uvedeno v katalogovém listu [22]. Střída odpovídá výpočtu pro výstupní napětí 6,35 V. V simulacích je použit náhradní model LED diody pouze pro typické hodnoty napětí na přechodu, tedy $U_F = 3,15$ V, v tomto případě pak vychází střída 0,78 pro 9 V, 0,52 pro 13,5V a 0,44 pro 16 V. Příklad výpočtu je v rovnici číslo 3.16.

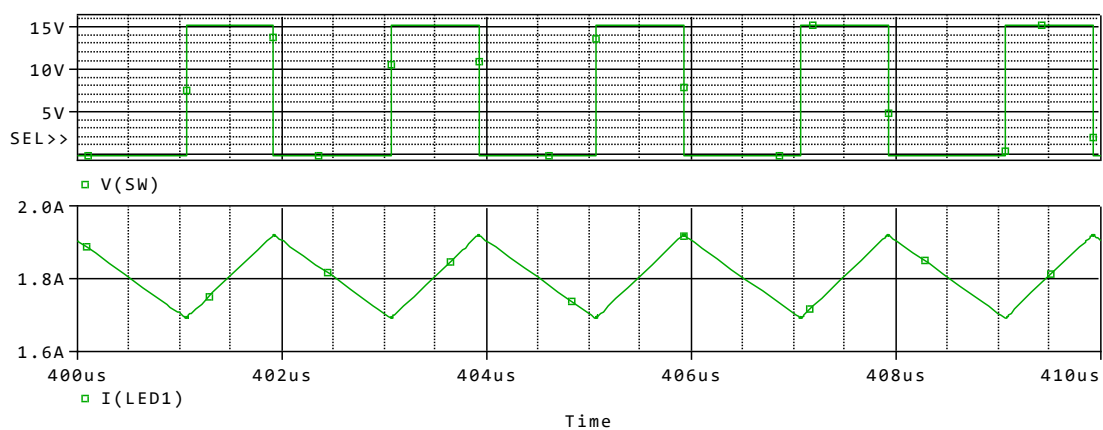
$$D = \frac{U_{LED}}{U_{IN} \cdot \eta} = \frac{6,35}{9 \cdot 0,9} = 0,78 \quad (3.16)$$



Obr. 3-8 Průběh napětí a proudu při $U_{in} = 9$ V



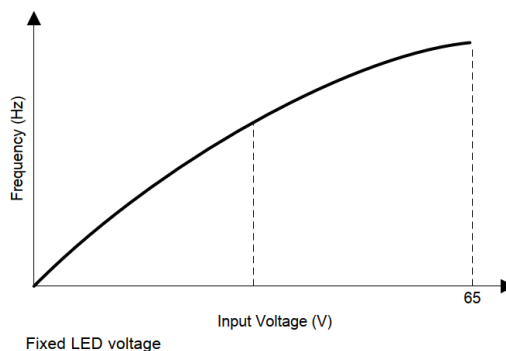
Obr. 3-9 Průběh napětí a proudu při $U_{in} = 13,5$ V



Obr. 3-10 Průběh napětí a proudu při $U_{in} = 16$ V

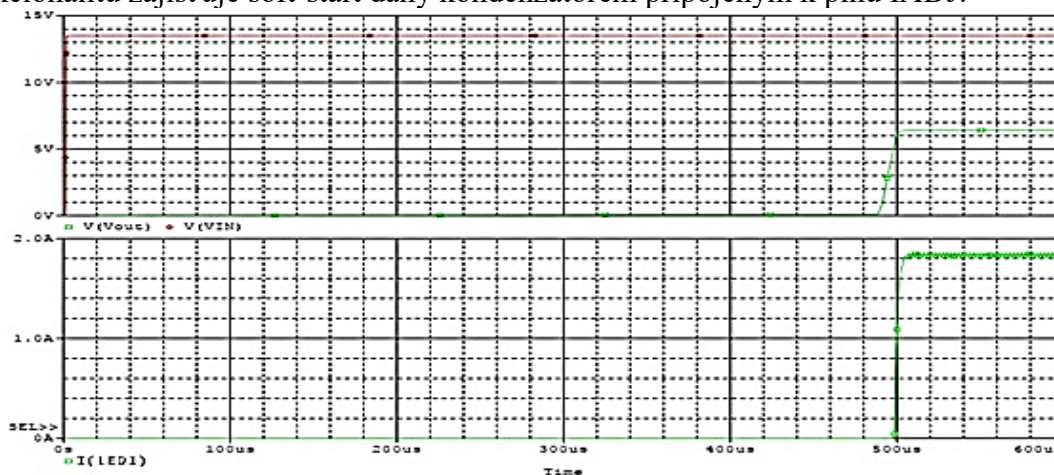
Tab. 3-4 Odečtené hodnoty ze simulací

U_{IN} [V]	t_{ON} [μ s]	t_{OFF} [μ s]	T [μ s]	f [kHz]	Střída [-]
9,0	4,126	1,158	5,283	189,3	0,78
13,5	1.193	1.140	2,333	428,7	0,51
16,0	0,868	1,141	2,008	497,8	0,43



Obr. 3-11 Závislost frekvence na vstupním napětí[22]

Na Obr. 3-12 je zobrazen náběh obvodu, a to z hlediska náběhu vstupního napětí (označení jako $V(VIN)$, červený průběh) a výstupního napětí ($V(Vout)$ zelený průběh), oba průběhy ve vrchním grafu. Výstupní proud ($I(LED1)$ zelený průběh) ve spodním grafu. Dle této simulace bylo kurzory změřeno, že obvod bude stabilní za $503 \mu s$, tuto funkcionalitu zajišťuje soft-start daný kondenzátorem připojeným k pinu IADJ.



Obr. 3-12 Výstupní napětí a proud v závislosti na čase při $V_{IN}=13,5 V$

V Tab. 3-5 je zaznamenána změna proudu při změně indukčnosti stanovená simulací. Simulace byla provedena parametricky pro hodnoty od $26 \mu H$ do $40 \mu H$ s krokem $2 \mu H$, což je tolerance vypočtené cívky.

Tab. 3-5 Změna proudu v závislosti na změně indukčnosti

L [μH]	$I_A [A]$	Zvlnění proudu [%]
26	1,77	15,1
28	1,78	14,1
30	1,79	13,2
32	1,80	12,3
34	1,80	12,2
36	1,81	10,9
38	1,82	10,3
40	1,82	9,8

Analýza Monte Carlo

Metoda Monte Carlo spočívá v mnohokrát opakované analýze uvažované soustavy s parametry součástek náhodně generovanými ve shodě s jejich skutečnými statistickými vlastnostmi. Jde tedy o simulaci „výroby“ mnoha vzorků téže soustavy. Při dostatečném počtu vzorků tato metoda poskytuje velmi věrný obraz o statistickém rozložení charakteristických vlastností soustavy. [24]

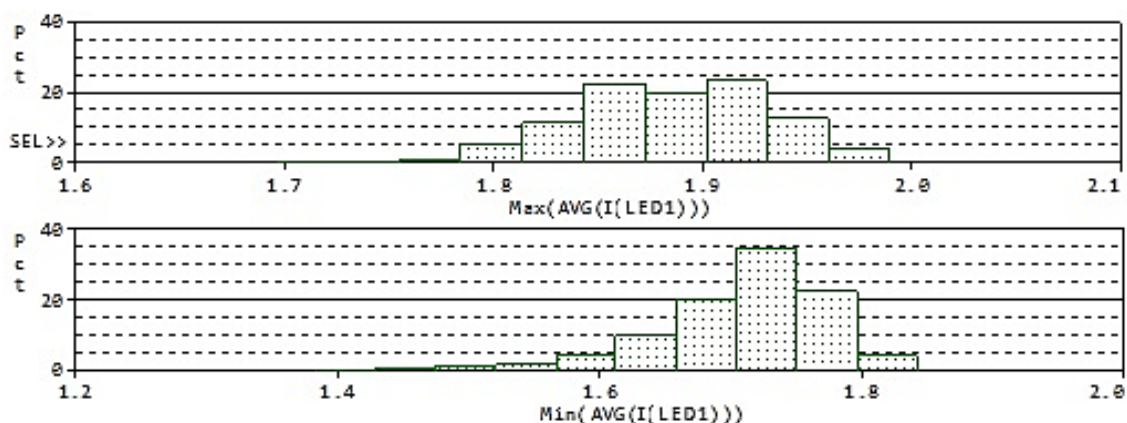
Tato analýza byla vytvořena pro 1000 vzorků. Bylo použito Gaussovské rozložení pravděpodobnosti. Tolerance je použita pro R 1 %, C 10 %, a L 20 %. Analýza byla provedena až po ustálení obvodu, tedy v čase 550 μ s až 600 μ s. Výsledek analýzy je na Obr. 3-13 jsou zobrazeny histogramy pro hodnotu maximálního možného proudu a minimálního. Z programu byly odečteny hodnoty sledované veličiny.

Rozsah maximálního proudu, je od 1,69 A do 1,99 A. Rozsah minimálního proudu je od 1,38 A do 1,84 A je patrné, že hraniční minimální hodnota nastane při velké indukčnosti cívky a velké kapacitě. Měnič tedy nabíhá pomaleji a ustálení trvá delší časový úsek, než je proveden v simulaci.

Rozsah proudu je určen z aritmetického průměru všech naměřených hodnot. Maximální proud je roven 1,88 A, minimální proud 1,71 A.

Dle této analýzy bylo zjištěno, že průměrný výstupní proud se bude pohybovat v oblasti od 1,71 A do 1,88 A, což je ± 5 %, od nominální hodnoty 1,8 A. Tolerance proudu byla dohodnuta na ± 10 %, to je splněno.

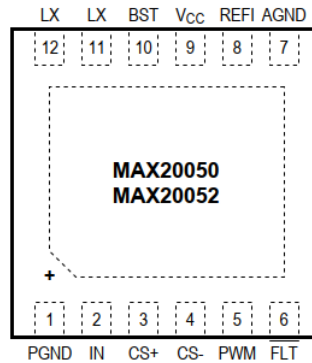
Provedená simulace dává odhad, v jakých mezích lze očekávat výstupní proud.



Obr. 3-13 Analýza Monte Carlo

3.3.2 MAX20050

Integrovaný obvod MAX20050 má integrované MOSFET tranzistory a funkcionalitu synchronního usměrnění. Splňuje kvalifikaci pro automobilový průmysl. Je teplotně odolný od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vstupní napětí má rozsah od 4,5 V do 65 V. Výstupní proud může dosahovat hodnoty maximálně 2 A. Fixní frekvence je 400 kHz.



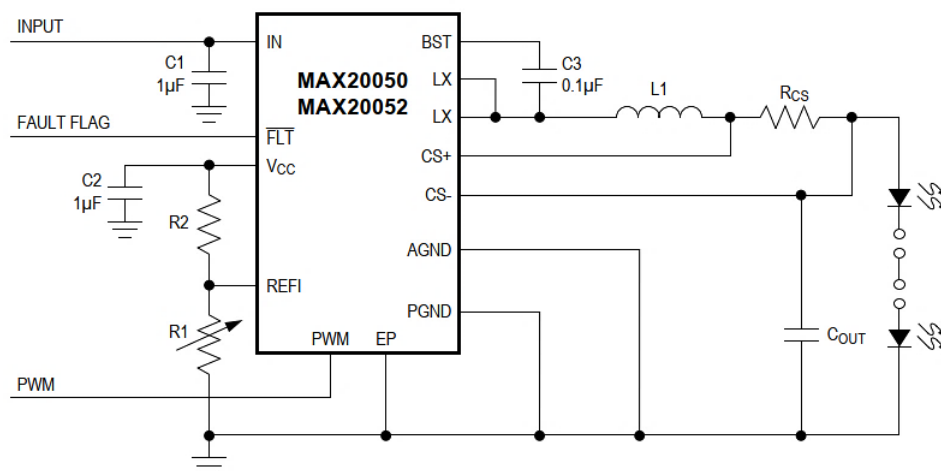
Obr. 3-14 Popis obvodu MAX20050[23]

- LX → přepínací uzel, připojit k jednomu konci cívky
- BST → zajištění napětí na MOSFET
- VCC → 5 V výstupní regulátor
- REFI → vstupní analogová reference 0-1,2 V
- AGND → analogová zem (signálová)
- PGND → výkonová zem
- IN → vstup
- CS+ → kladný vstup, snímací odpor je zapojen k tomuto pinu
- CS- → záporný vstup, snímací odpor je zapojen k tomuto pinu a zároveň i LED
- PWM → vstup ro externí řízení PWM signálu
- FLT → indikace chyby

Integrovaný obvod má analogový vstup REFI. Napětí na tomto pinu lineárně nastavuje úroveň proudu do LED diod. Pokud je $V_{REFI} \leq 1,2\text{ V}$, je možné nastavovat proud do LED, například připojením napěťového děliče. Pokud je $V_{REFI} > 1,2\text{ V}$, je do LED přiveden maximální proud daný snímacím rezistorem. Na tento pin může být maximálně připojeno napětí 5,5 V. Snímací rezistor je připojen mezi cívku a výstup řetězce LED diod a nastavuje maximální možný proud do LED řetězce. Pin CS+ je připojen jako kladný vstup na straně cívky a pin CS- je připojen k poslední anodě řetězce LED diod a je negativním vstupem. Možnost pulsní regulace je pomocí pinu PWM. Když tento pin nebude použit, připojí se na VCC, proud pak bude menší jak $5\text{ }\mu\text{A}$. 5 V regulátor má výstup na pinu VCC. Výrobce je doporučeno připojit mezi piny VCC a AGND keramický kondenzátor o hodnotě $1\text{ }\mu\text{F}$ ideálně co nejbližže pouzdru integrovaného obvodu. Svorka pro vstupní napětí je označena IN a výrobcem je doporučeno připojení kondenzátoru $1\text{ }\mu\text{F}$, tak aby uzemnění bylo co nejbližže sorce PGND. Spínaný uzel je označen pinem LX a je to výstup interního MOSFET tranzistoru buď vysoké úrovně, nebo nízké úrovně. Výstup je dále připojen k cívce. Pin BST zajišťuje dostatečně velké napětí pro gate driveru, doporučuje se připojení keramického kondenzátoru $0,1\text{ }\mu\text{F}$ k pinu LX. Analogová zem je pod pinem AGND pro všechny řídicí obvody LED driveru. AGND a PGND se spojí dohromady. FLT je pin, který detekuje

chybové chování buď otevřenou LED, nebo zkratovanou LED, dle podmínek daných katalogovým listem. Do výsledného zapojení bude použit integrovaný obvod s typem MAX20050ATC/V+.

K tomuto obvodu katalogový list neudává všechny potřebné vzorce pro výpočet externích komponent, proto bylo vycházeno z obecných rovnic pro snižující měnič. Typické zapojení je na Obr. 3-15. V katalogovém listu jsou dané rozmezí, jakých hodnot by měly externí součástky nabývat, což je dáno Tab. 3-6. Také zde jsou spočtené některé obvody pro různá vstupní napětí a výstupní proudy. To bohužel nekoresponduje se zadáním DP, proto tyto hodnoty byly brány jako orientační.[23]



Obr. 3-15 Typické zapojení obvodu MAX20050[23]

Tab. 3-6 Tabulka doporučených hodnot externích součástek[23]

L AND C COMPONENT VALUES (MAX20050, $f_{SW} = 400kHz$)				
Output Capacitor Range (C7)		$V_{IN} = 12V$ (typ), Figure 4	0.22	4.7
		$V_{IN} = 24V$ (typ), Figure 5	0.47	4.7
		$V_{IN} = 55V$ (typ), Figure 6	0.1	2.2
Inductor Range (L1)		$V_{IN} = 12V$ (typ), Figure 4	22	33
		$V_{IN} = 24V$ (typ), Figure 5	33	82
		$V_{IN} = 55V$ (typ), Figure 6	47	150
L AND C COMPONENT VALUES (MAX20050, $f_{SW} = 2.1MHz$)				
Output Capacitor Range (C7)		$V_{IN} = 12V$ (typ), Figure 4	0.1	4.7
Inductor Range (L1)		$V_{IN} = 12V$ (typ), Figure 4	10	68

Střída (duty cycle):

$$D = \frac{U_{OUT}}{U_{IN}} \quad (3.17)$$

Kde U_{IN} je vstupní napětí a U_{OUT} výstupní napětí na LED diodách.

Cívka:

$$L = \frac{(U_{IN} - U_{OUT}) \cdot U_{OUT}}{U_{IN} \cdot f_{SW} \cdot r \cdot I_{OUT}} \quad (3.18)$$

Kde f_{sw} je spínací frekvence 400 kHz a r je zvlnění doporučené na hodnotu 0,2, tedy 20 %.

Snímací rezistor:

$$R_{CS} = \frac{0,220}{I_{LED}} \quad (3.19)$$

Kde $I_{LED} = I_{OUT}$, tedy výstupní požadovaný proud, hodnota 0,220 = snímacímu napětí dáno katalogovým listem

Špičková hodnota proudu protékající cívkou:

$$I_{Lpeak} = I_{OUT} + \frac{r \cdot I_{OUT}}{2} \quad (3.20)$$

Výstupní kondenzátor:

$$C_{OUT} = \frac{(U_{IN_MIN} - U_{LED}) \cdot U_{LED}}{\Delta U_R \cdot 2 \cdot L \cdot U_{IN_MAX} \cdot f_{SW}^2} \quad (3.21)$$

Kde $V_{IN_MIN} = 9$ V (minimální hodnota vstupního napětí) a $V_{IN_MAX} = 16$ V (maximální hodnota vstupního napětí).

Tab. 3-7 Hodnoty externích součástek v závislosti na napětí

Veličina	$U_{IN} = 9$ V	$U_{IN} = 13,5$ V	$U_{IN} = 16$ V
D [-]	0,8	0,55	0,46
L [μ H]	9	23	28

Tab. 3-8 Hodnoty externích součástek

R_{CS} [Ω]	0,12
I_{LPEAK} [A]	1,98
C_{OUT} [μ F]	1,27

K vyčtené hodnotě indukčnosti cívky byla opět přidána tolerance 20 %. Výpočet je v rovnici 3.22 a nejbližší dostupná cívka je tedy 33 μ H.

$$L_{20\%} = L \cdot 1,2 = 23 \cdot 1,2 = 27,6 \mu H \quad (3.22)$$

Snímací rezistor je připojen mezi piny CS+ a CS-, dle katalogového listu bylo zjištěno, že hodnota napětí zde má minimální, typickou a maximální hodnotu, proto bylo spočítáno, jak tato změna ovlivní výstupní proud. Výpočet je uveden v rovnici 3.23 a vychází z klasického Ohmova zákona. V

Tab. 3-9 je rozptyl proudu, který může nastat. Rozptyl nabývá hodnot $\pm 2,5 \%$, což se jeví jako velice pozitivní předpoklad.

$$I_{LED} = \frac{U_{CS}}{R_{CS}} = \frac{0,215}{0,12} = 1,76 \text{ A} \quad (3.23)$$

Tab. 3-9 Rozptyl proudu

U_{CS} [mV]	215	220	225
I [A]	1,76	1,8	1,84

3.4 Kritické oblasti obvodu

Dle předešlých simulací a prostudování katalogových listů lze stanovit kritické oblasti obvodu.

Jak ukázala simulace Monte Carlo, tolerance komponent má vliv na celé zapojení a tím na výstupní proud. Snaha bude vybrat kvalitní komponenty s malou tolerancí hodnot

Na samotné DPS musíme počítat s parazitními odpory, indukčnostmi a kapacitami. Už jen špatné umístění komponent může vést k vzniku nežádoucích vlivů.

Před návrhem DPS je nutné si uvědomit jaké mohou nastat negativní vlivy, které mohou ovlivnit celé zapojení. Parazitní indukčnost je udávána cca 10 nH/10 cm. Mezi piny integrovaného obvodu existují parazitní indukčnosti, parazitní odpory a parazitní kapacity vůči zemi a dalším vodičům. [26]

Kritickou oblastí na DPS jsou hlavní proudové smyčky, pro které je důležitá co nejmenší plocha z důvodu správné funkčnosti obvodu, ale i z hlediska EMC zajistí minimální vyzařování. Mělo by být zajištěno co nejkompaktnější připojení komponent a tím zamezení parazitních jevů. Zajištěním co nejkratších spojů se vyvarujeme parazitnímu odporu.

V místech obvodu, kde dochází k velkým změnám signálu, což je například pin LX u IC MAX20050, kde je připojen výstup spínacího tranzistoru, by mělo být zajištěno co neblíže připojení k cívce a co nejrobustnější, tím by nemělo docházet k rušení tohoto signálu.

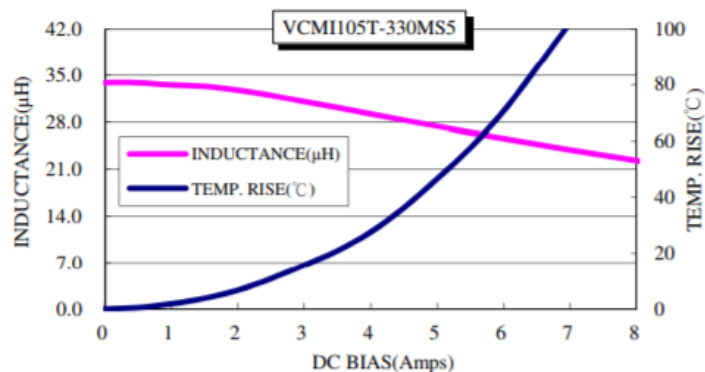
3.5 Výběr jednotlivých komponent

Pro oba obvody byly vypočítány obvodové prvky. V této kapitole bude vysvětlen výběr obvodových komponent pro oba integrované obvody. Všechny komponenty budou vybrány v pouzdru SMD, které zajistí menší rozměry. SMD součástky mají mnohem menší parazitní vlastnosti než drátové, proto jsou i z tohoto pohledu lepší volbou a budou využity u obou vzorků

Hlavní cívka měniče

Byla vybrána cívka VCM105T-330MS5 [24] od výrobce CYNTEC CO., která splňuje automobilovou kvalifikaci (AEC-Q200), je odolná v rozsahu teplot -55°C až 155°C , $I_{SAT} = 6,4 \text{ A}$. Má stíněné pouzdro. Indukčnost cívky klesá v důsledku nárůstu

proudu, jak lze vidět na Obr. 3-16. Pro využití v obou zapojeních splňuje rozsah indukčnosti a vyhovuje tedy kritériu.



Obr. 3-16 Snížení indukčnosti v závislosti na proudu[24]

Hlavní výkonová dioda měniče

Schottkyho dioda je vybrána dle závěrného napětí, které musí být minimálně větší než maximální vstupní napětí plus rezerva.[18] Měla by být dimenzována minimálně na 2 A. Byla tedy vybrána Schottkyho dioda SS3P4 od firmy Vishay. Maximální střední proud je 3 A při napětí 40 V a má malý úbytek napětí v závěrném směru 0,5 V. Je použita v zapojení s integrovaným obvodem TPS92515.

Rezistory

Rezistory byly vybrány s tolerancí 1 %, v různých pouzdrech provedení, všechny splňují automobilovou kvalifikaci.

Při výběru snímacích rezistorů je nutné dbát i na maximální výkon, který může rezistor snést. U obou zapojení se může objevit 0,42 W, proto byly zvoleny rezistory, které vydrží výkony až 1 W a je to i z důvodu špiček, tolerancí a podob. Hodnota vychází z výpočtu v rovnici (3.24). U_{sense} je hodnota napětí na snímacích rezistorech daná katalogovým listem 220 mV, I_{LED} je roven výstupnímu proudu, který může překročit i hodnotu 1,9 A vlivem zvlnění proudu.

$$P_{sense} = U_{sense} \cdot I_{LED} = 0,220 \cdot 1,9 = 0,42 \text{ W} \quad (3.24)$$

Kondenzátory

V zapojení budou použity keramické kondenzátory s dielektrikem X7R, které garantuje v daném teplotním rozsahu změnu kapacity maximálně $\pm 20\%$. Kondenzátory splňují rozsah -40°C až 125°C . U kondenzátorů je důležité dbát na to, v které části obvodu jsou použity a poté zvolit na jaké napětí budou dimenzovány. Na výstupu může vzniknout maximálně 7,4 V, proto v této části obvodu lze použít kondenzátory na 25 V. Kondenzátory na 10 V se nepoužívají z důvodu poklesu kapacity při zvyšující se teplotě. Dalším důvodem jejich nepoužití je možnost jejich zničení při nežádoucím odpojení LED modulu a tím výskytu napájecího napětí na výstupu, což může být až 16 V. Na vstupních svorkách může dojít k nárůstu napětí, například při testování startování až 27 V, a proto je vhodnější volit kondenzátory na 50 V. Pokud je to možné, je lepší využít kondenzátory na vyšší napětí. Protože s nárůstem teploty klesá kapacita, to může ovlivnit výstup celého zapojení. Z tohoto důvodu jsou v obou zapojení použity převážně kondenzátory na 50 V. Kondenzátor pro potlačení ESD výboje je dimenzován na napětí 100V.

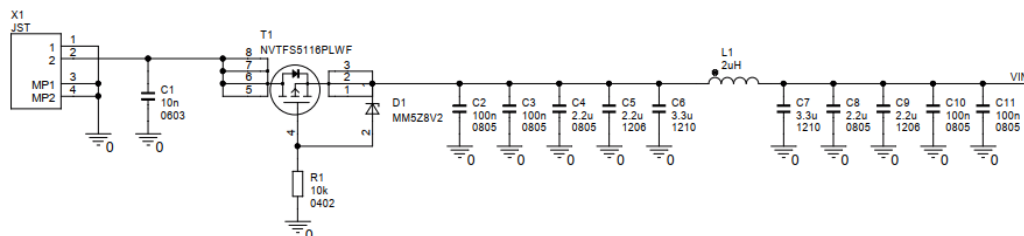
3.6 Navržená schémata

Dle vypočtených hodnot, simulací a doporučení katalogového listu byla navržena schémata v programu OrCAD Capture CIS. Do schématu byly použity komponenty popsané v předešlé kapitole. Celá schémata jsou v příloze (Příloha 1 a Příloha 4) v následujících podkapitolách jsou rozebrány základní bloky schémat.

3.6.1 Vstupní část

Vstupní část obvodu se skládá z napájecího konektoru, ESD kondenzátoru (C1), ochrany proti přepólování a vstupního EMC filtru.

Blok ochrany proti přepólování (reverse polarity protection) je standardně provozován pro automobilové aplikace. Existuje více variant, jak tuto ochranu řešit, základní je použití výkonové diody. Pro vyšší proudy je ale výhodnější použití tranzistoru, který má nižší ztráty při vyšších výkonech než dioda. Do zapojení byl jako ochrana proti přepólování zapojen transistor NVTFS5116PLWF, který zajistí spuštění obvodu pouze po přiložení správně polarizovaného napětí. U tranzistoru musí být dbáno pozornosti na napětí mezi gate a source, zde může být maximálně ± 20 V (dle katalogového listu), ale při testování může být napětí až nad tuto mez. Aby byl tranzistor ochráněn, je mezi svorky gate a source přidána Zenerova dioda. Je rychlá a dimenzována na závěrné napětí 8,2 V. Gate je přizemněn přes 10 k Ω rezistor. Zapojení je zobrazené na Obr. 3-17.



Obr. 3-17 Vstupní část obvodu

Vstupní filtr zamezuje šíření rušení do automobilové sítě. Prvotní návrh filtru je pouze orientační, na celkové parametry má vliv i okolní obvod a přesně nevíme, jaký šum bude filtr tlumit. Filtr bude upraven až po prvním měření na reálných deskách plošných spojů. Obvyklý výpočet je, že mezní frekvence f_c musí být menší než frekvence konvertoru, a to na $1/10 f_{sw}$ dle (3.25). Základní vzorec pro výpočet frekvence je dle Thomsonova vztahu uveden v (3.26). Z tohoto vzorce budou dále odvozeny obvodové prvky. Jeden z obvodových prvků musí být zvolen, což byla cívka, jejíž hodnota indukčnosti byla zvolena 2 μ H, kondenzátor se dopočítá dle rovnice číslo (3.27). Menší hodnota cívky byla volena z důvodu menšího pouzdra.

$$f_c = \frac{1}{10} \cdot f_{sw} = \frac{1}{10} \cdot 400 \cdot 10^3 = 40 \text{ kHz} \quad (3.25)$$

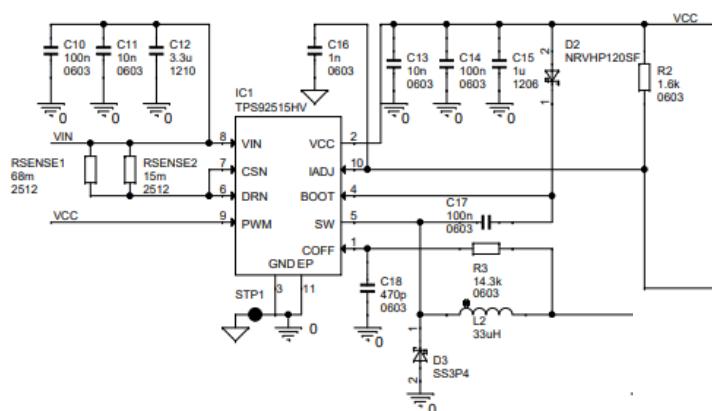
$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad (3.26)$$

$$C = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot L} = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot (40 \cdot 10^3)^2 \cdot 2 \cdot 10^{-6}} = 7,92 \cdot 10^{-6} F \quad (3.27)$$

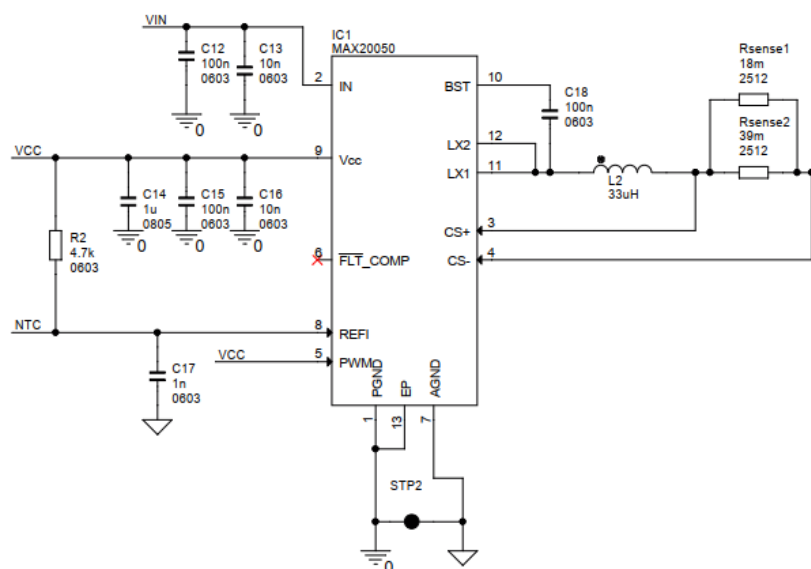
U integrovaného obvodu TPS92515 je proměnná spínací frekvence v závislosti na napětí, proto je výpočet filtru podřízen nejmenší možné spínací frekvenci a její 1/10.

3.6.2 Hlavní výkonová část obvodu

Na Obr. 3-18 jsou a Obr. 3-19 jsou zobrazeny hlavní části obou obvodů obsahující hlavní obvodové komponenty, hlavní cívku, diodu a snímací rezistory dle toho, o jaký obvod se jedná.



Obr. 3-18 Hlavní výkonová část obvodu TPS92515



Obr. 3-19 Hlavní výkonová část obvodu MAX20050

3.6.3 Lineární snižování proudu LED

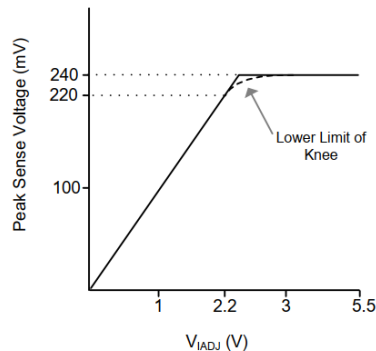
Z důvodu ochrany LED diody před přehřátím je využito lineární regulace proudu LED při vysoké teplotě. Dioda se nesmí přehřát a nesmí na ni dojít k ohřátí nad kritickou hodnotu, což je dle katalogového listu 150 °C.

Jako snímač teploty je použit termistor s negativní závislostí odporu (NTC). NTC je zapojen do děliče napájeného konstantním napětím. Při nominální hodnotě teploty 25 °C má hodnotu 10 kΩ, se vzrůstající teplotou jeho odpor klesá a tím bude regulováno napětí na pinech IADJ (pro obvod TPS92515) a REFI (pro obvod MAX20050) přes navržený odporový dělič. Díky tomuto zapojení dojde k regulaci výstupního proudu.

Hodnota teploty, kdy začne lineární regulace, byla zvolena 90 °C. Jestli je hodnota správně nastavena, bude ověřeno při testování.

Návrh lineární regulace pro obvod TPS92515. Před zvolenou mezí musí být obvod neovlivněný. Tedy na pin IADJ musí být přivedeno napětí větší nebo rovno jak 2,4 V, tento průběh je zobrazen na Obr. 3-20. Jakmile je ale teplota 90 °C a více, musí se začít snižovat napětí na pinu IADJ, tím se sníží snímací napětí integrovaného obvodu, poklesne proud a je zajištěno, že se výkon na diodách zmenší. Nastane redukce jejich zahřívání a teplota na čipech zůstane pod povoleným maximem. Z katalogového listu byla zjištěna hodnota odporu při 90°C. $R_{t90^\circ} = 1266 \Omega$.

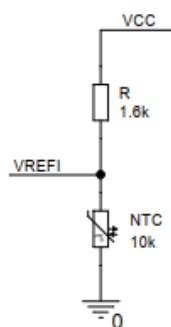
Dále bude postupováno dle výpočtů (3.28) a (3.29) pro napěťový dělič a bude dopočítána druhá hodnota odporu. Znázorněný dělič je na Obr. 3-21.



Obr. 3-20 Závislost snímacího napětí na V_{IADJ} TPS92515[22]

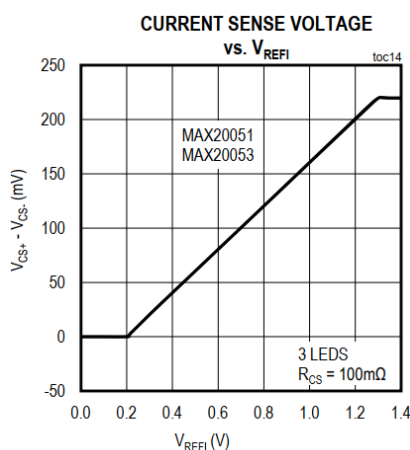
$$U_{IADJ} = \frac{R_{NTC}}{R_{NTC} + R} \cdot U_{CC} \quad (3.28)$$

$$R = \frac{U_{CC} \cdot R_{NTC}}{U_{IADJ}} - R_{NTC} = \frac{5 \cdot 1266}{2,2} - 1266 = 1,6 \text{ k}\Omega \quad (3.29)$$



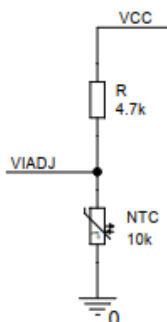
Obr. 3-21 Dělič pro nastavení lineární regulace TPS92515

Návrh lineární regulace pro obvod MAX20050 je obdobný. Rozdíl je v hranici napětí na pinu REFI. Pro zahájení lineární regulace musí klesnout napětí pod hodnotu 1,2 V. Závislost snímacího napětí při změně napětí na pinu REFI je zobrazena na Obr. 3-22. Výpočet odporu je uveden v rovnici (3.30). Dělič pro nastavení snižování proudu je na Obr. 3-23.



Obr. 3-22 Závislost snímacího napětí na V_{REFI} MAX20050[23]

$$R = \frac{U_{CC} \cdot R_{NTC}}{U_{IADJ}} - R_{NTC} = \frac{5 \cdot 1266}{1,1} - 1266 = 4,5 \text{ k}\Omega \quad (3.30)$$

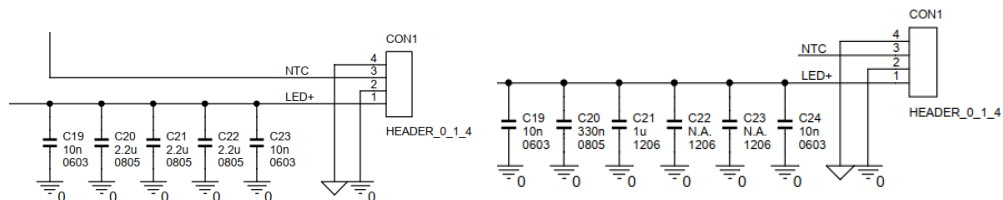


Obr. 3-23 Dělič pro nastavení lineární regulace MAX20050

3.6.4 Výstupní blok

Posledním blokem ve schématu je výstupní filtr s konektorem, ke kterému je následně pomocí kabelového svazku připojen LED. Výstupní kondenzátory zajistí absorpci zvlněného výstupního proudu z cívky. Tento blok je na obrázku Obr. 3-24.

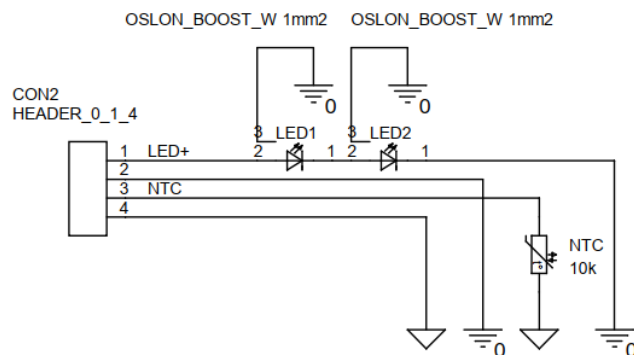
Zkratka N.A. znamená, že se prvek neosazuje, je zde pouze jako prostor pro možnost přidání kapacity.



Obr. 3-24 Výstupní blok vlevo TPS92515 a vpravo MAX20050

3.6.5 Obvodové zapojení LED modulu

Na obrázku číslo Obr. 3-25 je obvodové schéma LED modulu, které obsahuje napájecí konektor, kterým je připojen k měniči, dvě výkonové LED diody zapojené do série a NTC pro případné lineární snižování proudu do LED. V obvodu jsou připojeny dvě země výkonová pro katody LED a analogová zem k nezarušenému měření teploty.



Obr. 3-25 Obvodové zapojení LED modulu

3.7 Návrh desek plošných spojů

Návrh DPS byl realizován pomocí software Orcad Capture PCB Editor. Při návrhu spínaných měničů je důležité držet se určitých návrhových pravidel. Doporučený layout je znázorněn i v katalogovém listu daného integrovaného obvodu. Dle toho doporučení byl návrh DPS ubíráán. Cílem bylo navrhnout kompaktní zařízení odolné z hlediska EMC, což vyžaduje co nejmenší proudové smyčky, blokovací kondenzátory umístěné co možná nejbližší ke zdroji rušení.

Připojení snímacích rezistorů bylo provedeno pomocí Kalvinova připojení, tedy čtyřvodičově, aby bylo měřené napětí na snímacích rezistorech co nejpřesnější. Spoje vedoucí

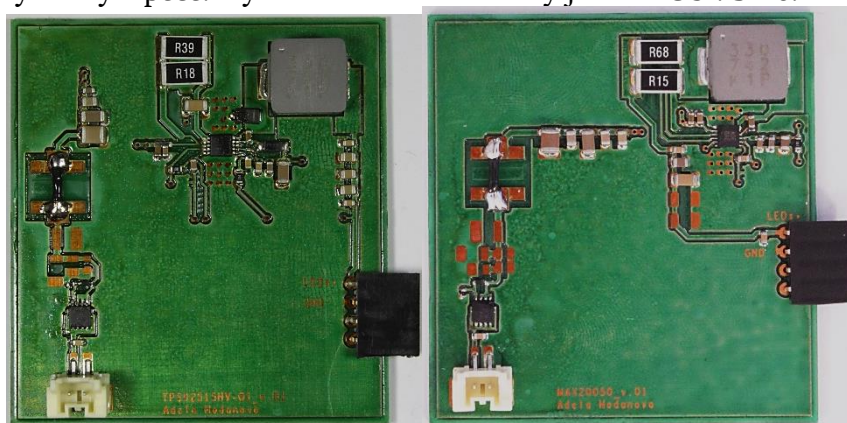
přímo do integrovaného obvodu zajistí co nejlepší přesnost měření proudu, protože nejsou ovlivňovány jinými komponenty a mají přímý spoj, který by měl být co nejkratší.

Kondenzátor na ochranu ESD byl umístěn co nejbližše konektoru.

Při návrhu bylo nutné také určení šířky spojů, u signálových spojů byly vedeny 0,4 mm široké tyto signálové spoje nepotřebují širší cesty, protože nejsou tak zatěžovány. U výkonových spojů byla snaha udržení větší šířky průměrně 0,75 mm, protože může protékat špičkový proud až 2 A. Teoretické poznatky byly nahrazeny praxí a bohužel ne všude je možnost vést takovou šířku spojů. U integrovaného obvodu lze maximálně udržet šířku 0,3 mm a dále se tyto parametry držely dle návrhu a možností na DPS. DPS bude z materiálu FR4. Navržené DPS jsou v Příloha 2 a Příloha 5. DPS byly vyrobeny v laboratoři firmy AL.

Snaha byla co nejlépe splnit všechny návrhové parametry a provést první měření.

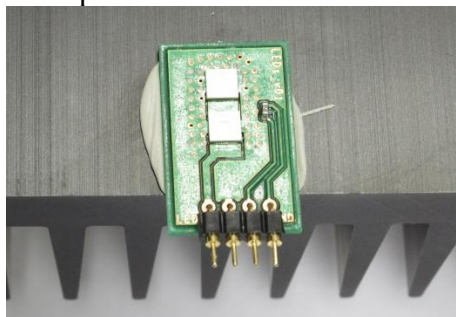
Desky plošných spojů byly osazeny součástkami a zapájeny metodou reflow. Tato metoda spočívá v nanesení pájecí pasty, následné osazení součástkami a vložení DPS do pece, kde je DPS postupně zahřívána až na teplotu 225°C. Po pár minutách jsou DPS schlazeny a vytaženy z pece. Vyrobené a osazené desky jsou na Obr. 3-26.



Obr. 3-26 Vyrobené vzorky v.01

Po osazení byly desky překontrolovány z hlediska technologie pájení. DPS byly překontrolovány vizuálně pod mikroskopem. Důležitým bodem byla kontrola integrovaných obvodů, u kterých mají piny velice malou rozteč a mohlo by dojít k nežádoucímu zkratu. Hlavní smyčky a spoje byly změřeny měřicím přístrojem a vyzkoušeno správné spojení. Poté již bylo možné připojení napětí s omezením na malý proud a následné plné vyzkoušení obvodů, jak bude popsáno v kapitolách dále.

Návrh DPS pro LED modul je v příloze (Příloha 8) a na Obr. 3-27 je zobrazeno reálné zapojení přilepené teplovodnou pastou k chladiči.



Obr. 3-27 LED modul v.01

4. TESTY NA VZORCÍCH

Vzorky byly podrobeny sadě testovacích měření. Nejdříve byly provedeny funkční testy. Vzorky byly testovány na chování při změně vstupního napětí. Požadavek je, aby byl výstupní proud stabilní od vstupního napětí 9 V do 16 V. Dále bylo nalezeno nejmenší možné napětí, od kterého již vzorek splňuje specifikaci na výstupní proud. Překontrolovány byly základní bloky obvodu, jako je ochrana proti přepólování, referenční napětí dané integrovanými obvody a filtrace výstupního proudu.

Dalším testem bylo proměření vzorků z hlediska EMC nazývaný z anglické literatury conducted emission tedy měření šum po napájecí větvi.

Termokamerou byly orientačně zjištěny nejvíce tepelně namáhané komponenty. Pro přesnější měření byly v druhém kroku použity termočlánky a přesné hodnoty zaznamenány.

Poslední zkouškou byl teplotní zátěžový test v klimatické komoře. Na nejvíce zahřívána místa vzorků byly nalepeny termočlánky a během měření byly snímány teploty. Daný vzorek podléhající měření byl vložen do boxu, který byl umístěn do klimatické komory. V podpůrném software klimatické komory byly zadány parametry teplot, na které má být komora chlazena nebo nahřívána následně byl spuštěn test. Každá teplota byla měřena hodinu, aby byly zajištěny stabilní parametry jak komory, tak měřených vzorků. S každou teplotou byl sledován výstupní proud daného vzorku. Vše bylo zaznamenáváno v průběhu měření do tabulky a po skončení měření byla data zpracována.

Všechny testy byly měřeny v laboratořích firmy Automotive Lightig s.r.o s využitím kalibrovaných měřicích přístrojů.

4.1 Měření na obvodu TPS92515

Obvod TPS92515 nesplňoval v prvním měření kritérium výstupního proudu $1,8 \text{ A} \pm 10 \%$. Při připojení vstupního nominálního napětí (13,5 V) byla změřena střední hodnota výstupního proudu pouze 1,6 A.

Nízká hodnota proudu byla korigována tak, že snímací rezistory byly připájeny ještě blíže integrovanému obvodu. Komplikace byla dána návrhem layoutu a v druhé iteraci bude tato nepřesnost opravena. Snímací rezistory byly přepájeny blíže integrovanému obvodu a výstupní střední hodnota proudu se zvýšila na 1,7 A, čímž byla splněna podmínka a obvod mohl být podroben všem testům.

4.1.1 Funkční testy

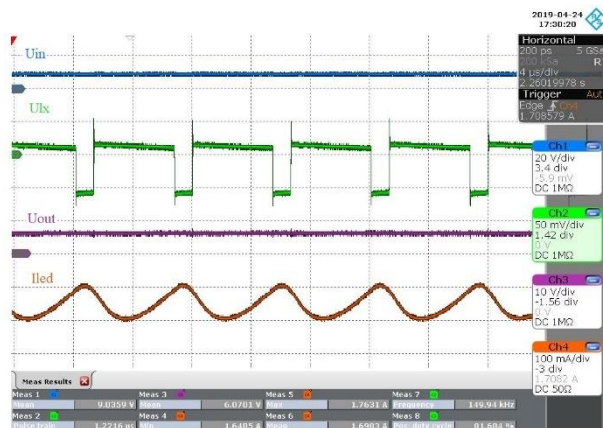
Obvod musí být stabilní a plně funkční od napětí 9 V do 16 V. To znamená, že v tomto rozsahu vstupních napětí musí být výstupní proud $1,8 \text{ A} \pm 10 \%$. Obvod byl tedy podroben této zkoušce a v daném rozmezí vstupních napětí splňoval podmínky a byl stabilní. Základní průběhy byly změřeny osciloskopem pomocí napěťových a proudových sond. Na následujících oscilogramech jsou zobrazeny průběhy vstupních a výstupních průběhů pro okrajové hodnoty a nominální hodnotu vstupního napětí.

U_{in}...vstupní napětí (modrý průběh = kanál 1)

U_{lx}...průběh napětí na výstupu spínacího tranzistoru (zelený průběh = kanál 2)

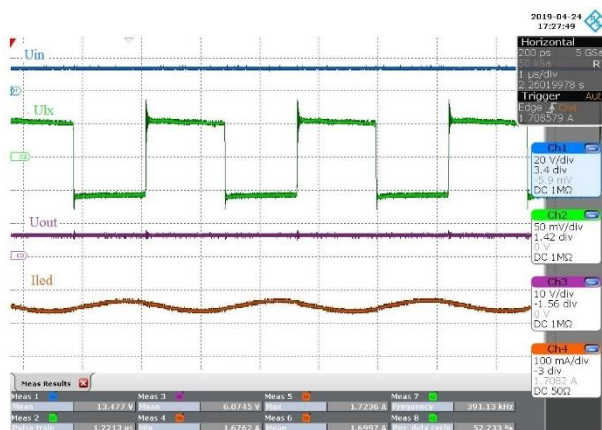
U_{out}...výstupní napětí (fialový průběh = kanál 3)

I_{led}...výstupní proud (oranžový průběh = kanál 4)

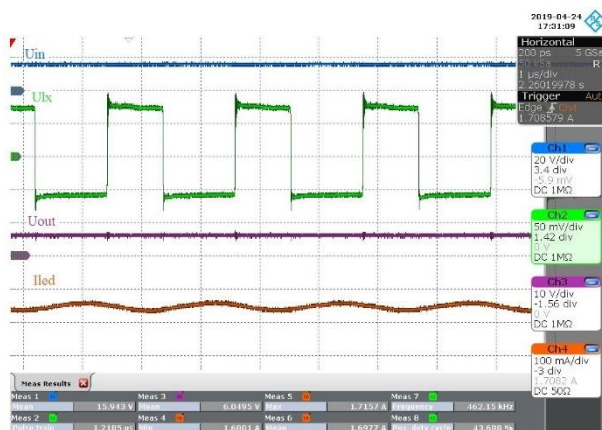


Obr. 4-1 Základní průběhy při U_{IN} 9 V

Na Obr. 4-2 je zobrazen oscilogram při nominálním vstupním napětí. Vstupní napětí je stabilní bez překmitů, jak zobrazuje modrý průběh (kanál 1). Zelený průběh (kanál 2) znázorňuje hlavní spínání obvodu, špičky vznikají při sepnutí obvodu. Výstupní napětí vykazuje male napěťové špičky při spínání. Výstupní proud je zobrazen oranžovou křivkou (kanál 4), zde lze vidět funkce výstupního filtru, která z trojúhelníku vyfiltruje téměř sinusový průběh.



Obr. 4-2 Základní průběhy při U_{IN} 13,5 V



Obr. 4-3 Základní průběhy při U_{IN} 16 V

Z naměřených hodnot byla dopočtena výsledná účinnost celého obvodu. Obr. 4-4 znázorňuje změnu účinnosti při zvyšování vstupního napětí v rozsahu od 9 V do 16 V. Účinnost celého vzorku má rozsah od 86% do 89%. Tabulka naměřených hodnot je v příloze (Příloha 17). Příklad výpočtu účinnosti pro nominální hodnotu napětí 13,5 V je ukázán v rovnicích (4.1), (4.2) a (4.3). Tento výpočet vychází z těchto naměřených hodnot:

$$U_{IN} = 13,50 \text{ V}$$

$$I_{IN} = 0,873 \text{ A}$$

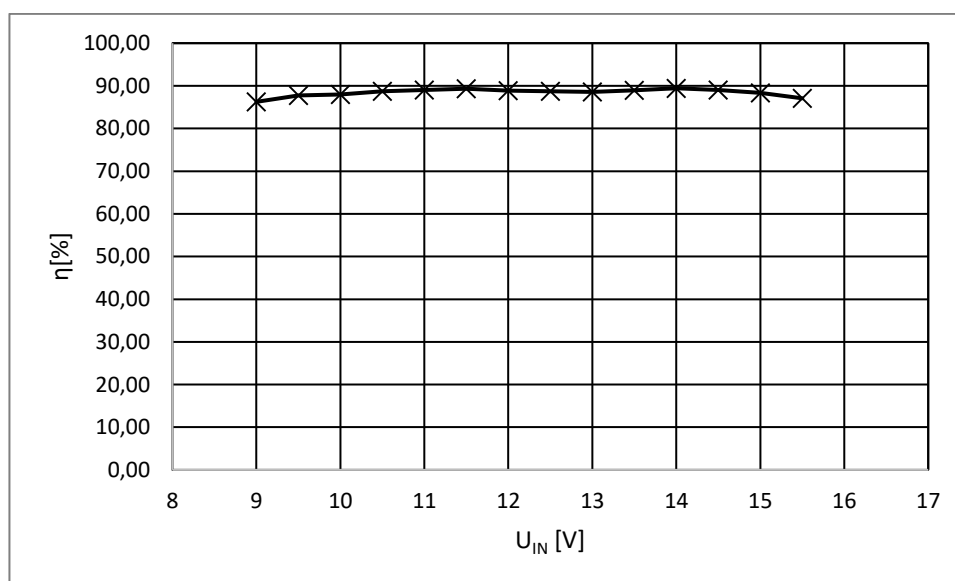
$$U_{OUT} = 6 \text{ V}$$

$$I_{OUT} = 1,74 \text{ A}$$

$$P_{IN} = U_{IN} \cdot I_{IN} = 13,50 \cdot 0,873 = 11,79 \text{ W} \quad (4.1)$$

$$P_{OUT} = U_{OUT} \cdot I_{OUT} = 6 \cdot 1,74 = 10,44 \text{ W} \quad (4.2)$$

$$\eta = \frac{P_{IN}}{P_{OUT}} \cdot 100 = \frac{11,79}{10,44} \cdot 100 = 89\% \quad (4.3)$$

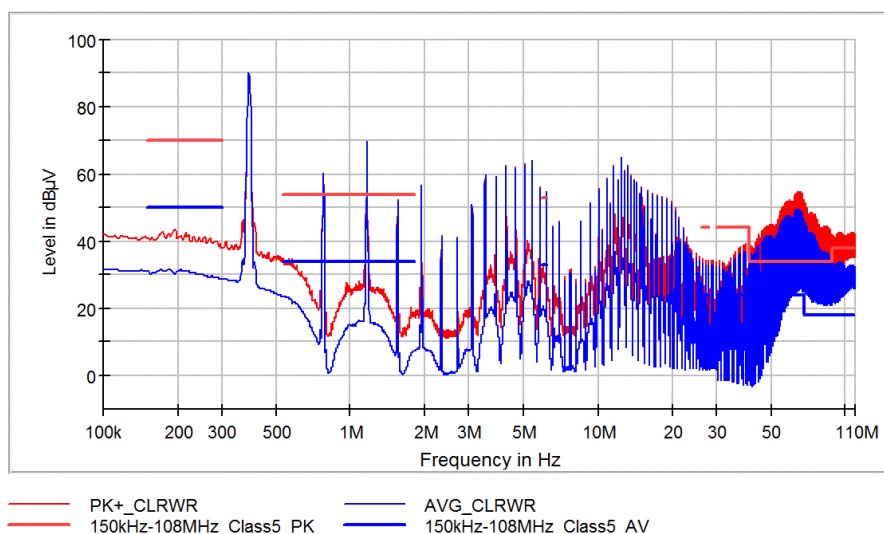


Obr. 4-4 Závislost účinnosti na změně vstupního napětí

4.1.2 EMC testy

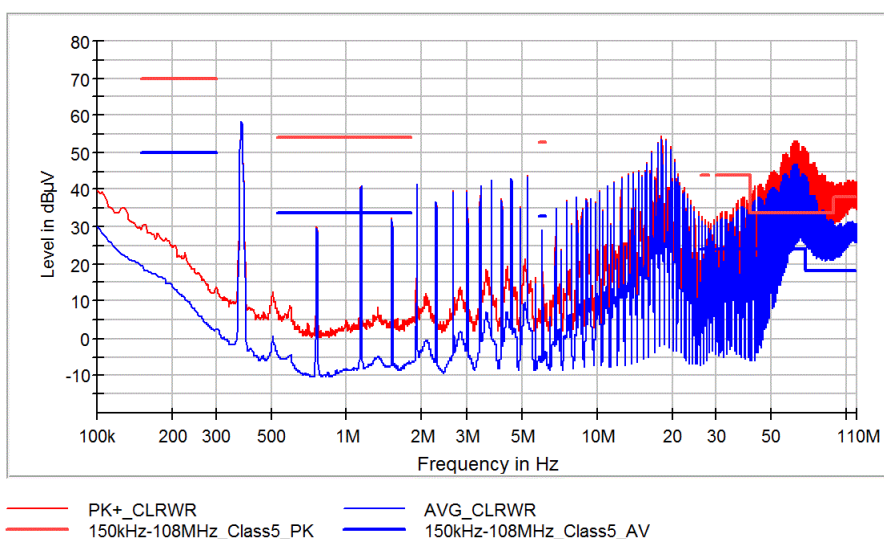
EMC testování je velice rozsáhlá problematika, proto bude v této práci řešeno pouze testování obvodu na rušení neboli šum po napájecí větvi (Conducted emissions). Úrovně, které nesmí obvod překročit, byly voleny dle normy CISPR 25. První měření bylo bez filtru, tyto průběhy jsou zobrazeny na Obr. 4-5. Druhé měření

již s osazeným filtrem na Obr. 4-6. Na těchto průbězích lze vidět funkčnost EMC filtru do 10 MHz.



Obr. 4-5 EMC měření bez použití filtru pro obvod TPS92515 verze 1

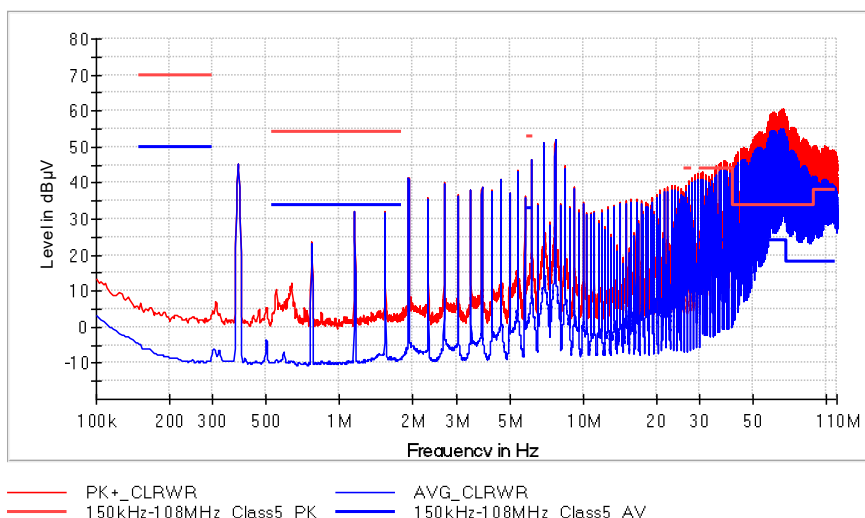
Filtr byl nedříve osazen dle vypočtené hodnoty, kdy utlumil rušení do 10 MHz až na jednu složku na frekvenci 1,3 MHz, na vyšších frekvencích není vidět změna.



Obr. 4-6 EMC měření s použitím filtru pro obvod TPS92515 verze 1

Pro utlumení složky na 1,3 MHz bylo postupováno experimentálně zvýšením kapacity filtru a výměny cívky. Cívka byla změněna na hodnotu 6,8 μH a kapacita navýšena o 1 μF na Obr. 4-7 je zobrazeno měření po doladění filtru. Utlumení není stále zcela ideální, třetí harmonická složka má již menší úroveň a splňuje specifikaci, ale naopak vyšších frekvencích od 20 MHz se úrovně zvýšily a v dalším kroku bude vylepšen layout, proto již filtr nebyl dále laděn. Pro utlumení rušení na vyšších

frekvencích je nutné optimalizovat layout, poté je možné dosáhnout lepších parametrů z hlediska EMC.



Obr. 4-7 EMC měření s doladěným filtrem pro obvod TPS92515 verze 1

4.1.3 Teplotní analýza

Obvod byl nejdříve zkontrolován z hlediska rozložení teplot termokamerou. To je ovšem jen orientační měření sloužící pro zjištění, které komponenty se nejvíce zahřívají. Přesnější měření je nutné v kritických oblastech obvodu proměřit termočlánky. Na Obr. 4-8 je snímek z termokamery. V obdélnících se nacházejí nejvíce zahřáté komponenty obvodu. V obdélníku Bx1 se nachází dioda, Bx3 je polohou integrovaný obvod a obdélník Bx2 ukazuje polohu snímacích rezistorů. K těmto komponentám byly přilepeny termočlánky. Po ustálení hodnot na termočláncích byly odečteny hodnoty teploty, přičemž na diodě bylo 63,1 °C, integrovaný obvod byl oteplen na teplotu 60,5 °C a snímací rezistory na 63,4 °C.



Obr. 4-8 Rozložení teplot na obvodu TPS92515 verze 1

4.2 Výsledky měření obvodu MAX20050

Obvod MAX20050 vykazoval po prvním testování výborné parametry z hlediska výstupního proudu, který je stabilní a dosahuje střední hodnoty $1,8 \text{ A} \pm 10 \%$.

4.2.1 Funkční testy

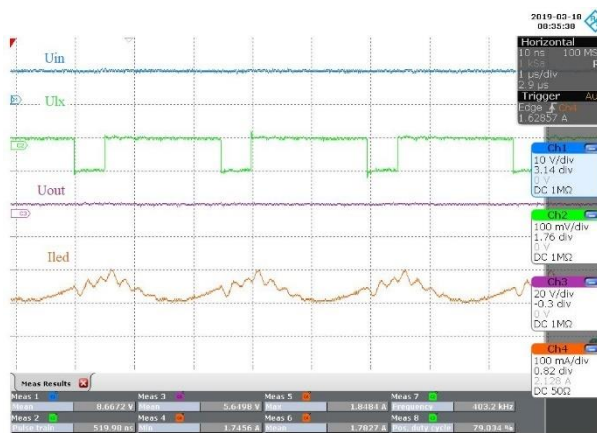
Obvod byl měřen při změně vstupního napětí od 9 V do 16 V. V tomto rozmezí se obvod choval stabilně a splnil daná kritéria. Na následujících obrázcích jsou zaznamenané oscilogramy s naměřenými hodnotami v daném okamžiku. Oscilogramy jsou pro okrajové podmínky vstupního napětí 9 V a 16 a pro typickou hodnotu napětí 13,5 V. Bylo změřeno i minimální možné vstupní napětí, které zajistí již stabilní obvod se splněnými podmínkami. Měřením bylo zjištěno, že obvod splní parametry výstupního proudu již od vstupního napětí 7,3 V.

U_{in}...vstupní napětí (modrý průběh = kanál 1)

U_{lx}...průběh napětí na výstupu spínacího tranzistoru (zelený průběh = kanál 2)

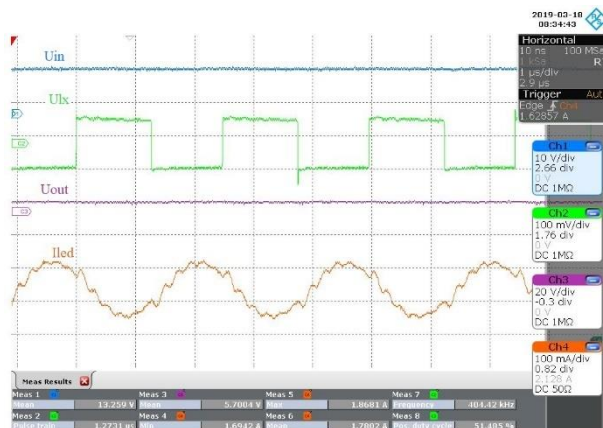
U_{out}...výstupní napětí (fialový průběh = kanál 3)

I_{led}...výstupní proud (oranžový průběh = kanál 4)

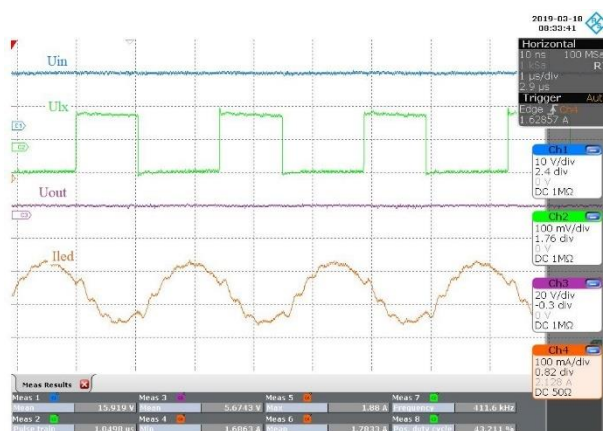


Obr. 4-9 Základní průběhy při $U_{IN} 9 \text{ V}$

Na Obr. 4-10 je zobrazen oscilogram při nominálním vstupním napětí. Vstupní napětí je stabilní bez překmitů, jak zobrazuje modrý průběh. Zelený průběh znázorňuje průběh napětí na hlavním spínacím uzlu. Občasné špičky vznikají při sepnutí obvodu. Výstupní napětí je stabilní. Výstupní proud je zobrazen oranžovou křivkou, zde lze vidět funkce výstupního filtru, která z trojúhelníku upraví tvar na téměř sinusový průběh. Na výstupním proudu je vidět nestabilita sinusový průběh je zvlněný, může to být dáno šumem, který se dostává do měření z okolí, i chybou uzemnění sond při měření.



Obr. 4-10 Základní průběhy při U_{IN} 13,5 V



Obr. 4-11 Základní průběhy při U_{IN} 16 V

Z naměřených hodnot, které jsou v tabulce vloženy do přílohy (Příloha 17) byl vytvořen graf na Obr. 4-12 závislosti účinnosti na změně vstupního napětí.

Účinnost celého vzorku má rozsah od 88 % do 90 %. Tím, že je střední hodnota výstupní proud 1,8 A, účinnost celého zařízení klesá. Hodnotu napětí 13,5 V je ukázán v rovnicích (4.4), (4.5) a (4.6). Tento výpočet vychází z těchto naměřených hodnot:

$$U_{IN} = 13,50 \text{ V}$$

$$I_{IN} = 0,91 \text{ A}$$

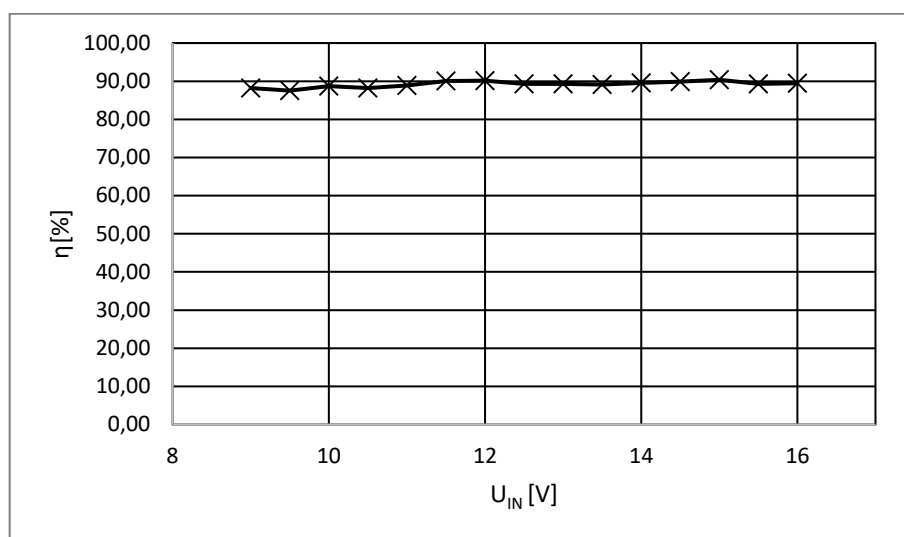
$$U_{OUT} = 6,00 \text{ V}$$

$$I_{OUT} = 1,76 \text{ A}$$

$$P_{IN} = U_{IN} \cdot I_{IN} = 13,5 \cdot 0,91 = 11,83 \text{ W} \quad (4.4)$$

$$P_{OUT} = U_{OUT} \cdot I_{OUT} = 6 \cdot 1,76 = 10,56 \text{ W} \quad (4.5)$$

$$\eta = \frac{P_{IN}}{P_{OUT}} \cdot 100 = \frac{11,83}{10,56} \cdot 100 = 89\% \quad (4.6)$$

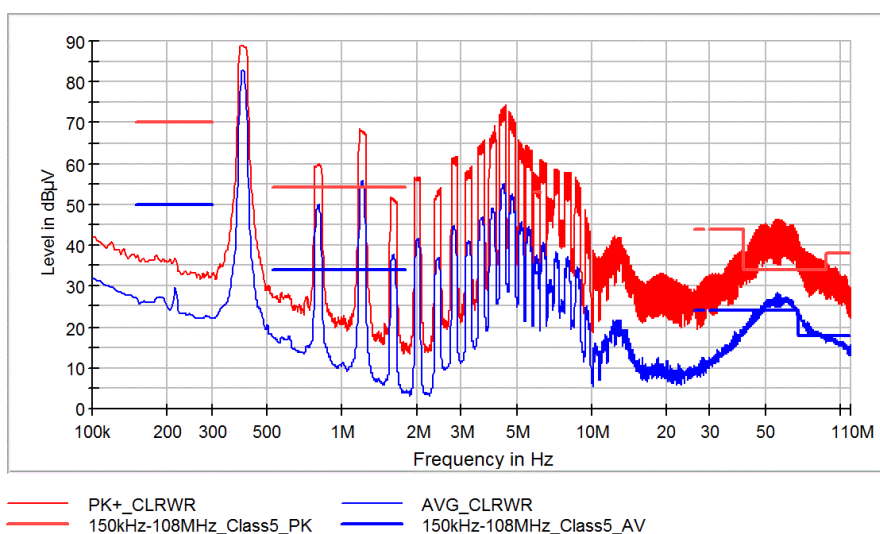


Obr. 4-12 Závislost účinnosti na změně vstupního napětí

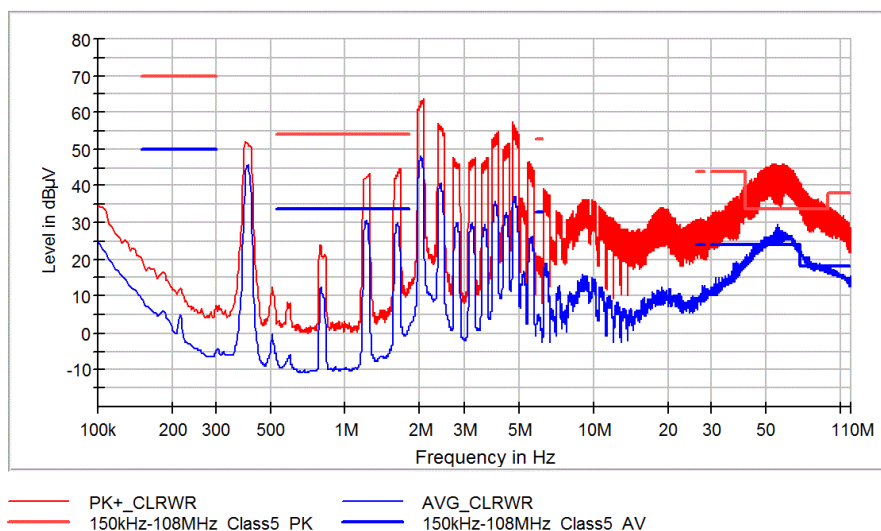
4.2.2 EMC testy

Pro navržený obvod byl teoreticky napočítán EMC filtr, který nebyl v prvním měření osazen, aby byla vidět jeho funkčnost. Obvod byl testován na rušení neboli šum po napájecích kabelech (Conducted emissions) dle normy CISPR25. Na Obr. 4-13 lze vidět úroveň rušení bez použití navrženého filtru, jsou zde zaneseny meze, které nesmí být překročeny, a to v tomto případě jsou. Na Obr. 4-14 je měření již s použitým filtrem a lze zde vidět, že složky jsou výrazně utlumeny a obvod splňuje danou EMC normu až na části ve vyšším frekvenčním pásmu, a to od frekvence 10 MHz. U tohoto integrovaného obvodu je velkou výhodou automatické rozmítání spínací frekvence. Funkce zajistí polopropustní spektra nebo-li lepší rozprostření generovaného šumu a tím redukcí špiček.

Červený průběh zobrazuje měření špičkové hodnoty. Modrý průběh zobrazuje měření průměrné hodnoty.



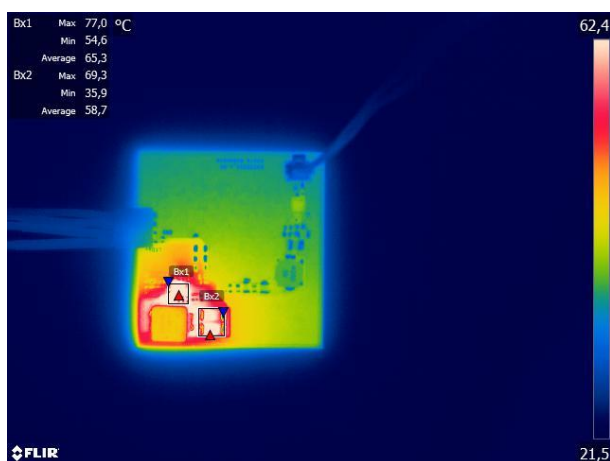
Obr. 4-13 EMC měření bez použití filtru pro obvod MAX20050 verze 1



Obr. 4-14 EMC měření s použitím filtru pro obvod MAX20050 verze 1

4.2.3 Teplotní analýza

Po ustálení obvodu byl vyfocen snímek termokamerou na Obr. 4-15. V obdélníku Bx2 se nachází snímací rezistory, které mají teplotu max 54,6 °C. Bx1 znázorňuje obdélník okolo integrovaného obvodu s teplotou max 64,1 °C. Pro přesnější měření byly k nejvíce tepelně namáhaným komponentám přilepeny termočlánky a změřena jejich hodnota. Po ustálení termočlánků byly odčteny teploty na snímacích rezistorech a byla naměřena teplota 64 °C, integrovaný byl zahřátý na teplotu 73,7 °C.



Obr. 4-15 Rozložení teplot na obvodu MAX20050 verze 1

4.3 Teplotní testy LED modulu

Nejkritičtější oblastí na teplotní testování je DPS s LED. Jak již bylo popsáno v předešlých kapitolách, protéká diodami vysoký proud typicky 1,8 A. Na LED se může vyskytnout výkon až 10,5 W.

Kvůli vysokému proudu a malé ploše LED dochází k problémům s chlazením a možnému zničení LED. Na obrázku Obr. 4-16 jde vidět teplotní rozložení, které není

zcela ideální a DPS bude optimalizována. Na DPS byl osazen konektor, kvůli kterému musí být DPS umístěna na kraj chladiče a není tedy plně využit odvod tepla do plochy. Dalším faktorem je tlustá DPS, tedy vrstva FR4 1,5 mm. Je tedy opět špatný převod tepla do chladiče. Tyto nedostatky budou řešeny v druhém návrhu DPS. K LED byly připojeny termočlánky a proměřeny teploty na LED1 a LED2. Po ustálení byly odčteny teploty na LED1 byla změřena teplota 100 °C a na LED2 76,5 °C.



Obr. 4-16 Rozložení teplot na LED modulu verze 1

4.4 Optimalizace vzorků

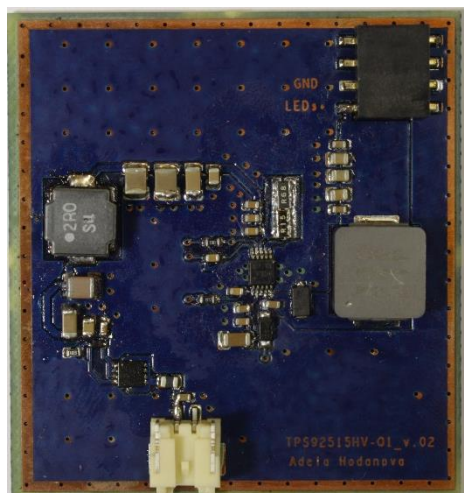
První vzorky obvodů byly důkladně proměřeny, jak je naznačeno v předešlých kapitolách. Následně byly zjištěny nedostatky a navrhнутy nové DPS se snahou zlepšení parametrů.

4.5 Optimalizace vzorku TPS92515

Pro obvod TPS TPS92515 bylo vytvořeno nové schéma s doplněním feritu hned za ESD kondenzátor a změna pouzdra snímacích rezistorů za menší variantu, ale stále pro stejný výkon. Ferit zajistí lepší filtraci na vyšších frekvencích, jedná se řádově o desítky MHz. Z nového schématu byla vygenerovaná data pro vytvoření nového layout. U tohoto obvodu bylo důležité snímací rezistory umístit co neblíže integrovanému obvodu. To se povedlo lépe než u první verze a tím jsou zaručené dobré vlastnosti pro výstupní proud. Protože EMC měření nesplňovala daná kritéria na vyšších frekvencích, byl layout upraven. Byla snaha o menší proudové smyčky, lepší rozložení a kompaktnější uzemnění obou stran DPS, přidání více prokůvů u kritických míst, přidání rámečku na kraji DPS a prokovení. Z termálního hlediska byly přidány prokovy k integrovanému obvodu a u kritických míst byly přidány větší šířky vedení proudu.

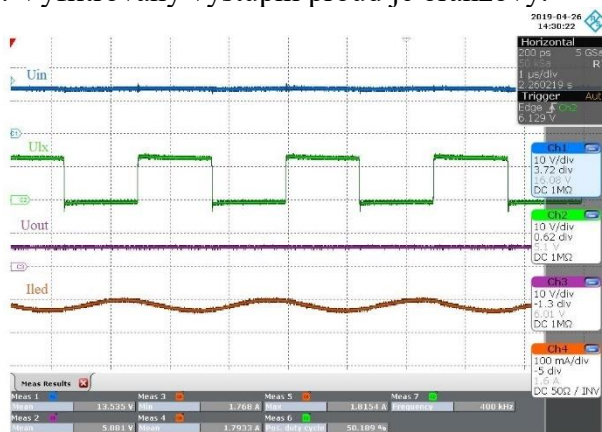
Druhý návrh DPS je v příloze (Příloha 11).

Takto navrhnutá DPS byla vyrobena, osazena a podrobena stejným testům jako první verze. Nový vzorek je zobrazen na Obr. 4-17.



Obr. 4-17 Vzorek TPS92515 verze 2.

Na obrázku Obr. 4-18 je zobrazen oscilogram pro nominální vstupní napětí 13,5 V. Modrý průběh zobrazuje ustálené vstupní napětí. Zelený průběh znázorňuje spínání tranzistoru. Výstupní napětí je zobrazeno fialovou barvou, malé špičky jsou dány spínáním tranzistoru. Vyfiltrovaný výstupní proud je oranžový.



Obr. 4-18 Základní průběhy při U_{IN} 13,5 V

V rozsahu od 9 V do 16 V byly proměřeny vstupní a výstupní parametry obvodu, tedy napětí a proudy. Následně byla vytvořena tabulka naměřených hodnot, která je v příloze (Příloha 17) a graf závislosti účinnosti na změně vstupního napětí, který je na Obr. 4-19.

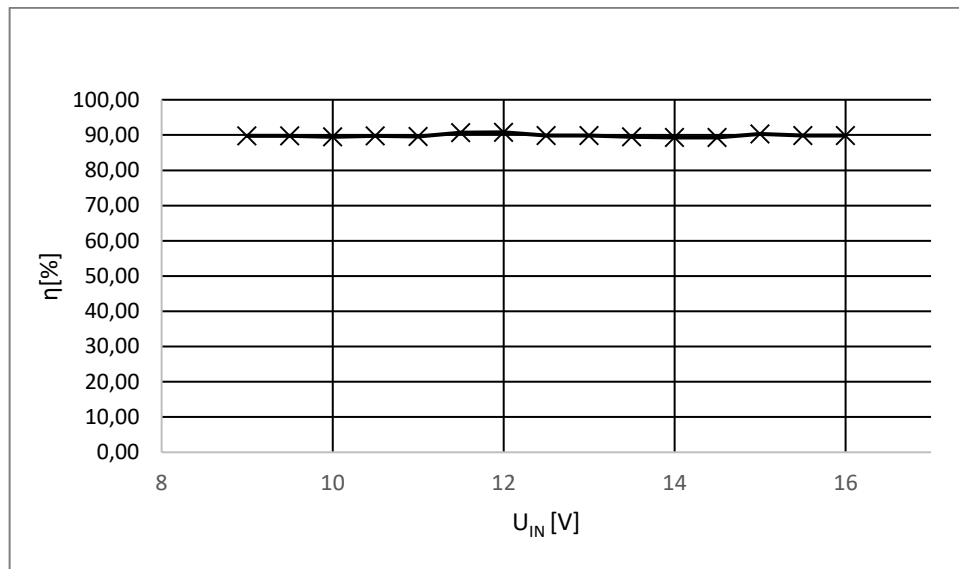
Účinnost celého vzorku má rozsah od 89 % do 90,8 %. Tím, že je střední výstupní proud 1,8 A blízko maxima I_C , je účinnost omezena. Výpočet účinnosti pro hodnotu vstupního napětí 13,5 V je ukázán v rovnicích (4.7), (4.8) a (4.9). Tento výpočet vychází z těchto naměřených hodnot:

$$\begin{aligned}
 U_{IN} &= 13,5 \text{ V} \\
 I_{IN} &= 0,889 \text{ A} \\
 U_{OUT} &= 6,00 \text{ V} \\
 I_{OUT} &= 1,79 \text{ A}
 \end{aligned}$$

$$P_{IN} = U_{IN} \cdot I_{IN} = 13,5 \cdot 0,889 = 12 \text{ W} \quad (4.7)$$

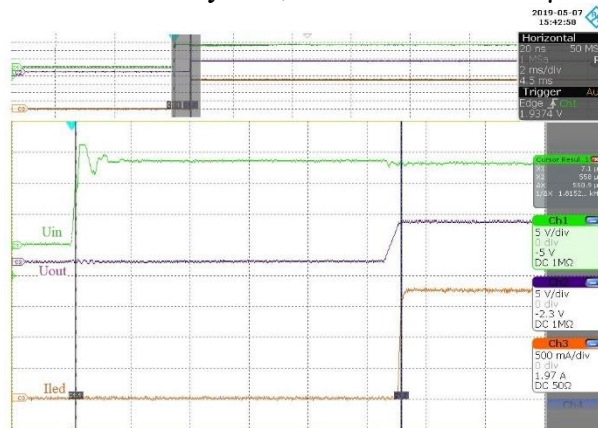
$$P_{OUT} = U_{OUT} \cdot I_{OUT} = 6 \cdot 1,79 = 10,74 \text{ W} \quad (4.8)$$

$$\eta = \frac{P_{IN}}{P_{OUT}} \cdot 100 = \frac{12}{10,74} \cdot 100 = 89,49\% \quad (4.9)$$



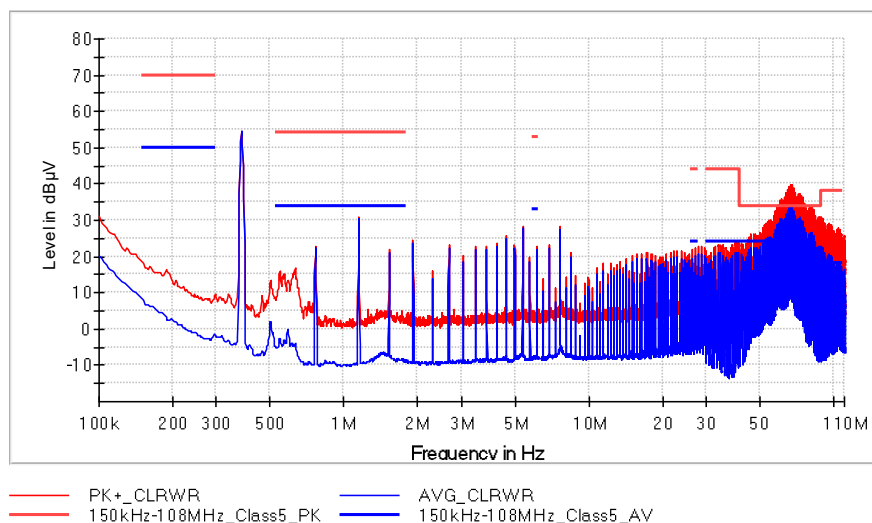
Obr. 4-19 Závislost účinnosti na změně vstupního napětí

Obr. 4-20 znázorňuje náběh obvodu do ustáleného stavu od sepnutí zdroje $U_{IN}=13,5 \text{ V}$ do 90% nominální hodnoty I_{LED} , což nastane za $550 \mu\text{s}$.



Obr. 4-20 Náběh obvodu do ustáleného stavu TPS92515

Obvod byl opět podroben měření v EMC komoře na rušení po vedení. Výsledek měření s již osazeným filtrem je zobrazen na Obr. 4-21. Do 20 MHz splňuje obvod dané podmínky, od této frekvence překračuje opět limit na rušení. Při srovnání s první verzí je ale vidět značný pokles i na vyšších frekvencích, čehož mělo být dosaženo. Bylo by vhodné ještě dále optimalizovat layout, zamyslet se nad vylepšením proudových smyček, lepších zemí apod., ale tím už se tato diplomová práce nebude zabývat.



Obr. 4-21 EMC měření s použitím filtru pro obvod TPS92515 verze2

Srovnání se simulací

U tohoto obvodu lze vyvodit porovnání, jak byla simulace přesná s reálně přeměřeným vzorkem. Byla tedy naměřena stejná tabulka hodnot, jako byla řešena v simulačním módu. Rozdíly naměřených a simulačních hodnot jsou hlavně dány reálnými součástkami a jejich tolerancemi. V simulaci jsou hodnoty komponent pevně dané, v reálném obvodu může docházet k odlišnostem a tím jiným hodnotám naměřeného obvodu. Náběh obvodu 550 μ s a v simulačním profilu 503 μ s pro reálný náběh mohl být zpožděn z důvodu pomalejšího náběhu zdroje apod. Ale tato hodnota je velice málo rozlišná.

Závěrem lze zhodnotit, že když je u daného integrovaného obvodu vytvořen simulační profil, je to výhodné z hlediska představy chování obvodů a představy možného výsledku výstupu obvodu.

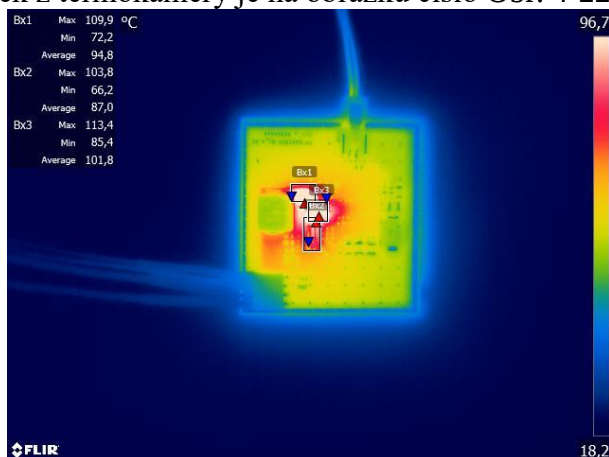
Tab. 4-1 Hodnoty dané simulací

U_{IN} [V]	t_{ON} [μ s]	t_{OFF} [μ s]	T [μ s]	f [kHz]	Střída [-]
9,0	4,126	1,158	5,283	189,3	0,78
13,5	1,193	1,140	2,333	428,7	0,51
16,0	0,868	1,141	2,008	497,8	0,43

Tab. 4-2 Naměřené hodnoty

U_{IN} [V]	t_{ON} [μ s]	t_{OFF} [μ s]	T [μ s]	f [kHz]	Střída [-]
9,0	4,110	1,450	5,565	179,7	0,78
13,5	1,320	1,180	2,500	400,0	0,50
16,0	0,920	1,244	2,164	462,2	0,42

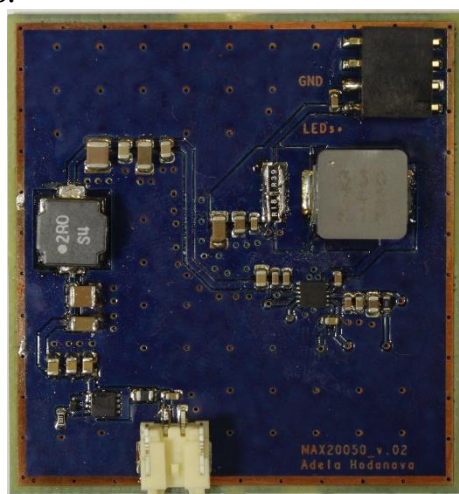
Termokamerou byly pořízeny snímky pro předběžné zjištění nejvíce namáhaných komponent, k těmto místům byly přilepeny termočlánky pro přesnější měření a takto nachystaný vzorek mohl být následně vložen do klimatické komory, jak bude popsáno v další kapitole. Snímek z termokamery je na obrázku číslo Obr. 4-22.



Obr. 4-22 Rozložení teplot na obvodu TPS92515 verze 2

4.5.1 Optimalizace vzorku MAX20050

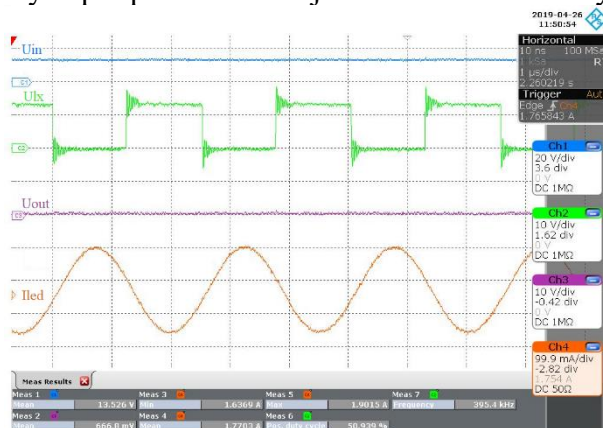
Obvod MAX20050 byl optimalizován z hlediska EMC. Byla snaha vylepšit layout tak, aby obvod splnil požadavky na měření rušení po vedení (conducted emission). Do schématu tedy byla přidána feritová cívka stejně jak u předchozího obvodu a také byly změněna pouzdra snímacích rezistorů na menší. Z termálního hlediska byly přidány prokovy k integrovanému obvodu a celá deska byla lépe prokovená, pro lepší propojení obou vrstev. Byla snaha o vytvoření robustnějšího uzemnění. Nově navržený layout je v příloze (Příloha 14). Takto navržená DPS byla vyrobena a osazena komponentami, tento vzorek je na Obr. 4-23.



Obr. 4-23 Vzorek MAX20050 verze 2.

Následující oscilogram na Obr. 4-24 zobrazuje průběhy při nominálním vstupním napětí 13,5 V, které je zobrazeno modrou barvou a je stabilní. Spínání tranzistoru zobrazuje zelený průběh vznikající zde překmity při spínání. Fialový průběh znázorňuje

výstupní napětí a oranžový průběh výstupní proud, který je vyfiltrováný. V porovnání s prvním vzorkem je výstupní proud stabilnější a není tak zašuměný.



Obr. 4-24 Základní průběhy při UIN 13,5 V

Průměrná účinnost celého obvodu je 89 %, což je stejné jako u prvního vzorku. Závislost změny účinnosti na změně vstupního napětí je zobrazena v grafu Obr. 4-25, tabulka naměřených hodnot, ze kterých je graf vytvořen, je v příloze (Příloha 17). Vzorový výpočet při vstupním napětí 13,5 V je v následujících rovnicích (4.10), (4.11) a (4.12).

$$U_{IN} = 13,50 \text{ V}$$

$$I_{IN} = 0,919 \text{ A}$$

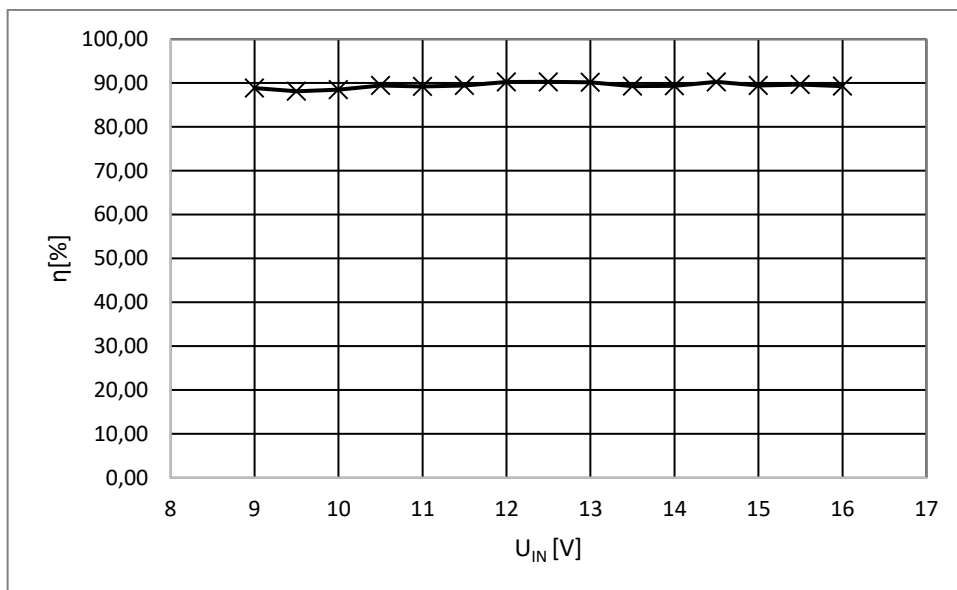
$$U_{OUT} = 6,00 \text{ V}$$

$$I_{OUT} = 1,79 \text{ A}$$

$$P_{IN} = U_{IN} \cdot I_{IN} = 13,5 \cdot 0,919 = 11,95 \text{ W} \quad (4.10)$$

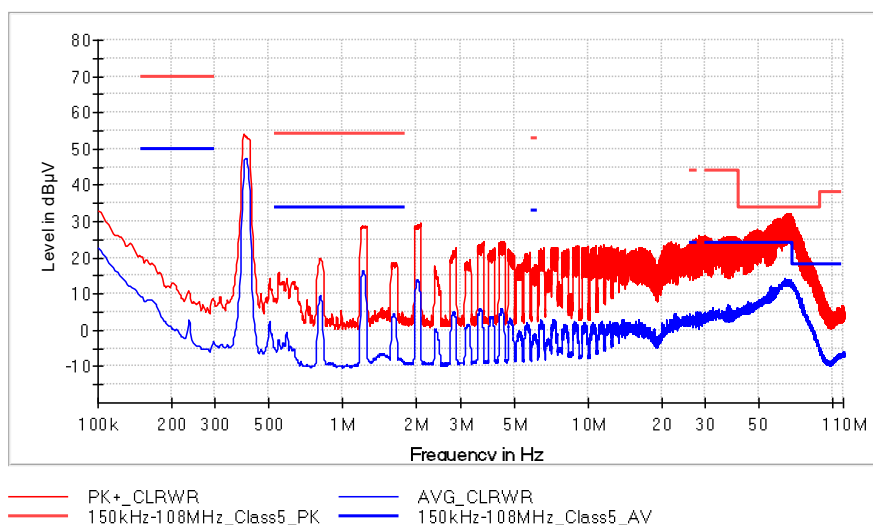
$$P_{OUT} = U_{OUT} \cdot I_{OUT} = 6 \cdot 1,79 = 10,74 \text{ W} \quad (4.11)$$

$$\eta = \frac{P_{IN}}{P_{OUT}} \cdot 100 = \frac{11,95}{10,74} \cdot 100 = 89,9 \% \quad (4.12)$$



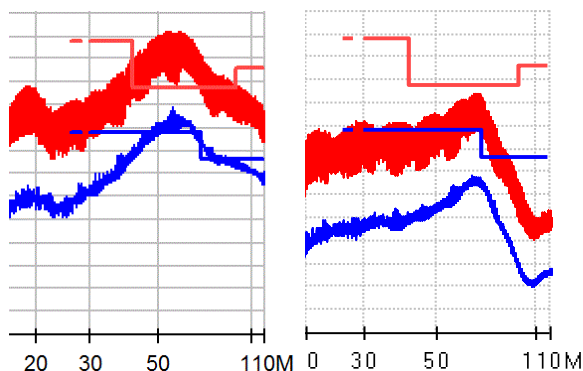
Obr. 4-25 Závislost účinnosti na změně vstupního napětí

Obr. 4-26 zobrazuje výsledek EMC testu již s použitým EMC filtrem. Tento vzorek plně splnil normu ve všech částech frekvenčního spektra. V oblasti vyšších frekvencí okolo 50 MHz je šum pod limitou pro špičkovou hodnotu 3 dB μ V a pro průměrnou hodnotu je pod limitou 10 dB μ V.



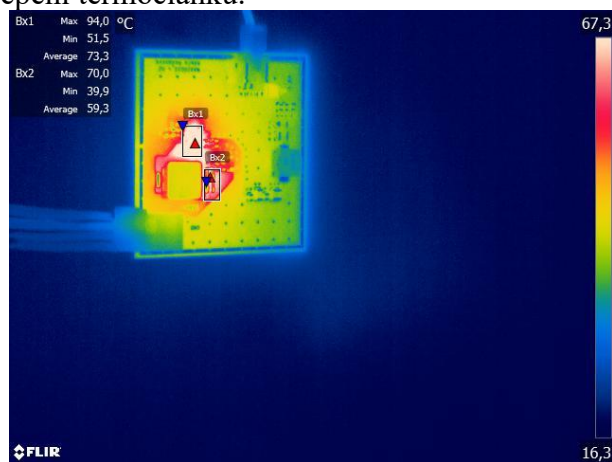
Obr. 4-26 EMC měření s použitím filtru pro obvod MAX20050 verze 2

Na Obr. 4-27 je vidět velké zlepšení na vyšších frekvencích. Tato změna je dána vylepšením layoutu. Lepší rozmístění komponent a zmenšení proudových smyček. Křivka znázorňující špičkovou hodnotu je utlumena o 30 dB μ V oproti prvnímu vzorku a pro průměrné hodnoty je útlum o 30 dB μ V nižší.



Obr. 4-27 Porovnání 1. a 2. vzorku obvodu MAX20050

Snímek z termokamery je na Obr. 4-28. Nejvíce teplotně namáhané komponenty jsou stejně jako o první verze snímací rezistory (Bx2) a integrovaný obvod (Bx1). Pro další měření bylo nutné nalepení termočlánků.

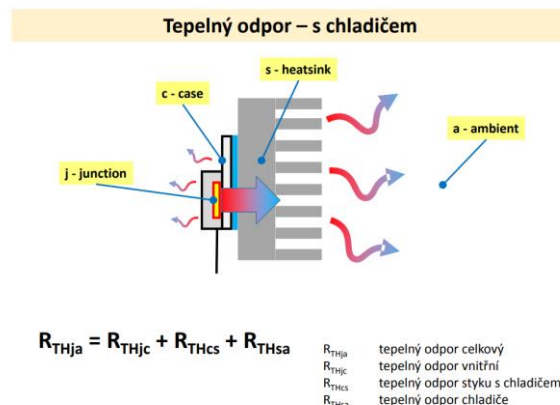


Obr. 4-28 Rozložení teplot na obvodu MAX20050 verze 2

4.5.2 Optimalizace LED modulu

Na modulu LED byl vyměněn napájecí konektor. Byl vybrán SMD konektor, díky kterému je možné umístit DPS doprostřed chladiče a tím zajistit lepší odvod tepla. Dalším krokem bylo zmenšení tloušťky DPS na 1 mm FR4.

K tomuto obvodu byl orientačně dopočítán chladič. Výpočet chladiče je naznačen níže. Obr. 4-29 zobrazuje tepelné odpory celého obvodu i s chladičem. Z tohoto schématu bude vycházet celý výpočet chladiče. Podpůrná literatura, ze které vychází výpočty [27][28].



Obr. 4-29 Rozložení tepelných odporů[27]

Veličiny pro výpočet chladiče:

- P_{max} ... maximální výkon, který lze rozptýlit do okolí není-li použit chladič
- T_{jmax} ... maximální dovolená teplota přechodu (120 °C - rezerva, aby nedošlo k poškození LED)
- T_a ... teplota okolí (30 °C)
- R_{THja} ... celkový tepelný odpor „přechod – okolí“ [K/W]
- R_{THjc} ... z katalogového listu pro LED (3,8 K/W)
- R_{THcs} ... tepelný odpor styku s chladičem
- I_{max} ... maximální (špičková) hodnota proudu (1,9A)
- U_{OUT} ... maximální možné výstupní napětí při teplotě 125 °C (6,8 V)
- η ... účinnost (30 %) (70% teplo)
- h ... výška DPS FR4 1 mm
- $\lambda_{Cu} = 386 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ tepelná vodivost mědi
- $\lambda_{FR4} = 0,3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ tepelná vodivost FR4
- l_1 ... vzdálenost LED od prvního prokovu cca 1 mm
- l_2 ... vzdálenost LED od prvního prokovu cca 2 mm
- l_3 ... vzdálenost LED od prvního prokovu cca 3 mm

Rozměry celá deska 40x40 mm, kde jsou prokovy a LED 10x20 mm, pouzdra LED zabírají 4x9 mm

- n ... počet prokovů (označováno via) 138
- nak ... nakovení 25μm

Maximální výkon:

$$P_{max} = I_{max} \cdot U_{OUT} \cdot \eta = 6,8 \cdot 1,9 \cdot 0,7 = 9,044 \text{ W} \quad (4.1)$$

Tepelný odpor celého obvodu i s chladičem:

$$R_{THja} = \frac{T_{jmax} - T_a}{P_{max}} = \frac{150 - 30}{9,044} = 13,2 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad (4.2)$$

Plocha, kterou zabírají LED a prokovy:

$$S_{DPS} = a_{LED_{Area}} \cdot b_{LED_{Area}} = 10 \cdot 20 = 200 \text{ mm}^2 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (4.3)$$

Plocha prokovů:

$$\begin{aligned} S_{via} &= n \cdot ((R^2 \cdot \pi - (R - nak)^2) \cdot \pi) \\ &= 138((0,00025^2 \cdot \pi - (0,00025 - 0,000025)^2) \cdot \pi) \\ &= 5,15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (4.4)$$

Plocha plnění:

$$\begin{aligned} S_{pl} &= n \cdot ((R - nak)^2 \cdot \pi) = 138((0,00025 - 0,000025)^2 \cdot \pi) \\ &= 2,2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (4.5)$$

Zbylá plocha:

$$\begin{aligned} S_{zb} &= S_{DPS} - S_{via} - S_{pl} = 2 \cdot 10^{-5} - 5,15 \cdot 10^{-6} - 2,2 \cdot 10^{-5} \\ &= 1,73 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (4.6)$$

Tepelné odpory:

$$R_{thFR4} = \frac{h}{\lambda \cdot S_{zb}} = \frac{0,001}{0,3 \cdot 1,73 \cdot 10^{-4}} = 19,28 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad (4.7)$$

$$R_{thvia1} = \frac{h + l_1}{\lambda \cdot S_{via}} = \frac{0,001 + 0,001}{386 \cdot 5,15 \cdot 10^{-6}} = 1,01 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad (4.8)$$

$$R_{thvia2} = \frac{h + l_2}{\lambda \cdot S_{via}} = \frac{0,001 + 0,002}{386 \cdot 5,15 \cdot 10^{-6}} = 1,51 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad (4.9)$$

$$R_{th_{via3}} = \frac{h + l_3}{\lambda \cdot S_{via}} = \frac{0,001 + 0,003}{386 \cdot 5,15 \cdot 10^{-6}} = 2,01 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad (4.10)$$

Tepelný odpor prokovů se vzdáleností 1-3:

$$\begin{aligned} R_{th_{via1-3}} &= R_{th_{via1}} \parallel R_{th_{via2}} \parallel R_{th_{via3}} \\ &= \left(\frac{1}{R_{th_{via1}}} + \frac{1}{R_{th_{via2}}} + \frac{1}{R_{th_{via3}}} \right)^{-1} \\ &= \left(\frac{1}{1,01} + \frac{1}{1,51} + \frac{1}{2,01} \right)^{-1} = 0,46 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \end{aligned} \quad (4.11)$$

Tepelný odpor všech prokovů:

$$R_{th_{via138}} = \frac{h}{\lambda \cdot S_{via}} = \frac{0,001}{386 \cdot 5,15 \cdot 10^{-6}} = 0,51 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad (4.12)$$

Tepelný odpor všech prokovů i se změnou vzdálenosti:

$$R_{th_{via}} = R_{th_{via1-3}} + R_{th_{via138}} = 0,46 + 0,51 = 0,97 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad (4.13)$$

Tepelný odpor FR4:

$$R_{th_{nak}} = \frac{h}{\lambda \cdot S_{zb}} = \frac{0,001}{0,3 \cdot 1,73 \cdot 10^{-4}} = 19,28 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad (4.14)$$

Celkový tepelný odpor DPS:

$$\begin{aligned} R_{th_{DPS}} &= R_{th_{FR4}} \parallel R_{th_{via}} \parallel R_{th_{nakov}} = \left(\frac{1}{R_{th_{FR4}}} + \frac{1}{R_{th_{via}}} + \frac{1}{R_{th_{nak}}} \right)^{-1} \\ &= 0,921 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \end{aligned} \quad (4.15)$$

Tepelný odpor teplovodné pasty:

$$R_{th_{TIM}} = \frac{h_{TIM}}{\lambda \cdot S_{TIM}} = \frac{0,0001}{2,3 \cdot 2 \cdot 10^{-4}} = 0,21739 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad (4.16)$$

Celkový tepelný odpor styku s chladičem:

$$R_{THcs} = R_{th_{DPS}} + R_{th_{TIM}} = 0,921 + 0,21739 = 1,14 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad (4.17)$$

Celkový tepelný odpor:

$$R_{THja} = R_{THjc} + R_{THcs} + R_{THsa} \quad (4.18)$$

Tepelný odpor chladiče:

$$\begin{aligned} R_{THsa} &= R_{THja} - R_{THjc} - R_{THcs} = 9,287 - 3,8 - 0,7076 \\ &= 5,01 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \end{aligned} \quad (4.19)$$

Dle napočítaných parametrů byl vybrán chladič SK 100 50 SA s odporem 2,5 K/W od výrobce

FISCHER ELEKTRONIK. Výběr byl dle napočítaného tepelného odporu chladiče plus rezerva. Modul LED s chladičem je na Obr. 4-30.



Obr. 4-30 LED modul s chladičem 2,5 K/W

4.6 Měření v klimatické komoře

Výsledné vzorky byly podrobeny testování také při změně okolní teploty. Pro tyto testy slouží klimatická komora, která umožňuje variování teplot a proměření požadovaných parametrů na testovaných vzorcích. Testovaný vzorek byl vložen do boxu, který zamezil proudění vzduchu z větráku klimatické komory. Na Obr. 4-31 je ukázáno měření v klimatické komoře. V levém rohu je pohled do boxu, kde je umístěn měřený vzorek s LED modulem, pod tímto obrázkem je vidět celkový box, ve kterém je testovaný vzorek uzavřen. Vpravo lze vidět celkové měřicí zařízení, klimatickou komoru s PC, ve kterém je podpůrný software pro měření.



Obr. 4-31 Klimatická komora

Nejdříve byly testovány vzorky s LED modulem, kde jsou LED umístěny na DPS s technologií FR4. Z důvodu rychlého zahřívání LED diod bylo při teplotě 35 °C došlo k teplotní regulaci, tím že měnič snižoval výstupní proud I_{LED} . V software klimatické komory byly nastaveny teploty 15 °C, 25 °C a 35 °C, přičemž každá teplota byla držena hodinu, aby se ustálila jak teplota v komoře i v boxu, tak aby se ustálily sledované teploty na LED modulu a na proměřovaném vzorku.

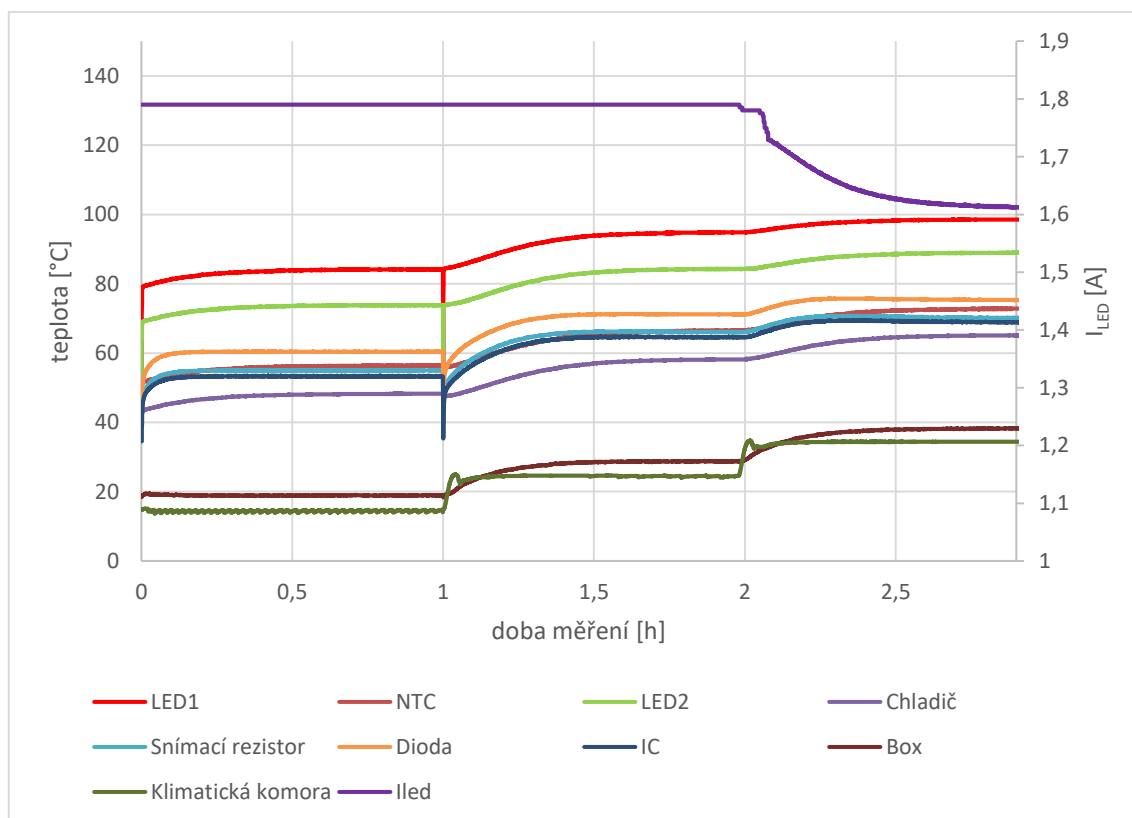
Měření proběhlo při vstupním nominálním napětí 13,5 V. Během měření byly zaznamenávány teploty naměřené termočlánky, přičemž byl sledován i výstupní proud.

Termočlánky byly umístěny dle snímků z termokamery na kritická místa vzorků. U vzorku TPS92515 tedy blízko snímacích rezistorů, Schottkyho diody a integrovaného obvodu. U vzorku MAX20050 byla sledována teplota v blízkosti snímacích rezistorů a integrovaného obvodu. Na LED modul byly přiloženy termočlánky do blízkosti LED 1, LED 2, termistoru a zespod chladiče tak, aby byla sledována prostupnost tepla z DPS do chladiče.

Celkový čas měření byl 3 hodiny pro každý vzorek. Na Obr. 4-32 je záznam výsledků z měření se vzorkem TPS92515, kde je vidět náhlý pokles teplot v čase 1 h. Zde došlo k nechtěnému odpojení napájení klimatické komory a následnému spuštění. V Tab. 4-3 je záznam teplotních parametrů při ustálení teploty v klimatické komoře i v boxu. Tyto teploty lze určit jako referenční a odvodit z nich celkové zahřívání a následné doporučení pro chlazení celého vzorku.

Teplota na čipu LED při teplotě klimatické komory 34,4 °C:

$$T_j = T_{sp} + R_{TH} \cdot P_{LED} \cdot \eta = 98,5 + 3,8 \cdot 10,74 \cdot 0,7 = 127,1 \text{ °C} \quad (4.20)$$



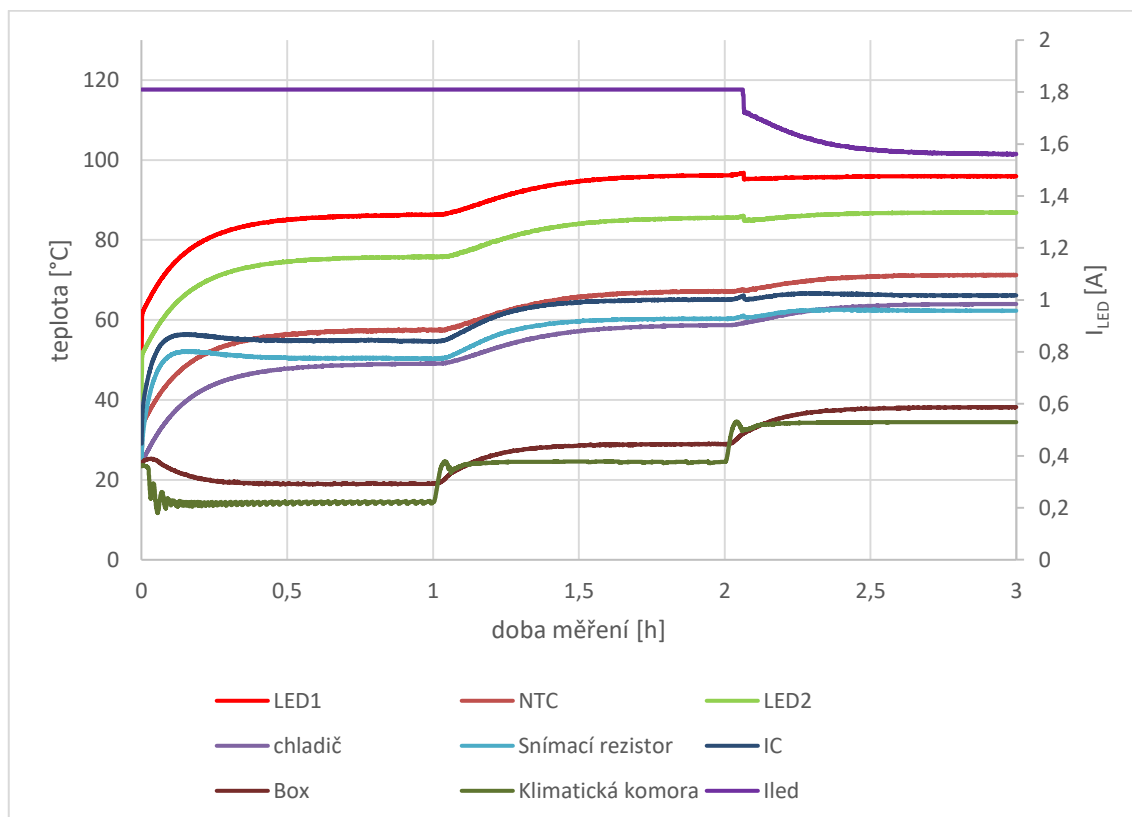
Obr. 4-32 Vzorek TPS92515 s LED modulem s DPS FR4

Tab. 4-3 Teploty na komponentech vzorek TPS92515, LED modu s DPS FR4

Oblast měření	Teplota [°C]	Teplota [°C]	Teplota [°C]
Klimatická komora	14,9	24,5	34,4
Box	18,2	28,8	38,1
LED1	84,0	94,8	98,5
LED2	73,8	84,2	88,9
NTC	56,4	66,5	72,6
Chladič	48,2	58,1	65,1
Snímací rezistor	55,0	66,2	70,2
Dioda	60,4	71,2	75,3
IC	53,3	64,5	68,9

Na Obr. 4-33 je zobrazen graf z měření pro vzorek MAX20050 a v Tab. 4-4 jsou zaznamenány hodnoty teploty měřených oblastí po ustálení teploty klimatické komory. U tohoto vzorku je nejvíce teplotně namáhanou komponentou integrovaný obvod. V grafu je viditelné, že po snížení výstupního proudu mírně klesla teplota na LED diodách a tím je zajištěno, že nemůže dojít k dosažení maximální teploty na čipu, která je daná katalogovým listem 150 °C. Výpočet teploty na čipu LED je pro maximální dosaženou teplotu. Tato situace nastala při 25 °C v klimatické komoře. Výpočet je uveden v rovnici (4.21).

$$T_j = T_{sp} + R_{TH} \cdot P_{LED} \cdot \eta = 96,2 + 3,8 \cdot 10,8 \cdot 0,7 = 124,9 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (4.21)$$



Obr. 4-33 Vzorek MAX20050 s LED modulem s DPS FR4

Tab. 4-4 Teploty na komponentech vzorek MAX20050, LED modul s DPS FR4

Oblast měření	Teplota [°C]	Teplota [°C]	Teplota [°C]
Klimatická komora	14,6	24,5	34,4
Box	15,8	24,4	34,4
LED1	86,2	96,2	95,9
LED2	75,8	85,5	86,9
NTC	54,7	65,1	71,3
Chladič	49,0	58,6	66,1
Snímací rezistor	50,4	65,1	62,3
IC	54,7	60,3	66,1

Aby byla vyzkoušena funkčnost vzorku i při vyšší teplotě jak 35 °C, musel být LED modul upraven. Na chladič byla připevněna pomocí teplovodné pasty DPS vyrobená na hliníkovém substrátu (dále Al), foto LED modulu je příloze (Příloha 8). Díky této technologii lepší k chlazení mohly být vzorky testovány až do teploty 50 °C, přičemž při této teplotě bylo zastaveno měření, aby nedošlo k přehřátí ostatních komponent a možnosti zničení měničů. Důvody budou vysvětleny dále při popisu měření.

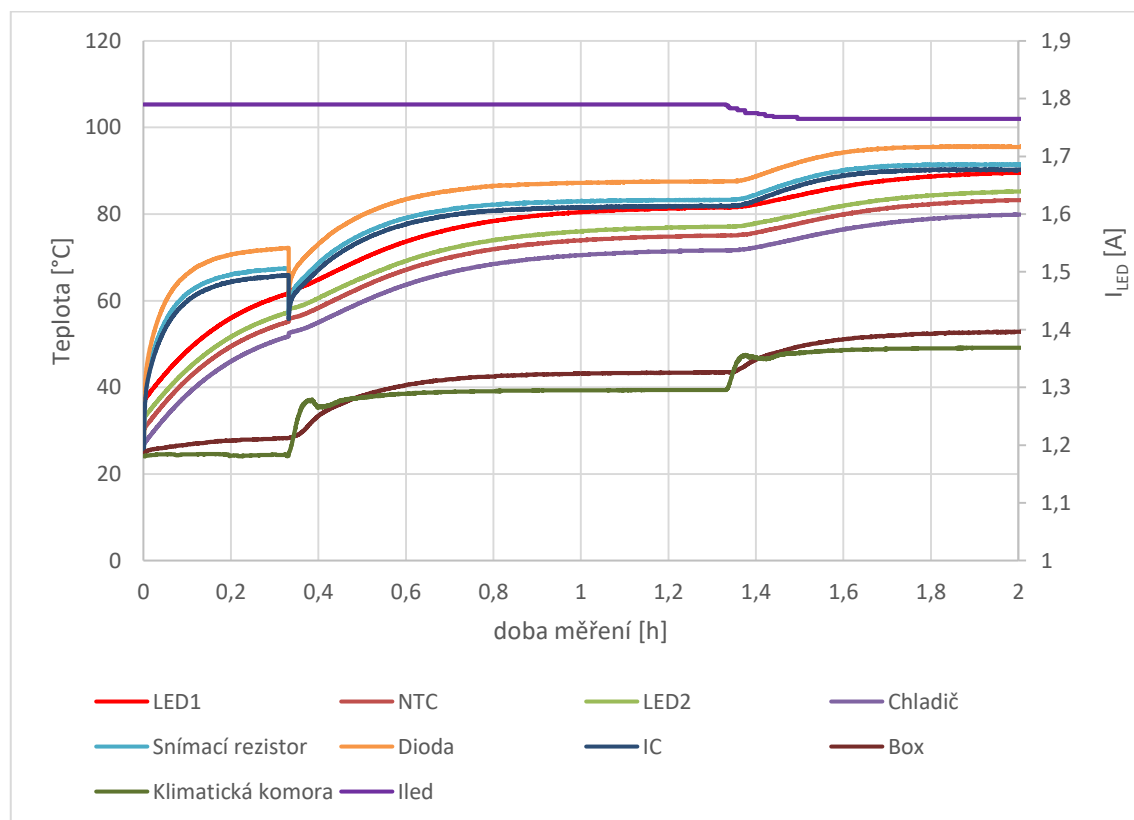
Měření probíhalo celkově 2 hodiny a 30 minut. Nejdříve byla klimatická komora zahřata na 25 °C po dobu 30 minut, následně byla zvýšena teplota na 40 °C a po hodině na 50 °C, kde bylo měřeno opět hodinu z důvodu dosažení stabilizovaných hodnot. Výstupní parametry byly snímány stejně jako v předešlých měření.

První testovaný vzorek byl TPS92515. Výsledky z měření jsou zobrazeny na Obr. 4-34. Z tohoto měření lze sledovat výrazné zlepšení chlazení LED modulu. LED diody mají nižší teplotu na čipu a tím je zaručena jejich delší životnost. Přestup tepla z DPS do chladiče je také výrazně lepší, a to o cca 20 °C.

Nejvíce zahřívanou komponentou je opět dioda, ale její hraniční teplota na čipu, která je dle katalogového listu 150 °C, nebyla překročena. Teplota na NTC téměř odpovídá teplotě na LED a tím mohlo být použito lineární snižování proudu dle teoretického předpokladu, jak bylo řešeno v kapitole 3.6.3. Ustálené hodnoty jsou zaznamenány v tabulce Tab. 4-5. Teplota na čipu LED 1 byla 130,54 °C při zahřátí klimatické komory na teplotu 50 °C dle vzorce (4.22).

Teplota na čipu LED

$$T_j = T_{sp} + R_{TH} \cdot P_{LED} \cdot \eta = 89,5 + 3,8 \cdot 10,74 \cdot 0,7 = 118,1 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.22)$$



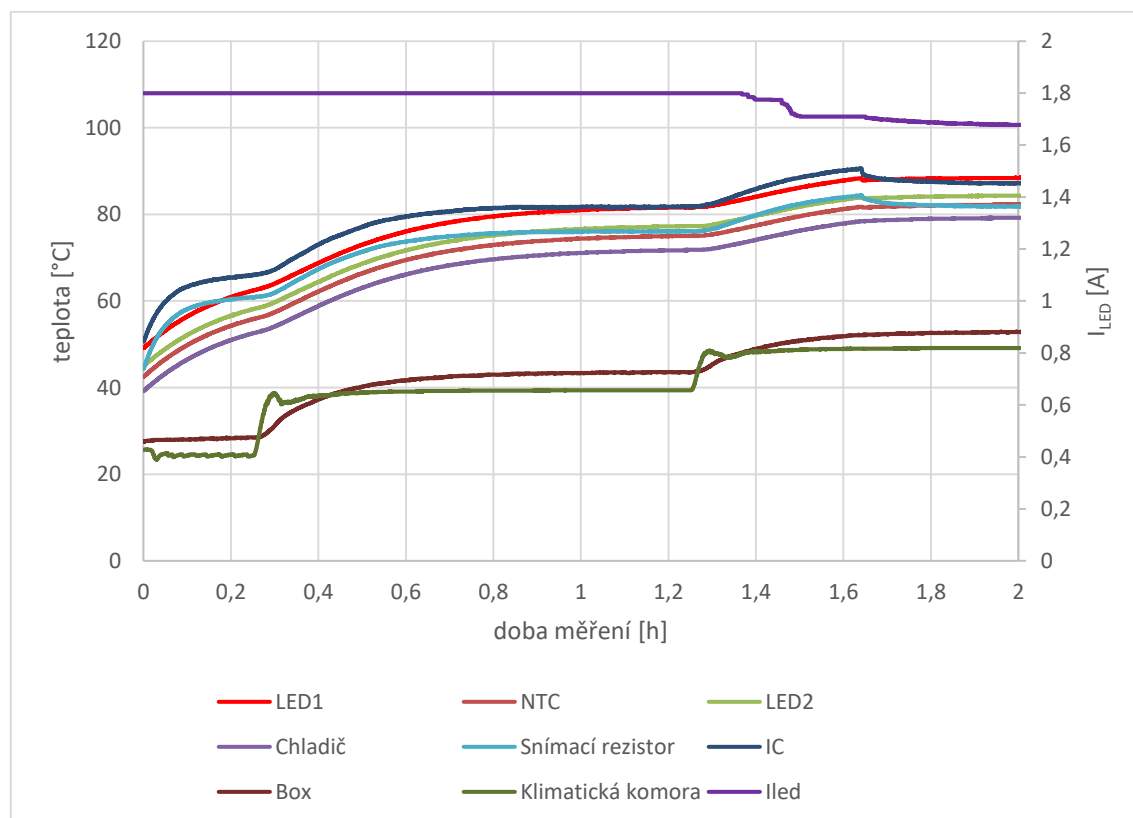
Obr. 4-34 Vzorek TPS92515 s LED modulem s DPS Al

Tab. 4-5 Teploty na komponentech vzorek TPS92515, LED modul s DPS AI

Oblast měření	Teplota [°C]	Teplota [°C]	Teplota [°C]
Klimatická komora	24,4	39,3	49,0
Box	28,2	43,4	52,8
LED1	61,3	81,8	89,5
LED2	57,1	77,2	85,3
NTC	54,3	75,2	83,2
Chladič	51,0	71,7	79,8
Snímací rezistor	67,4	83,4	91,5
Dioda	71,8	87,6	95,5
IC	65,8	81,9	90,2

Druhým testovaným vzorkem byl MAX20050. Tento vzorek byl testován dle stejných nastavení. Měření trvalo opět 2 hodiny a 30 minut. Nejvíce teplotně namáhanou komponentou byl integrovaný obvod. Při 50 °C v klimatické komoře došlo k pomalému lineárnímu snížení výstupního proudu a tím poklesla teplota na integrovaném obvodu. Z funkčního hlediska fungoval vzorek po celou dobu měření dle daných tolerancí.

$$T_j = T_{sp} + R_{TH} \cdot P_{LED} \cdot \eta = 88,4 + 3,8 \cdot 10,8 \cdot 0,7 = 117,2^{\circ}\text{C} \quad (4.23)$$



Obr. 4-35 Vzorek MAX20050 s LED modulem s DPS AI

Tab. 4-6 Teploty na komponentech vzorek MAX20050, LED module s DPS AI

Oblast měření	Teplota [°C]	Teplota [°C]	Teplota [°C]
Klimatická komora	24,6	39,4	49,1
Box	28,3	43,5	52,8
LED1	60,7	81,7	88,4
LED2	59,6	77,3	84,4
NTC	56,1	75,0	82,3
Chladič	52,6	71,8	79,1
Snímací rezistor	61,0	76,0	81,8
IC	65,8	81,7	87,1

4.7 Srovnání vzorků

Tato kapitola pojednává o celkovém srovnání obou vzorků z hlediska návrhu DPS, funkčnosti, teplotního namáhání a ceny. Hlavní parametry obou vzorků jsou vypsány v tabulce Tab. 4-7.

Tab. 4-7 Srovnání vzorků

Parametry	TPS92515	MAX20050
Synchronní usměrnění	NE	ANO
Integrovaný spínací tranzistor	ANO	ANO
Výstupní proud [A]	1,79	1,8
Účinnost min [%]	85,6	87,0
Účinnost max [%]	86,9	88,6
Automobilová kvalifikace	ANO	ANO
Cena celkem Kč	69,0	76,0

Z hlediska návrhu DPS je jednodušší obvod MAX20050, jelikož má praktičtější rozložení pinů na pouzdře. Katalogový list uvádí možnost umístění snímacích rezistorů dále od integrovaného obvodu, snímání proudu je i přes větší vzdálenost přesné a stabilní. Díky tomu umožňuje variabilnější možnost rozmístění komponent. Dobře navrženým layoutem lze dosáhnout výborných výsledků z hlediska EMC i při vysokých frekvencích.

Dalším užitečnou vlastností tohoto obvodu je funkcionality rozprostírání spínací frekvence, což zajistí rozprostřené spektrum. Výhodou je fixní spínací frekvence. Všechny hlavní komponenty měniče jsou integrované a není nutné vybírat podpůrné prvky, celý obvod je velice kompaktní. Přestože má tento obvod progresivní strukturu se synchronním usměrněním, při takto zadaném proudu není možné dosáhnout účinnosti více jak 90 %. Při nižším proudu by mohla být účinnost větší, jak je uvedeno v katalogovém listu.

Pro obvod TPS92515 je kladen důraz na rozmístění komponent. Rozmístění pinů integrovaného obvodu je horší než u předešlého IC a s tím se váží větší komplikace

při návrhu kvalitního layoutu. Snímací rezistory musí být co nejblíže k integrovanému obvodu jinak dochází ke zhoršení regulace výstupního proudu. I z pohledu EMC musí být kladen důraz na kvalitní layout. Obvod TPS92515 je bez synchronního usměrnění, tedy představitel klasické topologie s usměrňovací diodou. Z hlediska účinnosti při takto vysokém proudu vychází velice přívětivě.

Z hlediska teplotního namáhání je jsou oba vzorky tepelně namáhány podobně, ale u vzorku s obvodem TPS92515 je nutné sledovat teplotní rozložení na výkonové diodě, která nesmí překročit povolené maximum.

Cenové porovnání bylo provedeno pouze z hlediska rozdílů ve výkonovém jádru měniče. Vzorek s integrovaným obvodem TPS92515 vychází cenově IC = 56 Kč a Schottkyho dioda = 13 Kč celková kalkulace tedy 69 Kč. Vzorek s obvodem MAX20050 má započítán pouze integrovaný obvod za cenu 76 Kč. Ceník komponent byl vyhledán v internetovém obchodu Mouser electronics [29]. Cenový rozdíl je pod 10 Kč. V sériové výrobě by cena byla nižší, protože by se od dodavatele odebíralo více kusů, tato cena je počítána pouze pro jeden kus. V sériové výrobě může tedy i takto relativně malý cenový rozdíl hrát roli při výběru, který integrovaný obvod bude použit.

5. ZÁVĚR

Diplomová práce nejprve teoreticky popisuje LED budiče. Následuje popis lineárního regulátoru a následně spínaných budičů v různých topologiích. Práce detailně popsala teorii LED diody s následným převedením do praxe a vybráním LED diody s požadavkem na výstupní proud 1,8 A.

Byly zvoleny dva integrované obvody, jeden se synchronním usměrněním (MAX20050) a druhý bez této funkcionality (TPS92515). Integrované obvody byly zvoleny pro vzájemné porovnání, a proto byla snaha mít co nejvíce komponent stejných. Pro oba obvody byly dle katalogových listů vypočteny obvodové prvky.

Pro obvod TPS92515 je dostupný model pro simulační software PSpice, díky kterému mohly být vytvořeny základní simulace. Do simulačního modelu byly použity napočítané obvodové prvky a provedeny základní simulace z hlediska variování vstupního napětí a sledování výstupního proudu. Dle těchto výsledků byla doladěna paralelní kombinace snímacích rezistorů pro správné nastavení výstupního proudu. Simulací byla zjištěna závislost frekvence na velikosti vstupního napětí, jak je dáno i katalogovým listem. Byla provedena časová simulace náběhu obvodu, která byla zjištěna 503 μ s. Dále byla prověřena změna výstupního proudu s měnící se indukčností cívky, u které byla zjištěna odchylka od nominální hodnoty ± 2 %. Simulací Monte Carlo bylo ověřeno chování obvodu při tolerancích komponent. Výstupní proud se bude pohybovat v oblasti od 1,71 A do 1,88 A. Nejsou zde započteny tolerance integrovaných obvodů, nicméně dovolená hodnota výstupního proudu může být v rozmezí ± 10 % a tím by takto navržený obvod měl splnit specifikaci.

Pro obvod MAX20050 byla teoreticky zjištěna odchylka proudu $\pm 2,5$ % od nominální hodnoty, což se jeví jako velice pozitivní předpoklad.

Práce se zabývá studiem parazitních vlivů hlavních součástek. Tolerance každé komponenty mohou ovlivňovat výstupní proudy. Velký vliv na stabilitu vzorku mají i parazitní vlastnosti desek plošného spoje v kritických místech zapojení. Z těchto teoretických předpokladů byl vytvořen layout.

Pro oba obvody byly vybrány jednotlivé komponenty, tak aby splňovaly požadavky pro automobilovou kvalifikaci. Po vytvoření schémat byl vytvořen návrh layoutu a vyrobeny první vzorky, které byly celkově otestovány. Tyto vzorky měly několik nedostatků, které byly v diplomové práci detailně popsány. Další postup se zaměřil na optimalizaci s důsledkem dosažení lepších výsledků. Druhé verze vzorků byly též detailně otestovány z hlediska funkčnosti, účinnosti, EMC (conducted emission) a teplotního namáhání, čímž byly potvrzeny lepší výsledky.

Z hlediska funkčnosti oba vzorky splnily požadavky konstantního výstupního proudu s měnícím se vstupním napětím v rámci rozsahu vstupu od 9 V do 16 V.

V účinnosti obou vzorků nebyl razantní rozdíl, přičemž obvod MAX20050 dosahoval přibližně 89 %, to je o 2 % vyšší účinnost než s obvodem TPS92515.

Další testování probíhalo v EMC komoře, kdy u vzorků proběhla analýza rušení generovaného do napájecí větve. Toto měření proběhlo v souladu s normou CISPR25. První vzorky tuto normu nesplnily, na vyšších frekvencích, ani po přidání EMC filtru. Navržením nového layoutu byla snaha utlumení šumu v tomto kritickém pásmu. U vzorku MAX20050 se norma povedla splnit v celém rozsahu měření. Vzorek TPS92515 by mohl být ještě dále upraven, ale i tak byl útlum nižší o 10 dB μ V než

v předešlé variantě. Z hlediska lepšího EMC se jeví obvod MAX20050 hlavně kvůli jeho funkcionalitě automatického rozmítání spínací frekvence.

Vzorek s obvodem TPS92515 byl následně porovnán s hodnotami danými simulací. Bylo zjištěno, že hodnoty vypočtené dle simulace ukazují velice podobné hodnoty jako reálné vzorky a určené meze byly splněny.

Paralelně s návrhem a realizací budičů byl navrhován LED modul, který též procházel změnami a vylepšeními. Bylo nutné řešit problematiku chlazení LED diod. Prvotním návrhem bylo umístění LED diod na DPS s technologií FR4. S touto technologií docházelo k přehřívání LED diod a bylo nutné zajistit lepší chlazení. Další vzorek byl řešen DPS s hliníkovým jádrem, kde byl zajištěn lepší přestup tepla z DPS do chladiče.

Teplotními testy prošla již celá sestava, a to daného vzorku (MAX20050 nebo TPS92515) s LED modulem. Vzorky byly přeměřeny termokamerou pro zjištění nejvíce teplotně namáhaných komponent, k těmto místům byly přilepeny termočlánky pro zajištění přesnějšího měření a obě sestavy byly testovány v klimatické komoře. Vzorky podlely testování od 15 °C do 35 °C při použití LED modulu s technologií FR4. V této konfiguraci nastalo při 35 °C lineární snižování výstupního proudu. S použitím LED modulu s hliníkovou technologií byly testovány teploty 25 °C, 40 °C a 50 °C. Při 50 °C byly více namáhané hlavní komponenty na měničích a díky lineární regulaci proudu byly komponenty ochráněny, aby nedošlo k překročení jejich maximální dovolené teploty na čipu. Za daných podmínek splnily vzorky všechny testy v předem určených limitech.

Po zvážení všech vlastností obou obvodů je dle mého názoru lepší volbou obvod MAX20050. Tento obvod vypadá jako dobře použitelný i pro sériové projekty řešené v rámci R&D AL Jihlava.

Literatura

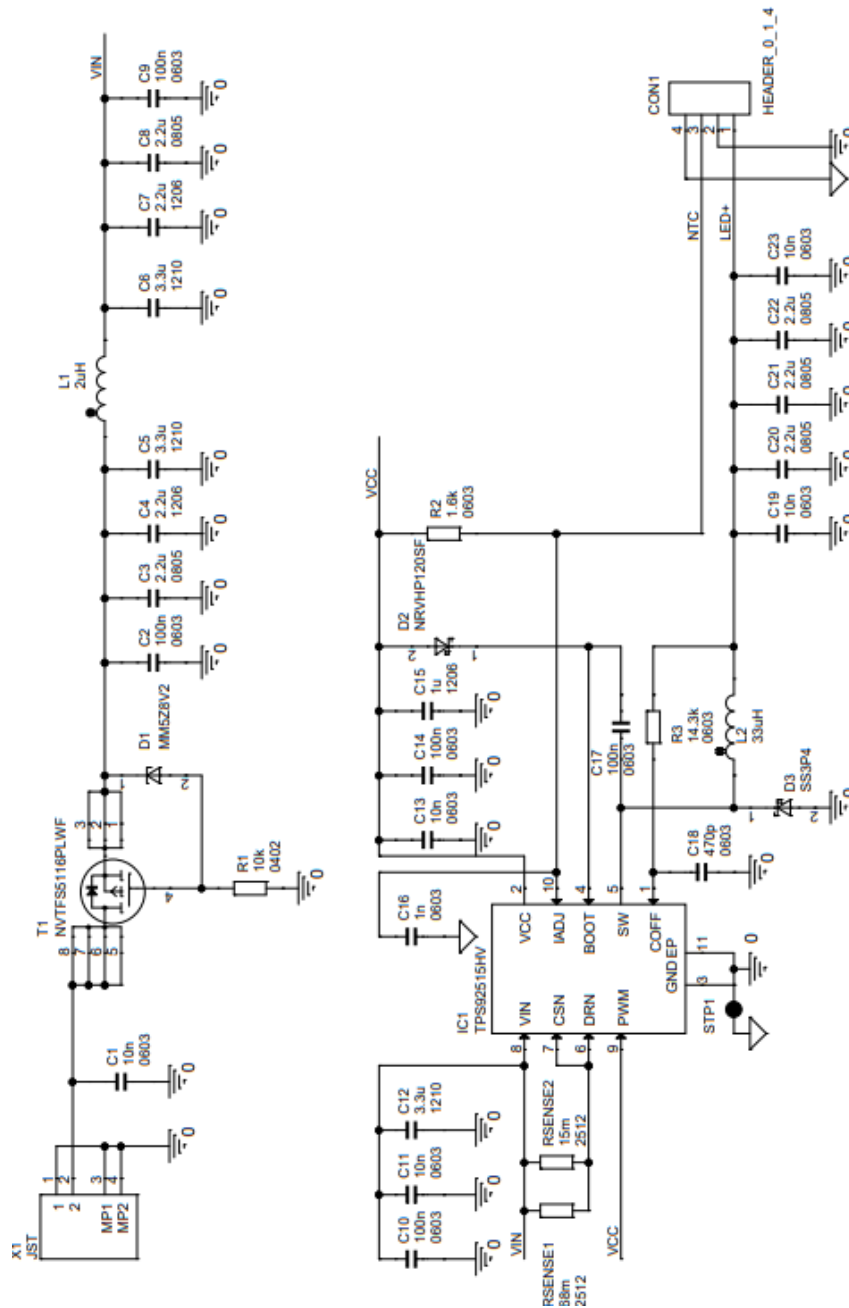
- [1] *Technology White Paper* [online]. [cit. 2019-01-12]. Dostupné z: http://www.climateaction.org/images/uploads/documents/Philips_Understanding-Power-LED-Lifetime-Analysis.pdf
- [2] VOCHYÁN, Josef. *Základy Optiky a Elektroniky*. Jihlava: Automotive Lighting, 2014, 66 s. Prezentace.
- [3] *Terminologie LED světelných zdrojů* [online]. 2017 [cit. 2018-11-19]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/clanek/terminologie-led-svetelnych-zdroju-2435>
- [4] *Jak LED diody fungují* [online]. [cit. 2018-06-25]. Dostupné z: <https://eshop.ledsolution.cz/led-diody-technicke-udaje>
- [5] Voltampérová charakteristika diody. In: *ELUC* [online]. Olomouc, 2015 [cit. 2018-08-24]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/578>
- [6] *NCSW170BT* [online]. [cit. 2018-11-12]. Dostupné z: <http://www.fairchip.com/pdf/Nichia/NCSW170B.pdf>
- [7] *OSLON Black Flat LUW HWQP* [online]. [cit. 2018-11-12]. Dostupné z: https://www.osram.com/os/ecat/OSLON%C2%AE%20Black%20Flat%20LUW%20HWQP/com/en/class_pim_web_catalog_103489/global/prd_pim_device_2190825/
- [8] *Luxeon FX Plus Cool White* [online]. [cit. 2018-11-12]. Dostupné z: <https://www.lumileds.com/uploads/767/DS182-pdf>
- [9] *SZ5-P series* [online]. [cit. 2018-11-12]. Dostupné z: http://www.seoulsemicon.com/upload2/SZ5-P0-WN-00_Datasheet_Rev41.pdf
- [10] 3. *Diody, tranzistory, tyristory, triaky, diaky* [online]. , 46 [cit. 2018-12-05]. Dostupné z: [http://files.materialy5.webnode.cz/200000059-8a8c68b85f/3.%20Diody,%20tranzistory,tyristory,%20triaky,%20diaky%20\[re%C5%BEim%20kompatibility\].pdf](http://files.materialy5.webnode.cz/200000059-8a8c68b85f/3.%20Diody,%20tranzistory,tyristory,%20triaky,%20diaky%20[re%C5%BEim%20kompatibility].pdf)
- [11] *WIRELI LED* [online]. [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: <http://www.wireliled.cz/aplikacni-poznamky/kolorimetrie/>
- [12] *OSLON® LX ECE, LUW CVBP.CE* [online]. [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: https://www.osram.com/os/ecat/OSLON%C2%AE%20LX%20ECE%20LUW%20CVBP.CE/com/en/class_pim_web_catalog_103489/global/prd_pim_device_2190858/
- [13] OßMANN, Prof. Dr. Ing. Martin. *Malé měniče DC-DC: Měníče stejnosměrného napětí pod lupou*. 2002.
- [14] SKOUPÝ, Petr. *Vzorové moduly DC/DC měničů* [online]. Brno, 2010 [cit. 2018-08-24]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=28545
- [15] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *Napájecí zdroje I*. Praha: BEN - technická literatura, 1996. ISBN 80-860-5602-3.

- [16] Osram [online]. [cit. 2018-09-27]. Dostupné z: <https://www.osram-group.com/en/our-company/our-strategy/110-years-of-osram>
- [17] AEC-Q100 [online]. [cit. 2018-09-27]. Dostupné z: <https://www.renesas.com/us/en/products/automotive/aec-q100.html>
- [18] *Napájení elektronických zařízení* [online]. Brno [cit. 2018-09-27]. Dostupné z: https://moodle.vutbr.cz/pluginfile.php/337199/mod_resource/content/1/Skripta_BNEZ.pdf. Přednášky. VUT - Ústav radioelektroniky.
- [19] *Synchronní snižující měnič* [online]. [cit. 2018-11-12]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2348495/>
- [20] HCM1A1307 [online]. EATON, 2016 [cit. 2018-11-19]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/87/bus-elx-ds-10552-hcm1a1307-1075421.pdf>
- [21] KW CULNM1.TG [online]. Osram, 2018 [cit. 2018-11-12]. Dostupné z: www.osram-os.com
- [22] TPS92515HV-Q1 [online]. [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: <http://www.ti.com/product/TPS92515HV-Q1>
- [23] MAX20050 [online]. [cit. 2018-11-12]. Dostupné z: <https://www.maximintegrated.com/en/products/power/led-drivers/MAX20050.html>
- [24] VCM1105T-330MS5 [online]. [cit. 2018-11-12]. Dostupné z: <http://www.cynotec.com/upfile/products/download/VCM1105T.pdf>
- [25] KOLKA, Dc. Dr. Ing. Zdeněk. *Analýza elektronických obvodů programem OrCAD PSpice* [online]. VUT [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: <https://user.unob.cz/biolek/vyukaVUT/skripta/PSPICE.pdf>
- [26] *Vybrané vlastnosti DPS* [online]. [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/125293/mod_resource/content/2/01_Vlastnosti_DPS.pdf
- [27] *Výkonová elektronika: Výpočet chlazení* [online]. [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <https://moodle.fel.cvut.cz/mod/folder/view.php?id=648>
- [28] SCHENK, David. *Optimalizace desky plošného spoje pro výkonovou LED* [online]. Brno, 2013 [cit. 2019-04-12]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=68151
- [29] MOUSER ELETRONICS [online]. [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: <https://www.mouser.com>

Seznam příloh

Příloha 1	Obvodové zapojení vzorku TPS92515 v.01	81
Příloha 2	Deska plošného spoje vzorku TPS92515 v.01.....	82
Příloha 3	Seznam komponent vzorku TPS92515 v.01.....	83
Příloha 4	Obvodové zapojení vzorku MAX20050 v.01	84
Příloha 5	Deska plošného spoje vzorku MAX20050 v.01	85
Příloha 6	Seznam komponent vzorku MAX20050 v.01	86
Příloha 7	Obvodové zapojení LED modulu	87
Příloha 8	Deska plošného spoje LED modulu verze 1-3.....	87
Příloha 9	Seznam komponent LED modulu.....	88
Příloha 10	Obvodové zapojení vzorku TPS92515 v.02	89
Příloha 11	Deska plošného spoje vzorku TPS92515 v.02.....	90
Příloha 12	Seznam komponent vzorku TPS TPS92515 v.02.....	91
Příloha 13	Obvodové zapojení vzorku MAX20050 v.02	92
Příloha 14	Deska plošného spoje vzorku MAX20050 v.02	93
Příloha 16	Seznam komponent vzorku TPS MAX20050 v.02	94
Příloha 17	Tabulky naměřených hodnot	95

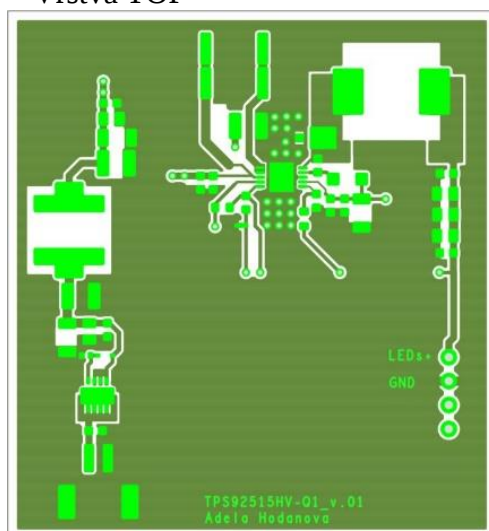
Příloha 1 Obvodové zapojení vzorku TPS92515 v.01



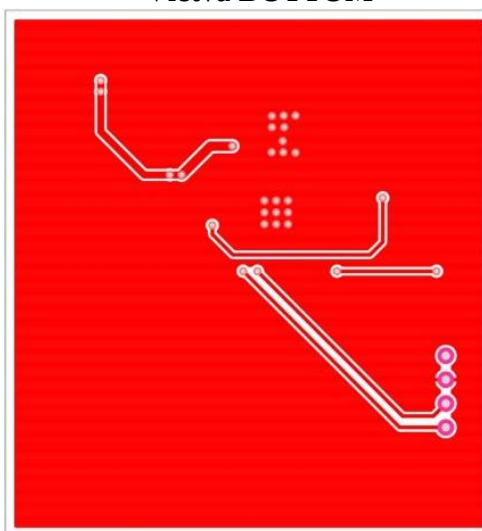
Příloha 2 Deska plošného spoje vzorku TPS92515 v.01

Rozměry desky: 51,7x55,6

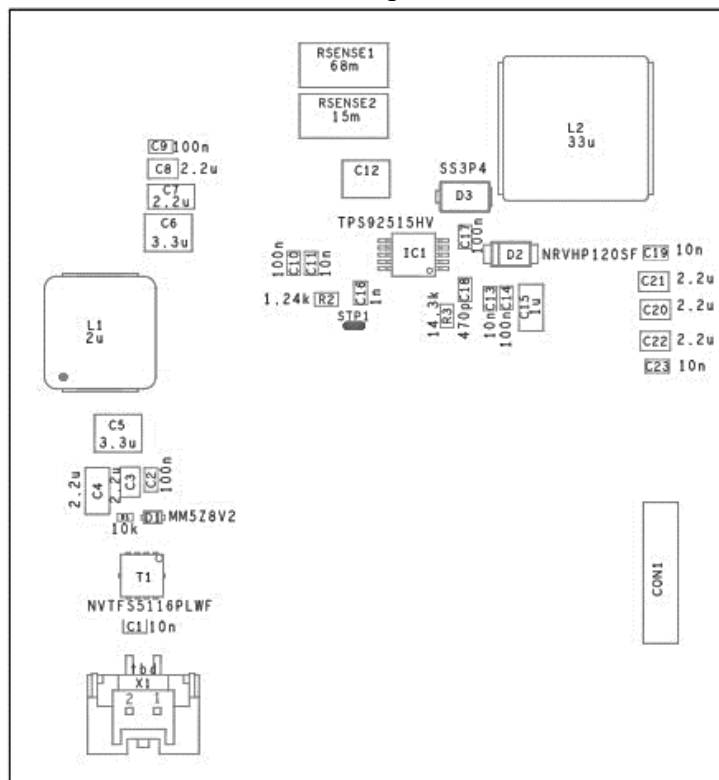
Vrstva TOP



Vrstva BOTTOM



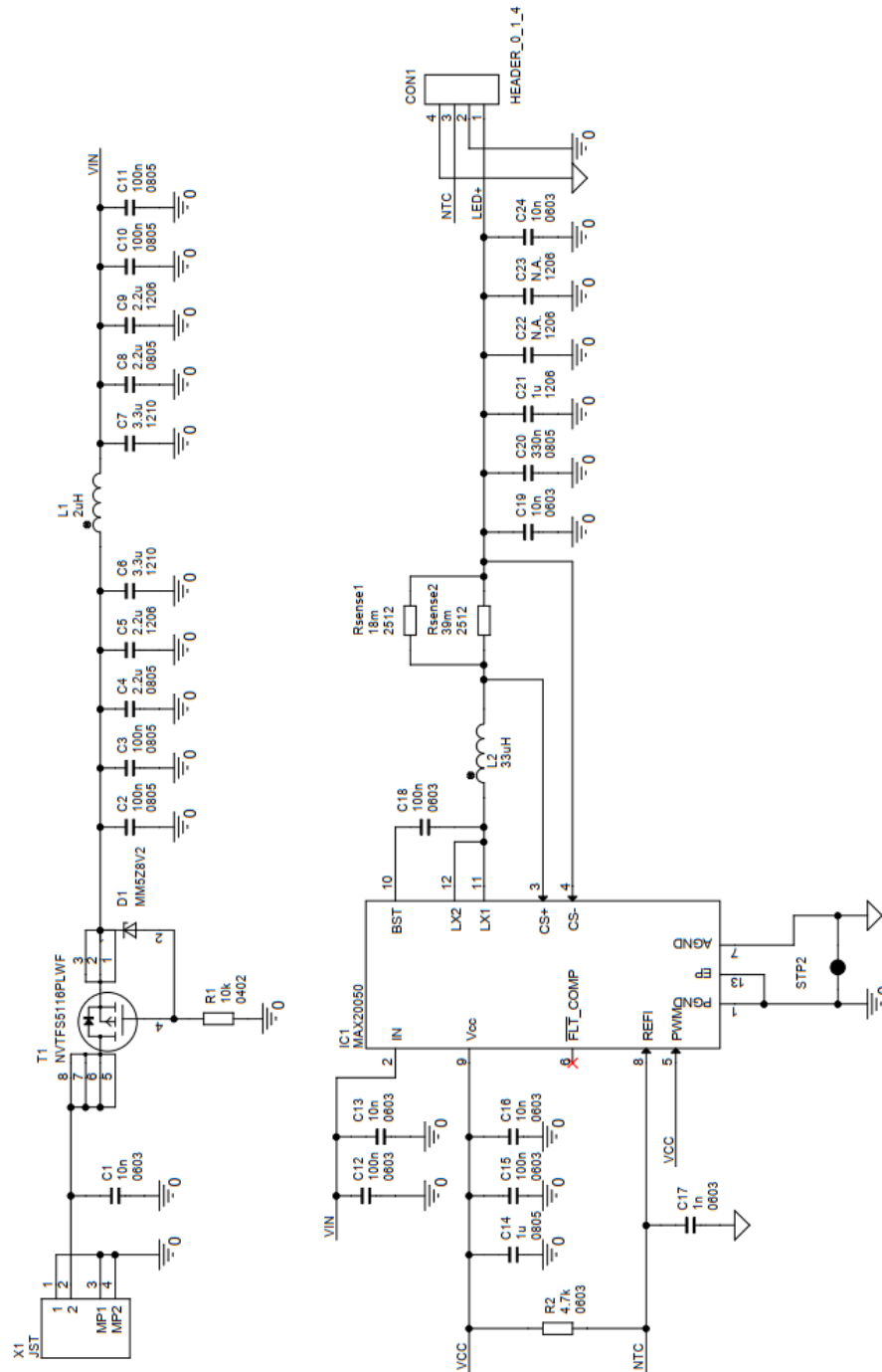
Osazovací plán



Příloha 3 Seznam komponent vzorku TPS92515 v.01

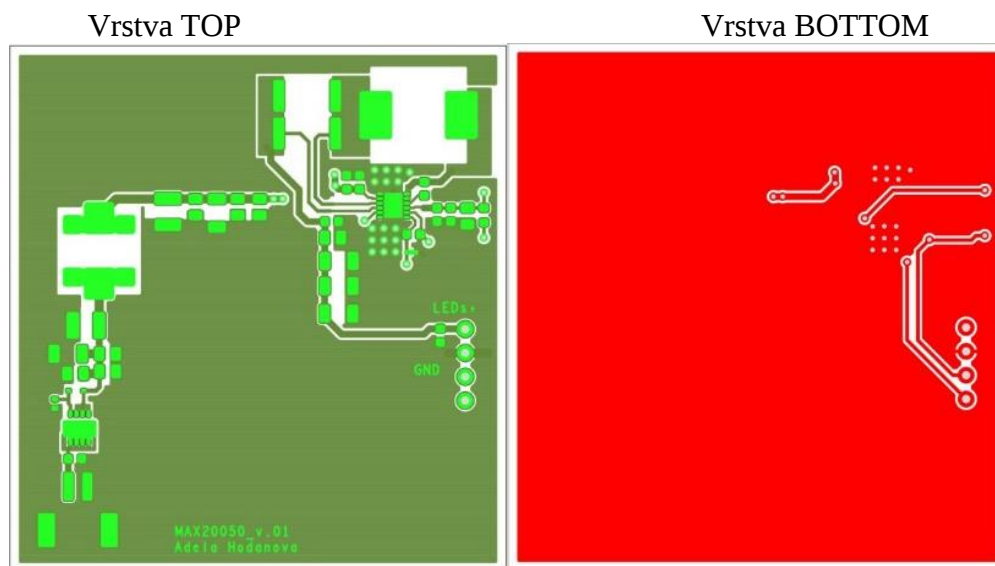
Pořadové číslo	Počet kusů	Označení	Hodnota	Pouzdro
1	1	CON1		HEADER_0_1_4
2	5	C1,C11,C13,C19,C23	10n	603
3	5	C2,C9,C10,C14,C17	100n	603
4	5	C3,C8,C20,C21,C22	2.2u	805
5	2	C4,C7	2.2u	1206
6	3	C5,C6,C12	3.3u	1210
7	1	C15	1u	1206
8	1	C16	1n	603
9	1	C18	470p	603
10	1	D1	MM5Z8V2	SOD523
11	1	D2	NRVHP120SF	SOD123_SOD123FL
12	1	D3	SS3P4	SMP
13	1	IC1	TPS92515HV	SSOP-10
14	1	L1	2u	8 x 8 x 4
15	1	L2	33u	11 x 10 x 4
16	1	RSENSE1	68m	2512
17	1	RSENSE2	15m	2512
18	1	R1	10k	402
19	1	R2	1.24k	603
20	1	R3	14.3k	603
21	1	STP1	0.5x1.5	
22	1	T1	NVTFS5116PLWF	DFN3333-8_WDFN8
23	1	X1		JST

Příloha 4 Obvodové zapojení vzorku MAX20050 v.01

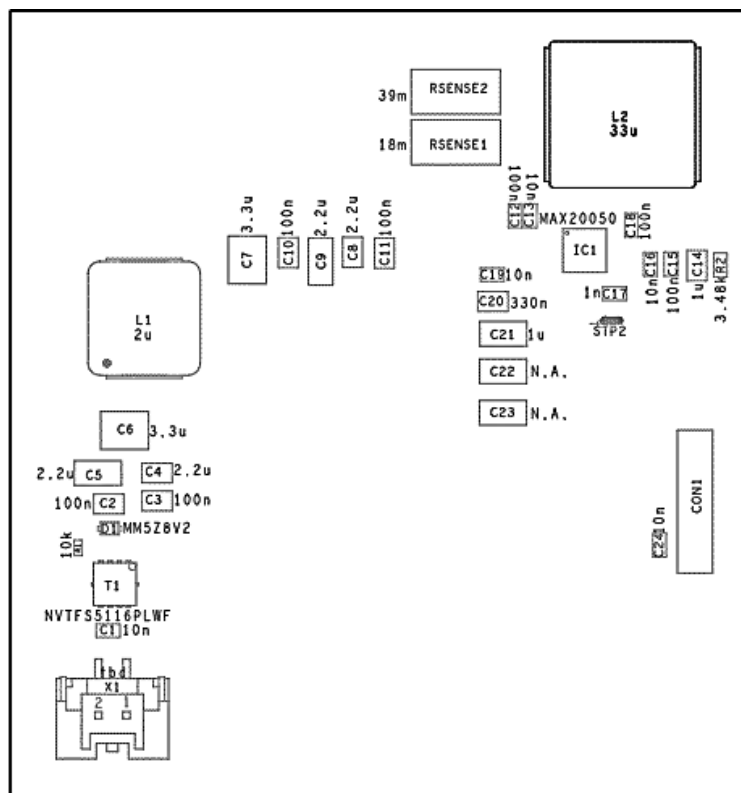


Příloha 5 Deska plošného spoje vzorku MAX20050 v.01

Reálná velikost desky 52,8x56,5mm



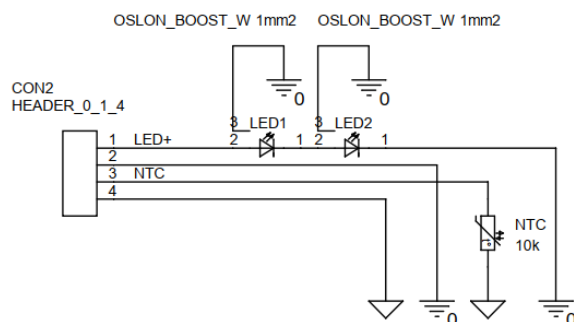
Osazovací plán



Příloha 6 Seznam komponent vzorku MAX20050 v.01

Pořadové číslo	Počet kusů	Označení	Hodnota	Pouzdro
1	1	CON1		HEADER_0_1_4
2	5	C1,C13,C16,C19,C24	10n	603
3	4	C2,C3,C10,C11	100n	805
4	2	C4,C8	2.2u	805
5	2	C5,C9	2.2u	1206
6	2	C6,C7	3.3u	1210
7	3	C12,C15,C18	100n	603
8	1	C14	1u	805
9	1	C17	1n	603
10	1	C20	330n	805
11	1	C21	1u	1206
12	2	C22,C23	N.A.	1206
13	1	D1	MM5Z8V2	SOD523
14	1	IC1	MAX20050	DFN3030-12-EP
16	1	L1	2u	8 x 8 x 4
17	1	L2	33u	11 x 10 x 4
18	1	Rsense1	18m	2512
19	1	Rsense2	39m	2512
20	1	R1	10k	402
21	1	R2	3.48k	603
22	1	STP2	0.5x1.5	
23	1	T1	NVTFS5116PLWF	DFN3333-8_WDFN8
24	1	X1	tbd	

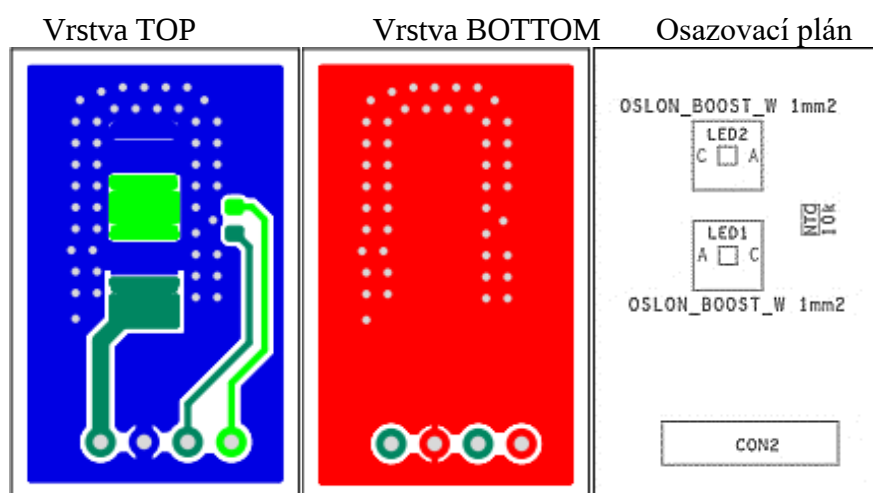
Příloha 7 Obvodové zapojení LED modulu



Příloha 8 Deska plošného spoje LED modulu verze 1-3

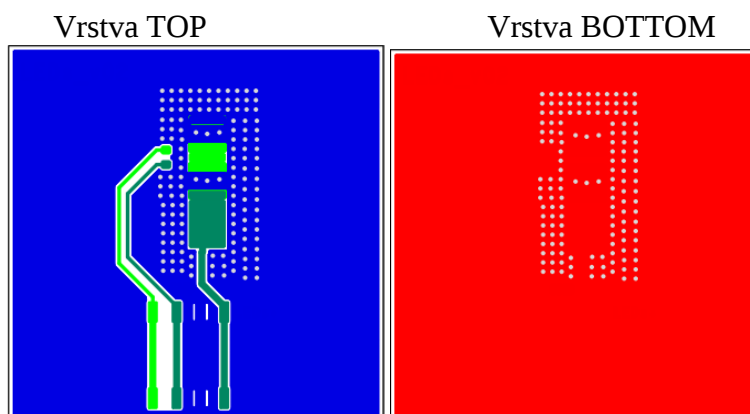
Verze 1 FR4 1,5mm

Rozměry desky: 16,5x26,5 mm



Verze 2 FR4 1mm

Rozměry desky: 40,0x40,0 mm



Verze 3 s hliníkovým jádrem

Vrstva TOP
 Roměry desky: 40,0x40,0 mm

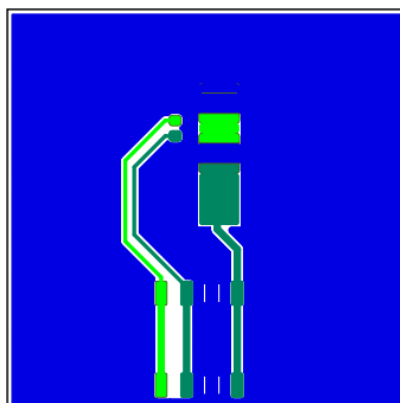
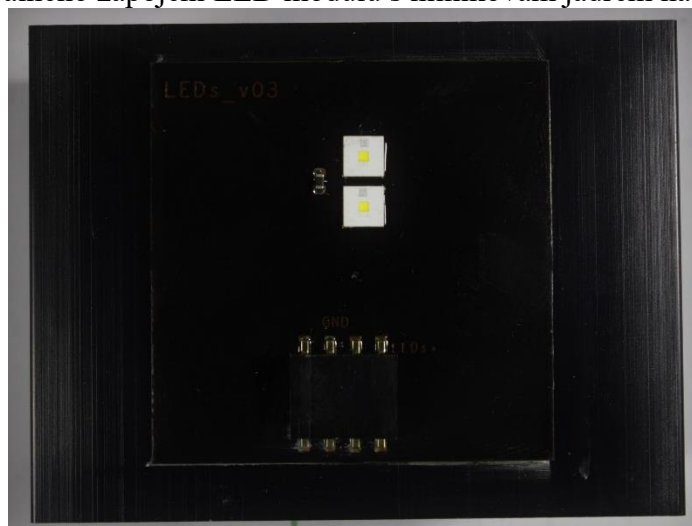


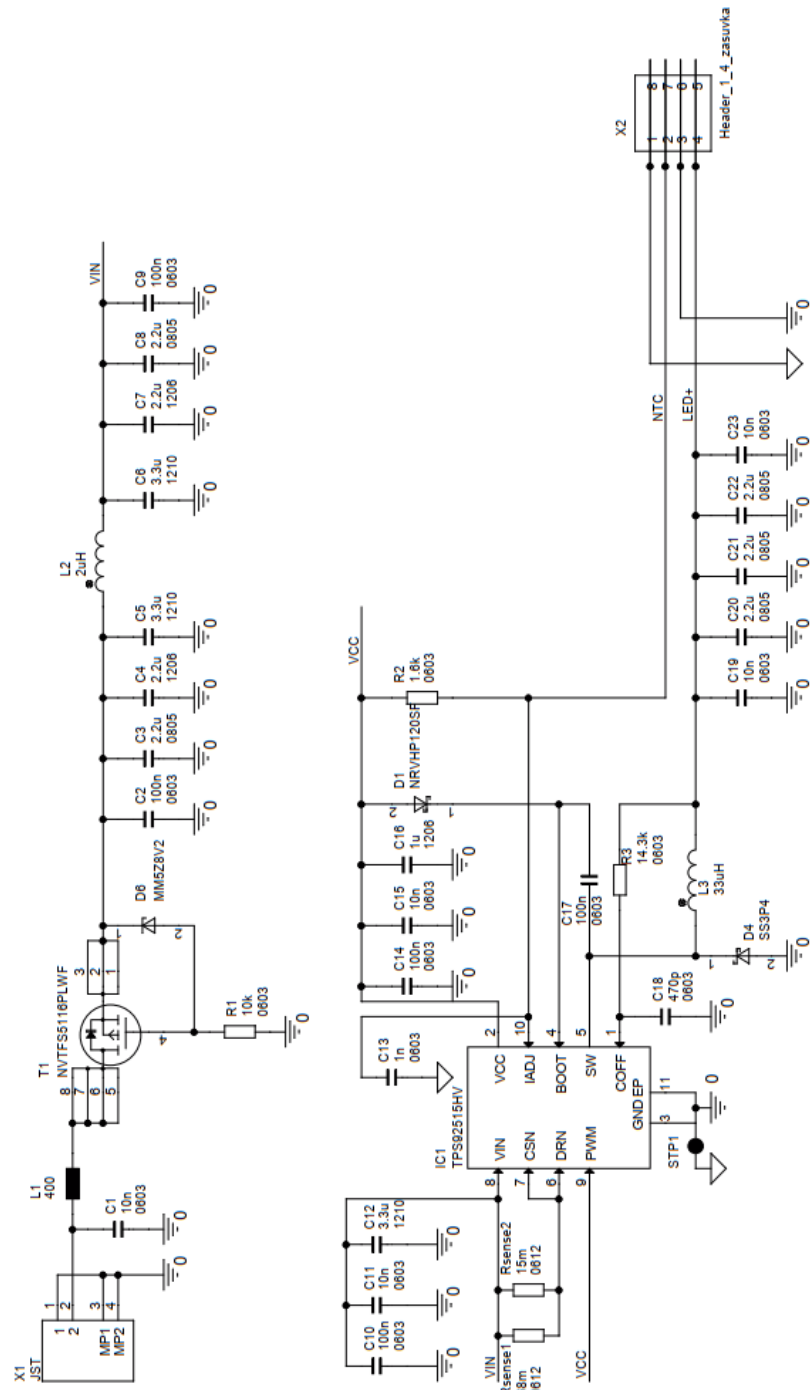
Foto reálného zapojení LED modulu s hliníkovým jádrem na chladiči



Příloha 9 Seznam komponent LED modulu

Pořadové číslo	Počet kusů	Označení	Hodnota	Pouzdro
1	1	CON2		HEADER_0_1_4
2	2	LED1,LED2	OSLON_BOOST_W	1mm2
3	1	NTC	10k	603

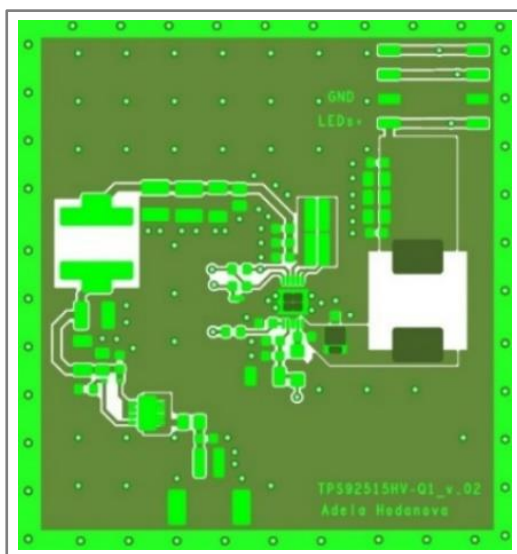
Příloha 10 Obvodové zapojení vzorku TPS92515 v.02



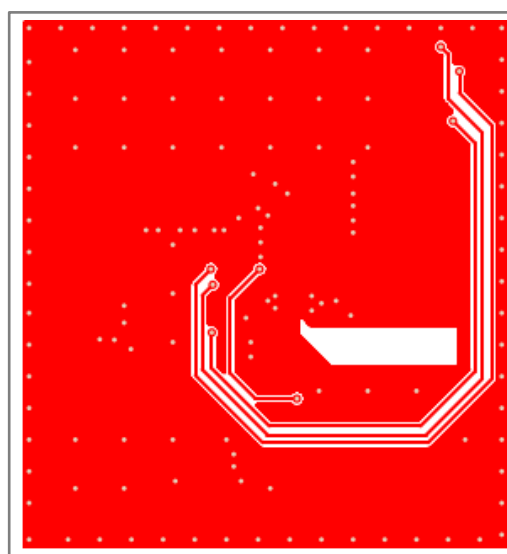
Příloha 11 Deska plošného spoje vzorku TPS92515 v.02

Rozměry desky: 52,0x55,9mm

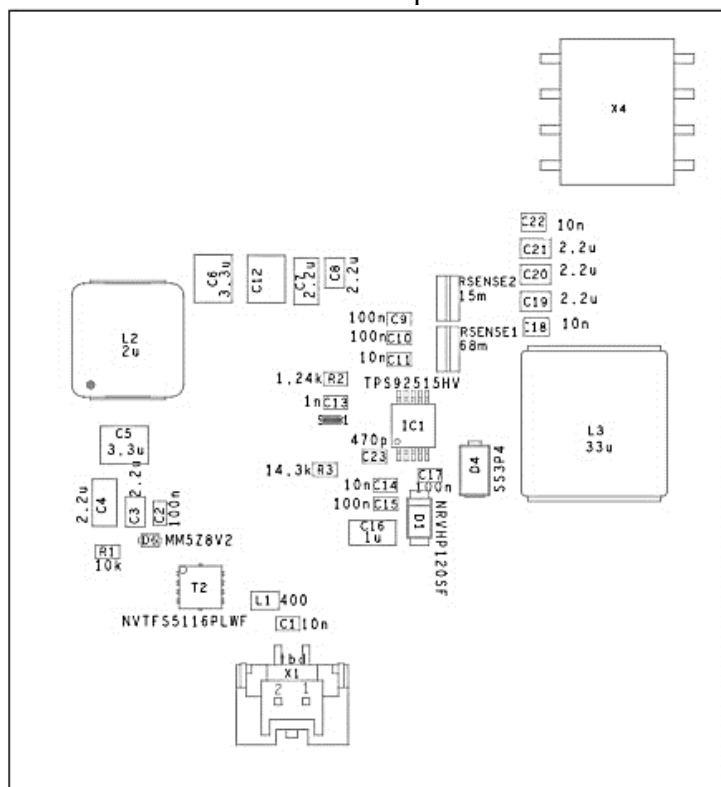
Vrstva TOP



Vrstva BOTTOM



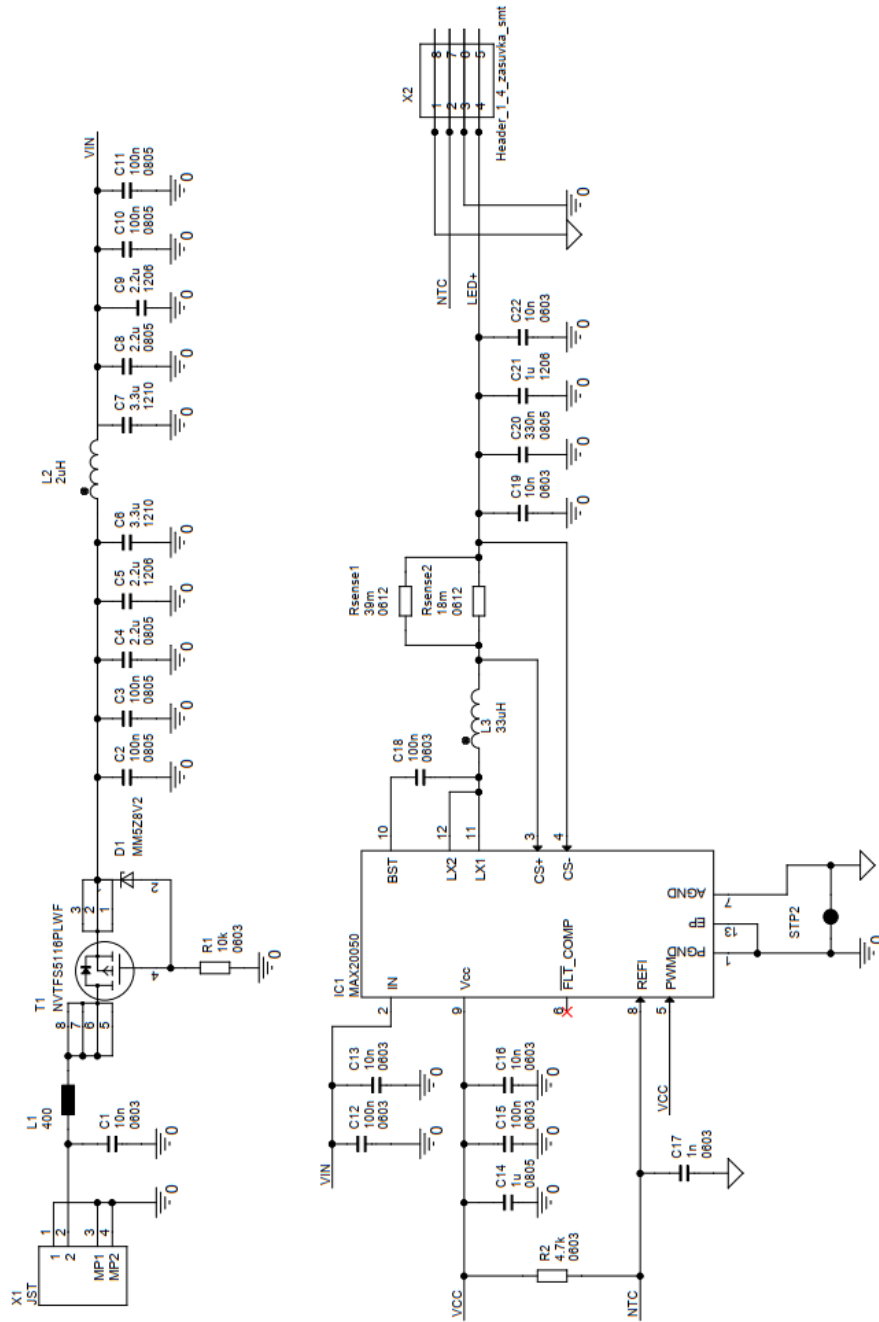
Osazovací plán



Příloha 12 Seznam komponent vzorku TPS TPS92515 v.02

Pořadové číslo	Počet kusů	Označení	Hodnota	Pouzdro
1	5	C1,C11,C14,C19,C23	10n	603
2	5	C2,C9,C10,C15,C17	100n	603
3	5	C3,C8,C20,C21,C22	2.2u	805
4	2	C4,C7	2.2u	1206
5	3	C5,C6,C12	3.3u	1210
6	1	C13	1n	603
7	1	C16	1u	1206
8	1	C18	470p	603
9	1	D1	NRVHP120SF	SOD123_SOD123FL
10	1	D4	SS3P4	SMP
11	1	D6	MM5Z8V2	SOD523
12	1	IC1	TPS92515HV-Q1	SSOP-10
13	1	L1	400	805
14	1	L2	2u	8 x 8 x 4
15	1	L3	33u	11 x 10 x 4
16	1	Rsense1	68m	612
17	1	Rsense2	15m	612
18	1	R1	10k	603
19	1	R2	1.24k	603
20	1	R3	14.3k	603
21	1	STP1	0.5x1.5	
22	1	T1	NVTFS5116PLWF	DFN3333-8_WDFN8
23	1	X1		JST
24	1	X2	Header_1_4_zasuvka	SMD

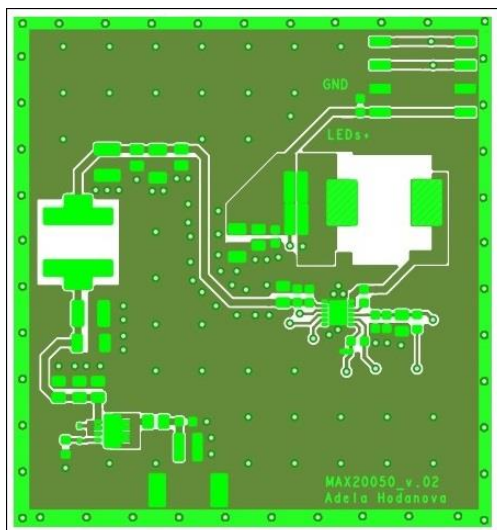
Příloha 13 Obvodové zapojení vzorku MAX20050 v.02



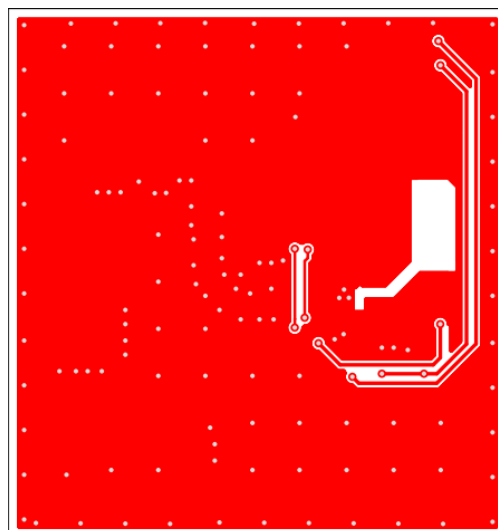
Příloha 14 Deska plošného spoje vzorku MAX20050 v.02

Rozměry desky: 52,9x56,1mm

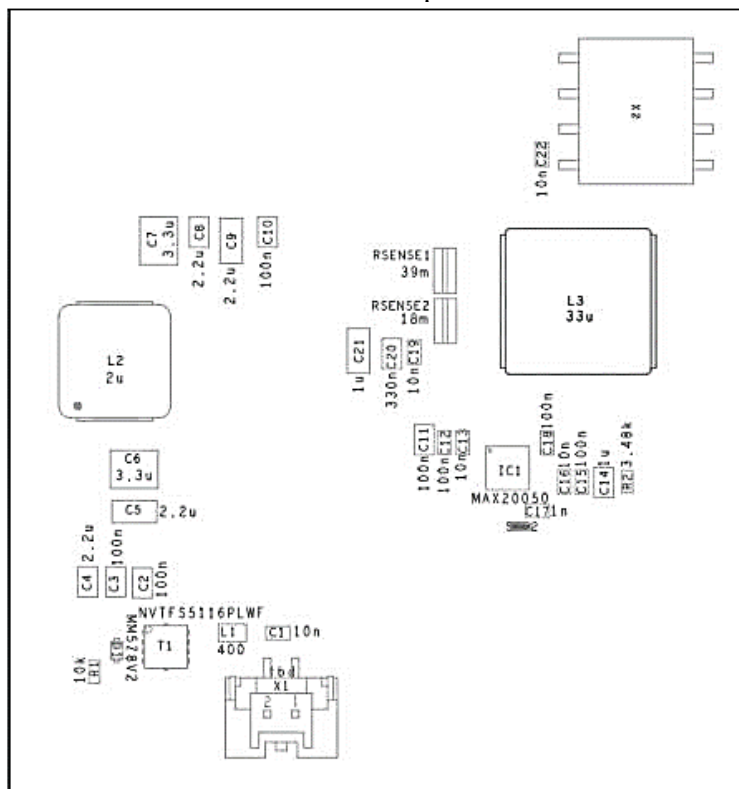
Vrstva TOP



Vrstva BOTTOM



Osazovací plán



Příloha 16 Seznam komponent vzorku TPS MAX20050 v.02

Pořadové číslo	Počet kusů	Označení	Hodnota	Pozdro
1	5	C1,C13,C16,C19,C22	10n	603
2	4	C2,C3,C10,C11	100n	805
3	2	C4,C8	2.2u	805
4	2	C5,C9	2.2u	1206
5	2	C6,C7	3.3u	1210
6	3	C12,C15,C18	100n	603
7	1	C14	1u	805
8	1	C17	1n	603
9	1	C20	330n	805
10	1	C21	1u	1206
11	1	D1	MM5Z8V2	SOD523
12	1	IC1	MAX20050	DFN3030-12-EP
14	1	L1	400	805
15	1	L2	2u	8 x 8 x 4
16	1	L3	33u	11 x 10 x 4
17	1	Rsense1	39m	612
18	1	Rsense2	18m	612
19	2	R1,R5	10k	603
20	1	R2	3.48k	603
21	1	STP2	0.5x1.5	
22	1	T1	NVTFS5116PLWF	DFN3333- 8_WDFN8
23	1	X1		JST
24	2	X1,X2	Header_1_4_zasuvka_smt	

Příloha 17 Tabulky naměřených hodnot

Změřené hodnoty pro vzorek TPS92515, verze 1

U_{in} [V]	I_{in} [A]	U_{out} [V]	I_{out} [A]	P_{in} [W]	P_{out} [W]	η [%]
9,00	1,34	6,00	1,74	12,06	10,44	86,57
9,50	1,29	6,00	1,74	12,26	10,44	85,19
10,00	1,22	6,00	1,74	12,20	10,44	85,57
10,50	1,15	6,00	1,74	12,08	10,44	86,46
11,00	1,10	6,00	1,74	12,10	10,44	86,28
11,50	1,05	6,00	1,74	12,08	10,44	86,46
12,00	1,00	6,00	1,74	12,00	10,44	87,00
12,50	0,96	6,00	1,74	12,00	10,44	87,00
13,00	0,92	6,00	1,74	12,01	10,44	86,91
13,50	0,89	6,00	1,74	12,02	10,44	86,89
14,00	0,85	6,00	1,74	11,90	10,44	87,73
14,50	0,83	6,00	1,74	11,98	10,44	87,17
15,00	0,80	6,00	1,74	12,06	10,44	86,57
15,50	0,78	6,00	1,74	12,03	10,44	86,80
16,00	0,75	6,00	1,74	12,00	10,44	87,00

Změřené hodnoty pro vzorek MAX20050, verze 1

U_{in} [V]	I_{in} [A]	U_{out} [V]	I_{out} [A]	P_{in} [W]	P_{out} [W]	η [%]
9,00	1,35	6,00	1,77	12,15	10,62	87,41
9,50	1,29	6,00	1,77	12,26	10,62	86,66
10,00	1,22	6,00	1,77	12,20	10,62	87,05
10,50	1,15	6,00	1,77	12,08	10,62	87,95
11,00	1,10	6,00	1,77	12,10	10,62	87,77
11,50	1,05	6,00	1,77	12,08	10,62	87,95
12,00	1,00	6,00	1,77	11,96	10,62	88,77
12,50	0,96	6,00	1,77	11,96	10,62	88,78
13,00	0,92	6,00	1,77	11,97	10,62	88,70
13,50	0,90	6,00	1,77	12,10	10,62	87,80
14,00	0,86	6,00	1,77	12,08	10,62	87,90
14,50	0,83	6,00	1,77	11,96	10,62	88,78
15,00	0,81	6,00	1,77	12,08	10,62	87,95
15,50	0,78	6,00	1,77	12,04	10,62	88,18
16,00	0,76	6,00	1,77	12,10	10,62	87,80

Změřené hodnoty pro vzorek TPS92515 verze 2

U_{in} [V]	I_{in} [A]	U_{out} [V]	I_{out} [A]	P_{in} [W]	P_{out} [W]	η [%]
9,00	1,39	6,00	1,79	12,55	10,74	85,60
9,50	1,32	6,00	1,79	12,50	10,74	85,91
10,00	1,24	6,00	1,79	12,44	10,74	86,33
10,50	1,18	6,00	1,79	12,39	10,74	86,68
11,00	1,13	6,00	1,79	12,43	10,74	86,40
11,50	1,08	6,00	1,79	12,42	10,74	86,47
12,00	1,03	6,00	1,79	12,36	10,74	86,89
12,50	1,00	6,00	1,79	12,45	10,74	86,27
13,00	0,96	6,00	1,79	12,45	10,74	86,24
13,50	0,92	6,00	1,79	12,39	10,74	86,66
14,00	0,88	6,00	1,79	12,38	10,74	86,78
14,50	0,86	6,00	1,79	12,41	10,74	86,53
15,00	0,83	6,00	1,79	12,42	10,74	86,47
15,50	0,80	6,00	1,79	12,40	10,74	86,61
16,00	0,77	6,00	1,79	12,38	10,74	86,72

Změřené hodnoty pro vzorek MAX20050, verze 2

U_{in} [V]	I_{in} [A]	U_{out} [V]	I_{out} [A]	P_{in} [W]	P_{out} [W]	η [%]
9,00	1,38	6,00	1,80	12,42	10,80	86,96
9,50	1,30	6,00	1,80	12,35	10,80	87,45
10,00	1,22	6,00	1,80	12,20	10,80	88,52
10,50	1,18	6,00	1,80	12,39	10,80	87,17
11,00	1,12	6,00	1,80	12,32	10,80	87,66
11,50	1,07	6,00	1,80	12,33	10,80	87,61
12,00	1,03	6,00	1,80	12,34	10,80	87,55
12,50	0,99	6,00	1,80	12,38	10,80	87,27
13,00	0,94	6,00	1,80	12,19	10,80	88,57
13,50	0,92	6,00	1,80	12,37	10,80	87,34
14,00	0,88	6,00	1,80	12,32	10,80	87,66
14,50	0,85	6,00	1,80	12,33	10,80	87,63
15,00	0,82	6,00	1,80	12,36	10,80	87,38
15,50	0,80	6,00	1,80	12,34	10,80	87,53
16,00	0,77	6,00	1,80	12,38	10,80	87,21