



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií ■

Porovnání napěťových stabilizátorů z hlediska EMC

Bakalářská práce

Studijní program: B0714A270001 Mechatronika
Autor práce: **Matěj Prýmek**
Vedoucí práce: Ing. Lubomír Slavík, Ph.D.
Ústav mechatroniky a technické informatiky





Zadání Bakalářské práce

Porovnání napěťových stabilizátorů z hlediska EMC

Jméno a Příjmení: **Matěj Prýmek**
Osobní číslo: M19000096
Studijní program: B0714A270001 Mechatronika
Zadávající katedra: Ústav mechatroniky a technické informatiky
Akademický rok: **2021/2022**

Zásady pro vypracování:

1. Prostudujte problematiku jednoduchých a spínaných stabilizátorů
2. Navrhněte jeden lineární stabilizátor a tři spínané zdroje různých typů.
3. Stabilizátory realizujte a proměřte vlastnosti z hlediska EMC

Rozsah grafických prací: dle potřeby dokumentace
Rozsah pracovní zprávy: 30-40 stran
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] KREJČIŘÍK, Alexandr. *Napájecí zdroje I, II, III*. Praha: BEN - technická literatura, 1999-2002. ISBN 80-86056-56-2.
- [2] FAKTOR, Zdeněk. *Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje*. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-86056-91-0.
- [3] KOVÁČ, Dobroslav, Irena KOVÁČOVÁ a Ján KAŇUCH. *EMC z hlediska teorie a aplikace*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-202-7.

Vedoucí práce: Ing. Lubomír Slavík, Ph.D.
Ústav mechatroniky a technické informatiky

Datum zadání práce: 12. října 2021

Předpokládaný termín odevzdání: 16. května 2022

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.
děkan

L.S.

doc. Ing. Josef Černohorský, Ph.D.
vedoucí ústavu

V Liberci dne 12. října 2022

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

16. května 2022

Matěj Prýmek

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu, panu doktoru Lubomíru Slavíkovi za trpělivost a spolupráci při zpracování bakalářské práce a jejích přidružených výrobků. Dále bych chtěl poděkovat samotné univerzitě TUL, jejíž výrobní prostory a měřicí, napájecí a testovací zařízení k této práci přispěly. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat členům své rodiny, kteří svou přítomností a nasloucháním k této práci přispěli více, než tuší.

Abstrakt

Cílem práce je průzkum problematiky spínaných stabilizátorů, zejména z hlediska jejich elektromagnetické kompatibility. V úvodu se práce věnuje vysvětlení důležitosti tohoto tématu v současné době. Pokračuje rešerší, kde je cílem seznámení se s různými typy napěťových stabilizátorů i zdrojů obecně a popsání jejich principů a vlastností. V praktické části jsou vybrány, navrženy a detailně popsány tři typy spínaných stabilizátorů spolu i s úvodem do technik a softwaru sloužícímu k realizaci desek plošných spojů. Tyto všechny výrobky jsou pak vyhodnoceny a porovnány mezi sebou. Následně jsou vyvozeny závěry z dopadu jejich odlišností na jejich EMC vlastnosti.

Klíčová slova:

Spínané stabilizátory, EMC, napěťové zdroje, měniče DC/DC, plošné spoje

Abstract

The goal of the project is the exploration of the issue of switching regulators, especially in terms of their electromagnetic compatibility. The introduction of the project deals with the explanation of importance of this topic in present times. It continues with a groundwork section, objective of which is to familiarize oneself with different types of voltage regulators and power sources in general and to describe their principles and properties. In the practical section there are selected, designed and described three types of switching regulators, together with an introduction to techniques and software used for making printed circuit boards. All those products are then subsequently evaluated and compared between each other, and conclusions are drawn from the effect of their differences on their EMC properties.

Keywords:

Switching regulators, EMC, voltage supplies, DC/DC converters, printed circuit boards

Obsah

Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	10
Seznam zkratk	10
1. Úvod.....	13
2. Zdroje, stabilizátory, měniče	15
2.1. Stabilizátory	16
2.1.1. Lineární stabilizátory.....	16
2.1.2. Spínané stabilizátory	16
2.2. PWM.....	17
2.3. Měníče stejnosměrného napětí	18
2.3.1. Dělení.....	18
2.3.2. Funkce	19
2.3.3. Buck/Step down	20
2.3.4. Boost/Step up.....	21
2.3.5. Buck-Boost.....	22
2.3.6. Kontinuální a diskontinuální mód.....	23
3. EMC	24
3.1. Pojmy.....	24
3.2. Schéma elektromagnetického rušení	25
3.3. Vztahy pro rušení	25
3.3.1. Šíření vedením	26
3.3.2. Šíření vyzařováním.....	27
3.4. Problémy způsobované rušením.....	29
3.4.1. Přeslechy	29
4. Vymezení praktické části	31
5. Postup řešení	32
5.1.1. Software pro výrobu DPS EAGLE	32
5.2. Obvod MC33063AD.....	32

5.2.1. Princip a vnitřní zapojení	33
5.2.2. Schéma	34
5.2.3. Postup návrhu	34
5.2.4. Návrh desky	36
5.3. Obvod LT8392	38
5.3.1. Princip a vnitřní zapojení	39
5.3.2. Postup návrhu	42
5.3.3. Návrh desky	44
5.4. Obvod LM317	45
5.4.1. Princip	45
5.4.2. Schéma a postup návrhu.....	46
5.4.3. Návrh desky	47
6. Realizace řešení.....	48
6.1. MC33063AD	48
6.1.1. Řešení problémů zapojení.....	48
6.1.2. Proces a výsledky měření.....	49
6.1.3. Vynechávání cyklů	51
6.1.4. Bližší porovnání EMC	52
6.1.5. Shrnutí.....	53
6.2. LT8392	54
6.2.1. Výsledky měření a porovnání s dokumentací	54
6.2.2. EMC vlastnosti	56
6.2.3. Shrnutí.....	58
6.3. LM317.....	59
6.3.1. EMC vlastnosti	60
7. Závěr	62
Seznam použité literatury	63
Seznam příloh	65

Seznam obrázků

Obr. 1 – Časový průběh PWM [4].....	17
Obr. 2 – Indukce napětí na cívce.....	19
Obr. 3 – Zapojení měniče typu buck.....	20
Obr. 4 – Zapojení měniče typu boost.....	21
Obr. 5 – Invertující zapojení měniče typu buck-boost	22
Obr. 6 – Čtyř spínačové zapojení měniče typu buck-boost	22
Obr. 7 – Kontinuální mód buck zapojení [3].....	23
Obr. 8 – Diskontinuální mód buck zapojení	23
Obr. 9 – Blokové schéma elm. rušení.....	25
Obr. 10 – Náhradní zapojení přeslechu [10]	29
Obr. 11 – Signál přeslechu	30
Obr. 12 – Blokové vnitřní zapojení obvodu MC33063 [12].....	33
Obr. 13 – Schéma zapojení s obvodem MC33063	34
Obr. 14 – Navržená deska s obvodem MC33063	36
Obr. 15 – Blokové vnitřní zapojení obvodu LT8392 [9]	39
Obr. 16 – Náhradní zapojení spínací části obvodu LT8392 [9]	41
Obr. 17 – Časový diagram spínačů v oblasti buck.....	41
Obr. 18 – Časový diagram spínačů v oblasti boost.....	42
Obr. 19 – Navržená deska s obvodem LT8392	44
Obr. 20 – Schéma zapojení s obvodem LM317.....	46
Obr. 21 – Navržená deska s obvodem LM317.....	47
Obr. 22 – Realizované zapojení s obvodem MC33060.....	48
Obr. 23 – graf 1 – Průběhy výstupních veličin zapojení MC33063.....	49
Obr. 24 – Vynechávání cyklů.....	51
Obr. 25 – Typický chod obvodu.....	52
Obr. 26 – graf 2 – Porovnání vyzařování MC33063.....	52
Obr. 27 – Zapojení s obvodem LT8392	54
Obr. 28 – graf 3 – Účinnost zapojení LT8392 při proměnlivém vstupním napětí	54

Obr. 29 – graf 4 – ukázkový graf účinnosti [9].....	55
Obr. 30 – graf 5 – účinnosti v jednotlivých oblastech	55
Obr. 31 – Zvlnění v jednotlivých oblastech	56
Obr. 32 – Rušení v režimu boost.....	57
Obr. 33 – graf 6 – Vyzařování LT8392.....	57
Obr. 34 – Zapojení s obvodem LM317	59
Obr. 35 – graf 7 – Účinnost obvodu LM317 při různých hodnotách U_{out}	59
Obr. 36 – graf 8 – Měření obvodu LM317 ve vyzařovací komoře.....	60

Seznam tabulek

Tabulka 1: Základní údaje obvodu MC33063:	32
Tabulka 2: Základní údaje obvodu LT8392:.....	38
Tabulka 3: Popis pinů obvodů LT8392	40
Tabulka 4: Základní údaje obvodu LM317	45

Seznam zkratk

A		Ampér
BP		Bakalářská práce
C	[F]	kapacita
C_o	[F]	Kapacita výstupního kondenzátoru
C_t	[F]	Kapacita časovacích kondenzátorů
D	[m]	Vzdálenost od měřeného bodu
Db		Decibel
dt	[s]	Časový rozdíl
E	[V/m]	Intenzita elektrického pole
E_m	[J]	Energie magnetického pole
EMC		Elektromagnetická kompatibilita
EMI		Elektromagnetické rušení
F		Farad
f	[Hz]	Frekvence
H		Henry

H	[A/m]	Intenzita magnetického pole
h	[m]	Vzdálenost
Hz		Hertz
I	[A]	Proud
I_{adj}	[A]	Chybový proud
I_C	[A]	Nabíjecí proud kondenzátoru
I_D	[A]	Proud procházející diodou
$I_{is(max)}$	[A]	Maximální měřený výstupní proud
$I_{o(max)}$	[A]	Maximální výstupní proud
I_{out}	[A]	Výstupní proud
I_R	[A]	Proud protékající zátěží
J		Joule
L	[H]	Indukčnost
l	[m]	Délka
L_{min}	[H]	Minimální indukčnost
m		Metr
n		Účinnost
PWM		Pulse width modulation
R	[ohm]	Odpor
R_{is}	[ohm]	Odpor snímacího rezistoru výstupní části
R_{sc}	[ohm]	Odpor snímacího rezistoru
s		Sekunda
S	[m ²]	Plocha
t	[m]	Výška
T	[s]	Perioda
t_{off}	[s]	Čas rozenutí
t_{on}	[s]	Čas sepnutí
U	[V]	Efektivní napětí
u	[V]	Efektivní střídavé napětí
U_{ag}	[V]	Napětí agresora
U_D	[V]	Úbytek napětí na diodě
U_{ef}	[V]	Efektivní napětí
U_f	[V]	Úbytek napětí na stabilizátoru
U_{in-}	[V]	Úroveň nevyhovujícího vstupního napětí
$U_{in(min)}$	[V]	Minimální vstupní napětí
U_{in+}	[V]	Úroveň vyhovujícího vstupního napětí
U_{ob}	[V]	Napětí oběti
U_{out}	[V]	Výstupní napětí
UPS		Záložní zdroj

U_{sat}	[V]	Úbytek napětí na spínacím členu
U_{vs}	[V]	Zvlnění
V		Volt
w	[m]	Šířka vodiče
X_{talk}	[Db]	Přeslech
Z_0	[ohm]	Vlnová impedance
ϵ_0		Relativní permitivita
ϵ_0	[F/m]	Permitivita vakua
$E_{F(t)}$	[V]	Naindukované napětí
λ	[m]	Vlnová délka
Φ	[Wb]	Magnetický tok

1. Úvod

V dnešní době je elektrickými zařízeními obklopen každý z nás. Počítače, notebooky, drobná elektronika, digitální zařízení atd. Stěží se najde člověk, který se s nimi neseťká každý den. Tato zařízení prakticky univerzálně fungují na stejnosměrné napětí, z čehož vyplývá nutnost přítomnosti konvertujícího či stabilizujícího napájecího prvku.

Z toho důvodu otázka způsobu realizace tohoto prvku nabývá většího významu, zejména se vzrůstajícím výkonem. Zde se jako atraktivní volba jeví spínané zdroje a stabilizátory, které nabízejí oproti alternativám mnohé výhody. Mezi ty se řadí například vysoká účinnost, poměr váhy a výkonu, rozměry a další. Je snadné pochopit, proč se tento typ napájecích zařízení v mnoha aplikacích jeví jako jasná volba.

Každá technologie je však nezbytně kompromisem, a spínaná zařízení nejsou výjimkou. Jejich podstatné výhody doprovází i nevýhody. Tou nejzásadnější je to, že spínaná zařízení jsou tradičně zdrojem velkého elektromagnetického rušení. Jinými slovy, jsou to problémová zařízení z hlediska elektromagnetické kompatibility.

Elektromagnetická kompatibilita, zkratkou EMC, je vlastnost elektrického či magnetického zařízení která vyjadřuje míru, do jaké toto zařízení ovlivňuje jiné objekty a sebe samotné. Zároveň pokrývá i míru jeho odolnosti vůči vlivům ostatních zařízení. Posouzení EMC je kritické pro správnou funkci přístroje, jeho spolehlivost a životnost. Vliv EMC na okolní objekty, mezi které spadá například i člověk, je rovněž důležitý kvůli bezpečnosti a nenarušené funkčnosti ostatních zařízení.

Cílem této bakalářské práce je vysvětlení funkce různých typů spínaných stabilizátorů a principu vzniku tohoto rušení. K dosažení těchto cílů budou realizovány tři typy různých spínaných stabilizátorů. Na hodnotách EMC se podílí velké množství faktorů. Některé jsou zjevné, jako například výkon a zatížení, nebo typ konkrétního přístroje. Další jsou méně intuitivní, ale stále velice důležité. Mezi ty spadá například využití designových pravidel pro potlačení EMC při návrhu zařízení. Změnou těchto prvků mezi jednotlivými typy vzniká možnost porovnání a tím pádem i zjištění, jak velký podíl na EMC různé tyto položky mají.

Je to problém, nad kterým se stojí za to pozastavit. Jak již bylo uvedeno, spínaná zařízení jsou tradičně považována za notorické body vzniku elektromagnetického rušení. Pokud si však čtenář tuto práci zobrazuje na monitoru počítače či obrazovce notebooku, nějaký příklad spínané technologie je bezpochyby v jeho blízkosti. Patrně jeden z mnoha a po dlouhou dobu. I tak je pro normálního uživatele velmi vzácné se s negativními důsledky této záporné vlastnosti setkat.

V přístroje, které nás obklopují, máme plnou důvěru. I při nepříznivých okolnostech naše technika zůstává spolehlivá. Nabízí se tedy otázka, o přesně jak velkou slabinu se jedná.

Historický vývoj a technický pokrok spolu s nejrůznějšími konvencemi a metodami pro zlepšení EMC přispívá k potlačení nežádoucích vlastností těchto zařízení. V dnešní době extrémní miniaturizace a integrační hustoty není přeháněním říct, že by bez řešení otázky EMC mnohé věci, které bereme jako samozřejmost, nebyly možné. Jaký by byl efekt, když by se některé z těchto zásad zanedbali, tedy jak moc "práce" odvádí EMC zlepšující taktiky je něco, co se tato bakalářská práce pokusí zodpovědět. Spínané stabilizátory, zajímavá a pozornost zasluhující zařízení sama o sobě, jsou pro to ze své podstaty dokonalým kandidátem. Jednak se jedná o problematiku od sebe takřka neoddělitelné. Zároveň mají spínané stabilizátory z důvodu své rozšířenosti a popularity velkou naději být snadno představitelné i osobám bez hlubšího technického zázemí.

2. Zdroje, stabilizátory, měniče

V úvodu se jeví vhodné představit elektrické zdroje obecně a terminologii je obklopující. Elektrický zdroj je zařízení, do kterého vstupuje elektrická energie, a ze kterého na jeho výstupu elektrická energie opět vystupuje, s požadovanými hodnotami elektrického napětí, proudu, frekvence a zvlnění atd. Dělit zdroje tedy můžeme podle několika kritérií, v závislosti na potřebách pro konkrétní aplikaci. Například zdroje střídavého/stejnosměrného napětí, zdroje konstantního proudu/napětí apod.

Pojem Elektrický zdroj úzce souvisí, ale není zaměnitelný, s pojmem elektrický stabilizátor. Existují mezi nimi zásadní odlišnosti. Zatímco úkolem zdroje je pouze produkovat elektrické veličiny o patřičných hodnotách, výhradním úkolem stabilizátoru je, jak z jeho jména vyplývá, udržovat určité veličiny na konstantních hodnotách i při změnách v zařízení. Mezi ty se řadí zejména změny zátěže, teploty apod. Funkce stabilizátorů bude blíže rozebrána v kapitole jim věnované [1].

Lze tedy říct, že na každý stabilizátor lze nahlížet jako na zdroj. Ne každý zdroj je však nezbytně stabilizátor. Jedná se o distinkci spíše teoretickou, jelikož dnes prakticky každý zdroj pro jakoukoli aplikaci bude v sobě stabilizátor obsahovat.

Oblast, na kterou se tato BP vymezuje, jsou zdroje stejnosměrného napětí. To je skupina, se kterou se člověk nejčastěji setkává v běžném životě. Toto je dáno jak prevalencí zařízení fungujících na stejnosměrný proud, tak typem rozvodné sítě. V české elektrické síti nalezneme střídavé napětí o hodnotách 230 V s frekvencí 50 Hz. Nezbytně tedy mezi tímto připojením a stejnosměrným spotřebičem bude existovat minimálně jeden, popřípadě více mezikroků, které elektrickou energii přemění do podoby, kterou spotřebič vyžaduje ke svému správnému chodu. Špatný zdroj napětí může mít za následek poškození nebo destrukci zařízení, či ohrožení na zdraví.

2.1. Stabilizátory

Stabilizátory jsou definovány jako zařízení, které udržují svoje výstupní veličiny na konstantních hodnotách i navzdory vnějším rušivým účinkům. To je v tomto případě zejména proměnlivý odebíraný proud, vstupní napětí, ale například i teplota či stárnutí součástek. Každý stabilizátor zároveň do nějaké míry i zlepšuje kvalitu svého výstupního napětí – potlačuje jeho střídavou složku. Tato BP se věnuje stabilizátorům napětí, zejména protože drtivá většina aplikací potřebuje konstantní napětí s potencionálně proměnlivým proudem, a ne naopak.

Stabilizátorů existuje nepřeberné množství. Dají se tedy dělit podle mnoha různých kritérií. Základní dělení je dle konstrukce stabilizátoru a jeho chodu. Zde je možné rozlišovat:

Zpětnovazební a parametrické: dané tím, zdali obvod má zpětnovazební smyčku či nikoliv.

Lineární a spínané: dané průběhem kompenzačního napětí, zdali je spojitě (lineární) či nespojitě pulzní (spínané). Parametrické stabilizátory jsou vždy lineární. Zpětnovazební mohou být jak lineární, tak spínané [1], [2].

2.1.1. Lineární stabilizátory

Tyto stabilizátory se vyznačují tím, že je jejich chod „lineární“, také lze říct „spojitý“. Matematicky řečeno, rozdělil by se signál jejich stabilizačního napětí na libovolně mnoho částí, eventuálně by bylo dosaženo libovolně malé změny napětí. Tímto se odlišují od spínaných stabilizátorů, kde existují ostré přechody mezi dvěma stavy. Nejběžnějším příkladem lineárních stabilizátorů jsou zapojení se zpětnou vazbou. Výstupní napětí je porovnáváno s požadovaným, a tato zesílená odchylka určuje stupeň otevření regulačního prvku – běžně tranzistoru [1].

2.1.2. Spínané stabilizátory

V případě lineárních stabilizátorů regulační prvek pracuje „spojitě“, což v jiných slovech znamená, že je na něm napětí neustále. Tímto se odlišuje od spínaných zapojení, kde regulační (tady též spínací) prvek nabývá pouze dvou stavů – sepnuto a rozepnuto. Regulační zásah určený odchylkou skutečného napětí od požadovaného potom neřídí otevření tranzistoru, nýbrž délku času, po který je regulační prvek sepnutý. Čím větší bude odchylka, tím déle setrvá regulační člen v otevřeném stavu. Jako regulační prvek se často používají tranzistory typu MOSFET. Spínané stabilizátory umožňují vůbec nejvyšší účinnost a jsou schopné zvládat od malých až i po velmi velké výkony.

Nezbytnou součástí spínaného stabilizátoru je prvek schopný akumulovat energii (cívka, kondenzátor). Ten usměrní výsledný průběh napětí z pulzního obdélkového, vycházejícího ze spínacího prvku, opět na jednoduše, stejnosměrné. V podstatě je potřeba zásobárna energie pro část periody, ve které je spínací prvek rozepnut [1], [3].

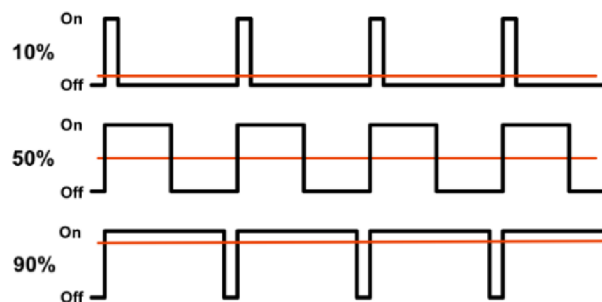
2.2. PWM

Jedním ze základních principů spínaných stabilizátorů je manipulace jejich frekvencí. Toho je nejběžněji docíleno za využití techniky PWM. PWM, z anglického *pulse width modulation*, tedy pulzně šířková modulace, je nástroj pro plynulou změnu efektivního napětí přiváděného na spotřebič.

Princip je následující: Doba, během které je zařízení aktivní, je s vysokou frekvencí rozdělována na periody. Každá perioda obsahuje dobu, ve které je spínací prvek otevřený, a dobu, ve které je zavřený. To včetně mezních případů, kdy pulz představuje 0% periody a napětí je tedy nulové, nebo kdy pulz představuje 100% periody, v kterémžto případě je shodný se stejnosměrným napětím o stejné velikosti. Pulzně šířkovou modulací je možné, při dostatečně velké frekvenci, dosáhnout s velkou přesností jakékoliv hodnoty napětí mezi těmito dvěma extrémy, změnou poměru mezi dobou sepnutí a rozepnutí v každé periodě. Tento poměr, nazývaný *duty cycle*, tj. pracovní cyklus, je právě to, co řídí regulační odchylka, popřípadě co je nastavováno.

U spínaného stabilizátoru například, poklesne-li napětí na výstupu vlivem větší zátěže, doba sepnutí se prodlouží na úkor doby rozepnutí, a efektivní napětí se tedy zvýší. V opačném případě je doba sepnutí kratší, a výstupní napětí se sníží [4].

$$U_{ef} = \text{duty cycle} * U_{max} \quad [V] \quad (1)$$



Obr. 1 – Časový průběh PWM [4]

2.3. Měníče stejnosměrného napětí

Měníče stejnosměrného napětí, zkráceně DC/DC měniče, jsou další spínaná zařízení úzce související se stabilizátory. Rozdíl mezi těmito dvěma pojmy je následující: Stabilizátory pouze udržují specifickou veličinu na určené hodnotě – toto je jejich jediný opravdový úkol. Měníče hodnotu této veličiny umožňují i měnit. Spínané měniče umožňují snadný převod jednoho napětí na druhé, přičemž jsou velice účinné a prostorově nenáročné. Měníče jak střídavého, tak i stejnosměrného napětí využívají spínané stabilizátory jako stavební prvky [3], [5].

2.3.1. Dělení

Existuje velké množství typů měničů. Základní principy však zůstávají stejné. Všechny obvody budou obsahovat spínací prvek, induktor a kondenzátor. Co odlišuje jednotlivé typy od sebe je rozložení těchto prvků. Kondenzátor nejčastěji slouží pouze jako rezervoár energie, pro samotnou funkci a stabilizaci je klíčová interakce spínacího prvku s induktorem. Tu různá zapojení využívají odlišným způsobem. Tímto se nabízí rozdělení měničů dle poměru výstupního napětí vůči vstupnímu.

Zde se rozlišuje několik základních druhů:

Step-down / Buck (stáhnout, zadržet) – Měníče s výstupním napětím menším než vstupním.

Step-up / boost (posílit, podpořit) – Měníče s výstupním napětím větším než vstupním.

Buck-boost (kombinace předchozích) – Měníče umožňující oba případy.

Invertor – Měníč, který pouze obrací polaritu vstupního napětí bez změny jeho velikosti.

Ćuk – Funkčně typ buck boost, ale s nulovým výstupním zvlněním.

Další typ dělení se řídí použitým prvkem na pozici induktoru. Zde se běžně používá cívka. Je však možné použít i transformátor. Takové zapojení se nazývá flyback. [6]

2.3.2. Funkce

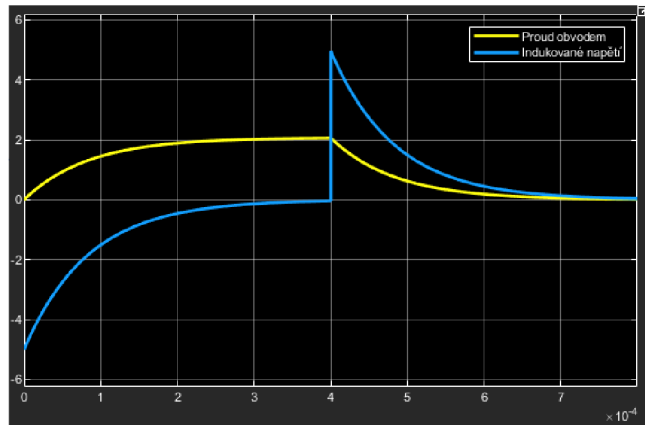
Jak již bylo řečeno, základním principem měničů DC/DC je společná funkce spínacího prvku a induktoru. Induktorem je součástka, jejíž hlavní veličinou je indukčnost. Jsou to tedy součástky schopné indukovat napětí a zároveň podobně jako kondenzátor přechovávat energii ve formě magnetického pole. První fenomén je popsáný Faradayovým zákonem elektromagnetické indukce, jehož tvar je následující [7]:

$$\varepsilon_{F(t)} = - \frac{d\Phi}{dt} \quad [V] \quad (2)$$

Slovně: indukované napětí $\varepsilon_{F(t)}$ je rovno derivaci, tj. celkové změně magnetického toku Φ v obvodu za čas t . Tedy čím rychlejší změna, tím vyšší indukované napětí. Vzhledem k tomuto diferenciálnímu charakteru může být indukované napětí vyšší než to, které ho vyvolalo. Důležitým faktem je, že takto indukované napětí bude mít opačnou polaritu (proto v rovnici mínus). Lze tedy říct, že induktory (v tomto případě většinou cívky) působí proti změně el. napětí. Energie přechovávána v magnetickém poli jednoduché cívky je dána tímto vzorcem [8]:

$$E_m = \frac{1}{2} * L * I^2 \quad [J] \quad (3)$$

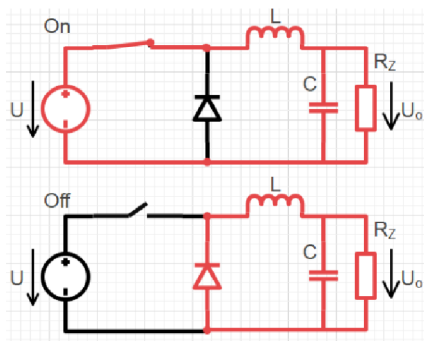
E_m je energie magnetického pole, L odpovídá indukčnosti cívky, I pak proudu cívkou procházejícím. Obě tyto vlastnosti lze pozorovat na následujícím průběhu, viz obr. 2.



Obr. 2 – Indukce napětí na cívce

Průběh byl získán z jednoduchého obvodu, obsahujícího pouze zdroj, cívku a zátěž zapojenou v sérii. Při uzavření obvodu cívkou začne protékat proud (žlutě) a indukovat se napětí opačné polarity než zdrojové (modře). Jelikož indukce je dána derivací, po ustálení proudu na konstantní hodnotě bude jeho změna nulová, a rovněž i indukované napětí tedy bude nulové. Po ustálení proudu v čase 0,4 ms je zdroj z obvodu odpojen. Na cívce se opět indukuje napětí, a stává se pro obvod zdrojem, působícím proti změně proudu až do spotřebování energie svého magnetického pole. Toto jsou hlavní principy, kterých měniče využívají. Umístění induktoru a časování spínání pak určuje typ měniče. I zde se používá PWM, vysvětlena v podkapitole spínaných stabilizátorů.

2.3.3. Buck/Step down



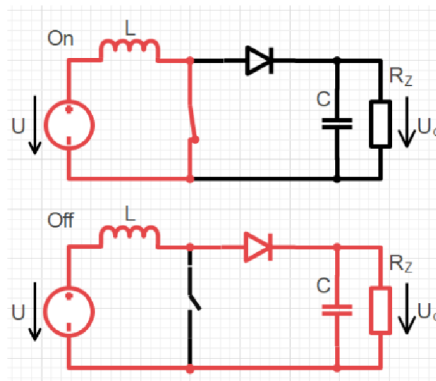
Obr. 3 – Zapojení měniče typu buck

Nechť je počáteční stav obvodu rozepnutý (v obrázku off). Po sepnutí spínače začne obvodem protékat proud a na cívce se začne indukovat napětí, působící proti napětí zdroje. Část vstupního napětí se tímto vyruší. Po krátké době se v absenci změn proudu toto indukované napětí začne snižovat, čímž napětí na zátěži začne stoupat. Cívka v této fázi přechovává energii ve formě magnetického pole. Pokud se spínací prvek rozepne, zatímco se proud stále ještě mění, tj. induktor není zcela saturovaný, na výstupu bude vždy nižší napětí než na vstupu. Induktor opět působí proti změně napětí svojí uchovanou energií, ale v opačném smyslu než ve stavu předešlém – stává se zdrojem proudu. Tento proud má větší hodnotu než proud, který teče obvodem ve stavu on. Průměrný proud může tedy být vyšší. Za snížené napětí je tedy možné dostat úměrně větší hodnotu maximálního odběru proudu. Funguje zde tedy princip zachování výkonu, při ideálním regulátoru [5]:

$$U_1 * I_1 = U_2 * I_2 \quad [W] \quad (4)$$

Stabilitu a vyhlazování výstupního napětí ve stavu on i off zajišťuje kondenzátor.

2.3.4. Boost/Step up

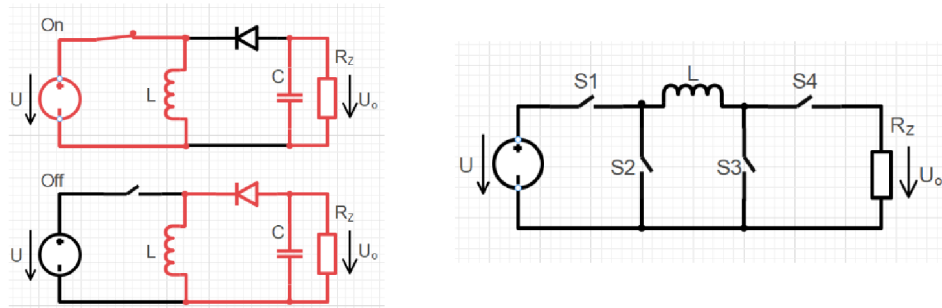


Obr. 4 – Zapojení měniče typu boost

Nechť je počáteční stav obvodu sepnutý (v obrázku on). Obvod je uzavřený přes cívku, kterou protéká proud. Eventuálně se v ní tedy část energie uloží ve formě magnetického pole. Při přechodu do stavu off bude cívka bránit poklesu proudu v obvodu využitím své uskladněné energie. Polarita indukovaného napětí na cívce tedy bude stejná jako polarita zdroje, čímž vznikne sériové zapojení dvou zdrojů napětí. Výsledné napětí tedy bude součtem napětí těchto dílčích zdrojů, na které je následně nabit kondenzátor. Napětí na cívce se však bude rychle snižovat. Před jeho poklesnutím k nule může obvod přejít znovu do stavu on, a na výstupu tak bude vždy napětí vyšší než vstupní. Výstupní napětí teoreticky nemá limit co do svojí velikosti, i zde však musí být zachována výkonová podmínka (rovnice 4). Zvýšením napětí tedy úměrně klesne maximální výstupní proud. Step up měnič má velký význam zejména v bateriemi napájených systémech, kde umožňuje velkou úsporu místa nahrazením velkých nebo sériově řazených baterií [5].

2.3.5. Buck-Boost

Tento měnič umožňuje regulaci napětí na hodnotu nižší i vyšší než napětí vstupní. Pro ideální měnič by rozsah výstupních hodnot byl od nuly do nekonečna. Rozlišujeme u něj dvě základní topologie – invertující a neinvertující.



Obr. 5 – Invertující zapojení měniče typu buck-boost

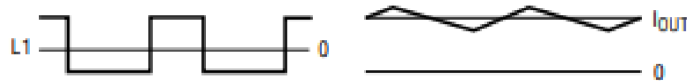
Obr. 6 – Čtyř spínačové zapojení měniče typu buck-boost

V invertujícím zapojení je chod buck-boost měniče podobný předchozím příkladům. Ve stavu on se ukládá energie v cívce a zátěž je zásobována energií z kondenzátoru, který se nabil v předchozím cyklu. Ve stavu off je zdroj odpojen, a energie cívky se přeměňuje na proud pro kondenzátor a zátěž. Výstupní napětí má opačnou polaritu než vstupní. Rozptyl výstupních hodnot tohoto zapojení je tedy v ideálním případě od nuly do *minus* nekonečna. S možností reverzace polarity však tato vlastnost téměř nikdy není na překážku [5], [9].

Druhé, neinvertujícím zapojení buck-boost měniče, rovněž zvané čtyř spínačové zapojení, je poněkud doslovnější kombinace měničů typu buck a boost. S pomocí spínačů se zde přepíná faktická topologie zapojení mezi zapojením snižujícím a zvyšujícím. Spínače S2 a S4 pracují jako diody, jejich sepnutím a rozepnutím se mění typ obvodu. Spínače S1 a S3 řídí pracovní cyklus. Řídícím spínačem je vždy pouze jeden z nich. Druhý, tzv. komutační, musí být spínán inverzně k němu. Sepnutím S4 vzniká snižující zapojení. Řídícím spínačem je S1, S2 pracuje jako dioda. Rozepnutím S2 vzniká zvyšující zapojení, řídícím spínačem je S3 a jako dioda pracuje S4 [9].

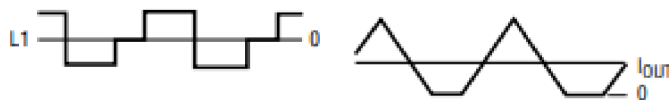
2.3.6. Kontinuální a diskontinuální mód

Všechna vysvětlení byla provedena na premise, že k začátku dalšího cyklu dojde před tím, než se spotřebuje všechna energie uložená v induktoru, tedy jeho proud klesne na nulu. Této situaci, kdy dojde k přechodu do dalšího cyklu před tím, než je induktor plně vybitý, se říká kontinuální mód. Většina zapojení bude při svých jmenovitých hodnotách pracovat v tomto módu. Je upřednostňovaný kvůli své lepší stabilitě. Nejedná se však o pravidlo.



Obr. 7 – Kontinuální mód buck zapojení [3]

Je-li zátěží odebírána příliš malá hodnota proudu, může dojít k druhému případu, tzv. diskontinuálnímu módu. Zatím se v obvodu mohli vyskytovat pouze dva stavy – nabíjení induktoru a vybíjení induktoru. V diskontinuálním módu se přidává ještě třetí, kdy se na induktoru neděje nic. Induktor je zcela vybitý, a proud neteče dovnitř ani ven [3].



Obr. 8 – Diskontinuální mód buck zapojení

Tyto módy mají své výhody a nevýhody. Ve většině případu je kontinuální mód lepší z hlediska stability a účinnosti. Diskontinuální je na druhou stranu schopen zvládat malé odběry proudů, se kterými by čistě kontinuálně pracující zapojení mělo potíže. V DC/DC měničích se lze běžně setkat s oběma módy. Obecně je však snaha se nechtěnému diskontinuálnímu módu vyhýbat. Z toho důvodu byly operace měničů vysvětleny na přímočařejším kontinuálním módu [3].

3. EMC

Jak již bylo řečeno, EMC je zkratkou pro pojem elektromagnetická kompatibilita. Formální definice tohoto pojmu následuje:

„schopnost systému fungovat vyhovujícím způsobem ve svém elektromagnetickém prostředí bez vytváření nepřijatelného elektromagnetického rušení“ [10]

Zároveň se jedná o název vědní disciplíny, která tuto problematiku a s ní související jevy zkoumá. Jejím cílem je zejména určení podmínek, které jsou potřeba pro správný provoz sloučených a na sebe působících systémů, a případně zlepšení jejich provozních vlastností.

3.1. Pojmy

V této oblasti se pracuje s několika odbornými pojmy. Budou představeny ty základní. *Elektromagnetické prostředí* je zastřešující pojem, představující souhrn všech působících jevů elektromagnetického charakteru [10].

Elektromagnetické rušení je jakýkoliv elektromagnetický jev, který může mít negativní dopad na provoz zařízení či obecně ostatní objekty, mezi které se řadí i živé organismy [10].

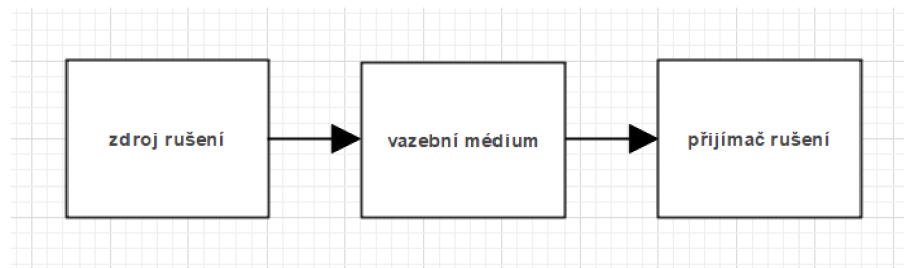
Další pojem je důležitý pro tuto BP: *EMI*. Z anglického *electromagnetic interference*, tzn. *Elektromagnetická interference*, je typ elektromagnetického rušení, které zhoršuje spolehlivost daných zařízení či systémů. Přístroje, které jsou hlavním bodem zájmu této BP, mohou produkovat právě tento typ rušení [10].

Následně se rozlišuje *mez rušení*, a *mez interference*. První vyjadřuje, jaká míra elektromagnetického rušení měřená v souladu s normami / dohodami je pro specifické zařízení přípustná. Druhá pak stanovuje, do jaké míry se provoz či spolehlivost zařízení může *maximálně* zhoršit vlivem elektromagnetického rušení [10].

Všechna zařízení pracují alespoň v nějaké míře elm. rušení. Proto existuje i pojem *odolnost*, což je schopnost zachování spolehlivého provozu zařízení i za přítomnosti rušení [10].

3.2. Schéma elektromagnetického rušení

Systém, ve kterém se vyskytuje elm. rušení lze popsat následujícím blokovým schématem, které se skládá ze tří základních komponent.



Obr. 9 – Blokové schéma elm. rušení

Jako první je zdroj, případně „generátor rušení“. Ty se následně dělí na *umělé* a *přirodní*. Mezi umělé se řadí veškerá elektrická technika, ale i ostatní formy uvolnění velkého množství energie způsobené člověkem, například výbuch. Patří mezi ně například motory, alternátory, spínaná zařízení jako měniče a zdroje, ale i spínací prvky obecně, jako stykače, relé, startéry apod. Následně zařízení s velkými výkony – svářečky, elektrické pece atd. Přírodní zdroje zahrnují ty volně se vyskytující. Ty mohou být vesmírného charakteru, jako jsou například sluneční a magnetické bouře a radiační pozadí kosmu a země. Nebo se jedná o nejrůznější atmosférické poruchy, z nichž ta nejznámější a nejčastější je blesk [10].

Dalším bodem je vazební médium, jehož prostřednictvím se rušení dostává do přijímače. To se dále dělí na vyzařování elm. pole, tj. šíření vzduchem. A šíření vedením, což zahrnuje všechny ostatní způsoby, zejména parazitní vazby různých částí obvodů – indukční, kapacitní, galvanická [10].

Posledním bodem je přijímač rušení. Různá digitální a logická zařízení, měřicí přístroje, komunikační přístroje, živé organismy včetně člověka. Je také možné, že přijímač elm. rušení je součástí zdroje onoho rušení – zařízení může mít negativní vliv na sebe samé [10].

3.3. Vztahy pro rušení

Každé zařízení, které využívá elektrické energie, je do určité míry zdrojem rušení. Úplně dokonalé odtlumení tohoto rušení není možné, jediné zařízení zcela odpojit od napětí. Rušení se může šířit dvěma možnými způsoby: šíření skrze vedení a šíření vyzařováním elm. pole. Tyto pojmy stojí za to blíže přiblížit [10].

3.3.1. Šíření vedením

Pod tímto pojmem se rozumí šíření rušení vazbami mezi obvody nebo částmi obvodů, mezi kterými v ideálním případě žádná vazba neexistuje. Dá se mu do velké míry zamezit využitím různých designových technik.

Galvanická vazba

Nejjednodušší typ vazby, prosté elektrické spojení vodičem. Ten vede užitečné signály a výkony, ale zároveň i jakékoliv rušení, které se na něm objeví vlivem propojených přístrojů a všech ostatních typů zdrojů rušení. Je tedy snaha, aby rušení pronikající do rozvodů bylo co nejmenší, případně se používají nejrůznější ochranné filtry. Ty by měli být umístěny co nejbližší zařízení, které mají chránit. Dobře lze toto demonstrovat na nestabilním nebo zarušeném síťovém připojení, takzvané „špinavé elektřině“. Ta bude zhoršovat chod připojených spotřebičů, zejména jsou na ni náchylné počítače s levnými zdroji. Řešením by byla jednotka UPS [10].

Kapacitní vazba

Dva vodiče vedoucí blízko sebe budou mezi sebou mít kapacitní vazbu. Ta závisí na ploše vodiče, vzdálenosti mezi nimi a také materiálem, kterým jsou odděleny. Obecně dvě oddělené vodivé plochy tvoří kondenzátor. Zvláště na plošných spojích tedy široké vodivé cesty či celé měděné vrstvy představují problém, pokud proti tomuto efektu není bojováno jejich spojováním či uzemňováním. Říká se jí také *elektrická vazba* [10].

Obecně kapacita má následující vztah [2]:

$$C = \varepsilon_0 * \varepsilon_r * \frac{S}{h} \quad [F] \quad (5)$$

ε_0 je permitivita vakua, ε_r je relativní permitivita, S je plocha vodivých ploch v m^2 a h je jejich vzdálenost v metrech. U vodičů se však často pracuje s upraveným vzorcem, kde je výsledkem C/l . Vztah pro plošné vodiče nad sebou:

$$\frac{C}{l} = \varepsilon_0 * \varepsilon_r * \frac{w}{h} \quad [F/m] \quad (6)$$

Celá rovnice 5 byl vydělen délkou l , což je jeden z komponentů plochy S . Zbývá tedy w , což je šířka vodiče. Tím výsledek vychází ve formátu farad na metr, což je pro potřeby vyhodnocování efektu kapacity užitečnější. Forma vztahu se bude měnit s geometrií vodičů a jejich vzájemnou polohou a umístěním vzhledem k prostředí. Tyto vzorce jsou již složitější, mohou zahrnovat i složky dané zakřivením magnetického pole. Pro všechna různá uložení běžných vodičů je najdeme v tabulkách [10].

Induktivní vazba

Tato vazba vzniká vzájemným působením magnetických polí vodiče, či skupiny vodičů. Odtud alternativní název *magnetická vazba*. Vyplyvá ze zákonů elektromagnetické indukce. Jestliže vodičem protéká proud, je kolem něho magnetické pole. To v blízkém vodiči může způsobit indukci napětí, což vyvolá tok proudu. Tento proud opět dá za vznik magnetickému poli. Několik vodičů může tedy takto být svými indukčnostmi spojeno, jsou mezi nimi závislosti. Změna na jednom se projeví na druhém. Vztah pro indukčnost přímého plošného vodiče [10]:

$$L = \frac{\mu_0 * \mu_r}{2 * \pi} * l * \ln \left(\left(\frac{2 * l}{t + w} \right) + 0,5 \right) [H] \quad (7)$$

V pořadí: μ_0 je permeabilita vakua, μ_r je relativní permeabilita, l je délka, t výška, a w šířka vodiče v metrech. I zde najdeme vzorec pro nejjednodušší případ, dva plošné vodiče nad sebou:

$$\frac{L}{l} = \frac{\mu_0 * \mu_r}{K_{L1}} * \frac{h}{w} [H/m] \quad (8)$$

K_{L1} je koeficient zohledňující tloušťku materiálu. Existuje pro něj empirický vzorec $1+0,8*h/w$. H je právě tloušťka oddělujícího materiálu, w je opět šířka vodiče.

3.3.2. Šíření vyzařováním

Na rozdíl od šíření prostřednictvím vedení toto rušení nepředstavuje vazbu dvou vodičů. Jedná se o přímé vyzařování elektromagnetického pole. Tento fenomén má velké množství využití. Stačí uvést například televizní nebo rádiový přenos, či i prostý telefonát. Nelze mu však zabránit. Bude přítomen jak u zařízení, které ho využívají, tak i u zařízení, kde je na škodu. Pro pochopení principu tohoto rušení je nutné bližší porozumění elektromagnetickému poli.

Elektromagnetické pole je, jak jeho název napovídá, složením elektrického pole a magnetického pole. Tyto dvě složky jsou na sebe v prostoru kolmé. Jejich vektorovým součinem dostáváme tzv. *Poyntingův vektor*, jehož směr udává směr šíření tohoto pole. Jeho velikost pak vyjadřuje přenos energie, které toto pole zprostředkovává. Podoba vztahu je tedy následující [10]:

$$\vec{S} = \vec{E} * \vec{H} [W/m^2] \quad (9)$$

S je již zmíněný Poyntingův vektor, E je intenzita elektrického pole, s jednotkou V/m, a H je intenzita magnetického pole, s jednotkou A/m. Dle zákonů práce se symboly, vynásobí-li se dvě veličiny, jednotka výsledku budou jednotky těchto veličin rovněž vynásobené.

$$\frac{V}{m} * \frac{A}{m} = \frac{V * A}{m^2} = \frac{W}{m^2} \quad (10)$$

Výslednou jednotkou je tedy watt na metr čtvereční. Z toho vyplývá, že elektromagnetické pole přenáší výkon. Na rozdíl od šíření vedením je tento přenos znatelný i na potencionálně velmi velké vzdálenosti. I jednoduchý přímý vodič, jímž prochází el. proud, bude vyzařovat. Problémy nám však dělají zejména proudové smyčky. Právě nechtěnému vytvoření velké proudové smyčky je třeba se při designu zařízení vyvarovat. Mnohá návrhová pravidla tvorby desek plošných spojů mají základy v tomto požadavku. Samotné zákonitosti rušení vyzařováním se nejlépe vysvětlí na vzorcích. Pro blízké pole v proudové smyčce [10]:

$$\vec{E} \approx \frac{Z_0 * I * S}{2 * \lambda * D^3} [A/m] \quad (11)$$

$$\vec{H} \approx \frac{I * S}{4 * \pi * D^2} [V/m] \quad (12)$$

Z_0 je vlnová impedance prostředí, I představuje proud smyčkou, S plochu smyčky v m^2 , λ vlnovou délku v metrech a D vzdálenost smyčky od měřeného bodu, rovněž v metrech.

Jak je vidět, hlavní hodnotou, která určuje velikost vyzařovaného elektromagnetického pole, je plocha smyčky a proud jí procházející. Při zkoumání elm. pole v relativní blízkosti smyčky má největší potlačující účinek na jeho velikost vzdálenost. Vzhledem k neměnným hodnotám ostatních parametrů se tedy obvykle proti rušení vyzařováním bojuje snahou o co možná nejmenší plochy smyček.

Podoba těchto vzorců se mění se vzdáleností, v jaké je prováděno měření. Pro vzdálené pole platí vztahy následující [10]:

$$\vec{E} \approx \frac{Z_0 * \pi * I * S}{\lambda^2 * D} [A/m] \quad (13)$$

$$\vec{H} \approx \frac{\pi * I * S}{\lambda^2 * D} [V/m] \quad (14)$$

Lze pozorovat, že vlivy vzdálenosti a komparativně i proudu a plochy smyčky ustoupily do pozadí a rozhodující kvantitou pro velikost vyzařovaného elm. pole se stává vlnová délka. Čím kratší vlnová délka, tím větší hodnoty polí.

3.4. Problémy způsobované rušením

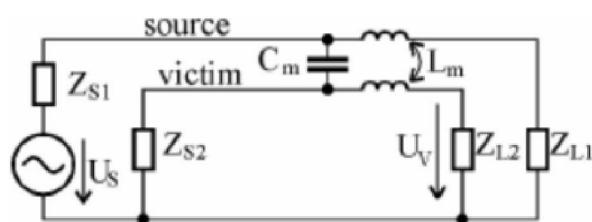
Rušení obecně zhoršuje chování zařízení, až do úplné nefunkčnosti či dokonce destrukce. Zvláště negativní vliv má na zařízení obsahující zesilovací prvky (tranzistory, operační zesilovače apod.). Jestliže nepracují s čistými signály, veškeré rušení totiž bude v souladu s jejich frekvenční charakteristikou rovněž zesíleno. To může vést ke ztrátě funkce i u zařízení s malým počtem součástek. Řízení se návrhovými pravidly pro co možná největší potlačení vlivů rušení je tedy kritické [10].

Rušení vyzařováním je mimo jiné na škodu i generací šumu v pásmech bezdrátové komunikace. Příkladem může být případ zapnuté nekvalitní mikrovlnné trouby, znemožňující řízení autíčka na dálkové ovládání. Jsme obklopeni elektromagnetickými poli, které přenášejí informace. Ty jsou zachycovány anténami a zesilovány. Silné zdroje vyzařování rušivých vln mohou kvalitu těchto signálů zhoršovat či znehodnocovat [2].

Zařízení, které mají vůči rušení větší odolnost jsou například nejrůznější měniče elektrické energie na ostatní energetické formy, tedy různé druhy elektromotorů, topná tělesa atd. Tyto zařízení však mohou být silnými *zdroji* různých typů rušení [2].

3.4.1. Přeslechy

Jedním z nejzávažnějších problémů, které rušení může zavést do systému, jsou *přeslechy*. Ty jsou způsobovány indukční a kapacitní vazbou. Mají za následek vzájemné ovlivňování různých nepropojených částí vedení, kde se změny na jedné mohou projevit či přímo objevit na druhé. To představuje velký problém zejména pro datové a citlivé systémy [10].



Obr. 10 – Náhradní zapojení přeslechu [10]

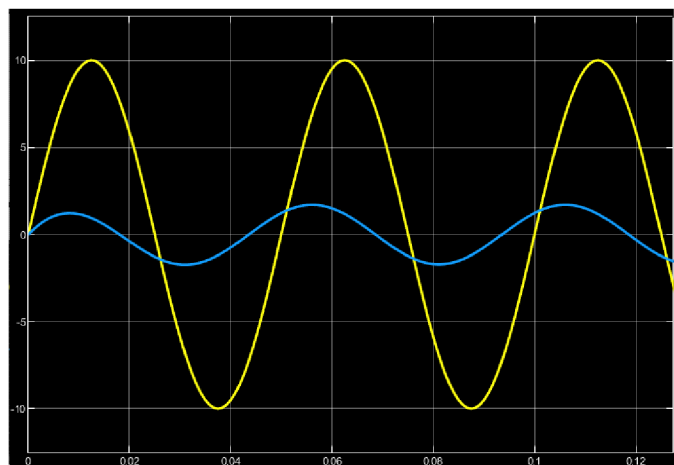
Ve schématu přeslechů viz obr. 10 figuruje „agresor“, tedy vedení, které je zdrojem rušícího signálu a „oběť“, což je část vedení rušením ovlivňovaná. Rušení kapacitní vazbou způsobuje změny napětí, rušení induktivní vazbou naopak změny proudu. Tyto projevy mají potenciál učinit zařízení nefunkčním, či jej dokonce po připojení na napětí zničit. Pro obranu proti tomuto jevu je několik možností. Tou nejpřímochařejší je zvětšení vzdálenosti mezi vodiči. Ta má přímý vliv na sílu vazby, která mezi vodiči může vzniknout. Příliš často se s tímto způsobem však nelze setkat. Pro podstatné potlačení vazeb je nutné, aby vzdálenost mezi vodiči byla několikanásobkem jejich šířky (udává se alespoň čtyřnásobek). To u složitějších zapojení ve velké většině případů nelze ospravedlnit, z důvodu limitovaného místa na desce [10].

Používanou obranou proti fenoménu přeslechů je přesunutí problémových vodičů na různé vrstvy, ideálně oddělené uzemněnou vrstvou. Podobným způsobem je protáhnutí zemního vodiče mezi těmito vodiči, například technikou rozlité mědi. Tyto metody jsou často kombinovány. Tímto způsobem je většina rušivých signálů pohlcena vedením nulového potenciálu [10].

Přeslech je název fenoménu. Je to však zároveň i název veličiny, vyjadřující poměr napětí agresora vůči napětí oběti. Vztah je následující [10]:

$$X_{talk} = 20 * \log \left| \frac{U_{ag}}{U_{ob}} \right| \quad [Db] \quad (15)$$

Jednotkou přeslechu je decibel. Praktický příklad vlivu přeslechu lze vidět na následujícím průběhu. Žlutě napětí agresora, modře napětí oběti.



Obr. 11 – Signál přeslechu

4. Vymezení praktické části.

Současné zadání se lehce liší od původního zadaného. Po domluvě s vedoucím bylo opuštěno od zdroje typu TOP switch. Jeho realizace by v dnešní době, s přihlédnutím k relativní složitosti ostatních zdrojů, představovala nepřiměřené komplikace. Současné zadání tedy obsahuje realizaci tří zapojení spínaných stabilizátorů a jednoho lineárního. Realizace pokrývá prostudování dokumentace, vytvoření schématu v návrhovém softwaru, následně návrhu desek plošných spojů a po výrobě těchto desek osazení patřičnými polovodičovými a diskrétními součástkami, ověření funkčnosti a provedení měření v souladu se zaměřením této bakalářské práce.

Měnič typu boost

Pointou tohoto zapojení je schopnost fungovat jako výuková pomůcka při studiu EMC. Z toho vyplývá požadavek na ideálně snadno dostupný, v principu nesložitý a dobře zdokumentovaný čip. Na jedné desce plošného spoje jsou realizovaná dvě různá zapojení, která využívají identický obvod. Ty jsou od sebe zcela oddělená, nesdílejí žádné vstupy ani výstupy. Jedno ze zapojení je navrženo se snahou držet se návrhových pravidel potlačující EMC. Druhé zapojení je naopak od těchto kritérií oproštěno a záměrně obsahuje prvky, kterým je z hlediska EMC třeba se maximálně vyhýbat. Zejména zcela redundantně velkoplošnou smyčku ve výkonové části obvodu. Kontrast těchto zapojení a jejich naměřených hodnot týkajících se EMC umožní vyvádět závěry a ilustrovat mnohé elementy EMC vlastností systémů v praxi.

Konkrétní vybraná součástka: **MC33063AD**

Měnič typu buck-boost

Záměrem zapojení s obvodem typu buck-boost je demonstrace možností spínaných technologií ve flexibilitě a účinnosti, při zachování velmi dobrých EMC vlastností za pomoci rušení vzdorujícímu designu. Vybraný obvod zvládá řádově vyšší výkon než předchozí zapojení, tedy již výstupní hodnoty potencionálně spotřebitelsky zajímavé. Zároveň se opět i oproti zapojení minulému jedná o velmi moderní obvod, dobře reprezentující současné možnosti v tomto sektoru. Cílem je ukázat, že existují možnosti zachování veškerých výhod spínaných technologií, aniž bychom se dostali do konfliktu s jejich nevýhodami.

Konkrétní vybraná součástka: **LT8392**

Lineární stabilizátor

Posledním typem je lineární nastavitelný stabilizátor. Ten slouží jako kontrast ke spínaným obvodům. Pro tuto pozici byl vybrán dnes již lehce zastaralý, ale za to velmi jednoduchý a rozšířený stabilizátor, **LM317**.

5. Postup řešení

5.1.1. Software pro výrobu DPS EAGLE

Pro vytvoření fyzické desky plošných spojů (zkratka DPS) je nutné množství prerekvizit. Zejména jsou nutná výrobní a návrhová data, vytvořená prostřednictvím softwaru pro návrh DPS. Zde je na výběr z množství volně dostupných i placených variant.

EAGLE je softwarový designer desek plošných spojů, vlastněný firmou AUTODESK. Oproti alternativám byl vybrán z několika důvodů: Pro studenty je dostupná jeho plná verze zdarma. Jedná se o relativně přímočarý a uživatelsky přívětivý software a s jeho užíváním jsem již měl předchozí zkušenosti jak z Technické Univerzity v Liberci, tak z předchozího studia.

Hlavními body EAGLU jsou synchronizace schematické a návrhové části. Dále možnost simulace a kontroly elektrického zapojení a snadná tvorba a získávání knihoven. Nabízí také možnost spojení s ostatním softwarem firmy AUTODESK, což usnadňuje spolupráci při práci na velkých projektech. Velmi důležitou výhodou je také aktivní online komunita, která velmi usnadňuje řešení problémů a hledání nástrojů. Nejedná se o program popsatelný jakožto „vysoký“ návrhový software DPS. Nezasahuje do komplexností zcela průmyslově orientovaných programů. Zároveň se však nejedná o produkt nedostačující či neúplný. Z uvedených důvodů se tedy jeví jako optimální software pro účely této BP [11].

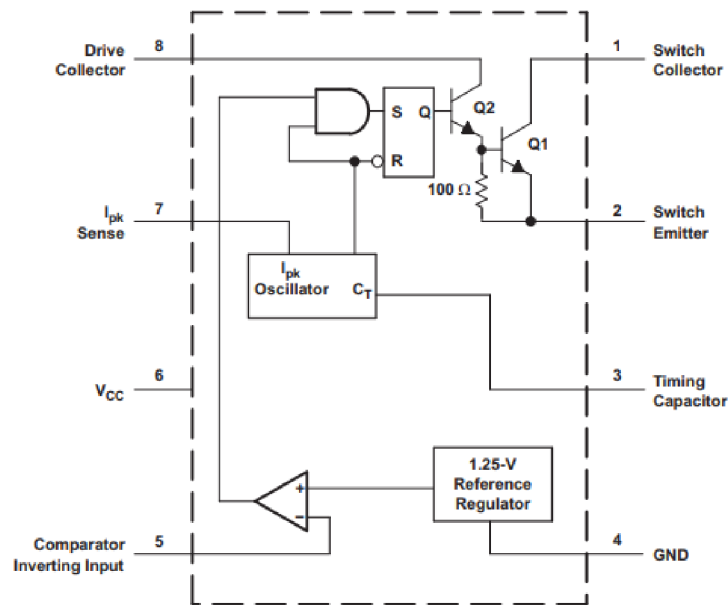
5.2. Obvod MC33063AD

Centrální obvod prvního zapojení, MC33063 umožňuje realizaci několika topologií, v závislosti na rozložení okolních součástek [12]. Vybrána byla možnost měniče typu boost, jakožto pro demonstrační účely zajímavější. Hlavní výhodou obvodu je nízké množství externích prvků potřebných pro realizaci měniče a kompaktnost. Je tedy vhodný pro užití například v přenosných zařízeních či testovacích aplikacích [12].

Tabulka 1: Základní údaje obvodu MC33063:

Typ:	Buck/Boost/Invertující
Vstupní napětí:	3–40 V
Maximální výstupní proud:	1,5 A
Maximální spínací frekvence:	100 KHz
Počet pinů:	8
Použití:	Jednoduché DC/DC měniče

5.2.1. Princip a vnitřní zapojení



Obr. 12 – Blokové vnitřní zapojení obvodu MC33063 [12]

Vnitřní zapojení obvodu je možné rozdělit na několik základních prvků. Primárně se zde nachází zdroj referenčního napětí, komparátor, oscilátor, ovladač PWM a řízený výkonový tranzistor, který představuje hlavní spínací prvek tohoto obvodu.

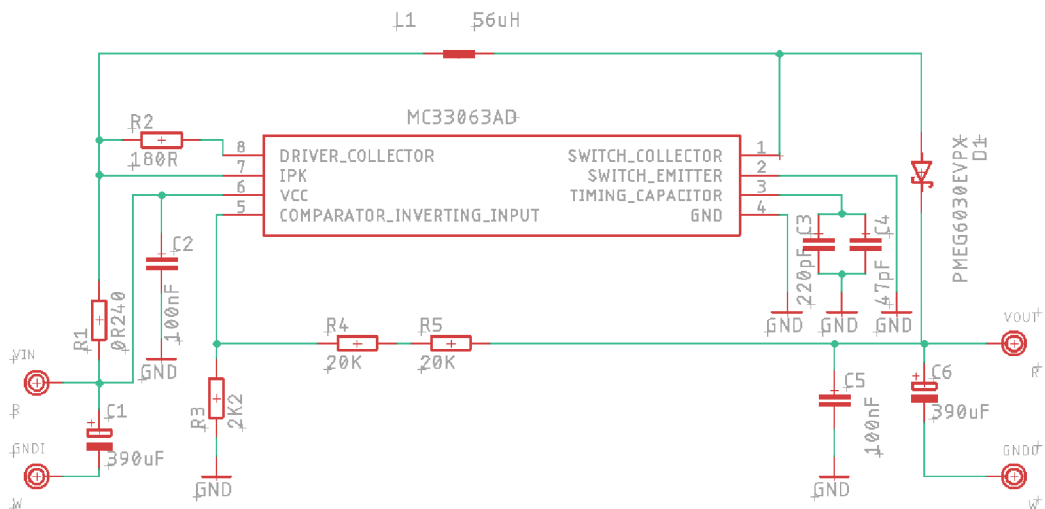
Funkce:

Viz obr. 12. Mezi výstupní větví měniče a komparátorem (pinem 5) se nachází odporový dělič. Ten umožňuje nastavit požadované výstupní napětí v uvedených mezích. Signál z komparátoru pak slouží jako vstup pro ovladač PWM, tedy samotné spínání, spolu s výstupem z oscilátoru, jehož frekvence je nastavena externími kondenzátory (pin 3). Spínání je zároveň ovládáno hodnotou proudu I_{pk} (pin 7), což je snímacím rezistorem získávaný signál aktuálního proudu induktorem.

Samotný chod představuje v zapojení boost spínání tranzistoru mezi pinem 1 (kolektor) a 2 (emitor). Vstupní větev (na kterou jsou rovněž připojeny piny 8, 7 a 6) před kolektorem obsahuje cívku, tedy induktor, a emitor tranzistoru je přiveden na GND. Když je tranzistor Q1 otevřen, proud prochází cívku skrze tranzistor do země. Dochází tedy k ukládání energie. Při rozepnutí se na cívce indukuje napětí, a stává se z ní zdroj pro výstup, sériově zapojen se vstupním zdrojem [12].

5.2.2. Schéma

Hotové schéma zapojení obvodu s MC33063 může vypadat například takto:



Obr. 13 – Schéma zapojení s obvodem MC33063

Hodnoty součástek pro požadované výstupní hodnoty se spočítají ze vzorců uvedených v dokumentaci. Jak je známo, spínané technologie potřebují pro dosažení stejnosměrného charakteru výstupního napětí výstupní kondenzátor. Proto je nutná i přítomnost diody D1, která zamezuje toku proudu z tohoto kondenzátoru spínacím tranzistorem do země, když je spínací tranzistor sepnutý.

5.2.3. Postup návrhu

Pro výstupní napětí platí jednoduchý vztah [10]:

$$U_{out} = 1,25 * \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) = 1,25 * \left(1 + \frac{40}{2,2}\right) = 23,98 \quad (16)$$

Požadované výstupní napětí tohoto obvodu je 24 V, čemuž odpovídá $R_2 = 40k$, a $R_1 = 2,2k$ ohmů. Jediné ostatní součástky, které je třeba dimenzovat, jsou snímací rezistor R_{sc} , výstupní kondenzátor, časovací kondenzátory a samotná hodnota induktoru. Pro tyto hodnoty je třeba znát poměr délky sepnutí a vypnutí obvodu, pro který je vztah následující [10]:

$$\frac{t_{on}}{t_{off}} = \frac{U_{out} + U_f - U_{in(min)}}{U_{in(min)} - U_{sat}} = \frac{24 + 0,6 - 9,5}{9,5 - 0,05} = 1,6 \quad (17)$$

Kde U_f představuje úbytek napětí na výstupním stabilizátoru (pokud přítomen), $U_{in(min)}$ je minimální vstupní napětí, a U_{sat} je saturační napětí spínacího prvku (úbytek napětí při plném otevření tranzistoru). Při adici rezervního napětí $U_f = 0,6$ V, minimálnímu vstupnímu napětí $U_{in(min)} = 9,5$ V a saturačnímu napětí $U_{sat} = 0,05$ V vychází tento výsledek (rovnice 17). Obvod setrvává ve stavu sepnuto o 60 % více času než ve stavu rozepnuto. Dalším potřebným údajem je délka periody obvodu. Ta je dána známým vztahem [2]:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{95000} = 10,53 \text{ us} \quad (18)$$

Jelikož potřebná hodnota indukčnosti induktoru je nepřímo úměrná frekvenci, frekvence byla zvolena co možná nejbližší maximální hodnotě 100kHz, na 95kHz. Toto je jedna ze slabín tohoto zapojení, moderní spínací technologie rutině pracují na frekvenci stovek kilohertzů, až jednotek megahertzů. Jelikož T je rovno součtu t_{on} a t_{off} , je teď možné osamostatněním spočítat t_{on} .

$$t_{on} = \frac{T}{\frac{1}{t_{on}/t_{off}} + 1} = \frac{10,53 * 10^{-6}}{\frac{1}{1,6} + 1} = 6,48 \text{ us} \quad (19)$$

Samotná hodnota kapacity časovacího kondenzátoru je dána jednoduchým koeficientem [12]:

$$C_t = t_{on} * 4 * 10^{-5} = 259,2 \text{ pF} \quad (20)$$

Hodnota snímacího rezistoru má rovněž vztah daný koeficientem, který se odvíjí od maximálního výstupního proudu ($I_{o(max)}$), který lze v obvodu připustit. Ten byl zejména z důvodu proudové schopnosti vybrané cívky omezen na 250 mA. Je třeba pamatovat, že toto zapojení je typu boost, s dvakrát vyšším výstupním napětím než vstupním. Úměrně se tedy na induktoru může objevit proud dvakrát větší než odebíraný z výstupu [12].

$$R_{sc} = \frac{0,3}{2 * I_{o(max)} * (\frac{t_{on}}{t_{off}} + 1)} = \frac{0,3}{2 * 0,25 * (1,6 + 1)} = 0,23 \text{ ohm} \quad (21)$$

Nyní už jen zbývá spočítat hodnotu induktoru. Následující vztah představuje minimální hodnotu jeho indukčnosti [12].

$$L_{min} = \frac{U_{in(min)} - U_{sat}}{2 * I_{o(max)} * (\frac{t_{on}}{t_{off}} + 1)} * t_{on} = \frac{9,5 - 0,05}{2 * 0,25 * (1,6 + 1)} * 6,48 * 10^{-6} = 47,1 \text{ uH} \quad (22)$$

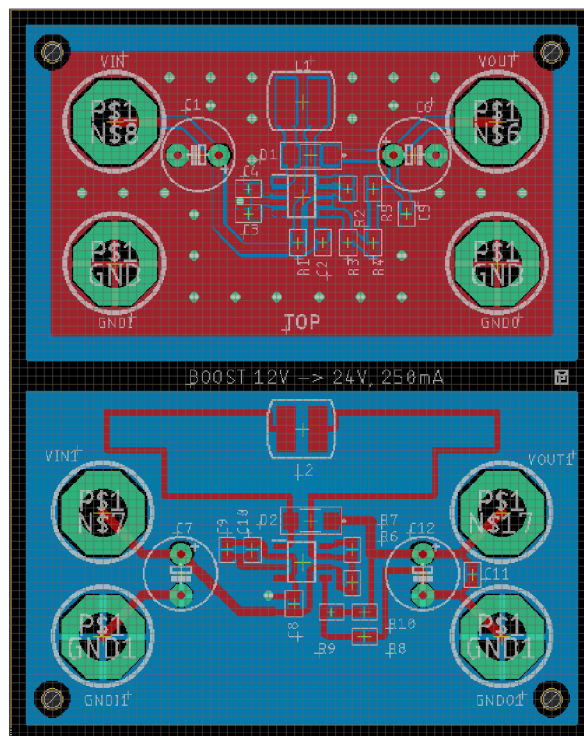
V tomto bodě je již připraveno v podstatě všechno potřebné pro funkční obvod. Zbývá jen dimenzovat výstupní kondenzátor pro požadovanou hodnotu zvlnění [5]:

$$C_o = 9 * \frac{I_{out} * t_{on}}{U_{ripple}} = 9 * \frac{0,25 * 6,48 * 10^{-6}}{0,05} = 291,6 \mu F \quad (23)$$

Odebíraný proud I_{out} byl dán jako maximální, požadované zvlnění U_{ripple} bylo stanoveno na 50 mV. Této hodnoty by měl být schopný dosáhnout kondenzátor spočtené kapacity, tato hodnota se však zcela běžně a vhodně ještě nadsazuje [5].

5.2.4. Návrh desky

Všechny hodnoty součástek jsou tedy určeny. Lze předpokládat, že zapojení v této podobě bude bez problémů fungovat. V souladu se zadáním se na desce plošných spojů MC33063 realizují dvě zapojení výše uvedeného schématu. Schéma a hodnoty součástek jsou jinak identické, jakékoliv rozdíly mezi nimi tedy budou tvořit pouze praktiky návrhu DPS. Jedno zapojení má být navrženo v souladu s návrhovými pravidly pro potlačení nežádoucích vlivů EMC, druhé má naopak za úkol umělé přidání prvků, které EMC vlastnosti zhoršují. Tyto dvě zapojení mezi sebou nemají žádnou elektrickou vazbu, a vzájemně se tedy neovlivňují. Rozdíly mezi realizacemi se nejlépe ukážou na hotovém návrhu:



Obr. 14 – Navržená deska s obvodem MC33063

Všechny neshody patrné mezi horním a dolním zapojením v obrázku 12 mají za úkol prohloubit rozdíly v EMC vlastnostech. Nachází se jich zde několik.

proudová smyčka

Nejvíce patrnou změnou je navržení hlavní výkonové smyčky. Pro připomenutí, míra elektromagnetického rušení vyzařováním je hlavně ovlivněna proudem protékajícím smyčkou a plochou oné smyčky. Z toho důvodu je smyčka obsahující cívku ve vrchním zapojení tak malé plochy, jak je jen nezbytně nutné a fyzicky možné. Naopak dolní zapojení má tuto smyčku zcela nesprávně a záměrně vyvedenou do prostoru. Tvoří zde tedy v podstatě jedno závitovou cívku s velkým průměrem. Ještě jinak řečeno, slouží jako anténa, což do systému vnáší množství parazitních veličin a jevů, zhoršující funkci systému.

Rozlitá měď

Rozdílem číslo dvě je přítomnost rozlité mědi u korektního zapojení a její absence u zhoršeného zapojení. Technika rozlité mědi spočívá ve snadném vedení signálových hladin „rozlitím“ mědi po celé ploše desky. V případě že je potenciál této vrstvy nulový, tedy připojený na zem, má zároveň odrušovací účinky. Velká část elm. rušení vytvářená protékajícími proudy se překlene do této hladiny a je neškodně svedena do země. Jejím hlavním přínosem je však zabezpečení obvodu proti přeslechům. Vodiče vedené blízko sebe se mohou ovlivňovat různými elektrickými vazbami. S měděnou plochou mezi nimi je možné těmto jevům do velké míry zamezit. Primární obětí těchto vazeb se stane zemní potenciál, kde to ve většině případů v běžných aplikacích nevádí. Kritičnost této úlohy je zřejmá zejména v mnohvrstevných deskách plošných spojů, kde se mezi každou vrstvou sloužící k vedení signálů nachází uzemněná vrstva právě pro tento účel. Rozlitá měď také výrazně zlepšuje tepelné vlastnosti zapojení [10].

vias

Třetím rozdílem je přítomnost prvků via, což jsou miniaturní prokovené otvory propojující v horním zapojení vrchní a spodní zemní plochu. Tyto prvky mají pozitivní vliv na tepelné vlastnosti desky, to se však v tomto zapojení příliš neuplatní. Jejich hlavní funkce spočívá ve zkracování drah proudů, protékajících rozlitou mědí do země. Celistvost vrchní zemní vrstvy je totiž narušena rozvody obvodu. Proud má sice k dispozici celou měděnou plochu, jeho největší koncentrace však bude v místech nejmenšího odporu, tedy nejkratší cesty. Bude tedy obepínat vodiče zapojení a uzavírat se se zemí přes relativně velkou vzdálenost. Což je vše, co stačí k vytvoření rušení produkující proudové smyčky.

Vzhledem k relativně malé velikosti zapojení by vliv tohoto efektu patrně nebyl příliš výrazný. Tradičně se však prvky via používají z důvodu ochrany proti potencionálně škodlivým místům koncentrace proudu. Techniku samotnou lze nalézt pod názvem „via stitching“, a má se postarat o to, aby délky cest proudů do země byly co možná neblíže nejkratším možným, tedy přímkám. To může mít pozitivní vliv i na odolnost zařízení vůči vnějšímu rušení [9].

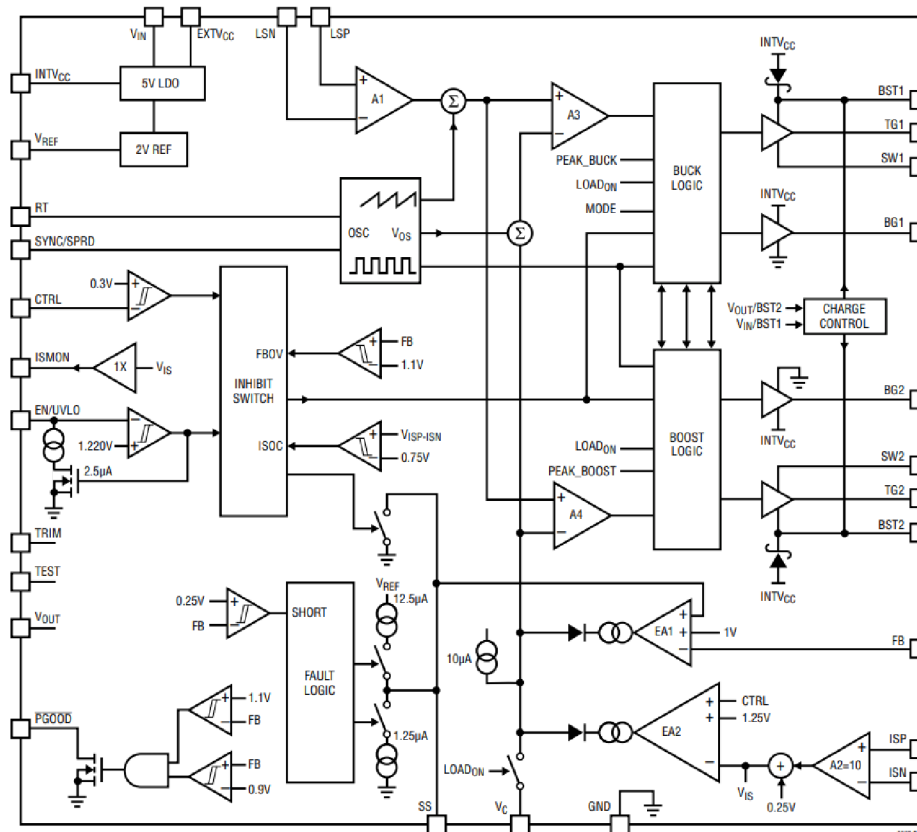
5.3. Obvod LT8392

Obvod LT8392 je řádově složitější než obvod předchozí. Jedním ze základních rozdílů je samotný typ měniče, buck-boost. Konkrétně se jedná o čtyř spínačovou variantu [9]. Obvod MC33063 je možné použít pro různé typy měničů. Obvod LT8392 tyto změny vykonává vnitřně, dle rozdílu mezi vstupním a požadovaným napětím pracuje v režimech buck nebo boost. Dalším rozdílem je úloha obvodu. LT8392 nemá v sobě výkonové prvky zabudované, spínací tranzistory se připojují jako součást externího zapojení. Je tedy možné je zvolit podle potřeb konkrétní aplikace. To má výhodu v tom, že maximální hodnoty proudu se odvíjí od schopnosti cívek a tranzistorů [9].

Tabulka 2: Základní údaje obvodu LT8392:

Typ:	Buck-Boost
Vstupní napětí:	3–60 V
Maximální výstupní proud:	Dle tranzistorů
Maximální spínací frekvence:	650 KHz
Počet pinů:	28
Použití:	Regulátory, nabíječky, automobil...

5.3.1. Princip a vnitřní zapojení



Obr. 15 – Blokové vnitřní zapojení obvodu LT8392 [9]

Vnitřní zapojení obvodu LT8392 obsahuje mnohem více prvků, je však stále možné identifikovat jednotlivé „oblasti“ a jejich úlohu. V pravé levé části zapojení (viz obr. 15) se nachází napájecí část obvodu. Ta následně napájí provoz logických částí obvodu a vytváří vnitřní a vnější referenční napětí. Zajímavostí je přítomnost vstupu pro případné externí napětí. Toho se využívá v tom případě, že obvod není napájen stejným napětím, jaké se používá ve výkonové části. To může mít pozitivní vliv na účinnost. Další důležitý blok je oscilátor, který je v případě obvodu LT8392 o něco sofistikovanější, než by byl obyčejný zdroj spínací frekvence. Obvod má integrovanou funkci „spread“, tedy rozptyl. Ta mu umožňuje, jestliže je povolena, kolísat se spínací frekvencí v okolí 30 % od nastavené. Toto řízení probíhá inteligentně v zájmu dosažení opět co možná nejvyšší účinnosti obvodu, v závislosti na jeho současném stavu a zatížení [9].

Pod touto oblastí se nachází blok inhibit switch a s ním spojený blok fault logic. První představuje blok deaktivace spínání, což může nastat z několika důvodů. Druhý blok obsahuje logiku pro zpracování chybových stavů, což je hlavně zkrat. Obvod LT8392 má několik volitelných reakcí na chybový stav, který tento blok rovněž určuje [9].

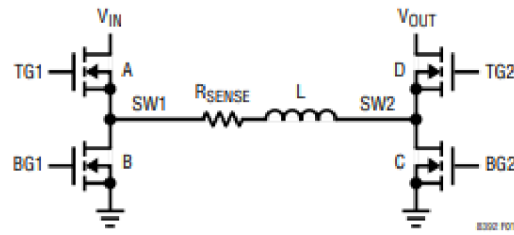
Řídicím jádrem obvodu jsou bloky generující spínací signály pro tranzistory. Řízení v oblasti buck a řízení v oblasti boost je oddělené. V jaké oblasti obvod pracuje je rozhodnuto dle poměru vstupního napětí k požadovanému. Pro přechod mezi oblastmi jsou řídicí bloky schopny mezi sebou komunikovat [9].

Jelikož se již jedná o obvod s větším množstvím pinů, jejichž funkce nemusí být vždy zřejmá, vyplatí se tady uvést tabulku s jejich popisem.

Tabulka 3: Popis pinů obvodů LT8392

Č. pinu	Název pinu	Funkce pinu
1	BG1	Ovladač spodního gatu buck části měniče
2	BST1	Plovoucí zdroj ovladače buck části měniče
3	SW1	Spínací bod buck části měniče
4	TG1	Ovladač horního gatu buck části měniče
5	LSP	Kladný terminál proud snímajícího rezistoru buck části
6	LSN	Záporný terminál proud snímajícího rezistoru buck části
7	VIN	Vstupní napětí
8	INTVCC	Interní napájecí napětí ovládací logiky
9	UN/UVLO	Nastavení ochrany vůči podpětí
10	TEST	Testovací pin pro potřeby výroby
11	TRIM	Orientační pin pro potřeby výroby
12	VREF	Zdroj referenčního napětí
13	CTRL	Nastavení ochrany vůči nadproudu
14	ISP	Kladný terminál proud snímajícího rezistoru boost části
15	ISN	Záporný terminál proud snímajícího rezistoru boost části
16	ISMON	Monitorování výstupního proudu pro paralelní aplikace
17	PGOOD	Monitorování shody výstupního napětí s požadovaným
18	SS	Nastavení pomalého startu
19	FB	Ochrana proti zkratu
20	VC	Výstup chybového zesilovače
21	RT	Nastavení spínací frekvence
22	SYNC/SPRD	Nastavení synchronizace frekvence
23	EXTVCC	Vstup externího napětí pro INTVCC
24	VOUT	Výstupní napětí
25	TG2	Ovladač horního gatu boost části měniče
26	SW2	Spínací bod boost části měniče
27	BST2	Plovoucí zdroj ovladače boost části měniče
28	BG2	Ovladač spodního gatu boost části měniče

Funkce:



Obr. 16 – Náhradní zapojení spínací části obvodu LT8392 [9]

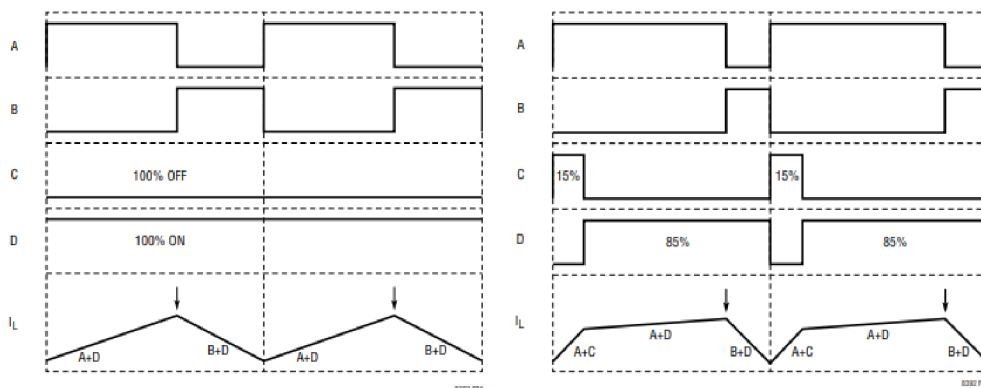
Obvod je schopný operovat ve čtyřech „módech“, mezi kterými inteligentně přepíná. Aby mezi jednotlivými režimy obvod na přechodových hodnotách neoscilloval, je přechod mezi nimi opatřen hysterezí. Čtyři stavy jsou [9]:

režim buck ($U_{IN} \gg U_{OUT}$)

Tedy, je-li vstupní napětí výrazně vyšší než výstupní. V tomto módu je spínač D vždy sepnutý, tj. průchozí, a spínač C vždy rozepnutý, lze si ho tedy odmyslet. Tímto zapojením vzniká podobné schéma jako tradiční měnič typu buck. V první části cyklu je spínač A sepnutý a zvyšuje se proud tekoucí cívkou. Než je však schopen dosáhnout své maximální hodnoty, spínač A se uzavře a sepne se spínač B. Zdrojem se stává energie, která se stihla uložit v cívce [9].

snižující režim buck-boost ($U_{IN} > U_{OUT}$)

V případě, že je vstupní napětí lehce vyšší než výstupní. Režim je podobný tomu předchozímu s tím rozdílem, že je zde aktivní i spínač C, a to vždy na začátku cyklu, prvních 15 %. Po zbylých 85 % je vystřídán spínačem D. V počáteční fázi, kde je sepnutý spínač A spolu s C proud induktorem prudce roste. Při sepnutí D a rozepnutí C tento růst pokračuje, ale pomaleji. V závěru se spínač A uzavírá a B otevírá. Proud cívkou klesá [9].



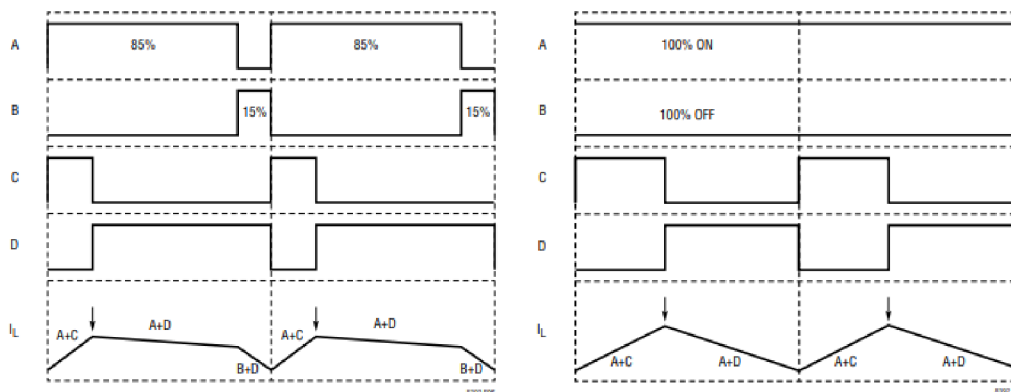
Obr. 17 – Časový diagram spínačů v oblasti buck

zvyšující režim buck-boost ($U_{IN} < U_{OUT}$)

Obdobně fungují i režimy oblasti boost, ale „role“ jednotlivých spínačů jsou prohozené. Tento mód je aktivní při lehce nižším vstupním napětím než výstupním. Na začátku každého cyklu je sepnut spínač A, který zůstane sepnut po 85 % cyklu, a na kratší dobu spínač C. Energie se ukládá v induktoru. V dalším stavu se rozezne spínač C a sepne spínač D. Induktor je zdrojem sériově zapojeným se vstupním skrze A. V posledních 15 % se zavírá spínač A a otevírá spínač B, což vede k poklesu zbytkového proudu induktorem [9].

režim boost ($U_{IN} \ll U_{OUT}$)

Situace je při výrazně nižším vstupním napětím než výstupním totožná jako předchozí, pouze spínač B je nyní rozeznut po celou dobu a spínač A naopak sepnut celou dobu. Odpadá tedy fáze, ve které je zbytková energie v induktoru odvedena otevřením B [9].



Obr. 18 – Časový diagram spínačů v oblasti boost

5.3.2. Postup návrhu

Zde je práce usnadněná. Datasheet obvodu sice specifikuje výpočty pro hodnoty a limitní veličiny klíčových součástek. Existuje však volně dostupná dokumentace k vývojové desce využívající stejný čip, se všemi zapojeními a součástkami již navrženými. Vzhledem k náročnosti zapojení s obvodem LT8392 se návrh z velké části odvíjí od tohoto zdroje. Další výhodou tohoto postupu je to, že bude k dispozici další bod, se kterým porovnat výsledek. Z důvodu velikosti schématu bude připojeno jako příloha (schéma zapojení s obvodem LT8392). Zapojení vývojové desky je sice kompletní, v několika směrech však nevyhovuje účelům BP, popřípadě obsahuje dobrovolné či nepotřebné prvky.

Některé hodnoty je tedy třeba předdimenzovat. Zapojení obsahuje napěťový dělič, umožňující nastavení minimálního vstupního napětí. Při poklesu pod tuto hodnotu se obvod deaktivuje. Zároveň umožňuje nastavit hysterezi, tedy úroveň napětí, nad kterou musí vstup vzrůst, aby se obvod opět aktivoval [9].

Se snižujícím se napětím při režimu boost vstupní proud úměrně vzrůstá, dle principu zachování výkonu (rovnice 2). Konkrétní induktoři použité v tomto zapojení však nemají takovou proudovou schopnost jako ve vývojové desce. Ta je navržena až na 144 W, což by byl problém i otestovat. Příliš nízké napětí by je tedy v režimu boost mohlo zničit. Hodnoty rezistorů tohoto děliče byli tedy upraveny. Vzorce jsou následující [9]:

$$U_{in+} = 1,233 * \frac{R_1 + R_2}{R_2} + 2,5\mu A * R_1 = 1,233 * \frac{227k + 100k}{100k} + 2,5\mu A * 100k = 4,28 V \quad (24)$$

$$U_{in-} = 1,220 * \frac{R_1 + R_2}{R_2} = 1,220 * \frac{227k + 100k}{100k} = 3,99 V \quad (25)$$

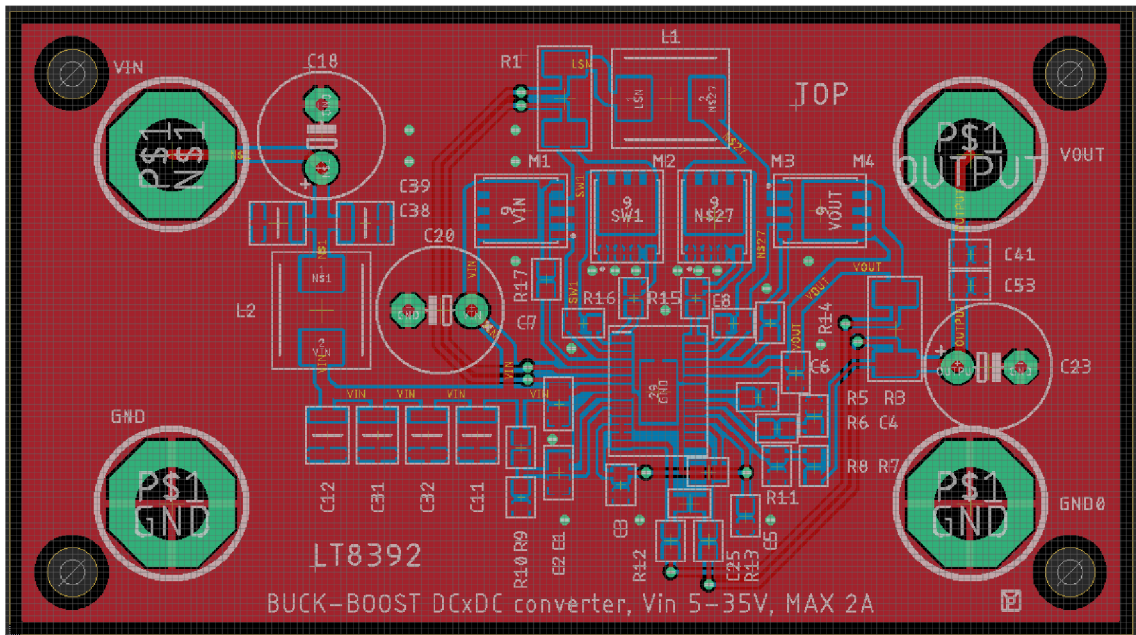
Obvod by se tedy měl deaktivovat při poklesu napětí pod 4 V a znovu rozběhnou při nárůstu nad 4,3 V. Toto přidává další úroveň ochrany obvodu.

Dalším parametrem, který musí být zváženo vzhledem k induktorům, je výstupní proud. LT8392 umožňuje snímání a reakci na překročení jak vstupního, tak výstupního proudu za použití snímacích rezistorů. Pro výstupní proud platí tento jednoduchý vztah [9]:

$$I_{is(max)} = \frac{50mV}{R_{is}} = \frac{50mV}{0,022} = 2,27 A \quad (26)$$

Což by při takové volbě rezistoru mělo zastavit chod obvodu při překročení hodnoty výstupního proudu přibližně 2,3 A.

5.3.3. Návrh desky



Obr. 19 – Navržená deska s obvodem LT8392

Deska LT8392 se snaží čistě jen o funkční, účinné zapojení. Nachází se zde pouze jeden čip LT8392. Datasheet specifikuje množství doporučení, kterých se držet v zájmu co nejvyšší účinnosti.

Zemnicí vrstva by neměla obsahovat žádné cesty. To se bohužel nepodařilo dodržet, vzhledem k jejich krátké délce a rozsáhlé ploše rozlité mědi na obou stranách by však negativní vliv tohoto faktu mohl být zanedbatelný [9].

Vstupní kondenzátor a spínače M1 a M2 by měly být v jedné kompaktní skupině, a co nejbližší kontroléru, rovněž to samé pro výstupní kondenzátor a spínače M3 a M4. Toho se podařilo docílit, s krátkými cestami od a ke kondenzátorům a všemi tranzistory v jedné ozrcadlené skupině. Toto rozložení také není náhoda, jedná se o experiment, zda takové rozložení přispívá dobrým EMC vlastnostem [9].

Doporučuje se využití via pro okamžité svedení zemí výkonových komponent do zemnicí vrstvy, to je splněno [9].

Jakékoliv prázdné prostory by měly být vyplněny rozlitou mědí, připojenou na stejnosměrný potenciál. Další vlastností této praktiky mimo zlepšení EMC vlastností je její vysoce pozitivní vliv

na tepelné vlastnosti obvodu. Měď, jakožto extrémně dobře tepelně vodivý materiál, rozvede teplo komponent (které může být značné) po celé desce, a v podstatě z celé desky udělá chladič [9].

Dalším bodem je oddělení výkonových a signálových vrstev, popřípadě vzdálenost mezi jejich cestami, která by měla být co největší. Jelikož se jedná o pouze dvoustranné (tedy dvouvrstvé) zapojení, tento požadavek představuje komplikace. Kombinací ostatních technik a relativně malému výkonu v porovnání s maximem by však toto zapojení mělo být dostatečné [9].

Snímací cesty by měli být vedeny blízko sebe, to vyplývá už z jejich charakteru Kelvinova připojení. V zapojení se vyskytují dva snímací rezistory, cesty jsou od nich v obou případech řešeny tímto způsobem [9].

Vstupní filtrační a stabilizační část a rovněž blokovací kondenzátory by měli být připojené co nejbližší čipu. Obdobně jako v předchozích bodech bylo tomuto vyhověno do takové míry, do jaké je to fyzicky proveditelné.

5.4. Obvod LM317

Na rozdíl od předchozích se jedná o lineární obvod. Je to nastavitelný stabilizátor napětí, s vnitřní proudovou limitací a detekcí příliš vysoké teploty. Hlavními klady jsou jednoduchost zapojení a spolehlivost. Použití například v automobilu, přesné proudové stabilizátory a součást různých napájecích obvodů [13].

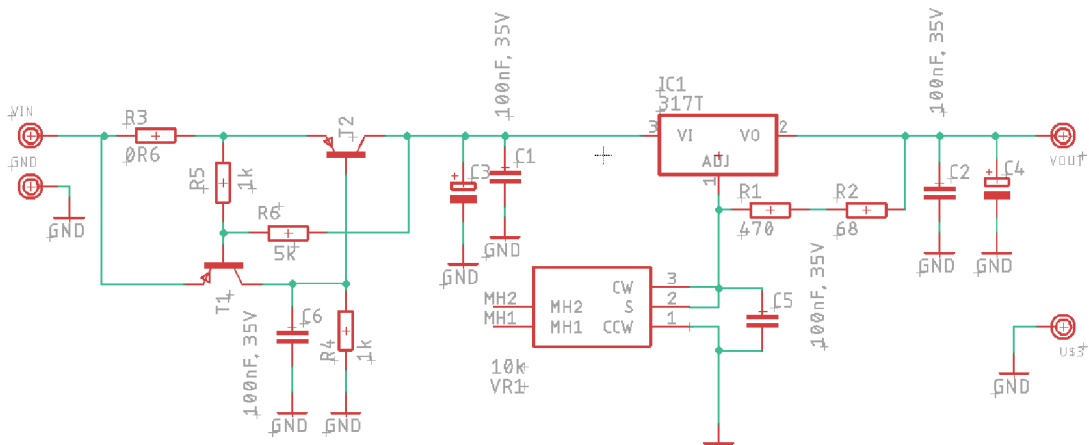
Tabulka 4: Základní údaje obvodu LM317

Typ:	lineární
Vstupní napětí:	-0,3–40 V
Maximální výstupní proud:	1,5 A
Počet pinů:	3
Použití:	Stabilizátor napětí

5.4.1. Princip

Obvod vytvoří napěťový rozdíl mezi svým vstupním a nastavovacím pinem, který je posléze použit pro vytvoření nastavovacího proudu. Ten je dán externím odporovým děličem. Tento proud stanovuje požadované výstupní napětí. To musí být vždy menší než vstupní. Velikost rozdílu mezi vstupním a výstupním napětím se zvyšuje s výstupním proudem a snižuje s rostoucí teplotou. Při pokojové teplotě a odběru 1 A se pohybuje kolem 2 V. Obvod se následně svojí vnitřní logikou za využití zpětné vazby snaží udržet výstupní napětí na nastavené hodnotě [13].

5.4.2. Schéma a postup návrhu



Obr. 20 – Schéma zapojení s obvodem LM317

Levá část zapojení s tranzistory představuje proudovou pojistku, vlastní zapojení obvodu LM317 se nachází od kondenzátoru C3 dále. Jak je vidět, zapojení je opravdu extrémně jednoduché, pouze odporový dělič pro nastavení napětí a vstupní a výstupní kondenzátory.

Jeden z rezistorů děliče je nahrazen potenciometrem. Výstupní napětí je tedy nastavitelné. Rovnice výstupního napětí má tento tvar [13]:

$$U_{out} = 1.25 V * \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) + I_{adj} * R2 \quad (27)$$

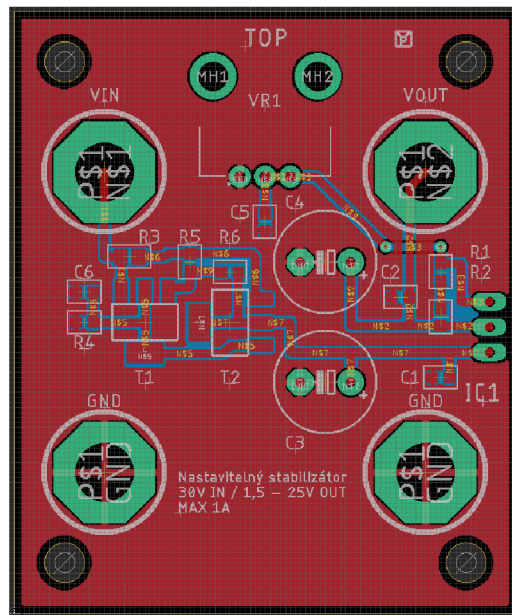
V tomto případě je R2 potenciometr, a R1 součet rezistorů R1 a R2 ve schématu, viz obr. 20. I_{adj} představuje „chybový proud“. Jeho maximální hodnota je regulována na 50 uA. Rezistor R1 v rovnici má pevně stanovenou hodnotu 538 ohmů, potenciometr R2 má hodnotu nastavitelnou od přibližně 20 ohmů do 10 kilo ohmů. Tím lze dostat rozsah nastavitelného výstupního napětí [13]:

$$U_{out} = 1.25 V * \left(1 + \frac{20}{538}\right) + 50\mu A * 20 = 1,3 V \quad (28)$$

$$U_{out} = 1.25 V * \left(1 + \frac{10000}{538}\right) + 50\mu A * 10000 = 24,98 V \quad (29)$$

Výstupní napětí se tedy může pohybovat mezi hodnotami přibližně 1,5 V a 25 V.

5.4.3. Návrh desky



Obr. 21 – Navržená deska s obvodem LM317

Schéma vypadá následovně. Jen obvod proudové pojistky zabírá stejné množství prostoru, jako celý zbytek zapojení. Místo pro umístění samotného obvodu LM317 je vidět těsně při pravé straně desky. Obvod LM317 se běžně vyrábí v pouzdře TO-220, které se jinak běžně používá pro výkonové tranzistory. Je to dáno opět lineárním charakterem obvodu. Bez přístupu k manipulaci energie prostřednictvím frekvence se veškerý rozdíl mezi vstupním a výstupním výkonem musí mařit přímo v obvodu. To produkuje velké množství tepla, z čehož vyplývá nutnost připojit na součástku chladič.

O účinnosti zapojení lze předem usoudit, že bude řádově nižší než u spínaných zapojení. Zároveň ale v zařízení neexistují žádné výkonové špičky, a mělo by tedy být z hlediska EMC v podstatě neslyšné.

6. Realizace řešení

Tato část bude věnovaná prezentaci výsledku realizovaných obvodů

6.1. MC33063AD



Obr. 22 – Realizované zapojení s obvodem MC33060

Po realizaci zapojení bylo provedeno první měření. Jeho výsledky se však neshodovaly s očekávanými. Chování obou obvodů, které by se mělo alespoň nějak lišit, bylo v podstatě totožné, a i samotné výstupní veličiny se neshodovaly s těmi, které by dle schématu osazené zařízení mělo mít.

6.1.1. Řešení problémů zapojení

Problém: Mezi zapojeními není očekávaný rozdíl, výstupní napětí klesá příliš rychle se zátěží, frekvence má mnohem nižší hodnotu než očekávanou.

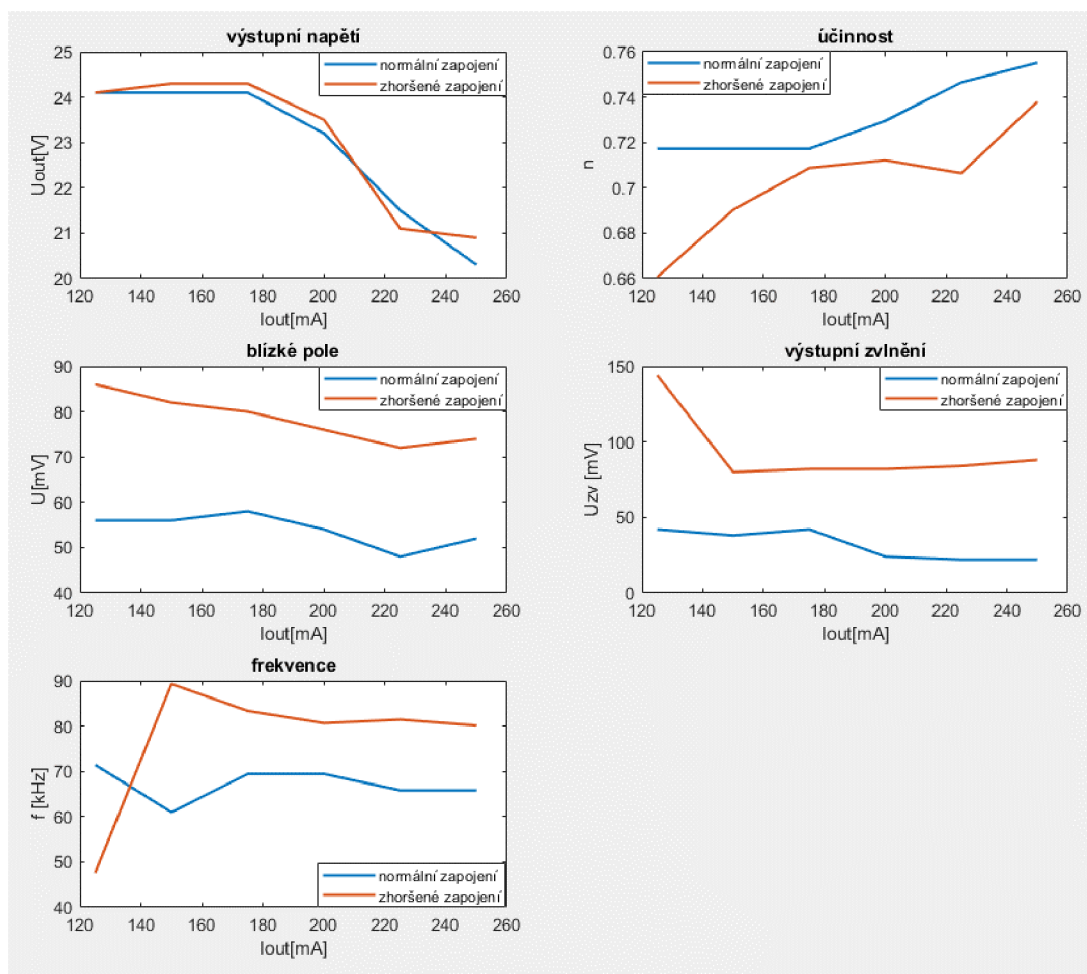
Tento poslední bod je nejkritičtější. Výstupní proud, jaký je zařízení schopno dodávat, se přímo odvíjí od frekvence a indukčnosti induktoru. Dá se tedy předpokládat, že nízká frekvence vede k rychlému poklesu napětí a ostatním neočekávaným vlastnostem. Frekvence je stanovena časovacími kondenzátory. Kontrola výpočtů i hodnot však žádnou chybu neodhalila, a i výměna kondenzátorů za nižší za účelem zvýšení frekvence neměla žádný pozorovatelný vliv.

Příčina byla nakonec identifikována v drobném textu jednoho datasheetu zařízení. Parafrázováno: Pokud je výstupní spínač vehnán do tvrdé saturace při nízkých spínaných proudech (<300 mA) a vysokých řídicích proudech (>30 mA), opuštění saturace může trvat až 2 mikrosekundy. Toto prodlužuje on time parametr součástky [12].

To se přesně shoduje s touto situací. Frekvence je nastavená blízko hornímu limitu součástky, 100kHz. Zároveň jsou odebírány relativně malé proudy, z důvodu proudového limitu induktoru. Tomuto efektu by se zamezilo použitím externího tranzistoru jako spínače. V tomto zapojení se však využívá vnitřní. Spínaný proud rovněž ovlivnit nelze. Ve schématu zapojení (viz obr. 13) si lze všimnout, že řídicí proud do spínacích tranzistorů protéká přes rezistor R2, který měl ve všech ukázkových zapojeních konstantní hodnotu 180 ohmů. Zvýšením hodnoty tohoto rezistoru je možné snížit bázový proud tranzistoru. Tím se posune jeho pracovní bod do oblasti, kde vypadnutí ze saturace nevyžaduje tolik energie. Problém byl tedy vyřešen výměnou tohoto rezistoru.

6.1.2. Proces a výsledky měření

Přípravek byl připojen na zdroj 12 V. Na výstup přípravku byl připojen voltmetr, ampérmetr, a reostat sloužící jako zátěž. Průběhy veličin byly pozorované na osciloskopu. Tímto způsobem byl změřen úsek výstupní charakteristiky přípravku. Při sběru dat byla vždy zapojena jen jedna část zapojení. Tímto způsobem je vyloučeno vzájemné ovlivnění.



Obr. 23 – graf 1 – Průběhy výstupních veličin zapojení MC33063

Výstupní hodnoty byly měřeny na ustálených hodnotách odebíraného proudu, od 125 mA do 250 mA, což je limit. Je zřejmé, že v podstatě všech metrikách kromě samotného výstupního napětí je zhoršené zapojení znatelně horší než normální.

Problém řešený v předchozí části se sice podařilo omezit, pravděpodobně však jeho vliv nebyl eliminován zcela. Když odebíraný proud překročí hranici 200 mA, výstupní napětí začne klesat, postupně až k přibližně 20,5 V při maximálním odběru. Frekvence rovněž stále není na své maximální hodnotě.

Přípravek dosahuje relativně velké účinnosti, s normálním zapojením ve vedení. Ta se pohybuje kolem 72 % a zvyšuje se se zvyšujícím se odběrem proudu, což platí obecně pro většinu zdrojů. V kontextu spínaných technologií je ale 72 % ještě nízká hodnota. Datasheet zařízení uvádí při hodnotách výstupního proudu 175 mA a identických hodnotách vstupního a výstupního napětí účinnost až 87,7 % [12].

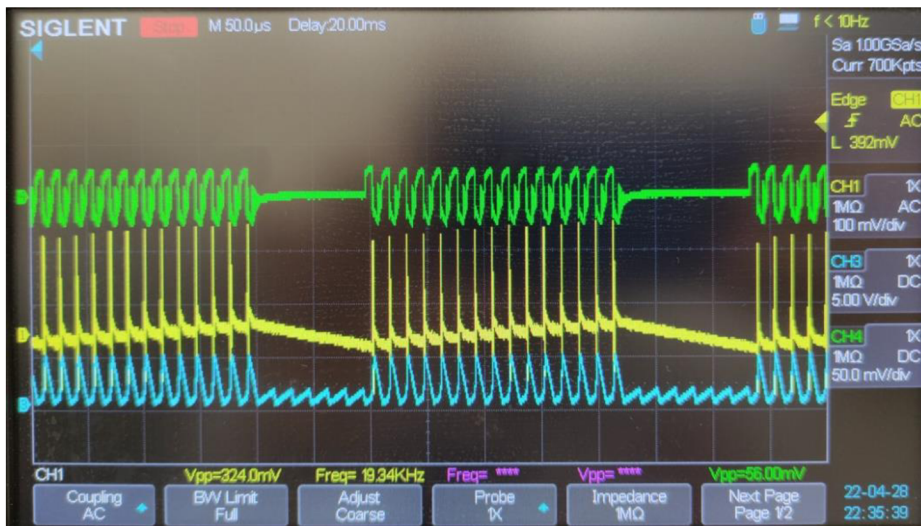
Rozdíl mezi dosaženou a udanou hodnotou bude způsobovat pravděpodobně kombinace několika faktorů. Jednak nedokonalé odstranění předchozího problému, použití vnitřního spínače a nějakou mírou pravděpodobně i vybraný induktor. Jedná se pouze o jednoduchou cívku, bez zvláštních úprav snižujících vnitřní odpor. Při přihlédnutí k těmto okolnostem je tedy dosažená účinnost adekvátní.

Pro tuto BP zvláště zajímavý parametr je hodnota vyzařovaného elm. pole, měřené sondou blízkého pole. To je u zhoršeného zapojení konzistentně až o třetinu horší. Rozdíly mezi zapojeními tedy měly efekt. Zajímavostí je, že měřená hodnota pole se se zvyšujícím se odběrem jeví jako klesající. Jedním možným vysvětlením je to, že obvod nespíná s konstantní frekvencí. Se zvyšujícím se odběrem se jeho frekvence i chování mění (to bude blíže popsáno níže). Se vzrůstajícím výkonem se tedy obvod může paradoxně dostat do oblasti, která je z hlediska EMC výhodnější. Odběr proudu sice roste, to však vede k růstu frekvence, což naopak způsobuje nižší hodnotu proudu spínaného v každém cyklu.

V posledních dvou grafech se nachází zvlnění a frekvence. Za pozornost stojí, že aby horší zapojení mohlo pracovat i jen blízko hodnotám toho lepšího, pracuje na znatelně vyšších frekvencích než normální. Tento rozdíl nelze přiřadit pouhým rozdílům v tolerancích součástek. Lze soudit, že zapojení se snaží pracovat v lepším režimu, ale jeho návrhové nedostatky vůči této snaze vzdorují. Výrazný je i rozdíl ve výstupním zvlnění. Dobré zapojení je v toleranci, zhoršené daleko přes ni.

6.1.3. Vynechávání cyklů

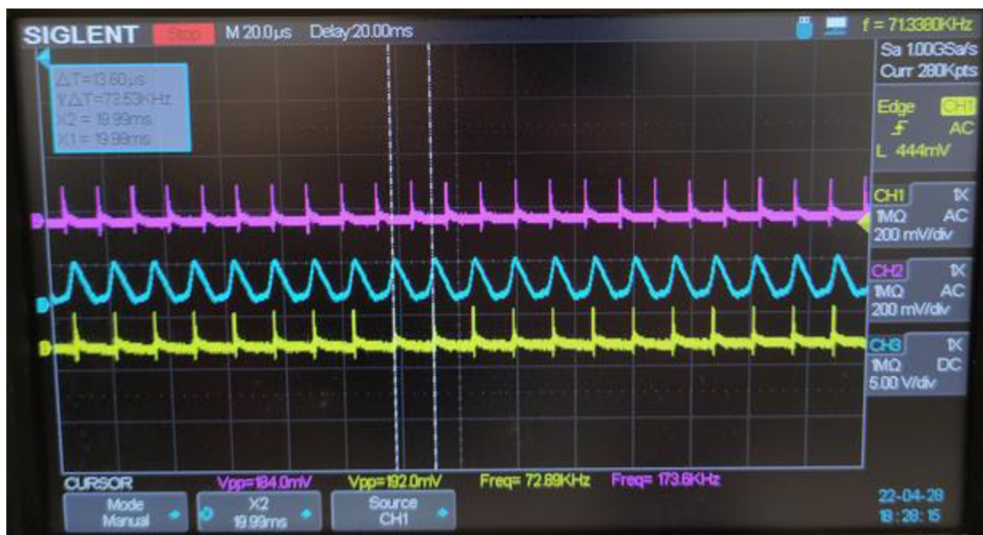
Při měření byl zjištěn rozdíl mezi očekávanou a naměřenou účinností. Pro připomenutí, hlavním problémem zapojení bylo pomalé vypadnutí tranzistoru ze saturace při malých spínaných proudech. To uměle prodlužuje dobu sepnutí tranzistoru. Tímto však vyvstává problém. Obvod totiž není při malých proudech schopný spínat s takovou frekvencí, s jakou potřebuje. Výstupní napětí by při této frekvenci nekontrolovatelně stoupalo. Proti tomuto případu však v obvodu existuje opatření.



Obr. 24 – Vynechávání cyklů

Tento obrázek byl sejmut při měření s malým výstupním proudem. Žlutě je zobrazeno výstupní napětí. Modře průběh napětí na časovacích kondenzátorech, zeleně pak energie pole. Napětí opravdu s každým sepnutím roste. Při překročení určité hranice ale obvod spínat přestane. Jedná se o ochranu proti právě této situaci. Obvod se chrání vynecháváním cyklů. Tento chod je obecně horší z hlediska EMC vlastností. Částečně se tedy i vysvětluje postupné zlepšování hodnot vyzařovaného rušení při zvyšování odběru. Obvod s rostoucím odebíraným proudem z tohoto módu vypadne, čímž se EMC vlastnostilepší.

Lze zde zároveň zřetelně vidět, že právě krátké proudové špičky, které představují sepnutí/rozepnutí spínacího prvku vedou ke vzniku elektromagnetického rušení. Jejich přítomnost vyplývá z principu technologie. Je tedy nasnadě, proč je u spínaných technologií EMC tak velký faktor.

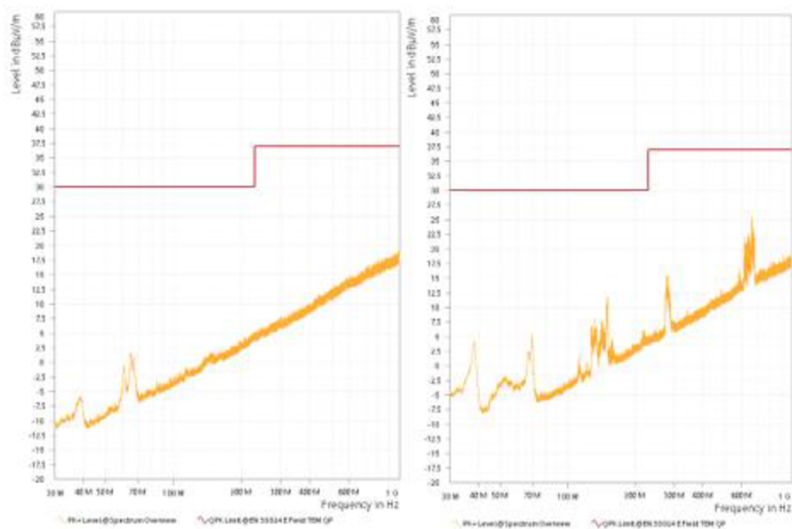


Obr. 25 – Typický chod obvodu

Když odebraný proud dosáhne určité úrovně, chod obvodu se ustálí. Oproti minulému stavu nejsou v časovací a tím pádem ani spínací charakteristice žádné nesrovnalosti. Jedná se o typický výstupní průběh měniče. To vede k markantnímu zlepšení zejména výstupního zvlnění.

6.1.4. Bližší porovnání EMC

Za účelem podrobnějšího srovnání bylo provedeno měření ve vyzářovací komoře. Ta měřený objekt izoluje od okolí a soustředí jeho vyzářovanou energii do jednoho bodu. Tato energie je následně změřena.



Obr. 26 – graf 2 – Porovnání vyzářování MC33063

Viz obr. 26. V levé části se nachází naměřená hodnota vyzařování dobrého zapojení. V pravé části je měření pro zhoršené zapojení. Na ose x se nachází frekvence. Na ose y pak velikost vyzařovaného pole v jednotkách Db uV/m. Jedná se o logaritmickou stupnici, vyjadřující zesílení naměřeného pole v jednotkách mikrovolt na metr oproti „prahové hodnotě“. Tu představuje hodnota 1 mikrovolt na metr.

Důležité je hlavně srovnání obou grafů. Dle očekávání si dobré zapojení vede velmi dobře. Zhoršené zapojení vyzařuje více. Jeho průběh rovněž obsahuje složky, které se u dobrého zapojení vůbec nevyskytují. O rozdílu mezi zapojeními tedy nemůže být pochyb.

6.1.5. Shrnutí

Chování obvodu se shoduje s predikcemi, obvod ale zároveň i přivedl pozornost k dalším faktorům chodu měničů. Rozdíl mezi dobrým a zhoršeným zapojením se silně projevil v téměř každé měřené veličině a poměrově dosahuje velkých hodnot (kolem 30 %). Realizace zapojení se neobešla bez potíží, s úsilím však bylo dosaženo výsledků. S využitím měřicí techniky lze na přípravku velmi přímočaře ilustrovat mnohé vlastnosti této kategorie měničů.

Z toho důvodu také nebylo vynaloženo ještě více úsilí na vyřešení problémového chování při nízkém odběru proudu. Jednak by pokračování nalezenou metodou už mohlo ohrozit funkčnost obvodu. Obvod se také chová v podstatě dle očekávání. Je to další vlastnost, kterou přípravek může demonstrovat, spojená s EMC.

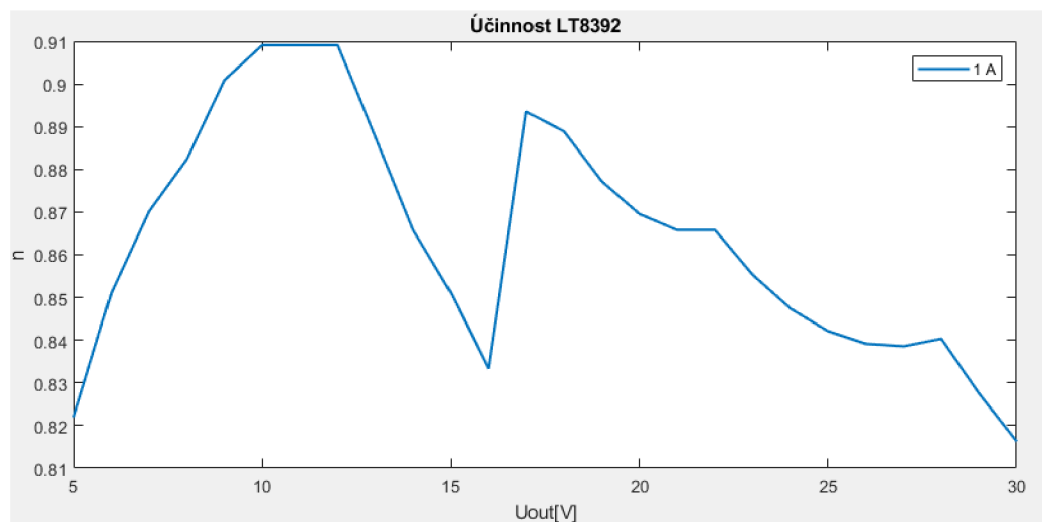
6.2. LT8392



Obr. 27 – Zapojení s obvodem LT8392

6.2.1. Výsledky měření a porovnání s dokumentací

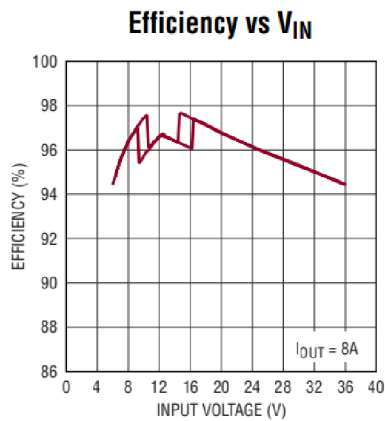
Hlavní vyzdvihovanou vlastností obvodu LT8392 je jeho účinnost. Ta byla změřena při proměnlivém vstupním napětí od 5 V do 30 V a konstantním odebíraném proudu 1 A, což je přibližně polovina maxima. Výstupní napětí měniče je 12 V.



Obr. 28 – graf 3 – Účinnost zapojení LT8392 při proměnlivém vstupním napětí

Účinnost zapojení neklesá pod hranici 80 % a ve své nejlepší oblasti přesahuje účinnost 90 %. To už je výsledek velice dobrý, a ukazuje proč jsou spínané stabilizátory dnes tak rozšířené. Téměř všechna vstupující energie se přemění na užitečnou. Menší ztrátový výkon umožňuje zmenšení zapojení, zvyšuje se tedy kompaktnost a výkonová hustota.

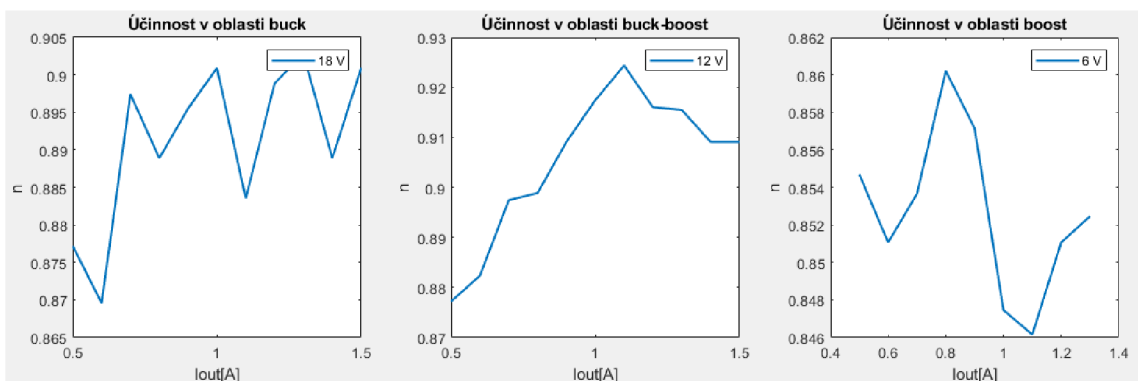
Průběh výstupní účinnosti má dobrou shodu s průběhem v datasheetu:



Obr. 29 – graf 4 – ukázkový graf účinnosti [9]

Grafy se shodují tvarem. Ukázkový dosahuje lepších výsledků, pravděpodobně kvůli vyššímu odběru proudu. Z obou grafů jsou dobře vidět zlomy, které odpovídají přechodům mezi režimy obvodu. Od 5 V je obvod v režimu boost, v okolí 12 V v režimu buck-boost, od přibližně 16 V přechází do režimu buck. Při měření byly tyto přechody jasně pozorovatelné. Stejně tak i hystereze mezi nimi. Ta má v tomto případě hodnotu zhruba 2 V. Příklad: Pro vypnutí z režimu buck-boost a přechod do režimu boost je nutný pokles vstupního napětí pod 8 V. Pro návrat do režimu buck-boost je však nutná hodnota aspoň 10 V. Tímto se zamezuje oscilacím mezi stavy.

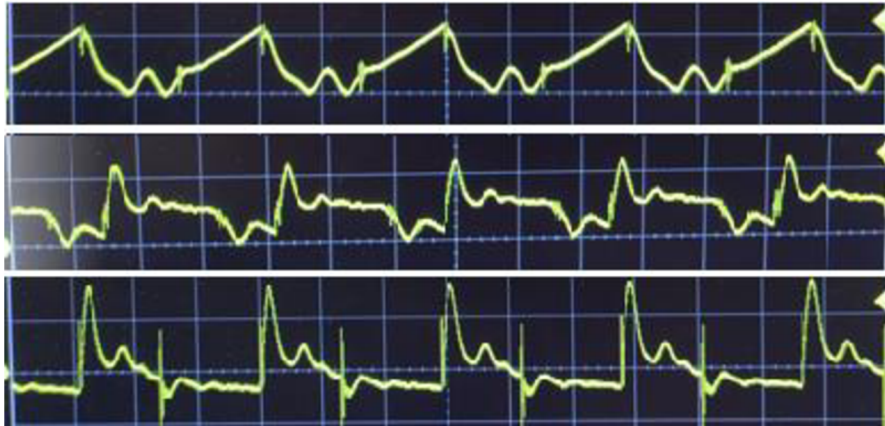
Ve většině aplikací by vstupní napětí bylo pevné, vyplatí se tedy změřit i účinnost v jednotlivých oblastech.



Obr. 30 – graf 5 – účinnosti v jednotlivých oblastech

Toto konkrétní zapojení s obvodem LT8392 není schopno zvládat vysoké proudy, proto byl změřen jen krátký úsek. Z toho vyplývá kostrbatost grafů. Jde z nich však odvodit zásadní informaci, účinnost v oblastech buck a buck-boost je podobná a velmi vysoká. Účinnost v oblasti boost je o poznání horší.

Další informace o chodu obvodu je možné získat z výstupního zvlnění. Jeho samotná hodnota není až tak důležitá, umožňuje ale náhled na proud induktorem, který není možné přímo změřit.



Obr. 31 – Zvlnění v jednotlivých oblastech

Ze shora dolů se jedná o zvlnění v oblastech buck, buck-boost a boost. Výstupní zvlnění velmi přesně odpovídá dokumentaci. Odkazují se na teoretickou část obvodu LT8392, viz obr. 17 a obr. 18. Je zřetelné, že reálný chod obvodu se plně shoduje s teoretickým.

Hodnoty zvlnění jsou relativně vysoké. To plyne hlavně z hodnot použitého výstupního kondenzátoru. Ten byl zvolen spíše z důvodu svého malého vnitřního odporu a dostupnosti nežli optimální kapacity. Zajímavé ale je srovnání mezi oblastmi. Zatímco v režimech buck a buck-boost je hodnota zvlnění téměř stejná (kolem 120 mV), v režimu boost je více než dvakrát větší. Lze čekat, že se tyto ostré proudové špičky výrazně projeví při měření vyzařování.

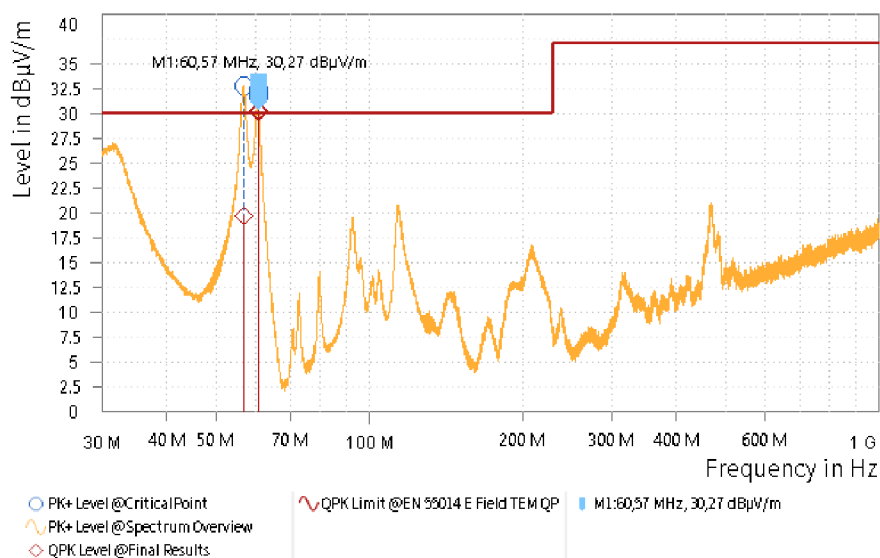
6.2.2. EMC vlastnosti

Zapojení s obvodem LT8392 pracuje s několikanásobně větším výkonem než předchozí zapojení s obvodem MC33063. Logicky se tedy bude zvyšovat i hodnota vyzařované energie. Vzhledem k tomuto faktu jsou hodnoty vyzařování v režimu buck a buck-boost v očekávaných mezích. Ke zdaleka nejhoršímu vyzařování dochází, očekávatelně, v režimu boost. Právě tam dochází ke spínání nejvyšších proudů.



Obr. 32 – Rušení v režimu boost

Průběh, viz obr. 32, velmi dobře ilustruje vznik rušení. Fialový průběh je napětí spínané tranzistorem v boost části zapojení. Zelený průběh pak rušení měřené sondou blízkého pole. Je vidět, že největší zákmity se dějí při sestupné hraně napětí, tedy „rozepnutí“ tranzistoru. Dává to smysl, při „sepnutí“ je v režimu boost na induktoru menší množství energie. Když je tranzistor otevřen, induktor se nabíjí – akumuluje energii. Při sestupné hraně se veškerá tato energie začne přeměňovat v proud, aby byly uspokojeny nároky dané proudem odebíraným. Tomu odpovídá velká proudová špička. Tato oblast je z celého pracovního rozsahu obvodu z hlediska EMC nejhorší. Z toho důvodu bylo právě v ní provedeno měření ve vyzářovací komoře.



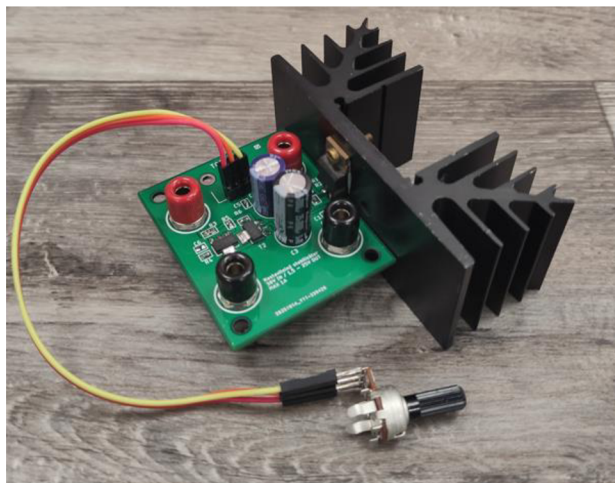
Obr. 33 – graf 6 – Vyzářování LT8392

Hodnoty viz obr. 33 byly získány při vstupním napětí o velikosti 8 V, výstupním napětí 12 V a odběru proudu 1 A. Vyzařovací spektrum LT8392 v tomto scénáři obsahuje mnoho složek. Ve dvou bodech dokonce překračuje normou povolenou hodnotu, představovanou červenou čarou. Zapojení tedy nebylo z hlediska EMC dostatečně optimalizováno. Jelikož však není cílem zapojení přivést ho na trh, plyne z toho pouze poučení, že je definitivně možné design zapojení stále zlepšovat, aby se co možná nejvíce řídil doporučeními, které jsou uvedené v dokumentaci a v teoretické části k obvodu.

6.2.3. Shrnutí

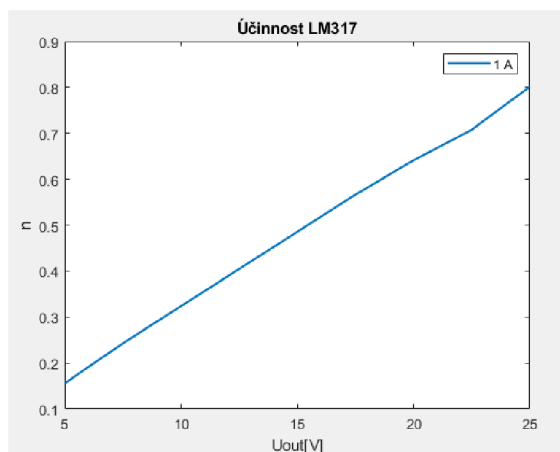
Zapojení s obvodem LT8392 demonstruje důvody, proč spínané měniče představují tak atraktivní volbu v tolika oblastech a aplikacích. Jedná se o extrémně účinná zařízení. Zároveň ale i předvádí jejich hlavní nevýhodu, ve formě špatných EMC vlastností. Na ty musí být při designu zapojení kladen nejvyšší důraz. Jak konkrétní realizované zapojení ukázalo, i relativně malé odchylky od optima mohou mít za následek velkou míru vyzařovaného elm. rušení. Jedním z cílů zapojení a BP obecně však je právě na tyto skutečnosti poukázat. V kombinaci s tím, že se jedná o první návrh, který byl s obvodem LT8392 v rámci této BP otestován a skutečnosti, že zapojení jinak bezchybně funguje ho však hodnotím jako úspěch.

6.3. LM317



Obr. 34 – Zapojení s obvodem LM317

Zapojení dobře ilustruje základní rozdíly mezi lineárními a spínanými obvody. Lineární obvody jsou výhodné z pohledu jednoduchosti a počtu součástek. Ve velké části svého pracovního rozsahu však mají mnohem menší účinnost. Dávám příklad následující realistické situace: Obvod je napájen napětím 30 V a vstupuje do něho 1,04 A. Výstupní napětí je nastaveno na 10 V a odebíraný proud je 1 A. Příkon je tedy 42 W, výstupní výkon je však pouze 10 W. To představuje účinnost menší než 25 %, se zbylým výkonem zmařeným na teplo. Je zde tedy zcela nutná přítomnost chladiče, součástka by se jinak teplem velice rychle zničila.



Obr. 35 – graf 7 – Účinnost obvodu LM317 při různých hodnotách U_{out}

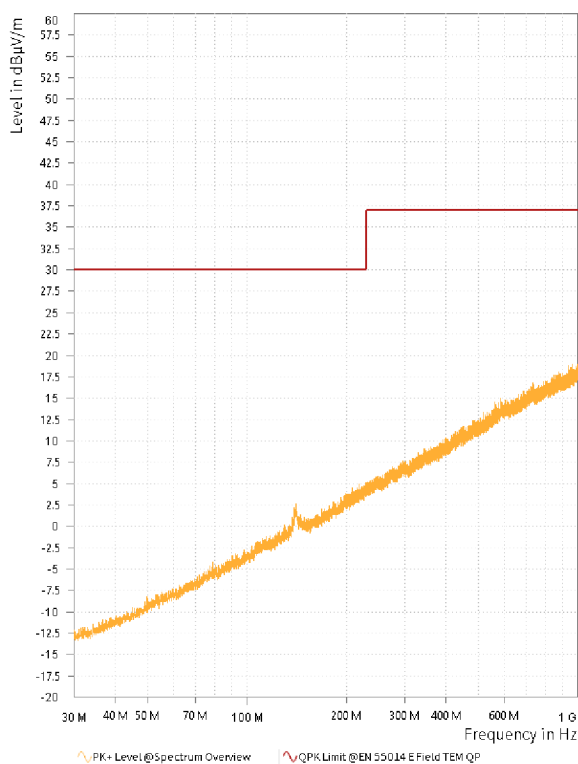
Účinnost obvodu se odvíjí od jeho odběru. Vstupní napětí mělo konstantní hodnotu 30 V. Rovněž konstantní byl i odebíraný proud, 1 A. Příkon zapojení se během měření takřka neměnil. Obvod dosahuje dobré účinnosti v oblasti, kde je malý rozdíl vstupního napětí vůči výstupnímu. Jeho

účinnost však rapidně klesá, když se tento rozdíl zvyšuje. V této oblasti je obvod velice ztrátový. Veškerá nevyužitá energie se přeměňuje na teplo.

To je hlavní nevýhoda lineárních stabilizátorů. Nároky na chlazení velice zvyšují nároky na velikost. Z v podstatě všech úloh středního a vyššího výkonu jsou v dnešní době vytlačeny mnohem efektivnějšími spínanými technologiemi. Použití však stále mají. Umožňují velmi přesnou a robustní stabilizaci napětí. Rovněž do obvodu nevnášejí žádné zvlnění, šum nebo proudové špičky. Lze je tedy nalézt například jako zdroje referenčního napětí, logických obvodů, různých nízko výkonových aplikací atd.

6.3.1. EMC vlastnosti

V lineárním obvodu se nevyskytuje střídavé napětí a neprobíhá zde žádné spínání výkonů. To má za následek výborné EMC vlastnosti. To jak z hlediska zdroje, tak i odolnosti. Sonda na měření blízkého vyzařovaného elektromagnetického pole nebyla schopná zachytit žádný konkrétní průběh, který by bylo možné oddělit od přirozeného šumu v místnosti. Jedná se o důležitý faktor při rozhodování, kde místo spínaného obvodu upřednostnit raději lineární. Jedná se jako vždy o kompromis. Návrhář se musí rozhodnout, zda je pro konkrétní použití důležitější účinnost a kompaktnost, nebo stabilita a kvalita průběhu.



Obr. 36 – graf 8 – Měření obvodu LM317 ve vyzařovací komoře

Obvod byl změřen v komoře pro měření vyzařované energie. Vstupní napětí bylo nastaveno na 24 V, výstupní na 12 V, s výstupním proudem 1 A. Zapojení tedy pracovalo s relativně velkým výkonem. I tak je naměřený průběh v grafu 9 takřka k nerozeznání od prázdné komory. Jedná se o konkrétní důkaz výborných EMC vlastností lineárních stabilizátorů. Potvrzuje zároveň výsledky měření sondou blízkého pole. Z hlediska elektromagnetického rušení je obvod LM317 prakticky neviditelný.

7. Závěr

Cíle práce byly splněny. Podařilo se navrhnout a realizovat tři typy zdrojů a změřit jejich vlastnosti. Hlavní úlohu, tedy upozornit na rozdíly mezi různými typy spínaných měničů s důrazem na správné provedení plošného spoje, realizovaná zapojení plní dobře. Dalším bodem byla realizace lineárního stabilizátoru a porovnat jej se spínanými zdroji z hlediska EMC.

Teoretická část práce představuje problematiku stabilizátorů a měničů, praktická část pak popisuje přípravky, které budou moci sloužit pro demonstraci spínaných měničů a jejich EMC vlastností.

Výsledky měření potvrdily předpoklad, že spínané stabilizátory produkují nepoměrně vyšší rušení než stabilizátory lineární a dále pak, že velmi záleží i na korektním návrhu plošného spoje spínaného zdroje.

Co se týká směru, ve kterém by práce mohla pokračovat, nabízí se hlubší průzkum oblasti spínaných technologií a metod, a to zejména s ohledem na EMC. Přirozeným dalším bodem zájmu by byly například spínané zdroje, které známe zejména z počítačů a nabíječek s velkým výkonem.

Seznam použité literatury

- [1] Systems, Monolithic Power, „Voltage Regulator Types and Working Principles,“ 2022. [Online]. Available: <https://www.monolithicpower.com/en/voltage-regulator-types>. [Přístup získán 15 5 2022].
- [2] T. Klaus, Příručka pro elektrotechnika, Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel GmbH & co., 2014.
- [3] J. Williams, „LT1070 design manual,“ Analog Devices, 1986. [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/an19fc.pdf>. [Přístup získán 11 5 2022].
- [4] J. Heath, „PWM: Pulse width Modulation: What is it and how does it work?,“ 2017. [Online]. Available: <https://www.analogictips.com/pulse-width-modulation-pwm/>. [Přístup získán 1 4 2022].
- [5] A. Krejčířík, Napájecí zdroje I., Praha: Technická literatura BEN, 1996.
- [6] Sunpower Group Holdings Ltd, „What is a Flyback Converter,“ 2019. [Online]. Available: <https://www.sunpower-uk.com/glossary/what-is-a-flyback-converter/>. [Přístup získán 30 4 2022].
- [7] Peripitus, „Co je Faradayův zákon?,“ 2018. [Online]. Available: <https://cs.khanacademy.org/science/fyzika-elektrina-a-magnetismus/xe9fba794b097c46d:magneticko-pole/xe9fba794b097c46d:elektromagneticka-indukce/a/what-is-faradays-law>. [Přístup získán 1 4 2022].
- [8] J. Reichl a M. Všeticka, „Energie magnetického pole cívky,“ 2006. [Online]. Available: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/309-energie-magnetickeho-pole-civky>. [Přístup získán 15 4 2022].
- [9] Analog devices, „LT8392 60V Synchronous 4-Switch Buck-Boost Controller with Spread Spectrum,“ 2020. [Online]. Available: <https://www.analog.com/en/products/lt8392.html>. [Přístup získán 5 15 2022].
- [10] Z. Plíva, „Návrhová pravidla plošných spojů,“ TUL, Liberec, 2012.
- [11] Autodesk Inc., „PCB layout software for every engineer,“ 2022. [Online]. Available: <https://www.autodesk.com/products/eagle/features>. [Přístup získán 11 5 2022].
- [12] Texas instruments, „MC3x063A 1.5-A Peak Boost/Buck/Inverting Switching Regulators,“ 2015. [Online]. Available: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/mc34063a.pdf?ts=1641457502660&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F. [Přístup získán 15 5 2022].

- [13] Texas Instruments, „LM317 3-Terminal Adjustable Regulator,“ 2020. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm317.pdf?ts=1652560242298>. [Přístup získán 11 5 2022].
- [14] Onsemi, „Adjustable output, positive 1.5 A LM317, NCV317,“ 2010. [Online]. Available: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/lm317-d.pdf>. [Přístup získán 15 5 2022].

Seznam příloh

Příloha A	Schéma zapojení s obvodem LT8392.....	66
Příloha B	schéma LT8392.png – Schéma zapojení návrhové desky LT8392.	
Příloha C	linear.brd – Návrh desky s obvodem LM317.	
Příloha D	linear.sch – Schéma zapojení s obvodem LM317.	
Příloha E	LT8392.brd – Návrh desky s obvodem LT8392.	
Příloha F	LT8392.sch – Schéma zapojení s obvodem LT8392.	
Příloha G	MC33063.brd – Návrh desky s obvodem MC33063.	
Příloha H	MC33063.sch – Schéma zapojení s obvodem MC33063.	
Příloha I	LM317graph.m – Matlab file s daty LM317.	
Příloha J	LT8392graph.m – Matlab file s daty LT8392.	
Příloha K	MC33063graph.m – Matlab file s daty MC33063	

