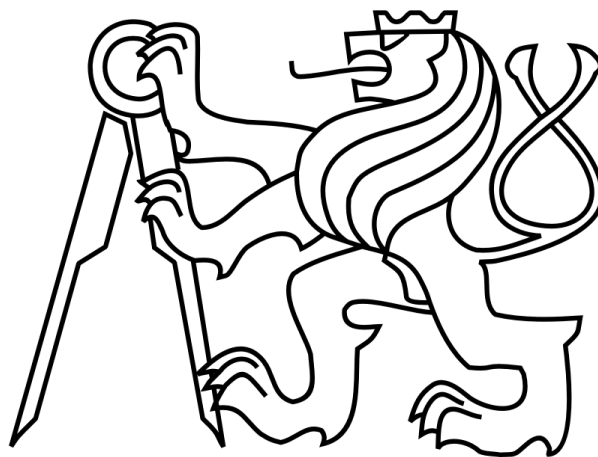


České vysoké učení technické v Praze
fakulta elektrotechnická
katedra mikroelektroniky



Bakalářská práce

**Přípravek pro porovnávání vlastností zdrojů typu SEPIC a
ZETA**

Autor: Petr Krýda

Vedoucí práce: Ing. Lubor Jirásek, CSc.

2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Krýda** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **474244**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Přípravek pro porovnání vlastností zdrojů typu SEPIC a ZETA

Název bakalářské práce anglicky:

Instrument for Comparing the Properties of SEPIC and ZETA Power Supplies

Pokyny pro vypracování:

1. Prostudujte dostupnou literaturu týkající se vlastností napájecích zdrojů typu SEPIC a ZETA.
2. Na základě 1) navrhnete a realizujete přípravek pro výuku umožňující demonstrovat a porovnávat vlastnosti a výhody napájecích zdrojů typu SEPIC a ZETA.
3. Proveďte ověřovací měření přípravku a zhotovte vzorový protokol o měření.
4. Zhodnoťte dosažené výsledky.
5. Přípravek zůstane v majetku zadávajícího pracoviště.
6. Publikování výsledků dosažených v této práci je možné pouze se svolením zadavatele.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Krejčířík, A.: Napájecí zdroje I. - III. Ben, Praha 1996 v pozdějších reediciích.
- [2] Aplikační poznámky firem STMicroelectronics, TI pro IO s funkcí SEPIC a ZETA.
- [3] FAKTOR, Z. Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje. 1. vyd. Praha: BEN, 2002, 248 s. ISBN 80-86056-91-0

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Lubor Jirásek, CSc., katedra mikroelektroniky FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **06.02.2020** Termín odevzdání bakalářské práce: **14.08.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2021**

Ing. Lubor Jirásek, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Pavel Hazdra, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou bakalářskou práci „Přípravek pro porovnávání vlastností zdrojů typu SEPIC a ZETA“ zpracoval sám s přispěním vedoucího práce a používal jsem pouze literaturu uvedenou na konci práce. Souhlasím se zapůjčováním práce a jejím zveřejňováním.

V Praze dne

podpis

Anotace

Bakalářská práce se zabývá napájecími zdroji typu SEPIC a ZETA. V práci jsou navrženy a realizovány dva přípravky, které umožňují demonstrovat a porovnávat vlastnosti obou typů zdrojů. Dále je provedeno ověřovací měření přípravků a zhodnocení. K práci je přiložen vzorový protokol o měření.

Klíčová slova: SEPIC, ZETA, spínaný zdroj, DC/DC měnič, spínaný regulátor

Annotation

The bachelor's thesis focuses on power supplies with SEPIC and ZETA topology. These circuits are designed and realised for study purposes. The realisation can demonstrate and compare properties of both topologies. Then the circuits are measured and evaluated. In appendix is a model protocol of the measurement.

Keywords: SEPIC, ZETA, switched-mode power supply, DC/DC converter, switching regulator

Poděkování

Mé poděkování patří Ing. Luboru Jiráskovi, CSc. za odborné vedení, trpělivost a ochotu, kterou mi při konzultování bakalářské práce věnoval.

Petr Krýda

Obsah

Úvod	1
1. DC/DC měniče	2
1.1 Lineární regulátory	2
1.2 Spínané regulátory	2
1.2.1 Snižující měnič	3
1.2.2 Zvyšující měnič	5
1.2.3 Invertující měnič	7
1.2.4 SEPIC	8
1.2.5 ZETA	13
2. Návrh přípravků	18
2.1 Požadavky kladené na přípravky	18
2.2 Bloková představa přípravku	18
2.3 Návrh měniče typu SEPIC	19
2.3.1 Blok vlastního měniče SEPIC	19
2.3.1.1 Výpočet střídavy	19
2.3.1.2 Spínací kmitočty	19
2.3.1.3 Indukčnosti L_1 a L_2	19
2.3.1.4 Kapacity C_1 a C_2	21
2.3.1.5 Výběr spínacích tranzistorů	21
2.3.1.6 Výběr diody	22
2.3.1.7 Schéma bloku	22
2.3.2 Blok modulátoru pulsně šířkové modulace	23
2.3.2.1 Výběr integrovaného obvodu modulátoru	23
2.3.2.2 Zpětná vazba	24
2.3.2.3 Nastavení oscilátoru	26
2.3.2.4 Kompenzace	26
2.3.2.5 Napájení PWM regulátoru	26
2.3.2.6 Negace PWM signálu	26
2.3.2.7 Schéma bloku	27
2.3.3 Blok pro řízení tranzistorů	27
2.3.3.1 Výběr budiče tranzistorů MOSFE	28
2.3.3.2 Schéma bloku	29
2.3.3.3 Napájení vstupní části integrovaného obvodu	29
2.3.3.4 Napájení výstupní části integrovaného obvodu	30
2.4 Návrh měniče typu ZETA	33

2.4.1 Blok vlastního měniče ZETA	33
2.4.2 Blok modulátoru pulsně šířkové modulace	34
2.4.3 Blok pro řízení tranzistorů	34
2.4.3.1 Výběr budiče tranzistorů MOSFE.....	34
2.4.3.2 Napájení vstupní části integrovaného obvodu	35
2.4.3.3 Napájení výstupní části integrovaného obvodu	35
2.3.3.2 Schéma bloku.....	35
3. Měření přípravků	36
3.1 Zatěžovací charakteristika.....	36
3.1.1 Zatěžovací charakteristiky přípravku ZETA	37
3.1.1.1 Měření 1	37
3.1.1.2 Měření 2	37
3.1.1.3 Měření 3	38
3.1.1.4 Měření 4	39
3.1.1.5 Měření 5	39
3.1.1.6 Měření 6	40
3.1.2 Zatěžovací charakteristiky přípravku SEPIC	41
3.1.2.1 Měření 7	41
3.1.2.2 Měření 8	41
3.1.2.3 Měření 9	42
3.1.2.4 Měření 10	43
3.1.2.4 Měření 11	43
3.2 Převodní charakteristika	44
3.2.1 Převodní charakteristiky na přípravku ZETA	44
3.2.2 Převodní charakteristiky na přípravku SEPIC	45
4. Výsledky.....	46
4.1 Splnění požadavků	46
4.2 Výsledná konstrukce přípravků.....	47
4.3 Porovnání vlastností přípravků.....	47
5. Diskuse	50
6. Závěr.....	53
7. Seznam literatury	54
8. Přílohy	56
8.1. Vzorový protokol	56
Měření vlastností zdrojů typu SEPIC a ZETA	56
1. Teorie.....	56
1.1 SEPIC.....	56
1.2 ZETA.....	57

2.1 Schéma zapojení přípravku SEPIC	58
2.2 Schéma zapojení přípravku ZETA	59
3.1 Popis přípravku SEPIC	60
3.2 Popis přípravku ZETA	61
4. Pokyny pro měření na přípravcích	62
5. Úkoly měření	62
8.2 Soupiska součástí pro přípravek SEPIC	64
8.3 Soupiska součástí pro přípravek ZETA	65
8.4 Šablona DPS pro přípravek SEPIC	66
8.5 Šablona DPS pro přípravek ZETA	66
8.6 Fotografie přípravku SEPIC	67
8.7 Fotografie přípravku ZETA	68
8.8 Ukázky průběhů napětí v přípravku	69
8.9 Naměřené zatěžovací charakteristiky	71
8.10 Naměřené převodní charakteristiky	78

Seznam použitých zkratek a symbolů

C		označení kondenzátoru
CMOS		označení technologie logických hradel
C_T		časovací kondenzátor oscilátoru
C	F	kapacita kondenzátoru
C_{iss}		vstupní kapacita hradla tranzistoru MOSFET
D		označení diody
DPS		deska plošného spoje
D_Z		Zenerova dioda
D	-	střída
D_{MAX}		maximální střída
D_{MIN}		minimální střída
f	Hz	kmitočet
f_s		spínací kmitočet
GND		označení pro potenciál země
I	A	proud
I_{DS}		proud drainem tranzistoru
I_1		vstupní stejnosměrný proud přípravku
I_2		výstupní stejnosměrný proud přípravku
i		okamžitá hodnota proudu
i_1		okamžitý proud do vstupu přípravku
i_2		okamžitý proud do zátěže
i_C		okamžitý proud kondenzátorem
i_D		okamžitý proud diodou
I_L		střední proud induktorem
i_L		okamžitý proud induktorem
i_{LMAX}		maximální hodnota proudu induktoru
i_{LMIN}		minimální hodnota proudu induktoru
I_{VDDA}		klidový proud do pinu VDDA
I_{VDDI}		klidový proud do pinu VDDI

L		označení induktoru
L	H	indukčnost
L_{MIN}		minimální indukčnost pro spojitý režim
MOSFET		druh tranzistoru řízeného polem
P	W	výkon
P_1		vstupní výkon
P_2		výstupní výkon
PWM		pulsně šířková modulace
Q		označení tranzistoru
Q	C	náboj
Q_G		celkový náboj hradla tranzistoru
R		označení rezistoru
R_T		časovací rezistor oscilátoru
R_Z		zátěž
R	Ω	odpor
$R_{DS(ON)}$		odpor kanálu tranzistoru v sepnutém stavu
R_i		vnitřní odpor zdroje
S		označení spínače
T	s	perioda
t		čas
t_1		doba trvání 1. fáze
t_2		doba trvání 2. fáze
U		označení zdroje
U_P		pomocný zdroj
U	V	napětí
U_C		střední napětí kondenzátoru
U_{DS}		povolené napětí mezi drainem a sourcem
U_1		vstupní napětí přípravku
U_{IMAX}		maximální vstupní napětí přípravku
U_2		výstupní napětí přípravku
U_L		střední napětí na induktoru

U_0	V	napětí naprázdno
u		okamžité napětí
u_C		okamžité napětí na kondenzátoru
u_D		okamžité napětí na diodě
u_L		okamžité napětí na induktoru
u_S		okamžité napětí na spínači
η	%	účinnost
Δi	A	změna proudu
Δi_L		změna proudu induktorem
ΔQ	C	změna náboje
ΔU	V	zvlnění napětí
ΔU_C		zvlnění napětí na kondenzátoru
Δt	s	časový úsek

Úvod

V dnešní době plné elektroniky, která pracuje s nízkými stejnosměrnými napětími se nelze obejít bez obvodů, které umožňují úroveň stejnosměrného napětí měnit. Tyto obvody se nazývají DC/DC měniče. Patří sem i spínané regulátory, z nichž se používají nejčastěji měniče typu BUCK a BOOST. Méně častá jsou zapojení ZETA a SEPIC, kterým je tato práce věnována. Tato zapojení umožňují napětí snižovat i zvyšovat. Práce se zabývá návrhem a konstrukcí přípravků se zdroji ZETA a SEPIC, které by případně mohly být určeny pro výuku. Přípravky budou umožňovat změnu parametrů v jejich obvodu a snadné měření časových průběhů napětí. Nakonec bude na přípravcích provedeno měření a jejich hodnocení.

1. DC/DC měniče

DC/DC měniče jsou elektronická zařízení, která umožňují měnit úroveň stejnosměrného napětí. Dle principu jejich činnosti jsou děleny do dvou skupin, na lineární regulátory a spínané regulátory.

1.1 Lineární regulátory

Lineární regulátory využívají polovodičový prvek, který pracuje v lineární oblasti své voltampérové charakteristiky. Na něm dochází k úbytku přebytečného napětí a ztrátě energie v podobě tepla. Lineární regulátory tedy mohou pouze snižovat napětí. Jejich účinnost klesá s rozdílem vstupního a výstupního napětí. Vůči spínaným regulátorům jsou značně neefektivní. Potřebují velké výkonové součástky, které je nutno chladit. Z toho také plynou jejich velké rozměry a hmotnost. Jejich zapojení je ale jednodušší a jsou levnější. V aplikacích, kde je vyžadován malý šum jsou lineární regulátory nenahraditelné. Podrobně jsou popsány v [1] a [2].

1.2 Spínané regulátory

Druhou skupinou jsou spínané regulátory. Jejich základ tvoří spínač (tranzistor), který pracuje jen ve dvou stavech, sepnuto a rozepnuto. Ztrátový výkon na tranzistoru je tudíž minimální. Spínací kmitočet bývá většinou nad hranicí slyšitelných 20 kHz. S rostoucím kmitočtem je možno docílit větší miniaturizace, ale začínají se více projevovat parazitní indukčnosti a kapacity, a také dochází k nechtěnému vyzařování energie do volného prostoru. Běžně se pracuje až do jednotek MHz. Regulace výstupního napětí je obvykle prováděna změnami střidy PWM signálu, kterým je ovládán tranzistor. Podle typu zapojení dokáží spínané regulátory snižovat i zvyšovat napětí. Dále některá zapojení umožňují například otáčet polaritu výstupního napětí vůči vstupnímu, či galvanicky oddělovat výstup od vstupu. Největší výhodou spínaných regulátorů je jejich vysoká účinnost, která dosahuje i 90 %. Nevýhodou bývá šum, který produkují.

Podle druhu elektronického prvku, jehož proud je tranzistorem spínán, je možno spínané regulátory dále dělit na:

Obvody se spínanými kapacitami

Princip činnosti spočívá v řízeném přelévání náboje mezi kapacitami. Jsou vhodné pro malé výstupní proudy. Další informace v [3] a [4].

Obvody s transformátory

U těchto obvodů je pomocí tranzistorů spínán proud do primárního vinutí transformátoru. Výstup měniče je galvanicky oddělen od vstupu. Tato skupina se nejčastěji vyskytuje jako napájecí zdroj ve spotřební elektronice. Dle typu zapojení mohou přenášet výkony v řádu stovek wattů. Více informací v [4] a [1].

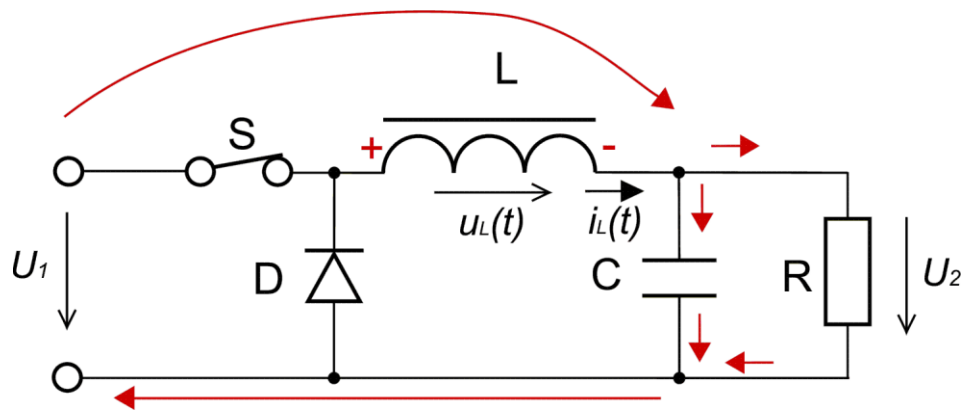
Obvody se spínanými induktory

Zde je využíváno hromadění energie v induktoru v prvním časovém intervalu, a následné odčerpávání energie v druhém časovém intervalu. Do této skupiny obvodů náleží i měniče typu SEPIC a ZETA, kterým je tato práce věnována. Tyto měniče nemají galvanicky oddělený výstup od vstupu a jsou jednodušší než měniče s transformátory. Dle typu zapojení mohou napětí snižovat, zvyšovat i invertovat. Jsou vhodné pro aplikace, kde je velikost napětí měněna méně než desetkrát. Při větším převodním poměru klesá účinnost.

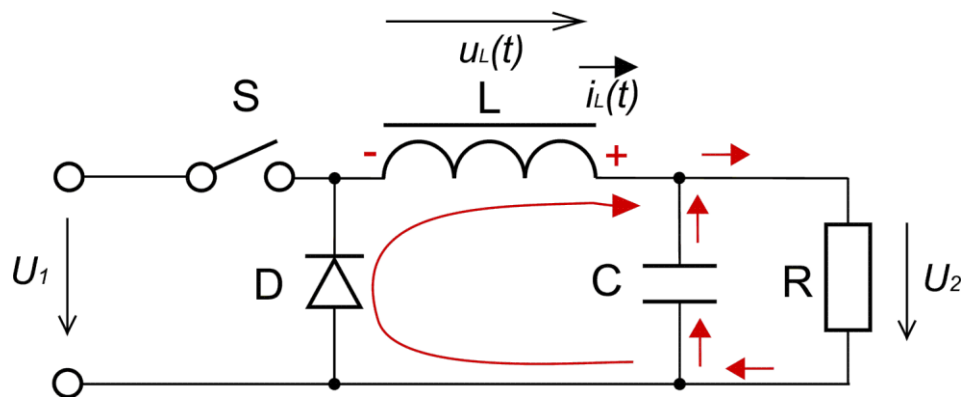
V následujících kapitolách budou stručně popsány základní měniče ze třetí skupiny, zvláštní důraz bude kladen na měniče typu SEPIC a ZETA.

1.2.1 Snižující měnič

Obrázky 1 a 2 znázorňují schéma snižujícího měniče, označovaného také jako BUCK. Výstupní napětí měniče je nižší než napětí vstupní.



Obr. 1: Snižující měnič, spínač v poloze sepnuto



Obr. 2: Snižující měnič, spínač v poloze rozepnuto

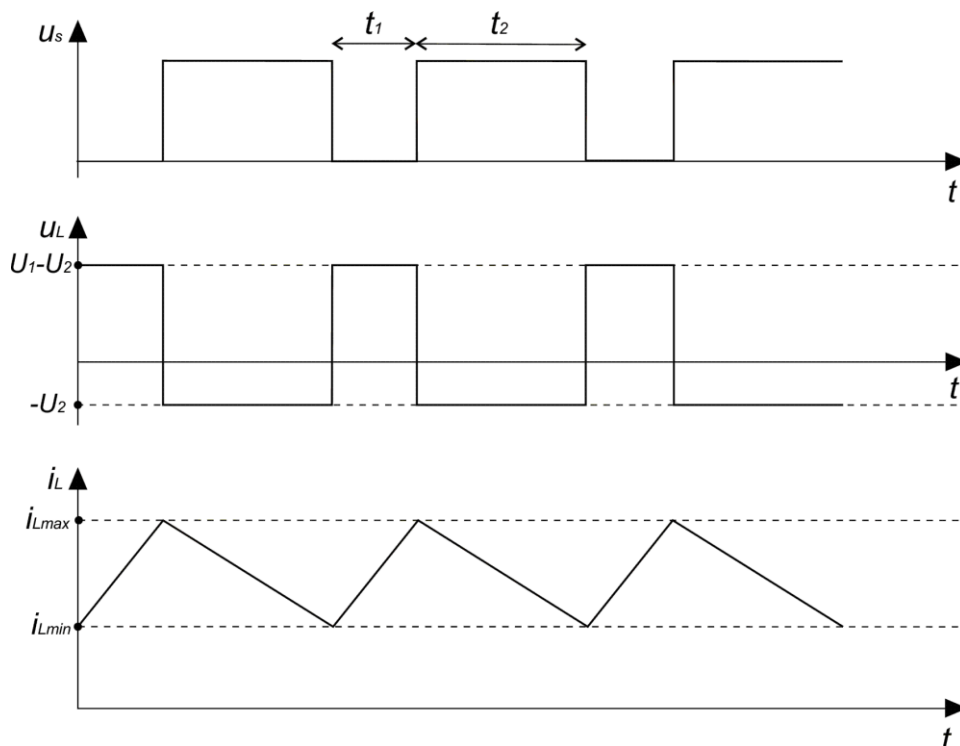
Dále je bráno v úvahu, že obvod pracuje v ustáleném stavu a na diodě je v otevřeném stavu úbytek napětí 0 V. Na vstupu obvodu je ustálené stejnosměrné napětí U_1 , na výstupu ustálené stejnosměrné U_2 . Konverze napětí probíhá ve dvou fázích. První fáze trvá dobu t_1 , druhá dobu t_2 .

V první fázi (obrázek 2) je spínač S sepnut. Na induktoru L je nyní napětí $u_L = U_2 - U_1$. Jelikož je napětí na induktoru polarizováno stejně jako proud, dioda D je po tuto fázi uzavřena. Proud i_L protékající induktorem lineárně vzrůstá. Část proudu i_L dobíjí kapacitor C, část teče do zátěže R_z .

V druhé fázi (obrázek 1) je spínač S rozepnut. Induktor drží velikost a směr svého proudu, otevírá se dioda D. Napětí u_L na induktoru je nyní $-U_2$, proud i_L lineárně klesá. V této fázi teče do zátěže částečně proud i_L a částečně proud z kapacitoru.

Výstupní napětí měniče závisí na poměru dob t_1 a t_2 . Zkracováním doby t_1 a prodlužováním doby t_2 se napětí snižuje.

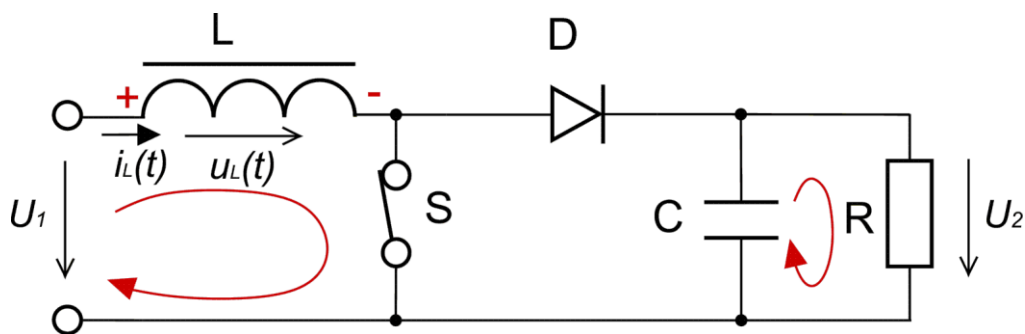
Obrázek 3 znázorňuje časové průběhy napětí a proudu induktoru v měniči, který pracuje ve spojitém režimu. Spojitý režim znamená, že proud induktorem bude po celou dobu větší než nula. Horní průběh znázorňuje napětí na spínači S. Další informace o zdroji typu BUCK v [5] a [6].



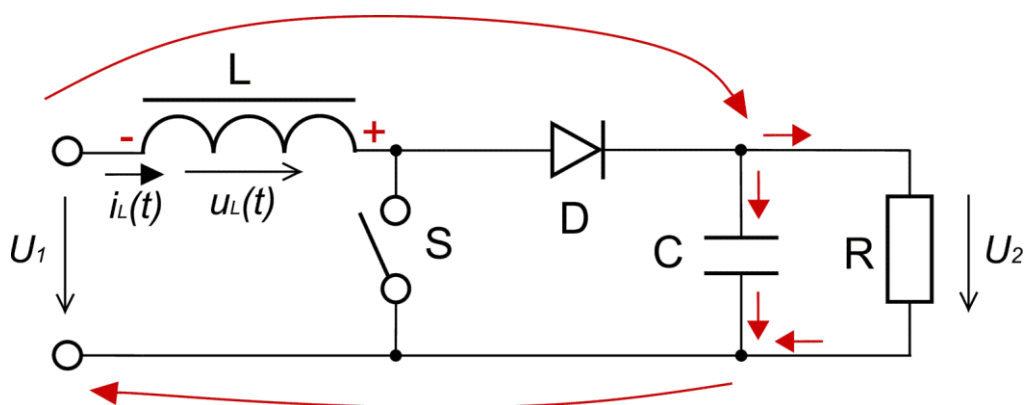
Obr. 3: Časové průběhy napětí a proudu induktoru snižujícího měniče, spojitý režim; převzato z [6] a upraveno

1.2.2 Zvyšující měnič

Obrázky 4 a 5 znázorňují schéma zvyšujícího měniče, označovaného také jako BOOST. Výstupní napětí měniče je vyšší než vstupní.



Obr. 4: Zvyšující měnič, spínač v poloze sepnuto

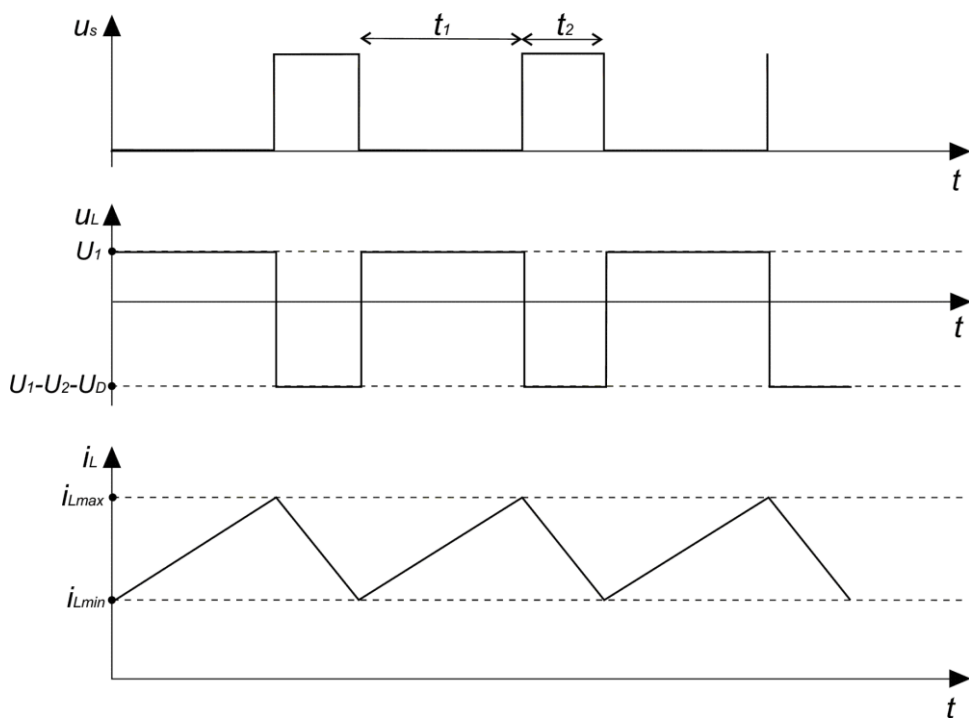


Obr. 5: Zvyšující měnič, spínač v poloze rozepnuto

Opět je počítáno s ustáleným stavem měniče. V první fázi (obrázek 4) je spínač S sepnut. Napětí na induktoru L se rovná vstupnímu napětí U_1 . Proud induktorem i_L lineárně roste. Napětí na diodě D je rovno $-U_2$, dioda je zavřena. Do zátěže teče pouze proud z kondenzátoru C.

V druhé fázi (obrázek 5) je spínač S rozepnut. Induktor si opět drží velikost a směr proudu z předešlé fáze. Tento proud proteče skrz diodu D, z části dobíjí kondenzátor, z části teče do zátěže. Na induktoru se ve fázi 2 naindukuje napětí u_L rovné $U_1 - U_2$, proud induktorem lineárně klesá.

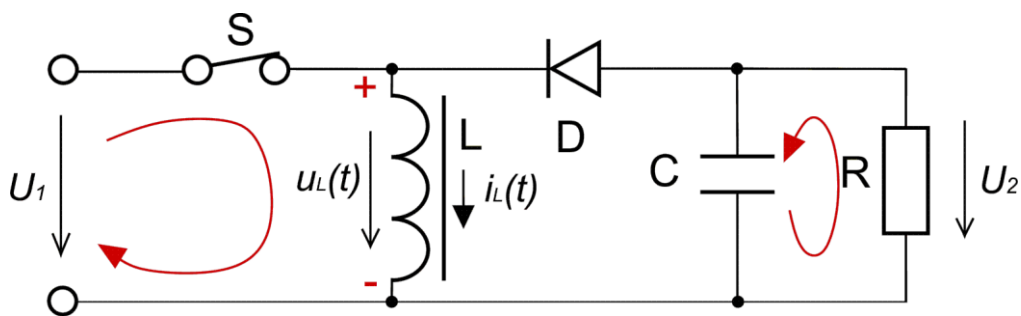
Obrázek 6 znázorňuje průběh napětí a proudu induktoru zvyšujícího měniče, který pracuje ve spojitým režimu. Horní průběh znázorňuje napětí na spínači S. Další informace o zdroji typu BOOST v [5] a [6].



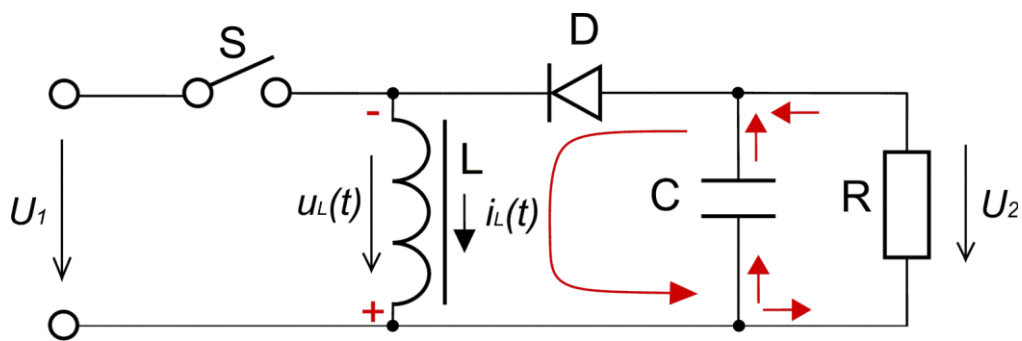
Obr. 6: Časové průběhy napětí a proudu induktoru snižujícího měniče, spojitý režim; převzato z [6] a upraveno

1.2.3 Invertující měnič

Měnič je také označován jako BUCK-BOOST. Jeho schéma je znázorněno na obrázcích 7 a 8. Tento měnič může napětí, jak snižovat, tak zvyšovat. Jeho nejdůležitější vlastnost je invertovaná polarita výstupního napětí vůči vstupnímu.



Obr. 7: Invertující měnič, spínač v poloze sepnuto



Obr. 8: Invertující měnič, spínač v poloze rozepnuto

Stejně jako předešlé typy pracuje měnič ve dvou fázích.

V první fázi (obrázek 7) je sepnut spínač S. Na induktor L je připojeno vstupní napětí U_1 . Proud induktorem i_L lineárně roste. Dioda D je polarizována v závěrném směru. Do zátěže teče pouze proud z kondenzátoru C.

V druhé fázi (obrázek 8) je spínač S rozepnut. Induktor L si opět uchovává velikost a směr proudu i_L . Proud ale protéká smyčkou vyznačenou na obrázku 8 červeně. Proud i_L se dále dělí na část, která nabíjí kondenzátor C, a část, která teče do zátěže R_z . Z obrázku je patrný princip inverze polaroty výstupního napětí.

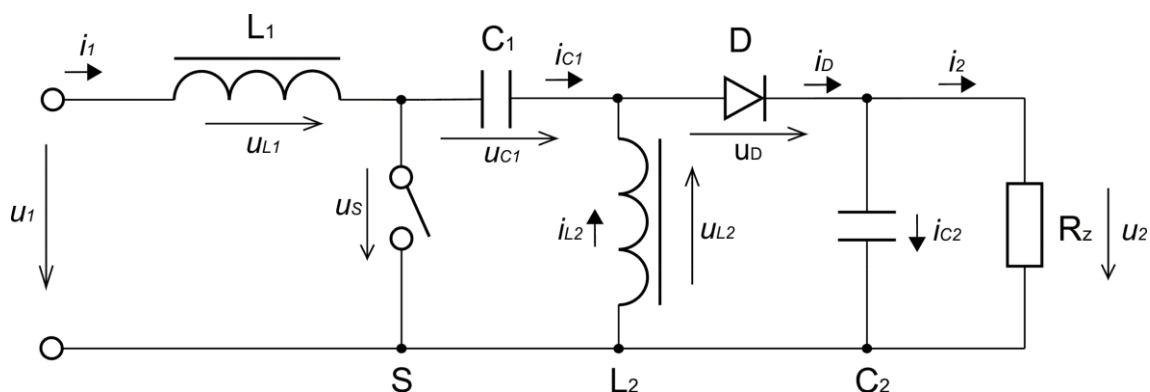
Obrázek 9 znázorňuje průběh napětí a proudu induktoru invertujícího měniče, který pracuje ve spojitým režimu. Horní průběh znázorňuje napětí na spínači S. Další informace o zdroji typu BUCK-BOOST v [5] a [6].

1.2.4 SEPIC

Měnič typu SEPIC (z anglického single-ended primary-inductor converter) umožňuje zvyšovat i snižovat napětí. Vyznačuje se spojitým vstupním proudem a nespojitým výstupním. Na rozdíl od měniče typu BUCK-BOOST neinvertuje napětí.

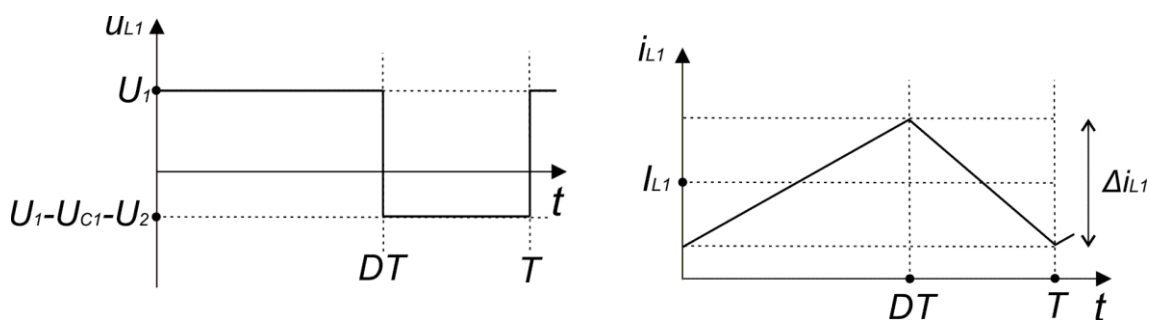
SEPIC se v podstatě skládá z měničů typu boost a buck-boost, které jsou navzájem propojeny vazebním kondenzátorem. Na obrázku 10 je znázorněno schéma zapojení měniče, ve kterém jsou vyznačeny proudy a napětí. Následující analýza zapojení vychází především

z [7]. Malými písmeny budou značeny okamžité hodnoty veličin závislé na čase. Velká písmena budou označovat průměrné hodnoty veličin nezávislé na čase. Při popisu bude předpokládáno, že obvod pracuje v ustáleném stavu a na diodě je v otevřeném stavu úbytek napětí 0 V. Zapojení pracuje v cyklu sestávajícího se ze dvou fází. Perioda jednoho cyklu je označena T . Střída signálu, kterým je ovládán spínač, je označena jako D . Doba trvání první fáze bude rovna $D T$, doba trvání druhé fáze bude rovna $T - D T$.



Obr. 10: Principiální zapojení měniče typu SEPIC; převzato z [7] a upraveno

Nejprve bude popsán děj na induktoru L_1 . Ve fázi sepnutého spínače je na induktoru napětí $u_{L1} = U_1$ (viz obrázek 10). Při rozepnutém spínači bude $u_{L1} = U_1 - U_2 - U_{C1}$. Z toho vyplývá, že v první fázi bude proud induktorem lineárně růst, ve druhé fázi lineárně klesat. Průběhy u_{L1} a i_{L1} zobrazuje obrázek 11.



Obr. 11: Časový průběh napětí a proudu induktoru L_1 ; převzato z [7] a upraveno

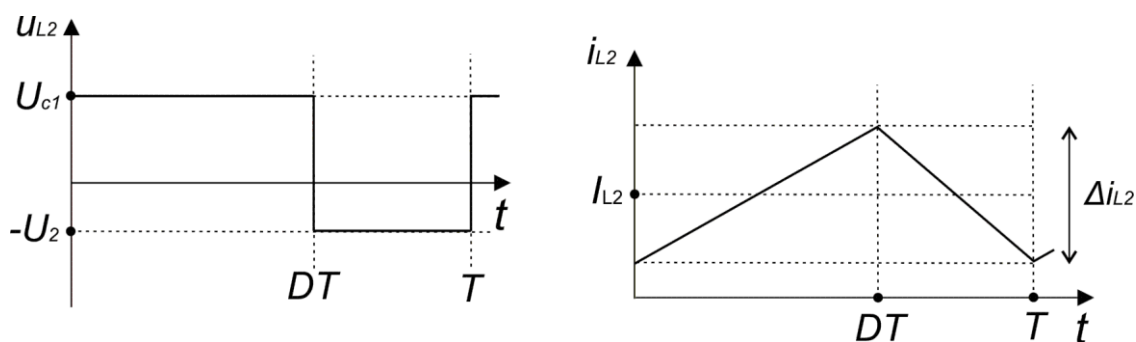
Protože střední hodnota proudu induktorem je konstantní, musí být střední hodnota napětí na induktoru nulová:

$$\frac{1}{T} \left(\int_0^{DT} u_{L1} dt + \int_{DT}^T u_{L1} dt \right) = 0 \quad (1.1)$$

Dosazením hodnot napětí z obr. 11 za u_{L1} a upravením rovnice (1.1) je získán vztah:

$$U_2 + U_{C1} = \frac{U_1}{1-D} \quad (1.2)$$

Induktor L_2 je v první fázi (spínač sepnut) připojen ke kondenzátoru C_1 , napětí $u_{L2} = u_{C1}$, proud i_{L2} lineárně roste. V druhé fázi si induktor drží velikost a směr svého proudu, otevírá se dioda D . Napětí u_{L2} je rovno záporné hodnotě výstupního napětí U_2 . Proud i_{L2} lineárně klesá. Průběhy u_{L2} a i_{L2} zobrazuje obrázek 12.



Obr. 12: Časový průběh napětí a proudu induktoru L_2 ; převzato z [7] a upraveno

Střední hodnota napětí na induktoru L_2 musí být opět nulová:

$$\frac{1}{T} \left(\int_0^{DT} u_{L2} dt + \int_{DT}^T u_{L2} dt \right) = 0 \quad (1.3)$$

Dosazením hodnot napětí z obr. 12 za u_{L1} a upravením rovnice (1.1) je získán vztah:

$$U_2 + U_{C1} = \frac{U_2}{D} \quad (1.4)$$

Výsledný vztah (1.5) mezi vstupním a výstupním napětím měniče je získán položením (1.2) a (1.4) do rovnosti.

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{D}{1-D} \quad (1.5)$$

Z rovnic (1.2) a (1.5) lze určit střední hodnotu napětí na kondenzátoru C_1 :

$$U_{C1} = U_1 \quad (1.6)$$

Dále budou určeny střední proudy I_{L1} a I_{L2} tekoucí induktory. Pokud je uvažováno, že měnič pracuje beze ztrát, bude se vstupní výkon rovnat výstupnímu:

$$U_1 I_1 = U_2 I_2 \quad (1.7)$$

Z obrázku 10 je patrné, že $I_{L1} = I_1$. Ze vztahů (1.7) a (1.5) lze dále získat:

$$I_{L1} = \frac{U_2 I_2}{U_1} = \frac{D}{1-D} I_2 \quad (1.8)$$

Střední hodnota proudu tekoucího kondenzátory je nulová. Výstupní proud I_2 teče diodou D (viz obr. 10). Protože je dioda průchozí jen v intervalu od $D T$ do T , bude výstupní proud I_2 roven:

$$I_2 = \frac{1}{T} \int_{DT}^T i_2 dt = \frac{1}{T} (I_{L1} + I_{L2})(1-D) T \quad (1.9)$$

Dosazením (1.8) do (1.9) a následnou úpravou je získán výsledek $I_{L2} = I_2$.

Změnu proudů induktory Δi_{L1} a Δi_{L2} (viz obr. 11 a 12) lze určit dle vztahu $u_L = L (\Delta i / \Delta t)$. Pro induktor L_1 bude platit:

$$\Delta i_{L1} = \frac{U_1 D T}{L_1} = \frac{(1-D) U_2 T}{L_1} \quad (1.10)$$

Pro induktor L_2 bude platit:

$$\Delta i_{L2} = \frac{(1-D) U_2 T}{L_2} \quad (1.11)$$

Pro spojitý režim činnosti měniče nesmí v průběhu periody klesnout proudy na nulovou hodnotu. Měnič pracuje na hranici spojitého režimu, pokud je proud induktorem

rovný nule jen v momentě konce periody. Pro tuto hraniční podmínku platí z trojúhelníkového průběhu (viz obr. 11) rovnost (1.12).

$$2I_{L1} = \Delta i_{L1} \quad (1.12)$$

Po dosazení (1.10) do (1.12) a upravení je získán vztah pro minimální hodnotu indukčnosti L_1 při zachování spojitého režimu:

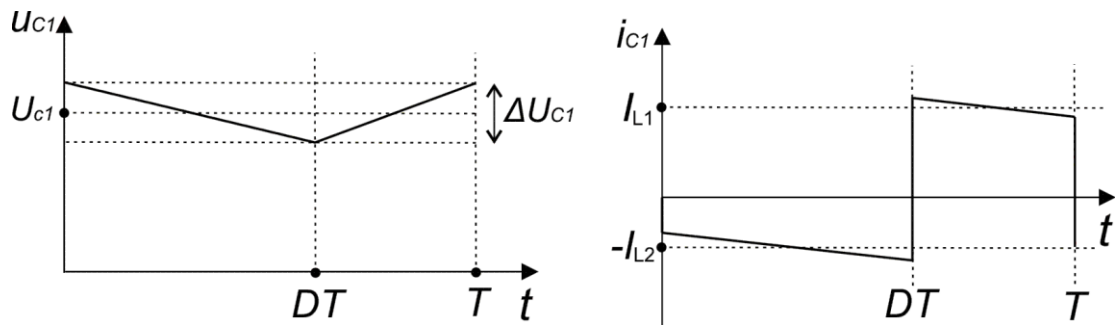
$$L_{1\min} = \frac{(1-D)U_2}{2I_1f_s} = \frac{(1-D)^2 R_z}{D} \frac{R_z}{2f_s} \quad (1.13)$$

Obdobně je získána minimální indukčnost L_2 :

$$L_{2\min} = \frac{(1-D)U_2}{2I_2f_s} = (1-D) \frac{R_z}{2f_s} \quad (1.14)$$

Dále bude určeno zvlnění napětí U_{C1} a U_2 . Se zvlněním souvisí hodnoty kapacit C_1 a C_2 . Požadované zvlnění je dáno vztahem:

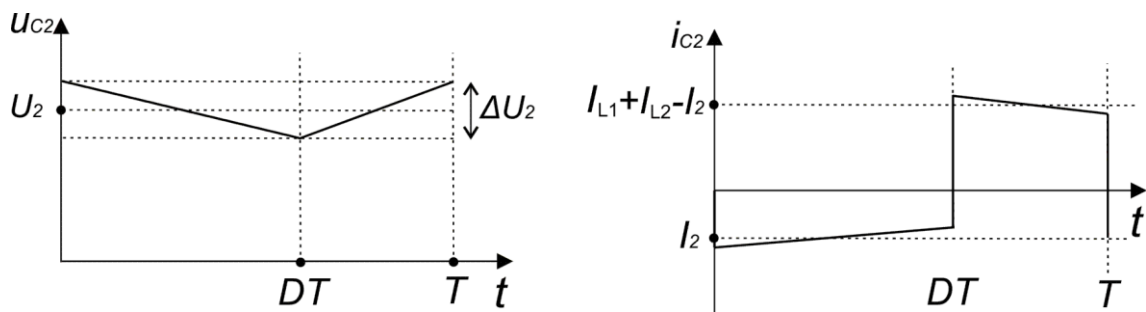
$$\Delta U = \frac{\int i(t)dt}{C} \quad (1.15)$$



Obr. 13: Časový průběh napětí a proudu kondenzátoru C_1 ; převzato z [7] a upraveno

Na obrázku 13 je znázorněn průběh napětí a proudu kondenzátoru C_1 . Při zanedbání malých proudových změn je kondenzátor po dobu DT nabíjen proudem $I_{L2} = I_2$. Pro zvlnění napětí U_{C1} platí:

$$\Delta U_{C1} = \frac{I_2 DT}{C_1} \quad (1.16)$$



Obr. 14: Časový průběh napětí a proudu kondenzátoru C_2 ; převzato z [7] a upraveno

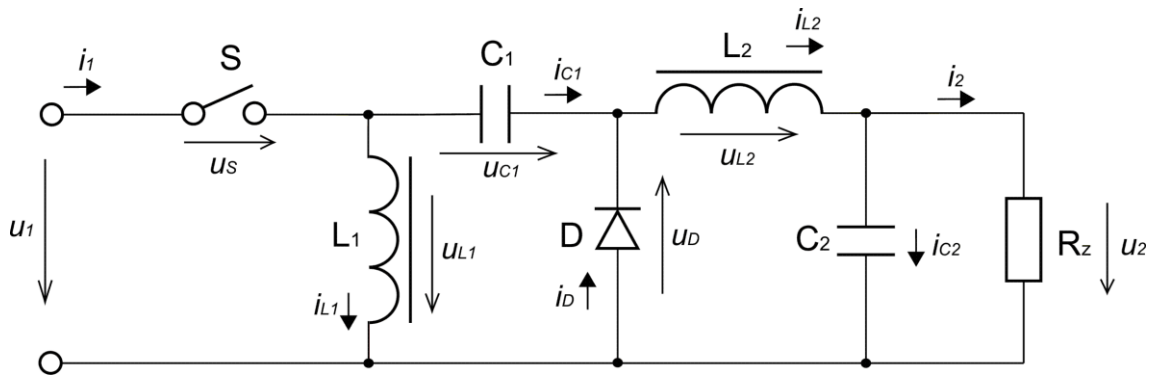
Na obrázku 14 je znázorněn průběh napětí a proudu kondenzátoru C_2 . Po dobu sepnutého spínače (doba $D T$) teče z kondenzátoru do zátěže proud I_2 . Podobně jako v předchozím případě bude zvlnění napětí na C_2 :

$$\Delta U_2 = \frac{I_2 D T}{C_2} \quad (1.17)$$

1.2.5 ZETA

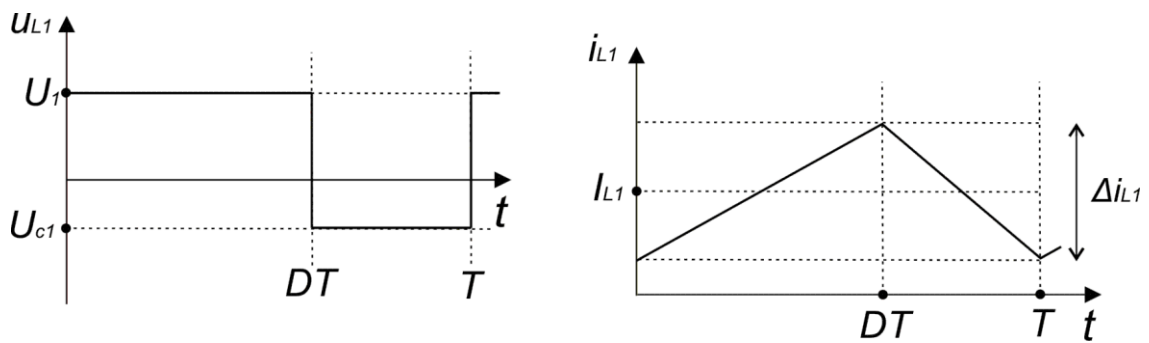
Měnič typu ZETA umožňuje snižovat i zvyšovat výstupní napětí vůči vstupnímu. Výstupní napětí má stejnou polaritu jako vstupní. ZETA se vyznačuje nespojitým vstupním proudem a spojitým výstupním.

Základní zapojení měniče ZETA obsahuje, stejně jako SEPIC, dva indukory, spínač, diodu a vazební kondenzátor. Rozdíl obou zapojení spočívá v záměně pozic induktoru L_1 a spínače S a pozic induktoru L_2 a diody D . Zapojení měniče typu ZETA znázorňuje obrázek 15. Na obrázku jsou vyznačeny proudy a napětí uvažované v následující analýze. V analýze měniče bude postupováno analogicky s analýzou měniče SEPIC z předešlé kapitoly. Postup výpočtu je obdobný jako v [7].



Obr. 15: Principiální zapojení měniče typu ZETA; převzato z [7] a upraveno

Pokud je spínač S v sepnutém stavu (po dobu DT), je na induktor L_1 připojeno napětí U_1 . Proud induktorem lineárně roste. Při rozepnutí spínače si induktor zachovává směr a velikost svého proudu, proud teče smyčkou L_1, D, C_1 . Na induktor je nyní připojeno napětí kondenzátoru u_{c1} , proud induktorem klesá. Časové průběhy u_{L1} a i_{L1} znázorňuje obrázek 16.



Obr. 16: Časový průběh napětí a proudu induktoru L_1 ; převzato z [7] a upraveno

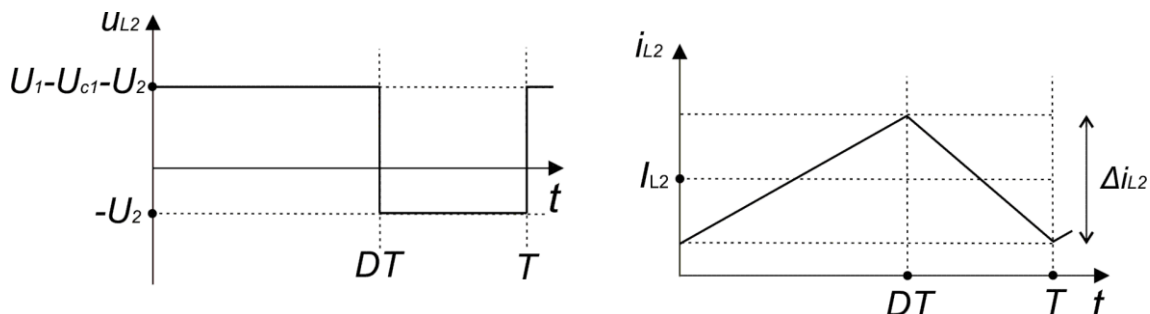
Vzhledem k předpokládanému ustálenému stavu činnosti měniče musí být střední hodnota napětí u_{L1} nulová:

$$\frac{1}{T} \left(\int_0^{DT} u_{L1} dt + \int_{DT}^T u_{L1} dt \right) = 0 \quad (1.18)$$

Dosazením hodnot napětí z obr. 16 za u_{L1} a upravením rovnice (1.18) je získán vztah:

$$U_{C1} = \frac{D U_1}{D - 1} \quad (1.19)$$

Induktor L_2 je ve fázi sepnutého spínače připojen k napětí $U_1 - U_{C1} - U_2$, proud induktoru roste. Ve fázi rozepnutého spínače se otevírá dioda D a proud induktoru teče smyčkou $L_2, C_2 \parallel R_z, D$. Napětí na induktoru u_{L2} je nyní rovno $-U_2$, proud lineárně klesá. Obrázek 17 znázorňuje časové průběhy u_{L2} a i_{L2} .



Obr. 17: Časový průběh napětí a proudu induktoru L_2 ; převzato z [7] a upraveno

Střední hodnota napětí u_{L2} musí být opět nulová. Obdobným výpočtem jako výše je získán vztah:

$$U_{C1} = \frac{(D-1)U_2}{D} + U_1 - U_2 \quad (1.20)$$

Porovnáním (1.19) a (1.20) a následnou úpravou je získán vztah mezi vstupním napětím měniče U_1 a výstupním U_2 :

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{D}{1-D} \quad (1.21)$$

Po dosazení výsledku do (1.19) je získána střední hodnota napětí na kondenzátoru $C1$:

$$U_{C1} = -U_2 \quad (1.22)$$

Z uvažované rovnosti vstupního a výstupního výkonu (viz (1.7) z předešlé kap.) a převodního vztahu (1.21) plyne vztah mezi vstupním a výstupním stejnosměrným proudem:

$$I_1 = \frac{D}{1-D} I_2 \quad (1.23)$$

Ze schématu na obrázku 15 plyne, že střední hodnota proudu induktorem L_2 je rovna výstupnímu stejnosměrnému proudu I_2 .

Vstupní proud měniče typu ZETA nemá spojitý průběh, protože je na vstupu zapojen spínač S. Ze schématu (obr. 15) vyplývá, že po dobu sepnutého spínače je i_{L1} roven součtu středních proudů I_{L1} a I_{L2} , tedy:

$$I_1 = \int_0^{DT} (I_{L1} + I_{L2}) dt = DI_{L1} + DI_{L2} \quad (1.24)$$

Sloučením vztahů (1.24) a (1.23) a upravením je získán výsledek pro střední proud I_{L1} :

$$I_{L1} = I_1 \quad (1.25)$$

Změnu proudů induktory Δi_{L1} a Δi_{L2} (viz obr. 16 a 17) lze určit dle vztahu $u_L = L (\Delta i / \Delta t)$. Pro induktor L1 bude platit:

$$\Delta i_{L1} = \frac{U_1 DT}{L_1} = \frac{(1-D) U_2 T}{L_1} \quad (1.26)$$

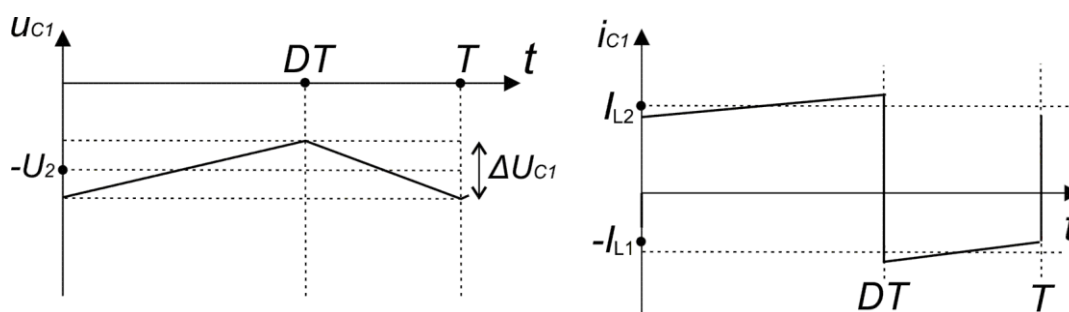
Pro induktor L2 bude platit:

$$\Delta i_{L2} = \frac{U_1 DT}{L_2} = \frac{(1-D) U_2 T}{L_2} \quad (1.27)$$

Hraniční stav spojitého režimu činnosti měniče je určen stejným postupem jako v analýze měniče typu SEPIC (viz kap. 1.2.4) Měnič pracuje ve spojitém režimu, pokud platí:

$$L_1 \geq \frac{(1-D) U_2}{2 I_1 f_s} = \frac{(1-D)^2 R_z}{D} \frac{R_z}{2 f_s} \quad (1.28)$$

$$L_2 \geq \frac{(1-D) U_2}{2 I_2 f_s} = (1-D) \frac{R_z}{2 f_s} \quad (1.29)$$

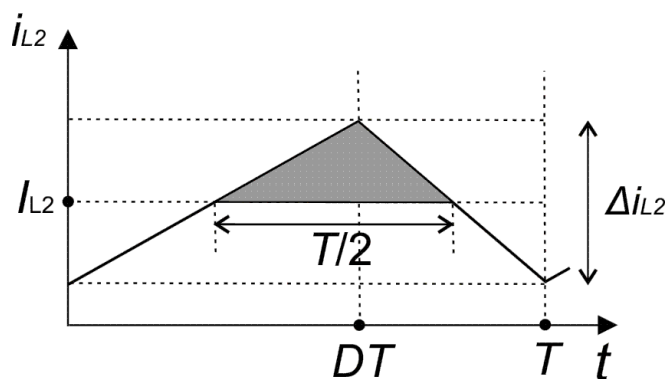


Obr. 18: Časový průběh napětí a proudu kondenzátoru C_1 ; převzato z [7] a upraveno

Obrázek 18 znázorňuje průběh napětí a proudu kondenzátoru C_1 . Zvlnění napětí U_{C1} se vypočítá dle vztahu (1.15). Při zanedbání malých proudových změn teče kondenzátorem po dobu $D T$ proud $I_{L2} = I_2$. Zvlnění napětí U_{C1} vychází:

$$\Delta U_{C1} = \frac{I_2 D T}{C_1} \quad (1.30)$$

Pro určení zvlnění napětí na kondenzátoru C_2 je uvažováno, že změna proudu induktorem L_2 je rovna změně proudu kondenzátorem C_2 . Tedy zvlnění proudu I_2 je zanedbatelné. Časový průběh proudu I_{L2} znázorňuje obr. 19. Na obrázku je vybarvena plocha, která odpovídá změně náboje na kondenzátoru C_2 v průběhu jedné periody.



Obr. 19: Časový průběh proudu induktorem L_2 , vyznačená plocha odpovídá ΔQ_{C2}

Změna náboje ΔQ_{C2} je rovna:

$$\Delta Q_{C2} = \frac{1}{2} \frac{T}{2} \frac{\Delta i_{L2}}{2} = \frac{T \Delta i_{L2}}{8} \quad (1.31)$$

Dosazením (1.27) do (1.31) a vydělením kapacitou C_2 je získán výsledný vztah pro zvlnění výstupního napětí:

$$\Delta U_{C2} = \frac{U_1 D T^2}{8 L_2 C_2} \quad (1.32)$$

2. Návrh přípravků

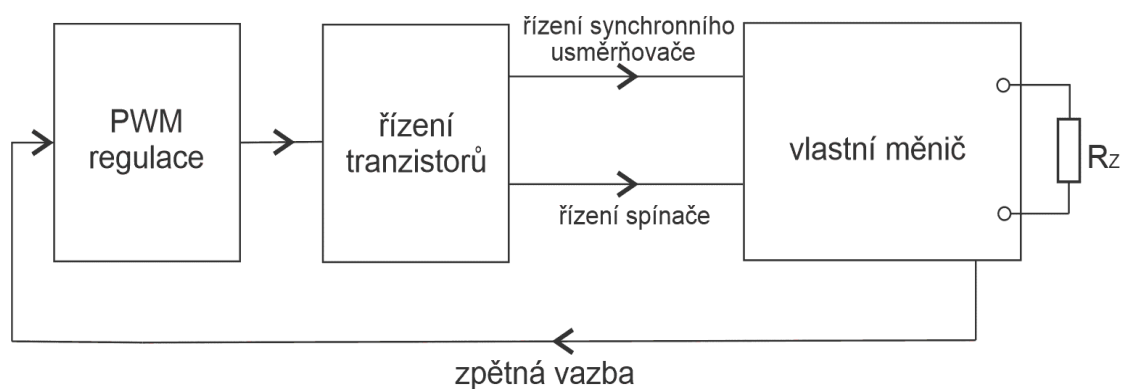
2.1 Požadavky kladené na přípravky

Aby bylo možné obě zapojení mezi sebou porovnávat, měla by být osazena stejnými prvky, a mít stejný způsob regulace. Dále je vhodné, aby přípravky dokázaly demonstrovat co nejvíce režimů činnosti měniče. Měly by mít možnost pracovat jak v režimu snižujícím napětí, tak v režimu zvyšujícím. Dále v režimu jak spojitého, tak nespojitého průběhu proudu induktry. Měly by mít možnost změny frekvence, střídý, velikosti induktorů a kapacitorů. Také možnost nahrazení diody z principiálního zapojení (obr. 10 a 15) vhodně řízeným tranzistorem, a za určitých podmínek se pokusit o synchronní usměrnění [8].

Rozsah vstupního napětí přípravku byl brán s ohledem na zdroj dostupný v laboratoři. Bylo zvoleno 5 V až 30 V. Výstupní napětí bylo zvoleno ve stejných mezích. Maximální výstupní proud byl volen 100 mA.

2.2 Bloková představa přípravku

Oba přípravky budou mít tři základní bloky. Uspořádání bloků znázorňuje obr. 20. Další text je věnován návrhu a popisu jednotlivých bloků pro měnič typu SEPIC a bloků pro měnič typu ZETA.



Obr. 20: Blokové schéma přípravku

2.3 Návrh měniče typu SEPIC

2.3.1 Blok vlastního měniče SEPIC

Zapojení vlastního měniče vychází z principiálního zapojení na obr. 10. Změna proti principiálnímu zapojení bude v použití tranzistoru jako spínače S a v možnosti nahrazení diody D tranzistorem. Dále bude uvažováno s možností připojení dvou hodnot indukčností a kapacit.

2.3.1.1 Výpočet střídavy

K výpočtu střídavy je užít vztah (1.5) upravený do tvaru (2.1).

$$D = \frac{U_2}{U_1 + U_2} \quad (2.1)$$

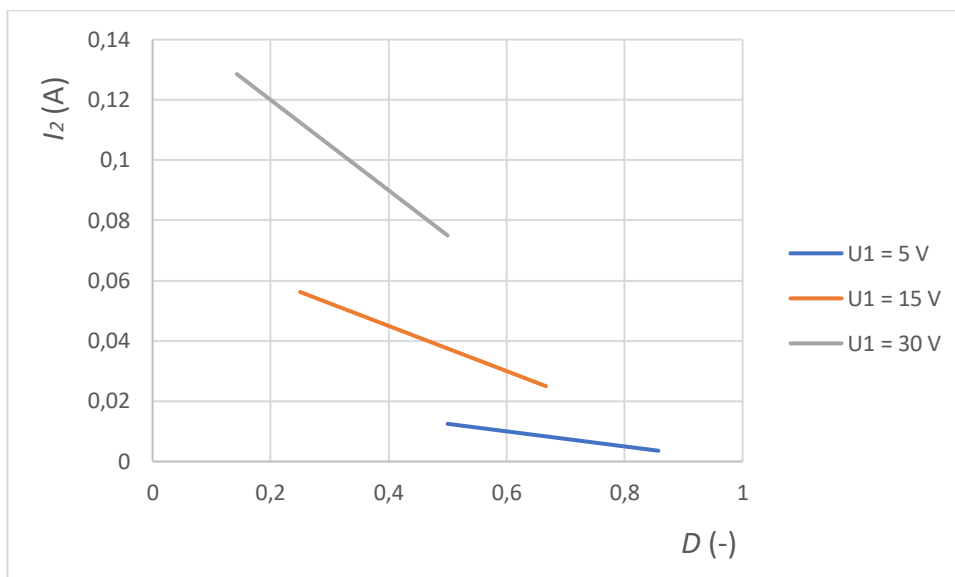
Pro minimální vstupní a maximální výstupní napětí ($U_1 = 5 \text{ V}$, $U_2 = 30 \text{ V}$) vychází střídava 0,86. Pro maximální vstupní a minimální výstupní napětí ($U_1 = 30 \text{ V}$, $U_2 = 5 \text{ V}$) vychází 0,14.

2.3.1.2 Spínací kmitočty

Zařízení bude mít volbu spínacích kmitočtů ze dvou hodnot 50 kHz a 100 kHz.

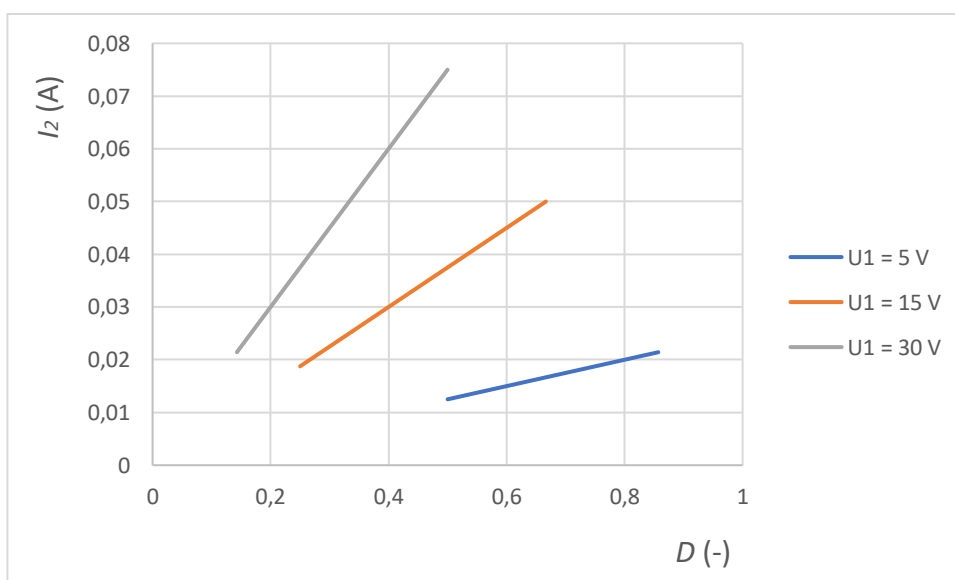
2.3.1.3 Indukčnosti L_1 a L_2

Pro spojitý průběh proudu induktorem L_1 je minimální hodnota indukčnosti L_1 dána vztahem (1.13). I_l ve vzorci znamená dolní hranici vstupního proudu, od které již průběh bude spojitý. S větší indukčností je možné si dovolit menší proud I_l . Z požadavků na přípravek, viz kap. 2.1, by měla být hranice mezi spojitým a nespojitým režimem někde uprostřed proudového rozsahu přípravku. Tomu vyhovuje indukčnost 1 mH. Na obrázku 21 je zanesena závislost minimálního výstupního proudu I_2 , při kterém je průběh spojitý, na střídě D pro tři hodnoty vstupního napětí. Závislost odpovídá indukčnosti $L_1 = 1 \text{ mH}$ a frekvenci spínání 100 kHz.



Obr. 21: Závislost minimálního proudu I_2 pro spojitý průběh induktorem L_1 na střídě D

Pro spojitý průběh proudu induktorem L_2 je minimální hodnota indukčnosti L_2 dána vztahem (1.14). Aby byl zajištěn optimální přenos energie měničem, je zvolena stejná hodnota indukčnosti L_2 jako hodnota indukčnosti L_1 . Na obrázku 22 je zanesena závislost minimálního výstupního proudu I_2 , při kterém je průběh proudu induktorem L_2 spojitý, na střídě D pro tři hodnoty vstupního napětí. Závislost opět odpovídá indukčnosti $L_2 = 1$ mH a frekvenci spínání 100 kHz.



Obr. 22: Závislost minimálního proudu I_2 pro spojitý průběh induktorem L_2 na střídě D

Aby bylo možné zkoumat vlastnosti měniče při různé velikosti indukčností, bude mít přípravek možnost pracovat s indukčnostmi 1 mH a 470 μ H. Vzhledem k dostupnosti byly zvoleny cívky od výrobce Talema série DP, viz [9]. Doporučená maximální frekvence udávaná výrobcem je 100 kHz.

2.3.1.4 Kapacity C1 a C2

Hodnota kapacit se určí ze vztahů (1.16) a (1.17). Je nutno zvolit požadované zvlnění napětí na kondenzátoru ΔU_C . Například, pro zvlnění 0,01 V, střidu 50 %, spínací kmitočet 100 kHz a výstupní proud 100 mA, vychází kapacita 50 μ F.

Pro účely přípravku budou kapacity volitelné, a to mezi dvěma hodnotami, 47 μ F a 94 μ F. Kapacity budou realizovány jako tantalové kvůli menší frekvenční závislosti s paralelně připojeným keramickým kondenzátorem o kapacitě 10 nF.

2.3.1.5 Výběr spínacích tranzistorů

Při volbě spínacích tranzistorů je bráno v úvahu více parametrů. Je třeba zohlednit maximální napětí U_{DS} , maximální proud I_{DS} , odpor kanálu sepnutého tranzistoru $R_{DS(on)}$, čas sepnutí tranzistoru, celkový náboj hradla Q_g a vstupní kapacitu C_{iss} .

Maximální napětí U_{DS} je dáno součtem vstupního a výstupního napětí měniče. Měnič na vstupu i výstupu pracuje s napětím do 30 V, proto je nutno volit U_{DS} větší než 60V.

Maximální proud I_{DS} by měl být volen alespoň o řád větší než výstupní proud přípravku, protože tranzistory protékají proudy obou induktorů.

Odpor kanálu tranzistoru v sepnutém stavu by měl být co nejmenší, protože na něm vznikají tepelné ztráty.

Čas sepnutí a vypnutí tranzistoru souvisí s celkovým nábojem a kapacitou hradla, dále pak s velikostí spínacího napětí a s impedancí smyčky, kterou protéká proud při zapínání a vypínání tranzistoru. Čas je požadován co nejmenší vůči periodě spínacího signálu, a to alespoň stonásobně [1].

Celkový náboj hradla a vstupní kapacita by měly být co nejmenší, aby při spínání neteklo do hradla tranzistoru mnoho energie, a aby bylo dosaženo krátkého času sepnutí.

Pro přípravku byl zvolen tranzistor IRFL4315 [10], který má následující parametry:

Maximální napětí $U_{DS} = 150 \text{ V}$

Maximální kontinuální proud $I_{DS} = 2,6 \text{ A}$

Odpor kanálu v sepnutém stavu $R_{DS} = 185 \text{ m}\Omega$

Spínací čas tranzistoru přibližně 30 ns

Celkový náboj hradla $Q_g = 12 \text{ nC}$

Vstupní kapacita hradla $C_{iss} = 420 \text{ pF}$

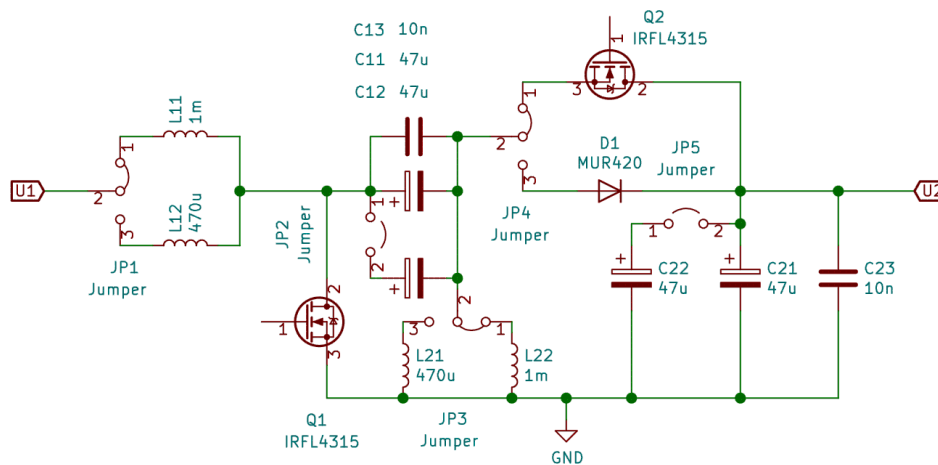
2.3.1.6 Výběr diody

Usměrňovací dioda by měla mít alespoň stokrát [1] menší dobu závěrného zotavení, než je perioda spínacího signálu. Dále nízký úbytek napětí v propustném směru. Dioda musí být dimenzována na větší závěrné napětí, než je součet vstupního a výstupního napětí přípravku [11]. Také je třeba nepřekročit maximální povolený proud diodou.

Byla zvolena ultrarychlá dioda MUR420, viz [12], s dobou závěrného zotavení 35 ns a úbytkem napětí v propustném směru 0,88 V.

2.3.1.7 Schéma bloku

Na obrázku 23 je znázorněno schéma bloku vlastního měniče typu SEPIC, které odpovídá výše uvedeným požadavkům na návrh. Změna zapojení prvků bude realizována pomocí jumperů.



Obr. 23: Schéma zapojení bloku vlastního měniče SEPIC

2.3.2 Blok modulátoru pulsně šířkové modulace

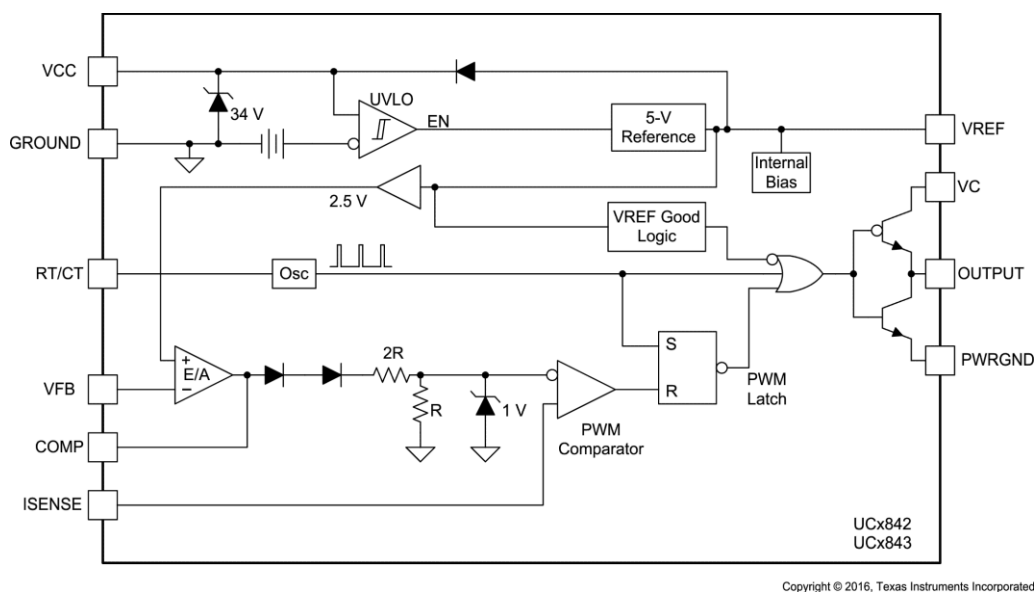
Blok modulátoru PWM se stará o generování signálu, kterým jsou po zpracování v řídicím bloku spínány tranzistory měniče. Modulátor musí splňovat tu část požadavků kladených na přípravek (kapitola 2.1), kterou zajišťuje. Musí tedy zajistit generování obdélníkového signálu o frekvenci 50 kHz a 100 kHz s rozsahem střidy v rozmezí od 1/7 do 6/7. Modulátor by měl mít zavedenou zpětnou vazbu z výstupu měniče, aby přípravek udržoval nastavené konstantní výstupní napětí.

2.3.2.1 Výběh integrovaného obvodu modulátoru

Pro účel řízení spínaných zdrojů pulsně šířkovou modulací je vyráběno mnoho integrovaných PWM regulátorů. S ohledem na požadavky výše uvedené je z dostupných obvodů vhodný UC3843. Obvod je určen k řízení DC – DC měničů pomocí změny střidy s pevně nastavenou spínací frekvencí. K dispozici má rozsah střidy 0 % až 100 %. Frekvence je nastavitelná až do 500 kHz. Obvod pracuje s napěťovou a proudovou zpětnou vazbou. Minimální napájecí napětí obvodu je 8,4 V, maximální 30 V. Další vlastnosti viz katalogový list obvodu [13].

Vnitřní blokové uspořádání obvodu znázorňuje obrázek 23. Obvod obsahuje napěťovou referenci 5 V. Z té je získáváno napětí 2,5 V, které je připojeno na neinvertující

vstup chybového zesilovače (ERROR AMP.). Invertující vstup (pin VFB) slouží k připojení napěťové zpětné vazby pomocí odporového děliče výstupního napětí měniče. Rozdíl napětí na vstupech chybového zesilovače je zesílen a přiveden na invertující vstup PWM komparátoru. Na neinvertující vstup PWM komparátoru bývá připojen signál odvozený z trojúhelníkového proudu induktorem měniče. PWM komparátor porovnává tyto signály a vzniká obdélníkový signál s proměnnou střídou.



Obr. 24: Vnitřní uspořádání obvodu UC3843; převzato z [14]

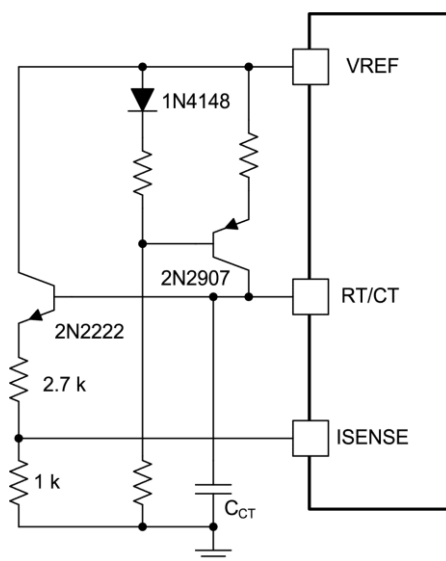
Obvod také obsahuje systém UNDERVOLTAGE LOCKOUT, který při poklesu napájecího napětí pod 7,9 V zablokuje výstup na hodnotu logické 0.

2.3.2.2 Zpětná vazba

V běžných aplikacích je obvod UC3843 provozován v proudovém režimu. Mezi sourcem spínacího tranzistoru a zemí je zapojen rezistor R_{SENSE} snímající proud pro pin CURRENT SENSE.

Pro aplikaci přípravku je vhodné, aby obvod pracoval v napěťovém režimu, tedy aby moduloval PWM signál pouze na základě napěťové zpětné vazby pinu VFB. V aplikačních poznámkách k integrovanému obvodu [14] je popsáno zapojení obvodu pro tento režim.

Zapojení znázorňuje obrázek 25. Pro neinvertující vstup PWM komparátoru (pin CURRENT SENSE) je zde použit pilovitý signál z oscilátoru (pin RT/CT). Zapojení bylo použito při návrhu přípravku.



Obr. 25: Zapojení UC3843 pro napěťový režim; převzato z [14]

Napěťová zpětná vazba je odvozena z odporového děliče na výstupu měniče. Napětí děliče je připojeno na invertující vstup chybového zesilovače. Na neinvertujícím vstupu je napětí 2,5 V (viz kap. 2.3.2.1). Zpětnovazební systém se snaží na vstupech chybového zesilovače napětí vyrovnat. Pokud by bylo napětí na invertujícím vstupu nižší než na neinvertujícím, obvod by zvětšil střihu spínacího signálu. Tím by zvýšil výstupní napětí měniče, tedy i napětí na invertujícím vstupu. V opačném případě by obvod napětí snížil. Je možné tedy předpokládat, že napětí na děliči bude 2,5 V. Dělič je připojen na výstupní napětí U_2 . Z toho vyplývá vztah pro výstupní napětí přípravku (2.2).

$$U_2 = 2,5 \left(\frac{R_1 + R_2}{R_2} \right) \quad (2.2)$$

Výstupní napětí přípravku je požadováno proměnné, mezi 5 V a 30 V. Tohoto rozsahu je docíleno pomocí tří rezistorů. Rezistor R_1 je složen ze sériové kombinace pevného rezistoru R_1 a potenciometru R_{V1} . Rezistor R_2 je pevný. Poměr hodnot $R_1 : R_{V1} : R_2$ vychází 1 : 10 : 1. Hodnoty musejí být zvoleny tak, aby děličem protékal zanedbatelný proud vůči výstupnímu proudu měniče. Byly zvoleny hodnoty: $R_1 = 5 \text{ k}\Omega$, $R_{V1} = 50 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 5 \text{ k}\Omega$.

2.3.2.3 Nastavení oscilátoru

K nastavení frekvence oscilátoru slouží pin (RT/CT). Nastavení se provádí dvěma prvky, časovacím rezistorem R_T a kondenzátorem C_T . Kondenzátor C_T se připojuje mezi pin RT/CT a pin GND. Nabíjen bývá z napěťové reference (pin VREF) přes rezistor R_T . (2.3) udává přibližný vztah mezi frekvencí oscilátoru a hodnotami C_T a R_T , viz [14].

$$f = \frac{1,72}{R_T C_T} \quad (2.3)$$

Výrobce integrovaného obvodu doporučuje volit hodnotu R_T mezi 5 k Ω a 100 k Ω a hodnotu C_T mezi 1 nF a 100 nF. Jako možné řešení vychází pro spínací kmitočet 100 kHz $C_T = 1$ nF a $R_T = 17,2$ k Ω . Odpor 17,2 k Ω je získán sériovým spojením hodnot 15 k Ω a 2,2 k Ω . Pro spínací kmitočet 50 kHz vychází $C_T = 1$ nF a $R_T = 34,4$ k Ω . Je volen rezistor 33 k Ω .

2.3.2.4 Kompenzace

Pokud by zpětnovazební smyčka nevhodně obracela fázi signálu, mohlo by dojít k rozkmitání systému. Z tohoto důvodu jsou připojeny mezi pin COMP a VFB prvky, které mají za úkol fázi upravit. Návrh kompenzace není jednoduchý. Na základě doporučení výrobce obvodu UC3843 byla zvolena paralelní kombinace rezistoru 100 k Ω a keramického kondenzátoru 220 pF.

2.3.2.5 Napájení PWM regulátoru

K napájení bude užito pomocného zdroje o napětí 12 V. K napájecímu pinu VCC bude připojen blokovací keramický kondenzátor 100 nF.

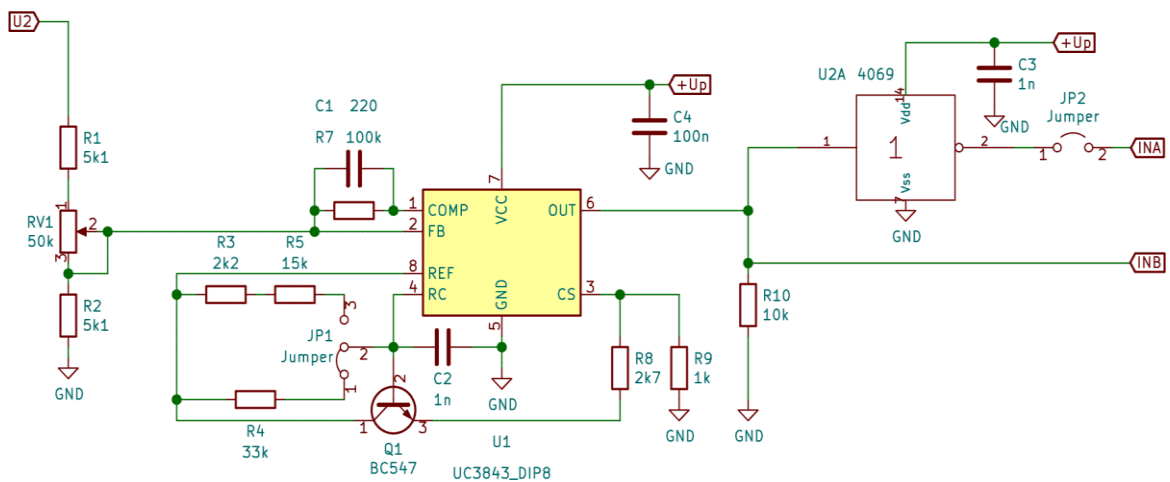
2.3.2.6 Negace PWM signálu

Pokud bude dioda měniče nahrazena tranzistorem, bude nutné vytvořit řídicí signál pro tranzistor. Za předpokladu spjitého režimu měniče bude signál pro druhý tranzistor

negací signálu pro první tranzistor. Vzhledem k úrovni signálu z výstupu obvodu UC3843 o hodnotě 12 V je pro účel negace signálu zvolen CMOS invertor 4069.

2.3.2.7 Schéma bloku

Schéma na obrázku 26 odpovídá výše uvedenému návrhu.

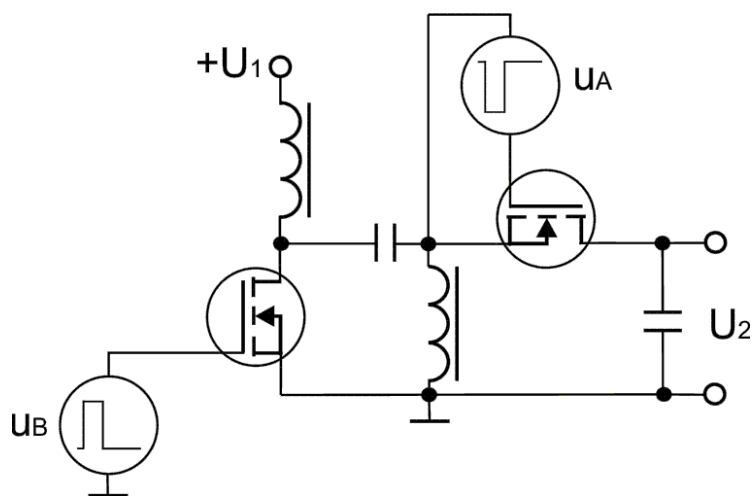


Obr. 26: Schéma zapojení bloku modulátoru PWM

2.3.3 Blok pro řízení tranzistorů

Blok má za úkol zpracovat výstupní signál bloku modulátoru pulsně šířkové modulace na signál vhodný pro spínání hradel tranzistorů měniče.

2.3.3.1 Výběr budiče tranzistorů MOSFE



Obr. 27: Měníč se zdroji řídicích signálů pro tranzistory

Na obrázku 27 je znázorněno schéma měniče s naznačenými zdroji řídicích signálů pro tranzistory. Tyto zdroje je třeba realizovat. Z obrázku je patrné, že zdroje jsou vůči sobě plovoucí. Pro realizaci připadá v úvahu MOSFET budič, který bude napájet hradla tranzistorů z dvou na sobě nezávislých izolovaných větví. Podmínky splňuje obvod 2EDF7275FXUMA1 od firmy Infineon, detaily v [15]. Obvod obsahuje dva izolované výstupní kanály, každý má piny pro vlastní napájení a vlastní společný vodič. Izolovaná je také vstupní část od výstupní. Pevnost izolace je v řádu jednotek kilovoltů, pro účely přípravku zcela postačující.

Schéma na obrázku 28 znázorňuje doporučené rozmístění prvků kolem integrovaného obvodu. Prvky zajišťují nastavení a správnou funkci budiče. Výpočty v následujících kapitolách pocházejí ze zdrojů [15] a [16].

se aktivuje připojením pinu SLDON k pinu GNDI. Přebytké napětí se ztrácí na rezistoru R_{VDDI} , který je připojen mezi napájecí zdroj a pin VDDI.

$$R_{VDDI} \leq \frac{V_{DD} - 3,3 \text{ V}}{I_{VDDI} + 0,5 \text{ mA}} \quad (2.4)$$

Hodnota odporu rezistoru se určí dle vzorce (2.4), kde V_{DD} je napětí zdroje a I_{VDDI} je proud který bude pinem VDDI odebírán. Hodnota I_{VDDI} je pro spínací frekvenci 100 kHz okolo 1,5 mA [16]. Napětí V_{DD} (12 V) bude zajišťovat pomocný zdroj U_P (viz obr 29). Odpor rezistoru R_{VDDI} byl zvolen 3 k Ω .

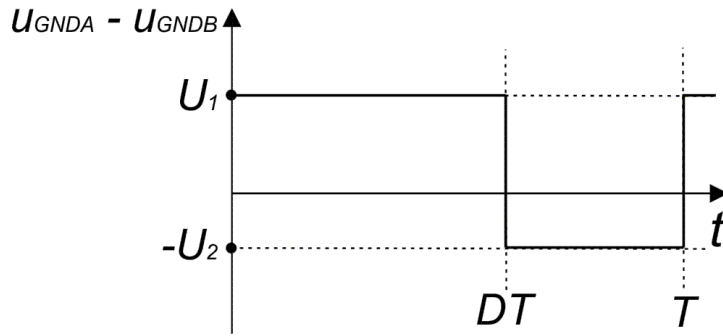
Pro eliminaci poklesů napětí VDDI na parazitních impedancích slouží blokovací kondenzátor C_{VDDI} mezi pinem VDDI a pinem GNDI. Výrobce doporučuje užít keramický kondenzátor s kapacitou 10 nF až 22 nF. Kondenzátor by měl být zapojen co nejbližší k integrovanému obvodu. Pro aplikaci byla zvolena kapacita 18 nF.

2.3.3.4 Napájení výstupní části integrovaného obvodu

Každý ze dvou výstupních kanálů budiče budí jeden tranzistor. Kanály jsou napájeny odděleně. Napájecí napětí může být v rozsahu 4,5 V až 20 V. Vzhledem k použitému tranzistoru, viz kap. 2.3.1.5, bylo zvoleno 12 V.

Kanál B budí tranzistor Q_B . Napájení kanálu B (12 V) je řešeno pomocným zdrojem U_P (viz obr. 29). Společný vodič kanálu (GNDB) je připojen k zemi přípravku. Mezi pin VDDDB a GNDB je připojen blokovací kondenzátor C_{VDDDB} . Jeho výrobcem doporučená minimální hodnota kapacity je dvacetinásobek vstupní kapacity hradla tranzistoru C_{iss} . Byl zvolen keramický kondenzátor o kapacitě 1 μ F.

Kanál A budí tranzistor Q_A . Source tranzistoru je připojen na pin GNDA. Na obrázku 30 je znázorněn průběh napětí mezi piny GNDA a GNDB. Průběh na obrázku odpovídá průběhu napětí na induktoru L_2 , viz kapitolu 1.2.4.



Obr. 30: Průběh napětí mezi piny GNDA a GNDB

Napájení kanálu A je řešeno zapojením nazývaným bootstrap, viz obr. 29. Další informace o zapojení bootstrap v [17]. Vždy když je napětí pinu GNDA (obr. 30) v dolní úrovni, je z pomocného zdroje U_P nabíjen přes diodu D_B kondenzátor C_{VDDA} . Kondenzátor C_{VDDA} slouží jako zdroj napětí pro horní kanál.

$$C_{VDDA} = \frac{Q_{CVDDA}}{\Delta U_{VDDA}} = \frac{Q_g + D_{MAX} I_{VDDA} \frac{1}{f}}{\Delta U_{CVDDA}} \quad (2.5)$$

(2.5) udává vztah pro výpočet kapacity C_{VDDA} . Q_{CVDDA} je náboj, který je nutno dodat kondenzátoru C_{VDDA} za jednu periodu, Q_g je náboj hradla pro sepnutí tranzistoru, I_{VDDA} klidový proud do pinu VDDA, D_{MAX} maximální střída PWM signálu, f frekvence spínání, a ΔU_{VDDA} zvlnění napětí na kondenzátoru C_{VDDA} . Pro frekvenci 100 kHz a zvlnění 1 V vychází kapacita C_{VDDA} 24 nF. S velkou rezervou byl zvolen keramický kondenzátor s kapacitou 1 μ F.

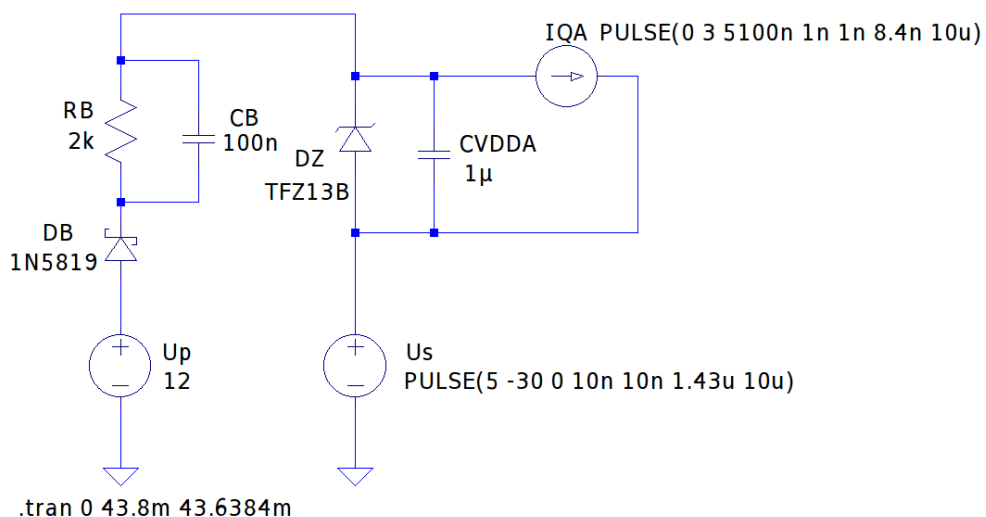
„Bootstrapovou“ diodu D_B je nutno volit na základě několika parametrů. První parametr je maximální střední proud diodou. Ten je určen rovnicí (2.6).

$$I_{AV,MAX} = \frac{Q_{CVDDA}}{1 - D_{MAX}} f \quad (2.6)$$

Po dosazení proud vychází 17 mA. Další parametr je maximální závěrné napětí diody. To by mělo být vyšší než $U_{IMAX} - U_P = 18$ V. Dále je důležité, aby byla dioda dostatečně rychlá pro včasné nabíjení kondenzátoru. Doba závěrného zotavení diody by měla být mnohonásobně menší než perioda spínání. Byla zvolena Schottkyho dioda 1N5819 [18]

s maximálním středním proudem 1 A, závěrným napětím 40 V a typickou dobou závěrného zotavení 10 ns.

Protože dolní úroveň napětí průběhu na obr. 30 ($-U_2$) může nabývat hodnot -30 V až -5 V, je třeba regulovat napětí, na které je nabíjen C_{VDDA} . K regulaci slouží Zenerova dioda D_Z , rezistor R_B a kondenzátor C_B . Dioda D_Z omezuje svým Zenerovým napětím napětí, na které se může nabít „bootstrapový“ kondenzátor C_{VDDA} . Regulátor je vhodné nastavit tak, aby napájecí napětí kanálu A bylo kolem 12 V. Také je snaha minimalizovat výkon, který je regulátorem mařen. Proto je třeba, aby tekla Zenerovou diodou co nejmenší proud. Pracovní bod Zenerovy diody je proto dobré nastavit těsně před koleno voltampérové charakteristiky diody. Byla zvolena dioda BZX83V013 se Zenerovým napětím 13 V. Hodnota odporu rezistoru $R_B = 2\text{ k}\Omega$ a kapacity kondenzátoru $C_B = 100\text{ nF}$ byla zvolena na základě simulace zapojení bootstrapu v programu LTSpice. Volba hodnot byla kompromisem mezi výsledným napětím U_{VDDA} a proudem protékajícím Zenerovou diodou. Pro $U_1 = 5\text{ V}$ a $U_2 = 30\text{ V}$ vychází střední hodnota napětí u_{VDDA} 12,9 V a střední hodnota proudu i_{DZ} 11,4 mA. Pro $U_1 = 30\text{ V}$ a $U_2 = 5\text{ V}$ vychází střední hodnota napětí u_{VDDA} 10,9 V a střední hodnota proudu i_{DZ} 11 nA.



Obr. 31: Simulační schéma obvodu bootstrap; program LTSpice

Obrázek 31 zobrazuje simulační schéma. Proudový zdroj IQA modeluje odběr tranzistoru Q_A při spínání. Napěťový zdroj U_S modeluje napětí na source tranzistoru Q_A .

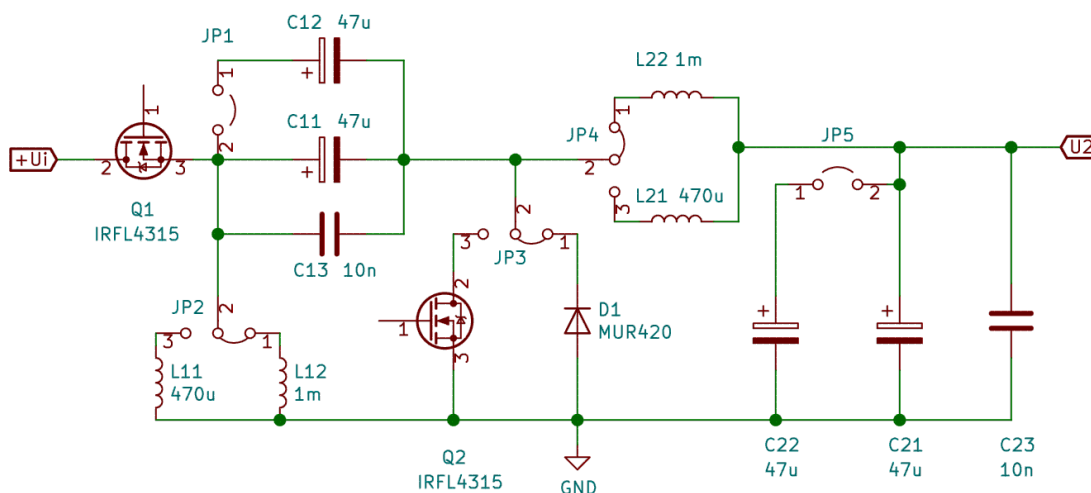
2.4 Návrh měniče typu ZETA

2.4.1 Blok vlastního měniče ZETA

Zapojení vlastního měniče vychází z principiálního zapojení na obr. 15. Stejně jako v přípravku s měničem SEPIC bude změna proti principiálnímu zapojení spočívat v použití tranzistoru jako spínače S a v možnosti nahrazení diody D tranzistorem. Dále v možnosti připojení dvou hodnot indukčností a kapacit.

Z kapitol 1.2.4 a 1.2.5 plyne, že obě zapojení mají stejný převodní vztah napětí, i stejné vztahy pro volbu indukčností cívek. Dále platí stejné požadavky pro výběr spínacích tranzistorů a usměrňovací diody, viz kap. 2.3.1 a [19]. Vzhledem k požadavkům na přípravek, viz kap. 2.1, bude zapojení vlastního měniče ZETA osazeno stejnými prvky jako zapojení vlastního měniče SEPIC, viz kap. 2.3.1. Tím bude dosaženo vhodných podmínek pro porovnávání obou přípravků.

Na obrázku 32 je znázorněno výsledné schéma bloku vlastního měniče ZETA, které vzniklo modifikovaným uspořádáním prvků z návrhu měniče SEPIC, viz kap. 2.3.1.7.



Obr. 32: Schéma zapojení bloku vlastního měniče ZETA

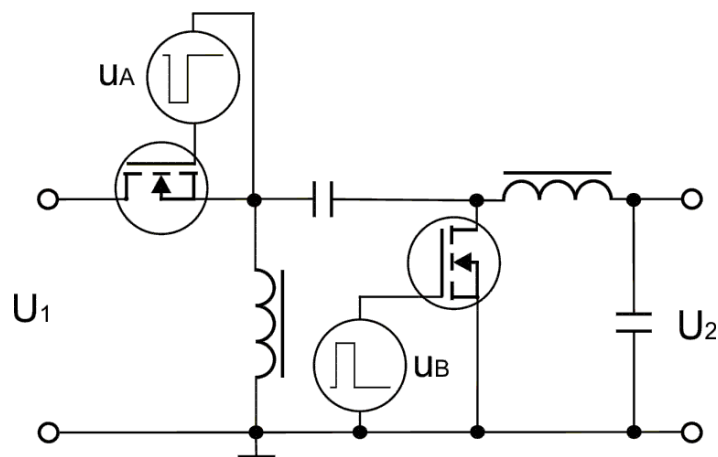
2.4.2 Blok modulátoru pulsně šířkové modulace

Na blok modulátoru pulsně šířkové modulace pro měnič ZETA jsou kladeny zcela stejné požadavky jako na blok modulátoru pro měnič SEPIC, viz kap. 2.3.2. Pro oba přípravky budou použita stejná zapojení. Schéma bloku je znázorněno na obrázku 26 v kapitole 2.3.2.7.

2.4.3 Blok pro řízení tranzistorů

2.4.3.1 Výběr budiče tranzistorů MOSFE

Podobně, jako v kapitole 2.3.3.1 je třeba realizovat dva vzájemně izolované zdroje u_A a u_B , kterými budou ovládány hradla tranzistorů. Schéma měniče s naznačenými zdroji je na obrázku 33.



Obr. 33: Měnič se zdroji řídicích signálů pro tranzistory

Požadavkům na řízení hradel tranzistorů vyhovuje stejný integrovaný obvod (2EDF7275FXUMA1) jako u přípravku s měničem SEPIC, viz. kap. 2.3.3.1.

2.4.3.2 Napájení vstupní části integrovaného obvodu

Stejně jako u přípravku SEPIC bude využito pomocného zdroje U_P o napětí 12 V. Opět bude aktivován regulátor napájecího napětí vstupní části uvnitř integrovaného obvodu. Řešení je popsáno v kapitole 2.3.3.3.

2.4.3.3 Napájení výstupní části integrovaného obvodu

Napájení kanálu B bude řešeno stejným způsobem jako v přípravku s měničem SEPIC, viz kap. 2.3.3.4. O napájení se stará pomocný zdroj U_P .

Napájení kanálu A je třeba izolovat od kanálu B, viz obr. 33. K tomu bude využito integrovaného DC/DC měniče IA1212S, viz [20]. Vstupní i výstupní napětí měniče je 12 V. Výstup je od vstupu izolován, pevnost izolace je 1000 V. Měnič dokáže přenášet výkon 1 W, pro účely přípravku plně postačující. Mezi vstupní svorky měniče bude připojen blokovací keramický kondenzátor C_B s kapacitou 100 nF. Mezi piny VDDA a GNDA budiče bude připojen blokovací keramický kondenzátor C_{VDDA} s kapacitou 1 μ F, viz kap. 2.3.3.4.

2.3.3.2 Schéma bloku

Na obrázku 34 je znázorněno schéma bloku pro řízení tranzistorů měniče ZETA, které odpovídá návrhu.

Na přípravcích byly měřeny zatěžovací charakteristiky pro různé režimy při rozsahu výstupního proudu 0 mA až 100 mA. Níže budou uvedeny výsledné grafy, naměřené hodnoty jsou obsaženy v příloze 8.9.

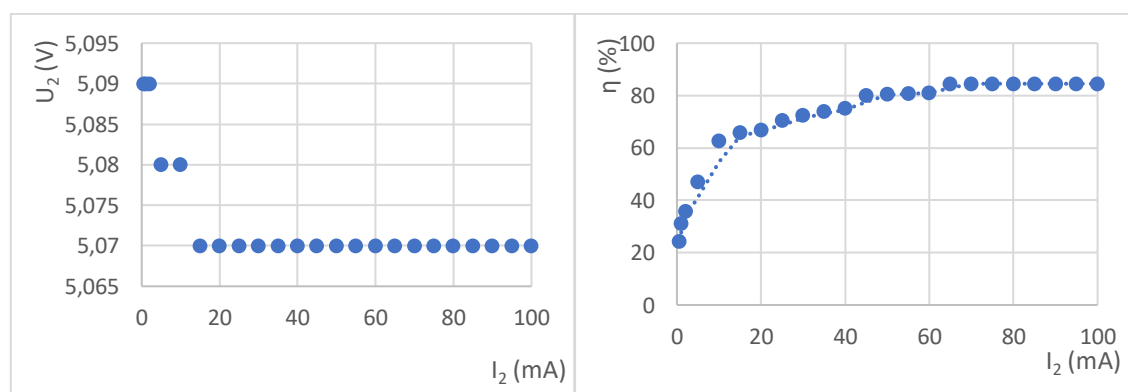
3.1.1 Zatěžovací charakteristiky přípravku ZETA

3.1.1.1 Měření 1

První měření (obr. 35) bylo uskutečněno pro snižující režim z 15 V na 5 V. Na přípravku byla zvolena indukčnost cívek 470 μH , frekvence spínání 100 kHz a usměrnění pomocí diody.

Při zatěžování (obr. 35a) nejprve výstupní napětí klesá z 5,09 V na 5,07 V. Od proudu přibližně 20 mA se charakteristika podobá charakteristice ideálního zdroje.

Účinnost měniče (obr. 35b) s rostoucím výstupním proudem narůstá až na 85 % při proudu 65 mA. Tuto účinnost lze pro DC/DC měnič považovat za vyhovující.



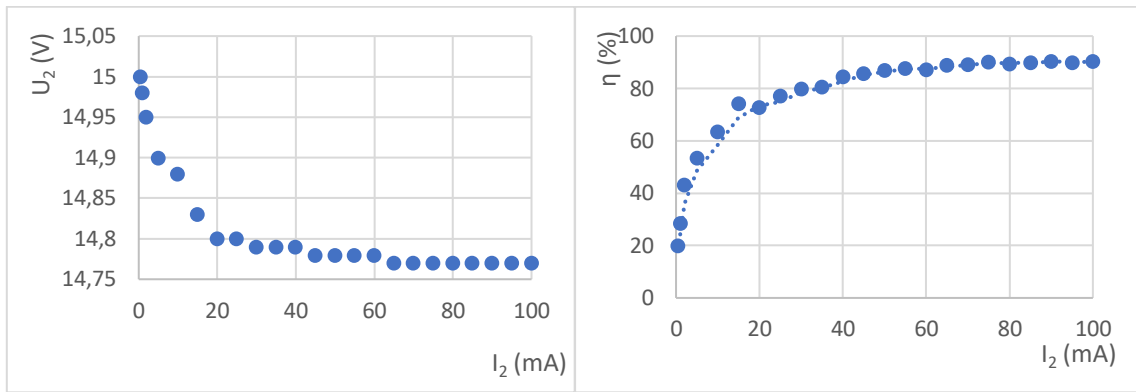
a) Zatěžovací charakteristika

b) Účinnost měniče

Obr. 35: Naměřené parametry, ZETA, 15/5, dioda, 470 μH , 100 kHz

3.1.1.2 Měření 2

Druhé měření (obr. 36) bylo uskutečněno pro převod z 15 V na 15 V. Indukčnost cívek byla 470 μH , frekvence spínání 100 kHz a usměrnění pomocí diody.



a) Zatěžovací charakteristika

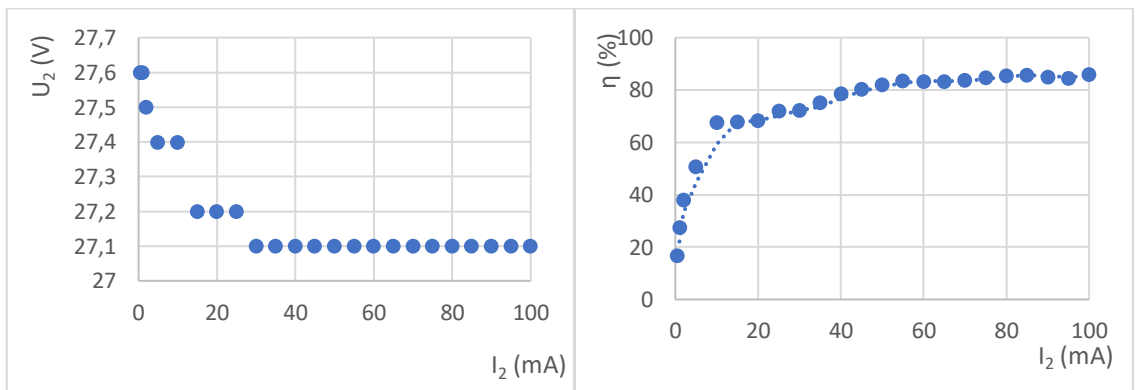
b) Účinnost měniče

Obr. 36: Naměřené parametry, ZETA, 15/15, dioda, 470 μ H, 100 kHz

V měřeném rozsahu výstupních proudů kleslo výstupní napětí z 15 V na 14,77 V. V této variantě nastavení přípravku bylo dosaženo nejvyšší účinnosti 90 %.

3.1.1.3 Měření 3

Třetí měření (obr. 37) bylo uskutečněno pro zvyšující režim z 15 V na 30 V. Indukčnost cívek byla 470 μ H, frekvence spínání 100 kHz a usměrnění pomocí diody.



a) Zatěžovací charakteristika

b) Účinnost měniče

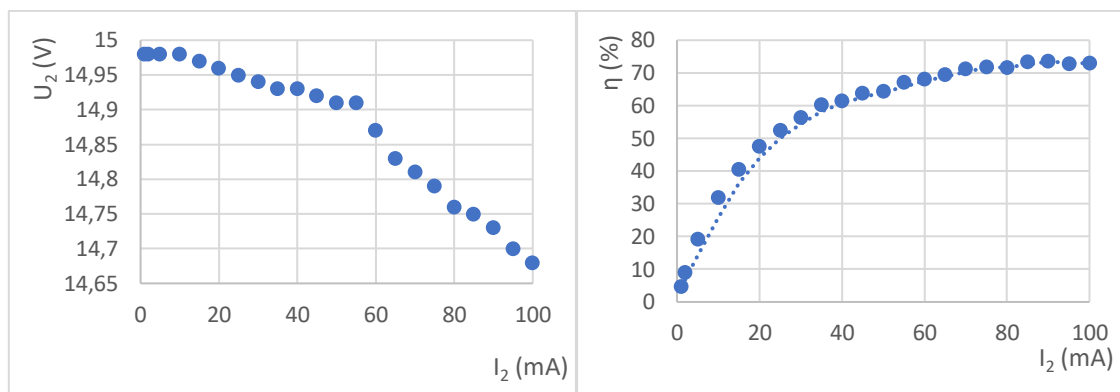
Obr. 37: Naměřené parametry, ZETA, 15/30, dioda, 470 μ H, 100 kHz

Napětí kleslo z 27,6 V na 27,1 V. Nejvyšší dosažená účinnost byla 86 %.

3.1.1.4 Měření 4

Čtvrté měření (obr. 38) bylo uskutečněno pro převod z 15 V na 15 V s pokusem o synchronní usměrnění. Usměrňovací dioda byla nahrazena řízeným tranzistorem.

Indukčnost cívek byla 470 μH , frekvence spínání 100 kHz.



a) Zatěžovací charakteristika

b) Účinnost měniče

Obr. 38: Naměřené parametry, ZETA, 15/15, synchronní usměrnění, 470 μH , 100 kHz

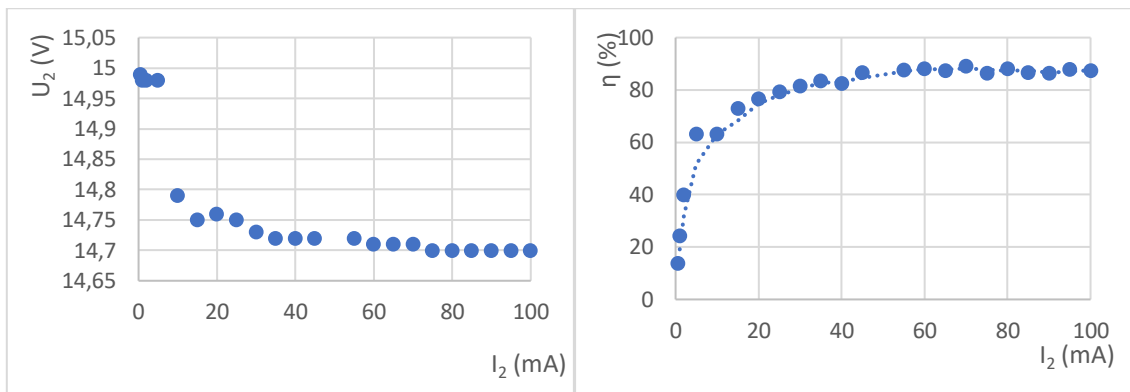
Narozdíl měření s usměrňovací diodou (obr. 36) má zatěžovací charakteristika stále klesající trend. Vnitřní odpor zdroje vychází okolo 3 Ω .

Bylo dosaženo maximální účinnosti jen 73 %, při měření s diodou (obr. 36) bylo dosaženo 90 %.

Zapojení se synchronním usměrňovačem (obr. 38) má horší vlastnosti než zapojení s diodou. Možné příčiny jsou diskutovány v kapitole 5.

3.1.1.5 Měření 5

Páté měření (obr. 39) bylo uskutečněno pro převod z 15 V na 15 V. Indukčnost cívek byla 1 mH, frekvence spínání 100 kHz a usměrnění pomocí diody.



a) Zatěžovací charakteristika

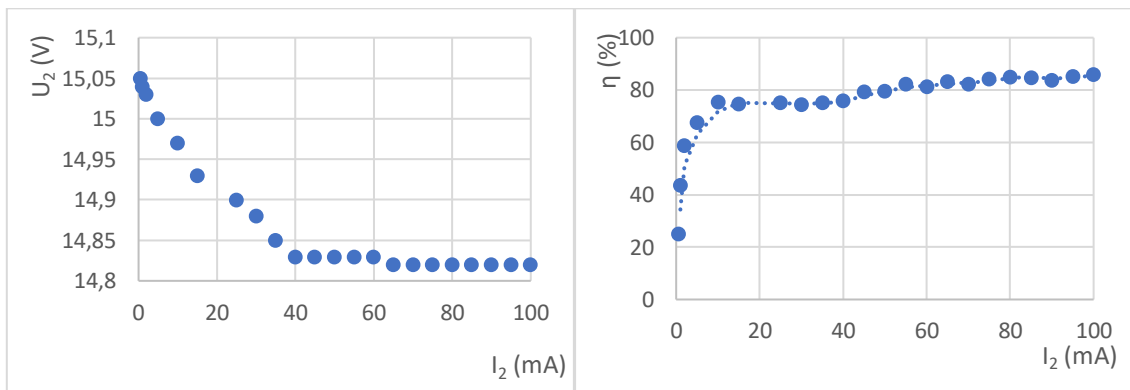
b) Účinnost měniče

Obr. 39: Naměřené parametry, ZETA, 15/15, dioda, 1 mH, 100 kHz

Změna indukčnosti z 470 μH na 1 mH nezavinila žádnou podstatnou změnu vlastností měniče. Došlo ke snížení maximální dosažené účinnosti z 90 % na 88 % a k mírnému zvýšení poklesu výstupního napětí.

3.1.1.6 Měření 6

Šesté měření (obr. 40) bylo uskutečněno pro převod z 15 V na 15 V. Indukčnost cívek byla 1 mH, frekvence spínání 50 kHz a usměrnění pomocí diody.



a) Zatěžovací charakteristika

b) Účinnost měniče

Obr. 40: Naměřené parametry, ZETA, 15/15, dioda, 1 mH, 50 kHz

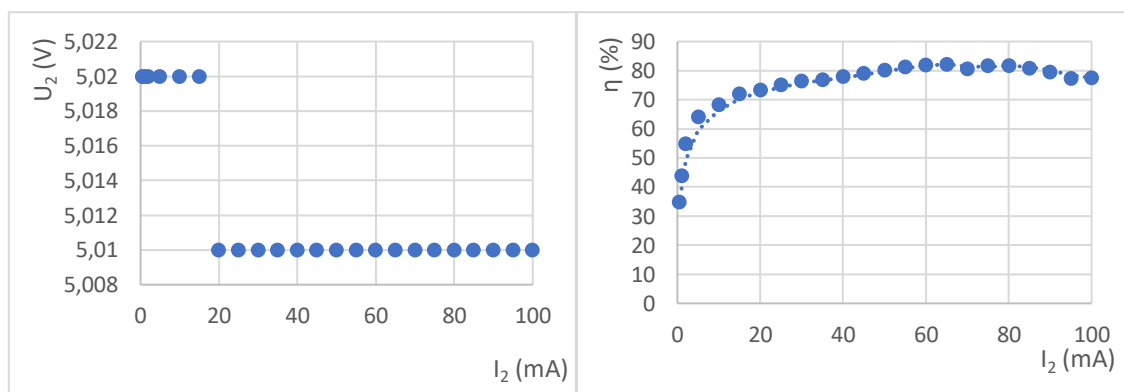
Změna frekvence spínání ze 100 kHz na 50 kHz se projevila především v posunu hladiny výstupního proudu, od které se zatěžovací charakteristika přiblíží k charakteristice ideálního zdroje. To nastává okolo 40 mA. Dále se mírně zmenšila účinnost měniče.

3.1.2 Zatěžovací charakteristiky přípravku SEPIC

Měření proběhla ve stejné konfiguraci nastavení přípravku jako u měření měniče ZETA. Vynecháno je měření se synchronním usměrňovačem, protože se synchronní usměrnění nepodařilo na přípravku SEPIC zprovoznit, více v kapitole 5.

3.1.2.1 Měření 7

Sedmé měření (obr. 41) bylo uskutečněno pro snižující režim z 15 V na 5 V. Na přípravku byla zvolena indukčnost cívek 470 μH , frekvence spínání 100 kHz a usměrnění pomocí diody.



a) Zatěžovací charakteristika

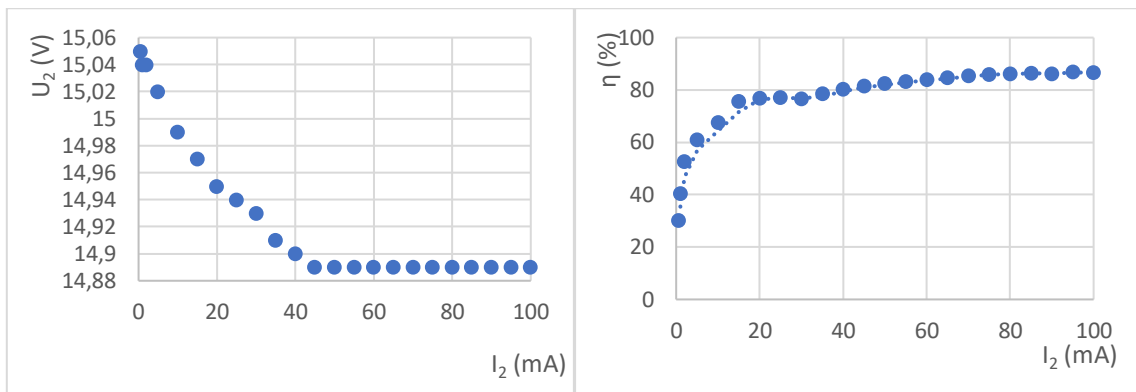
b) Účinnost měniče

Obr. 41: Naměřené parametry, SEPIC, 15/5, dioda, 470 μH , 100 kHz

Od výstupního proudu 20 mA je na výstupu měniče udržováno konstantní napětí 5,01 V. Nejvyšší účinnosti (82 %) bylo dosaženo při výstupním proudu 65 mA.

3.1.2.2 Měření 8

Osmé měření (obr. 42) bylo uskutečněno pro převod z 15 V na 15 V. Indukčnost cívek byla 470 μH , frekvence spínání 100 kHz a usměrnění pomocí diody.



a) Zatěžovací charakteristika

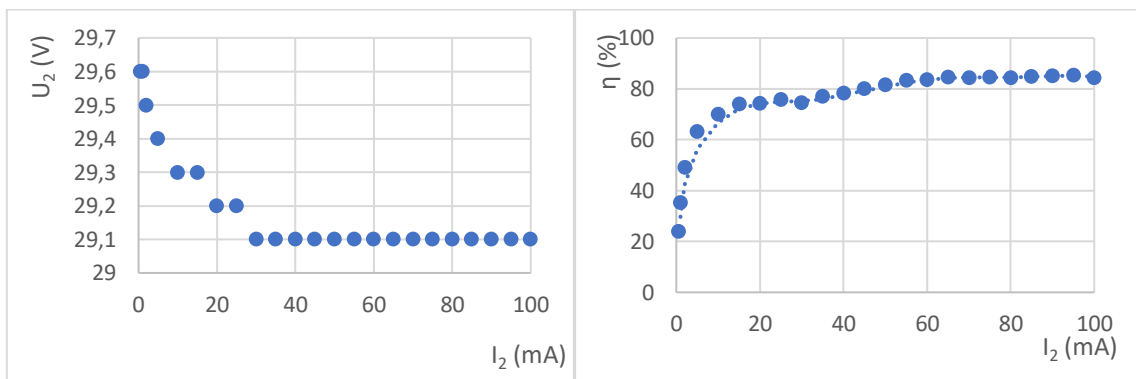
b) Účinnost měniče

Obr. 42: Naměřené parametry, SEPIC, 15/15, dioda, 470 μ H, 100 kHz

Výstupní napětí klesá s rostoucím výstupním proudem z 15,05 V na 14,89 V, poté je od výstupního proudu 45 mA konstantní. Nejvyšší dosažená účinnost byla 87 %.

3.1.2.3 Měření 9

Deváté měření (obr. 43) bylo uskutečněno pro převod z 15 V na 30 V. Indukčnost cívek byla 470 μ H, frekvence spínání 100 kHz a usměrnění pomocí diody.



a) Zatěžovací charakteristika

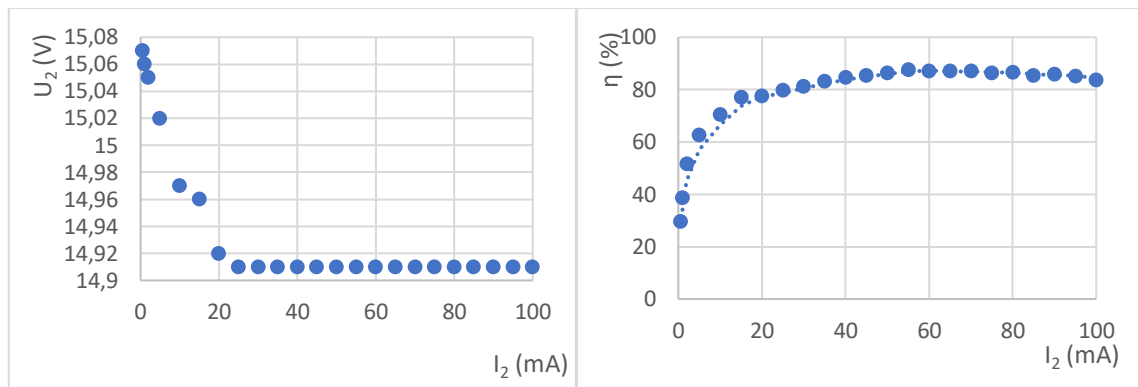
b) Účinnost měniče

Obr. 43: Naměřené parametry, SEPIC, 15/30, dioda, 470 μ H, 100 kHz

Od výstupního proudu 30 mA drží výstupní napětí hodnotu 29,1 V. Nejvyšší účinnosti (85 %) bylo dosaženo při proudu 95 mA.

3.1.2.4 Měření 10

Desáté měření (obr. 44) bylo uskutečněno pro převod z 15 V na 15 V. Indukčnost cívek byla 1 mH, frekvence spínání 100 kHz a usměrnění pomocí diody.



a) Zatěžovací charakteristika

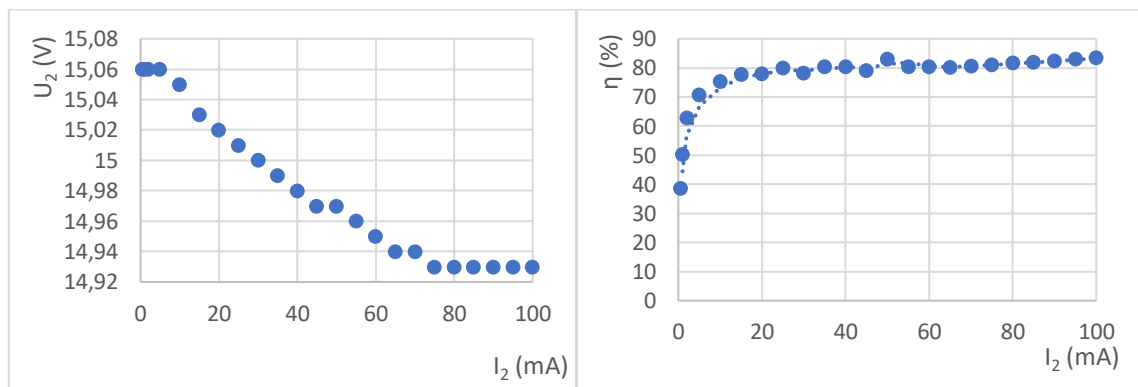
b) Účinnost měniče

Obr. 44: Naměřené parametry, SEPIC, 15/15, dioda, 1 mH, 100 kHz

Změna indukčnosti, viz obrázky 42 a 44, téměř nezměnila vlastnosti měniče.

3.1.2.4 Měření 11

Desáté měření (obr. 45) bylo uskutečněno pro převod z 15 V na 15 V. Indukčnost cívek byla 470 μ H, frekvence spínání 50 kHz a usměrnění pomocí diody.



a) Zatěžovací charakteristika

b) Účinnost měniče

Obr. 45: Naměřené parametry, SEPIC, 15/30, dioda, 470 μ H, 50 kHz

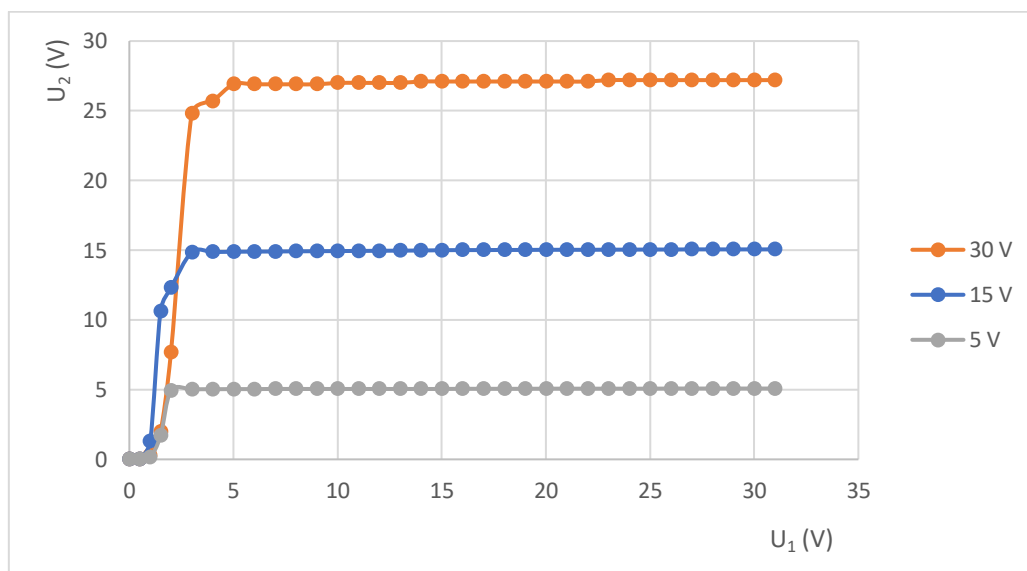
Změna frekvence spínání ze 100 kHz na 50 kHz prodloužila klesající trend zatěžovací charakteristiky, viz obr. 42 a 45. Dále se mírně zmenšila účinnost měniče.

3.2 Převodní charakteristika

Převodní charakteristika je závislost výstupního napětí zdroje U_2 na vstupním napětí U_1 . V ideálním případě by mělo být výstupní napětí na vstupním napětí nezávislé. Parametrem převodní charakteristiky bývá konstantní hodnota výstupního proudu nebo zatěžovacího odporu [4]. V měření na přípravcích byl zvolen jako parametr konstantní výstupní proud 50 mA. Měření byla realizována se spínacím kmitočtem 100 kHz, indukčností cívek 470 μH a usměrněním pomocí diody. Níže budou uvedeny výsledné grafy, naměřené hodnoty jsou obsaženy v příloze 8.10.

3.2.1 Převodní charakteristiky na přípravku ZETA

Na obrázku 46 jsou vyneseny naměřené převodní charakteristiky přípravku ZETA. Převodní charakteristika byla měřena pro tři hodnoty nastavení výstupního napětí, pro minimum 5 V, střed 15 V a maximum 30 V.

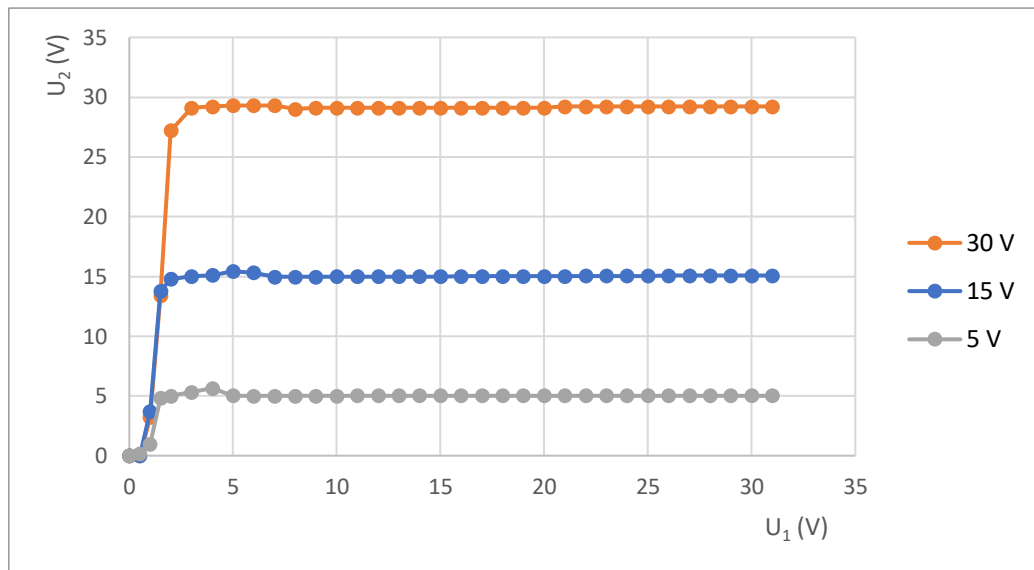


Obr. 46: Převodní charakteristiky, ZETA, $I_2 = 50 \text{ mA}$, $L = 470 \mu\text{H}$, $f = 100 \text{ kHz}$

Dle naměřených charakteristik začíná přípravek pracovat od vstupního napětí kolem 2 V. Při vstupním napětí v intervalu 5 V až 30 V se výstupní napětí změní až o 3 % své hodnoty.

3.2.2 Převodní charakteristiky na přípravku SEPIC

Na obrázku 47 jsou vyneseny naměřené převodní charakteristiky přípravku SEPIC. Převodní charakteristika byla měřena pro stejné hodnoty nastaveného výstupního napětí, jako u přípravku ZETA, viz kap. 3.2.1.



Obr. 47: Převodní charakteristiky, SEPIC, $I_2 = 50 \text{ mA}$, $L = 470 \text{ } \mu\text{H}$, $f = 100 \text{ kHz}$

Dle naměřených charakteristik začíná přípravek pracovat od vstupního napětí kolem 1,5 V. Při vstupním napětí v intervalu 5 V až 30 V se výstupní napětí změní až o 3 % své hodnoty.

4. Výsledky

4.1 Splnění požadavků

Požadavky, které mají přípravky splňovat:

1. Osazení obou bloků samotného měniče stejnými prvky
2. Stejný způsob regulace výstupního napětí.
3. Možnost demonstrovat různé režimy činnosti měniče.
4. Možnost změny frekvence
5. Možnost změny střídání
6. Změna velikosti induktorů a kapacitorů
7. Možnost nahrazení usměrňovací diody tranzistorem
8. Výstupní napětí v rozsahu 5 V až 30 V
9. Maximální výstupní proud 100 mA

Výsledky práce:

1. Vzhledem k podobnosti vztahů pro návrh měniče SEPIC a měniče ZETA, viz kapitoly 2.3.1 a 2.4.1, byly bloky vlastního měniče osazeny stejnými prvky. Rozdíl je pouze v jejich obvodovém zapojení.
2. Pro oba měniče bylo použito stejné zapojení bloku PWM regulátoru.
3. Oba přípravky mohou, jak snižovat, tak zvyšovat napětí. Indukčnosti cívek byly navrženy tak, aby měnič mohl pracovat v závislosti na výstupním proudu ve spojitým i nespojitým režimu.
4. Na přípravcích lze provést pomocí jumperu změnu spínací frekvence mezi 100 kHz a 50 kHz.
5. Střídání PWM signálu lze nastavovat polohou běžce trimru výstupního děliče.
6. Přípravky umožňují polohou jumperů volit mezi dvěma hodnotami indukčnosti, 470 μH a 1 mH. Dále přípravky umožňují volbu kapacity vazebního a výstupního kondenzátoru mezi 47 μF a 94 μF .

7. Na přípravcích je možné volit mezi usměrňovací diodou a tranzistorem pomocí jumperu. Dále lze odpojit řízení tranzistoru. S možností synchronního usměrnění je počítáno za předpokladu spojitého režimu měniče. Synchronní usměrnění se podařilo zprovoznit na přípravku ZETA, ale s nižší účinností než s diodou, viz kap. 3.1.1. Při pokusu o synchronní usměrňovač u přípravku SEPIC, nedokázal přípravek regulovat výstupní napětí. Problém je dále diskutován v kapitole 5.
8. Rozsah výstupního napětí u přípravku ZETA byl naměřen 5,1 V až 27,1 V. U přípravku SEPIC byl naměřen rozsah 5,0 V až 29,1 V. Možná úprava rozsahu je diskutována v kapitole 5.
9. Přípravek byl otestován do zatížení 100 mA, viz kap. 3.1.

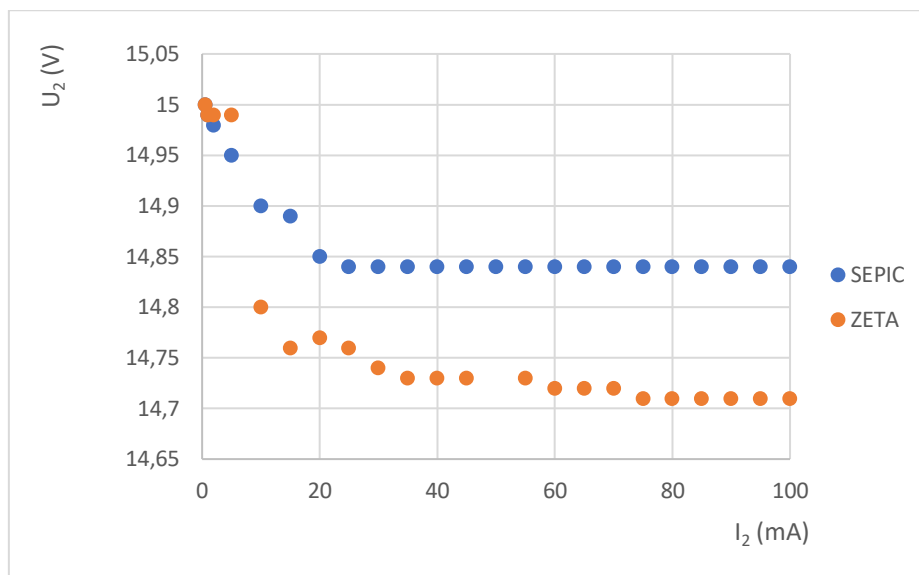
4.2 Výsledná konstrukce přípravků

Z důvodu předpokládaného využití pro výuku byly přípravky vyrobeny z diskrétních součástek. Přípravky jsou osazeny měřicími body pro připojení sondy osciloskopu. Ukázky změřených průběhů napětí jsou obsaženy v příloze 8.8.

Šablony DPS jsou obsaženy v přílohách 8.4 a 8.5. Fotografie přípravků jsou v přílohách 8.6 a 8.7.

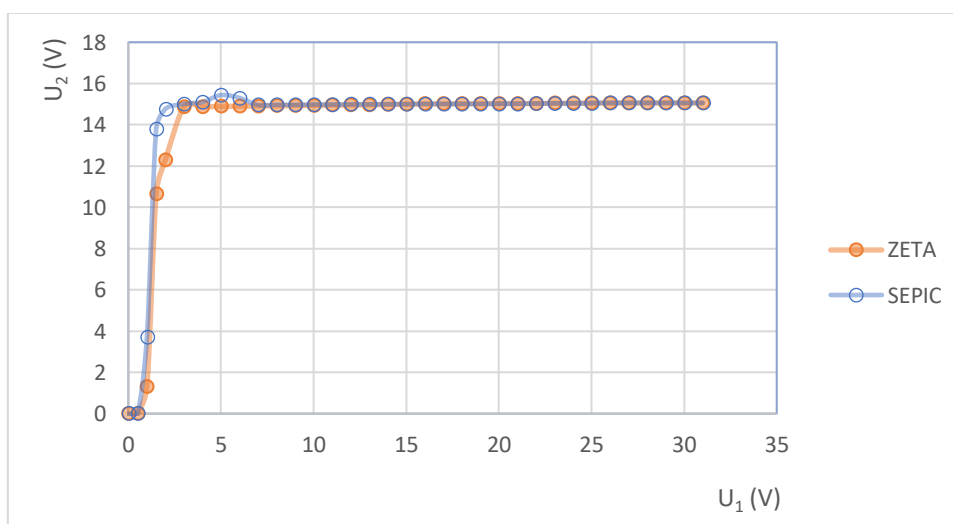
4.3 Porovnání vlastností přípravků

Naměřené zatěžovací charakteristiky (kap. 3.1) obou přípravků mají průběh stejného tvaru. Charakteristika přípravku ZETA klesá trochu rychleji než charakteristika přípravku SEPIC. Přípravek ZETA má větší vnitřní odpor než přípravek SEPIC. Na obrázku 48 jsou pro porovnání vyneseny zatěžovací charakteristiky obou přípravků se stejným obvodovým nastavením ($L = 1 \text{ mH}$, $f = 100 \text{ kHz}$, $U_1 = 15 \text{ V}$, $U_2 = 15 \text{ V}$).



Obr. 48: Zatěžovací charakteristiky, 15/15, dioda, 1 mH, 100 kHz

Na obrázku 49 jsou pro porovnání vyneseny převodní charakteristiky obou přípravků se stejným obvodovým nastavením ($L = 470 \mu\text{H}$, $f = 100 \text{ kHz}$, $U_1 = 15 \text{ V}$, $U_2 = 15 \text{ V}$, $I_2 = 50 \text{ mA}$). Naměřené převodní charakteristiky obou přípravků jsou srovnatelné. Liší se hlavně mírným nárůstem a následným poklesem výstupního napětí u přípravku SEPIC v okolí $U_1 = 4 \text{ V}$. To je zaviněno nepravidelnou činností měniče, problém je dále diskutován v kap. 5.



Obr. 49: Převodní charakteristiky, 15/15, 470 μH , 100 kHz, 50 mA

Dosažené účinnosti obou přípravků jsou srovnatelné. Při ekvivalentním nastavení přípravků ($L = 470 \mu\text{H}$, $f = 100 \text{ kHz}$, $U_1 = 15 \text{ V}$, $U_2 = 15 \text{ V}$) dosáhl přípravek SEPIC maximální účinnosti 87 %, přípravek ZETA 90 %.

Přípravky SEPIC a ZETA se liší především spojitostí vstupního a výstupního proudu. Měnič ZETA má nespojitý vstupní proud. S tím souvisí problém kolísání vstupního napětí přípravku. Měnič SEPIC má nespojitý výstupní proud. S tím souvisí problém vstupu rušivých signálů do zpětné vazby. Problémy jsou dále diskutovány v kapitole 5.

5. Diskuse

V této kapitole budou diskutovány problémy, které se vyskytly při realizaci přípravků, a budou hledána jejich řešení.

Synchronní usměrnění

Přípravky umožňují nahradit usměrňovací diodu tranzistorem. Tranzistor nahrazující diodu je řízen negací řídicího signálu druhého tranzistoru. S náhradou diody a synchronním usměrněním je počítáno pouze ve spojitém režimu činnosti měniče. Cíl je demonstrovat, že tento způsob řízení synchronního usměrnění nefunguje v nespojitém režimu.

Aby mohlo synchronní usměrnění pracovat ve všech režimech měniče, bylo by třeba detekovat, kdy se má tranzistor zavřít. Řešení by mohlo být realizováno senzorem (např. přístrojový zesilovač), který by měřil napětí mezi sourcem a drainem tranzistoru. Pokud by napětí kleslo k nule, bylo by logickými obvody odpojeno řízení tranzistoru.

U zapojení ZETA bylo synchronní usměrnění ve spojitém režimu zprovozněno, ale účinnost měniče byla přibližně o 20 % nižší než při použití diody. To mohlo být způsobeno nedostatečným zpožděním mezi zavřením prvního a otevřením druhého tranzistoru.

Při pokusu o synchronní usměrnění u přípravku SEPIC, nedokázal přípravek regulovat výstupní napětí a měl velký odběr proudu. Příčina mohla být v rušivém signálu, který se dostával z výstupu měniče na vstup PWM regulátoru. Problém je diskutován níže.

Nestabilní vstupní napětí u přípravku ZETA

Zapojení ZETA se vyznačuje nespojitým vstupním proudem. Tento proud má za následek kolísání vstupního napětí. Pokud je měnič napájen ze zdroje s velkým vnitřním odporem, napětí kolísá více. Problém byl do jisté míry vyřešen přidáním kondenzátoru o kapacitě 1000 μF na vstup přípravku.

Rušivý signál u přípravku SEPIC

V určitých případech (převážně ve zvyšujícím režimu z 5 V na větší napětí než 20 V) docházelo k jevu, kdy nebyl průběh řídicího PWM signálu pravidelný. Signál byl po nějakou dobu nulový. Poté začal být obdélníkový s nárůstem střídý. Dále dosáhla střída maxima a začala klesat. Následně byl signál opět nějakou dobu nulový. Průběh řídicího signálu nebylo možné jednoduchým způsobem zanezt do jednoho obrázku.

Tento nepravidelný režim byl zřejmě způsoben rušivým signálem, který se dostával z výstupu měniče na vstup PWM regulátoru. Rušivý signál mohl souviset s nespojitým průběhem výstupního proudu, typickým pro zapojení SEPIC.

Problém byl řešen připojením filtračního kondenzátoru o kapacitě 1000 μF na výstup přípravku. Na obrázku 50 je zachycen průběh řídicího signálu po připojení kondenzátoru. Synchronní usměrnění se zprovoznit nepodařilo.



Obr. 50: Řídicí signál po připojení filtračního kondenzátoru, SEPIC 5/30, 470 μH , 100 kHz, 60 mA

Celková nestabilita přípravků

Maximální uvažovaný výstupní proud přípravků je 100 mA. Pokud je nad touto hranicí proud dále zvyšován, začnou být přípravky od určité hodnoty proudu nestabilní. Tato hodnota závisí na aktuálním nastavení přípravku.

Nestabilita může být způsobena, jako v předchozím bodě, pronikáním rušivých signálů do zpětné vazby obvodu. Také se mohou projevit různé parazitní indukčnosti a kapacity v přípravku. Vzhledem k účelu přípravku pro výuku, byl přípravek konstruován z diskrétních součástek. Tímto uspořádáním byl získán obvod s rozprostřenými parametry, pro konstrukci podobných měničů nevhodný.

Aby byl přípravek SEPIC schopný dodávat maximální výstupní proud 100 mA, byly vyrobeny celkem tři obvody, z nichž až třetí požadavek splňoval v celém rozsahu vstupních a výstupních napětí. Obvody se lišily prostorovým uspořádáním prvků, poslední měl výstupní část umístěnou vedle vstupu PWM regulátoru.

Nestabilita přípravků by se dala dále vylepšovat jejich prostorovým uspořádáním a miniaturizací, popřípadě integrací. Dále by mohlo pomoci vyměňovat celé cívky místo přepínání pomocí jumperů, popřípadě navinout cívky na jedno těleso a přepínat odbočky.

Rozsah výstupního napětí

Rozsah výstupního napětí u přípravku ZETA byl naměřen 5,1 V až 27,1 V. U přípravku SEPIC byl naměřen rozsah 5,0 V až 29,1 V. Hodnoty se liší díky toleranci rezistorů výstupního děliče. Rozsah napětí by šel snadno upravit změnou hodnot rezistorů. Pro účely přípravku však úprava není třeba.

6. Závěr

Cíl práce byl navrhnout a realizovat funkční přípravky pro zkoumání a porovnávání vlastností zdrojů ZETA a SEPIC. Na základě požadavků, viz kap. 2.1, byly navrženy a vyrobeny dva finální přípravky. Na přípravcích byla provedena kontrolní měření, která ověřovala, zda přípravky požadavky splňují. Přípravky vyhovují požadovaným rozsahům napětí a proudů. Přípravky jsou koncipovány pro výuku, jsou realizovány diskrétními součástkami s množstvím měřicích bodů pro osciloskop. Také je umožněno volit mezi dvěma hodnotami spínací frekvence, indukčnosti cívek a kapacity vazebních kondenzátorů. Dále byl učiněn pokus o synchronní usměrnění při spojitém režimu činnosti měniče. To se podařilo zprovoznit jen u přípravku ZETA, viz kap. 5. Byl zpracován vzorový protokol o měření, viz příloha 8.1.

7. Seznam literatury

- [1] KREJČIŘÍK, Alexandr. *Napájecí zdroje I*. Praha: BEN - technická literatura, 2001. ISBN 80-86056-02-3.
- [2] KREJČIŘÍK, Alexandr. *Lineární napájecí zdroje*. Praha: BEN - technická literatura, 2001. ISBN 80-7300-002-4.
- [3] HUMLHANS, Jan. *Nábojové pumpy: funkce, přehled a použití*. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-7300-046-6.
- [4] KREJČIŘÍK, Alexandr. *DC/DC měniče*. Praha: BEN, 2001. ISBN 80-7300-045-8.
- [5] KREJČIŘÍK, Alexandr. *Napájecí zdroje II*. Praha: BEN - technická literatura, 2000. ISBN 80-86056-03-1.
- [6] ROBERTS, Steve. *DC/DC Book of Knowledge*, 3rd ed. RECOM, 2016
- [7] BJÖRN JÖRGENSEN, Asger. *Derivation, Design and Simulation of the Single-Ended Primary-Inductor Converter (SEPIC)*. 10.31224/osf.io/69puh., 2019
https://www.researchgate.net/publication/332817638_Derivation_Design_and_Simulation_of_the_Single-Ended_Primary-Inductor_Converter_SEPIC (cit. 31.7.2020)
- [8] Texas instruments: *Synchronous rectification in high-performance power converter design*; <https://www.ti.com/lit/wp/snva595a/snva595a.pdf> (cit. 31.7.2020)
- [9] Talema: DP Series - Low Cost Power Inductors, datasheet
<https://talema.com/wp-content/uploads/datasheets/DP.pdf> (cit. 31.7.2020)
- [10] Infineon: IRFL4315, datasheet
<https://www.infineon.com/dgdl/irfl4315pbf.pdf?fileId=5546d462533600a4015356280dbc1f> (cit. 31.7.2020)
- [11] Texas instruments: *AN-1484 Designing A SEPIC Converter*
<https://www.ti.com/lit/an/snva168e/snva168e.pdf> (cit. 31.7.2020)
- [12] ON Semiconductor: MUR420, datasheet
<https://www.onsemi.com/pub/Collateral/MUR420-D.PDF> (cit. 31.7.2020)
- [13] ST: UC3843B, datasheet
<https://www.st.com/resource/en/datasheet/uc3843b.pdf> (cit. 31.7.2020)
- [14] Texas instruments: *UCx84x Current-Mode PWM Controllers*, aplikační poznámky

<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/uc2842.pdf> (cit. 31.7.2020)

[15] Infineon: 2EDF7275, datasheet

https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-2EDF7275F-DataSheet-v02_05-EN.pdf?fileId=5546d462636cc8fb0163b08fd9203057 (cit. 31.7.2020)

[16] Infineon: 2EDF7275, aplikační poznámky

https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-GateDriverICs_EiceDRIVER_2EDi_Using_the_EiceDRIVER_2EDi_family-ApplicationNotes-v03_00-EN.pdf?fileId=5546d46267354aa001675a431da84a41
(cit. 31.7.2020)

[17] Texas instruments: *Bootstrap Circuitry Selection for Half-Bridge Configurations*

<https://www.ti.com/lit/an/slva887/slva887.pdf> (cit. 31.7.2020)

[18] Micro Commercial Components: 1N5819, datasheet

[https://mccsemi.com/pdf/Products/1N5817-1N5819\(DO-41\)-V1.pdf](https://mccsemi.com/pdf/Products/1N5817-1N5819(DO-41)-V1.pdf) (cit. 31.7.2020)

[19] Texas instruments: Designing DC/DC converters based on ZETA topology

<https://www.ti.com/lit/an/slyt372/slyt372.pdf> (cit. 31.7.2020)

[20] XP power: IA1212S, datasheet

<https://datasheetspdf.com/pdf-file/1274006/XP/IA1212S/1> (cit. 31.7.2020)

8. Přílohy

8.1. Vzorový protokol

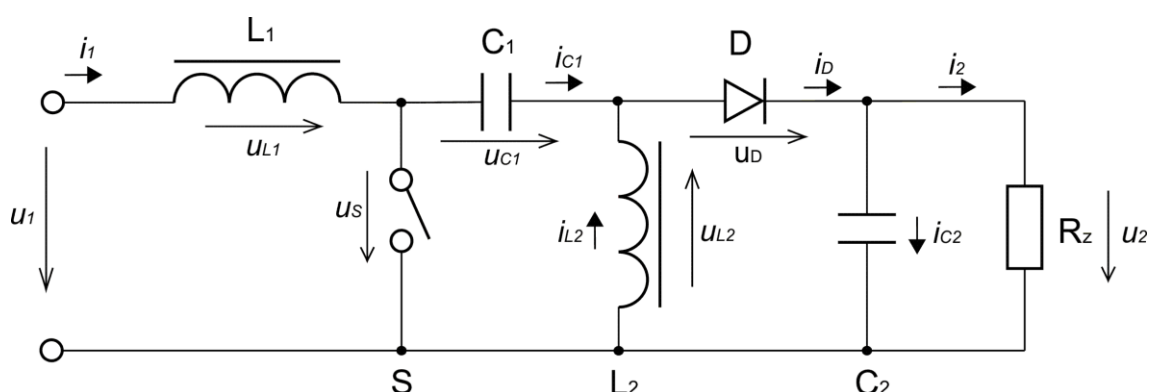
Měření vlastností zdrojů typu SEPIC a ZETA

1. Teorie

1.1 SEPIC

Měnič typu SEPIC (z anglického single-ended primary-inductor converter) umožňuje zvyšovat i snižovat napětí. Vyznačuje se spojitým vstupním proudem a nespojitým výstupním. Na rozdíl od měniče typu BUCK-BOOST neinvertuje napětí.

SEPIC se v podstatě skládá z měničů typu boost a buck-boost, které jsou navzájem propojeny vazebním kondenzátorem. Na obrázku 1 je znázorněno schéma zapojení měniče.



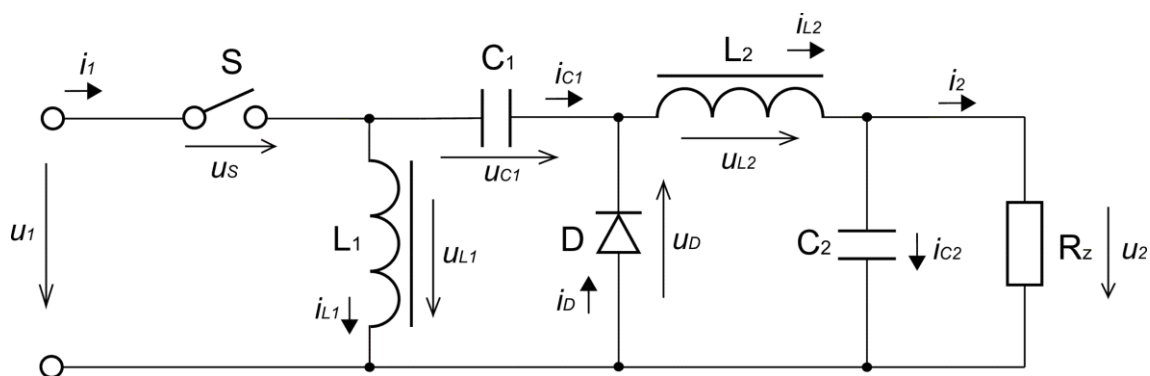
Obr. 1: Principiální zapojení měniče typu SEPIC

Konverze napětí probíhá ve dvou fázích. V první fázi je spínač S sepnut. Tím je na cívku L_1 připojeno konstantní napětí U_1 , a v cívce narůstá proud. Cívka L_2 je připojena na nabitý kondenzátor C_1 , proud cívkou roste. Do zátěže teče pouze proud z kondenzátoru C_2 . V druhé fázi je spínač S rozepnut. Cívky si snaží udržet velikost a směr svého proudu, otevírá se dioda D. Proud cívky L_2 teče přes diodu D, částečně nabíjí kondenzátor C_2 , částečně teče do zátěže. Proud cívky L_1 nabíjí kondenzátor C_1 a připojuje se k proudu cívky L_1 , který teče do výstupní části obvodu.

1.2 ZETA

Měnič typu ZETA umožňuje snižovat i zvyšovat výstupní napětí vůči vstupnímu. Výstupní napětí má stejnou polaritu jako vstupní. ZETA se vyznačuje nespojitým vstupním proudem a spojitým výstupním.

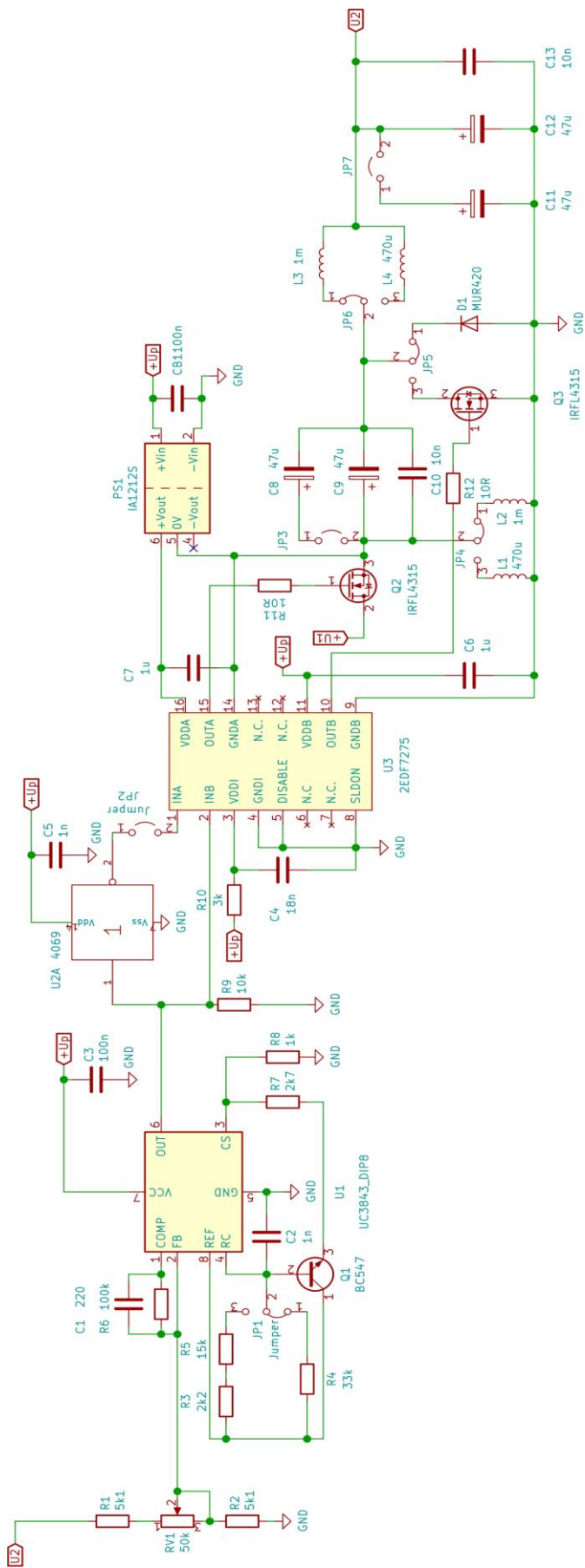
Základní zapojení měniče ZETA obsahuje, stejně jako SEPIC, dva induktory, spínač, diodu a vazební kondenzátor. Rozdíl obou zapojení spočívá v záměně pozic induktoru L_1 a spínače S a pozic induktoru L_2 a diody D . Zapojení měniče typu ZETA znázorňuje obrázek 2.



Obr. 2: Principiální zapojení měniče typu ZETA

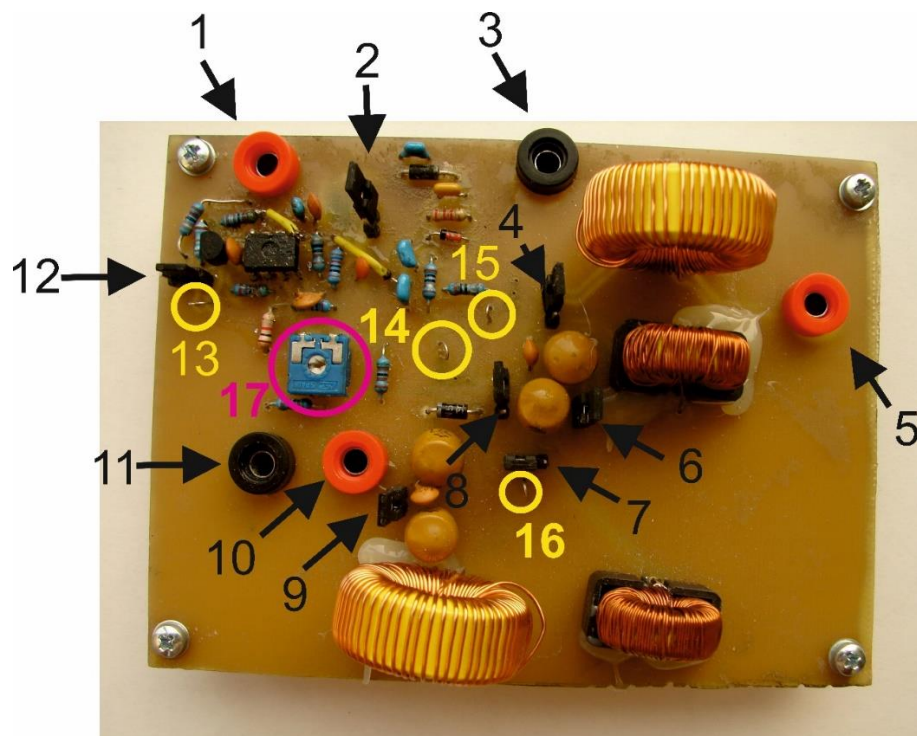
Konverze napětí probíhá opět ve dvou fázích. V první fázi je spínač S sepnut. Tím je na cívku L_1 připojeno konstantní napětí U_1 , a v cívce narůstá proud. Dále teče proud ze zdroje přes kondenzátor C_1 a cívku L_2 do zátěže. V druhé fázi je spínač S rozepnut. Cívky si snaží udržet velikost a směr svého proudu, otevírá se dioda D . Proud cívky L_2 teče do zátěže. Proud cívky L_1 teče přes diodu a nabíjí kondenzátor C_1 .

2.2 Schéma zapojení přípravku ZETA



Obr. 4: Schéma zapojení přípravku ZETA

3.1 Popis přípravku SEPIC

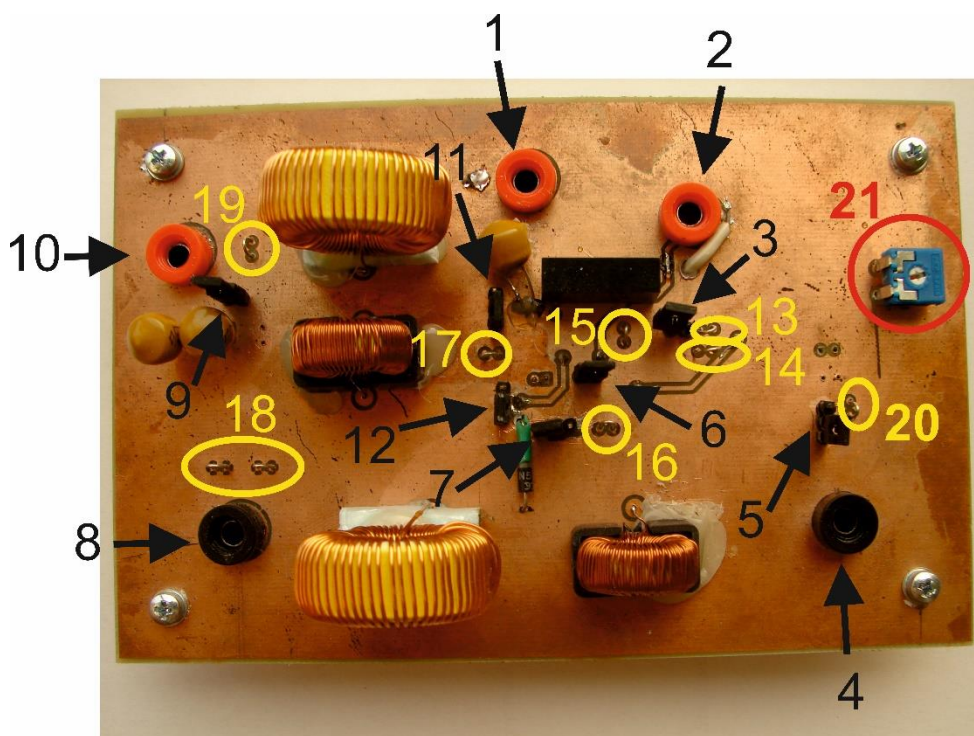


Obr. 5: Popis přípravku SEPIC

1. Připojení kladného pólu pomocného zdroje $U_P = 12\text{ V}$
2. Jumper, připojení řídicího signálu pro synchronní usměrňovač
3. GND
4. Jumper, volba indukčnosti, poloha nahoře: $470\ \mu\text{H}$, poloha dole: $1\ \text{mH}$
5. Připojení kladného pólu vstupního napětí U_I
6. Jumper, volba kapacity vazebního kondenzátoru, poloha zapojeno: $94\ \mu\text{F}$, poloha odpojeno: $47\ \mu\text{F}$
7. Jumper, volba indukčnosti, poloha vlevo: $470\ \mu\text{H}$, poloha vpravo: $1\ \text{mH}$
8. Jumper, volba mezi usměrňovací diodou a tranzistorem, poloha dole: dioda
9. Jumper, volba kapacity výstupního kondenzátoru, poloha zapojeno: $94\ \mu\text{F}$, poloha odpojeno: $47\ \mu\text{F}$
10. Kladný pól výstupního napětí U_2
11. GND
12. Jumper, volba spínací frekvence, poloha vlevo: $50\ \text{kHz}$, poloha vpravo $100\ \text{kHz}$
13. Měřicí bod, pin RT/CT PWM regulátoru
14. Měřicí bod, gate tranzistoru Q3

15. Měřicí bod, gate tranzistoru Q2
16. Měřicí bod, drain tranzistoru Q2
17. Trimr výstupního děliče, nastavení výstupního napětí

3.2 Popis přípravku ZETA



Obr. 6: Popis přípravku ZETA

1. Připojení kladného pólu pomocného zdroje $U_p = 12\text{ V}$
2. Připojení kladného pólu vstupního napětí U_I
3. Jumper, připojení řídicího signálu pro synchronní usměrňovač
4. GND
5. Jumper, volba spínací frekvence, poloha dole: 50 kHz, poloha nahoře 100 kHz
6. Jumper, volba kapacity vazebního kondenzátoru, poloha zapojeno: 94 μF , poloha odpojeno: 47 μF
7. Jumper, volba mezi usměrňovací diodou a tranzistorem, poloha vlevo: dioda
8. GND
9. Jumper, volba kapacity výstupního kondenzátoru, poloha zapojeno: 94 μF , poloha odpojeno: 47 μF

10. Kladný pól výstupního napětí U_2
11. Jumper, volba indukčnosti, poloha nahoře: 470 μH , poloha dole: 1 mH
12. Jumper, volba indukčnosti, poloha nahoře: 470 μH , poloha dole: 1 mH
13. Měřicí bod, negovaný výstupní signál PWM regulátoru
14. Měřicí bod, výstupní signál PWM regulátoru
15. Měřicí bod, gate tranzistoru Q2
16. Měřicí bod, gate tranzistoru Q3
17. Měřicí bod, drain tranzistoru Q3
18. GND
19. Měřicí bod, kladný pól výstupního napětí U_2
20. Měřicí bod, pin RT/CT PWM regulátoru
21. Trimr výstupního děliče, nastavení výstupního napětí

4. Pokyny pro měření na přípravcích

1. Nastavte přípravek pomocí jumperů do požadované konfigurace.
2. Připojte pomocný zdroj U_p o napětí 12 V.
3. Ujistěte se pomocí osciloskopu, že na výstupu PWM regulátoru je řídicí signál.
4. Připojte vstupní napětí přípravku v rozsahu 5 V až 30 V s proudovým omezením 2 A.
5. Nastavte zátěž na požadovanou hodnotu výstupního proudu. Nepřekračujte maximální výstupní proud přípravku 100 mA.

5. Úkoly měření

1. Pozorujte osciloskopem, jak se mění střída řídicího signálu při změně převodního poměru přípravku. Zaznamenejte.
2. Změřte zatěžovací charakteristiky obou přípravků pro snižující a zvyšující režim. Měřte při shodném nastavení obou přípravků. Charakteristiky mezi sebou porovnejte.
3. Pro jedno měření určete závislost účinnosti měniče na výstupním proudu.

4. Pro jedno z měření změňte frekvenci spínání. Změřte znovu zatěžovací charakteristiku a závislost účinnosti měniče na výstupním proudu. Porovnejte s původním měřením.
5. Pro jedno z měření změňte indukčnosti cívek. Změřte znovu zatěžovací charakteristiku a závislost účinnosti měniče na výstupním proudu. Porovnejte s původním měřením.
6. Změřte převodní charakteristiky obou přípravků pro snižující a zvyšující režim. Měřte při shodném nastavení obou přípravků. Charakteristiky mezi sebou porovnejte.

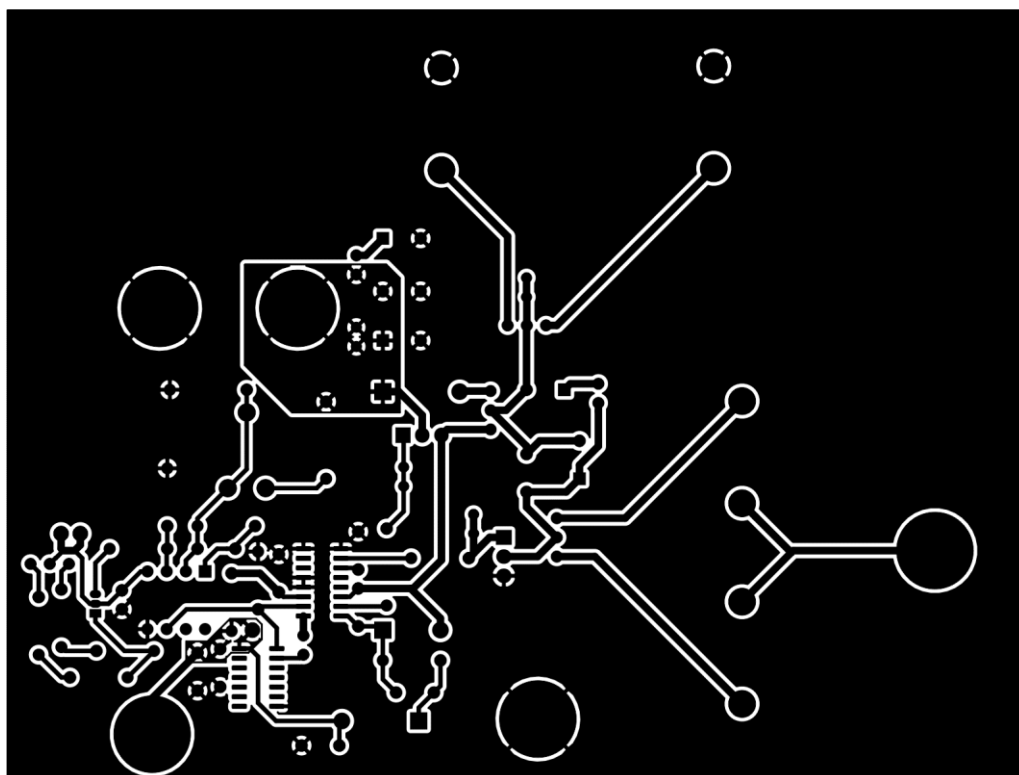
8.2 Soupiska součástek pro přípravek SEPIC

Označení	Hodnota	Popis
C1	220 pF	keramický, 50 V
C2	1 nF	keramický, 50 V
C3	100 nF	keramický, 50 V
C4	1 nF	keramický, 50 V
C5	18 nF	keramický, 50 V
C6	1 μ F	keramický, 50 V
C7	1 μ F	keramický, 50 V
C8	100 nF	keramický, 50 V
C9	100 nF	keramický, 50 V
C10	10 nF	keramický, 50 V
C11	47 μ F	tantalový, 50 V
C12	47 μ F	tantalový, 50 V
C13	47 μ F	tantalový, 50 V
C14	47 μ F	tantalový, 50 V
C15	10 nF	keramický, 50 V
D1	1N5819	Schottkyho dioda
D2	BZX83V013	Zenerova dioda, 13 V
D3	MUR420	ultrarychlá dioda
L1	470 μ H	toroidní tlumivka, $f_{\max} = 100$ kHz
L2	1 mH	toroidní tlumivka, $f_{\max} = 100$ kHz
L3	470 μ H	toroidní tlumivka, $f_{\max} = 100$ kHz
L4	1 mH	toroidní tlumivka, $f_{\max} = 100$ kHz
Q1	BC547B	NPN
Q2	IRFL4315	NMOS
Q3	IRFL4315	NMOS
R1	5,1 k Ω	0,6 W
R2	5,1 k Ω	0,6 W
R3	2,2 k Ω	0,6 W
R4	33 k Ω	0,6 W
R5	15 k Ω	0,6 W
R6	100 k Ω	0,6 W
R7	2,7 k Ω	0,6 W
R8	1 k Ω	0,6 W
R9	10 k Ω	0,6 W
R10	3 k Ω	0,6 W
R11	10 Ω	0,6 W
R12	2 k Ω	0,6 W
R13	10 Ω	0,6 W
RV1	50 k Ω	trimr 0,15 W
U1	UC3843	PWM regulátor, DIP8
U2	4069	CMOS invertor, SO14
U3	2EDF7275	MOSFET DRIVER, DSO16

8.3 Soupiska součástek pro přípravek ZETA

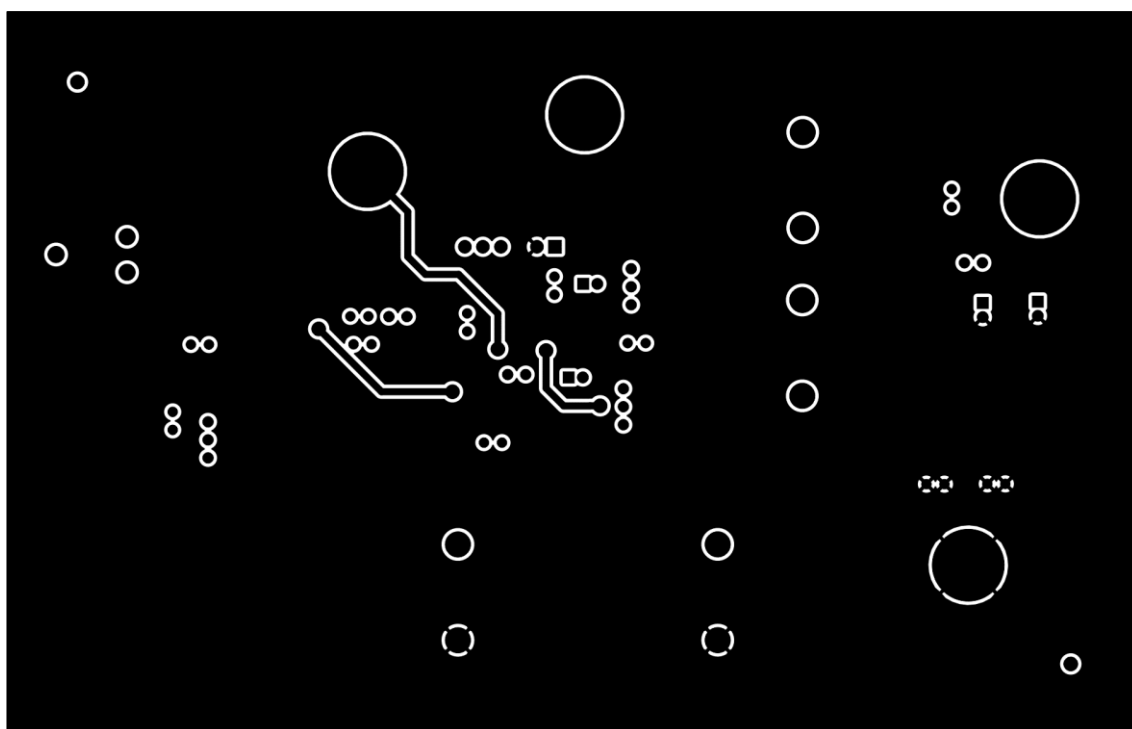
Označení	Hodnota	Popis
C1	220 pF	CKS1206, keramický, 50 V
C2	1 nF	CKS1206, keramický, 50 V
C3	100 nF	CKS1206, keramický, 50 V
C4	18 nF	CKS1206, keramický, 50 V
C5	1 nF	CKS1206, keramický, 50 V
C6	1 μ F	CKS1206, keramický, 50 V
C7	1 μ F	CKS1206, keramický, 50 V
C8	47 μ F	tantalový, 50 V
C9	47 μ F	tantalový, 50 V
C10	10 nF	CKS1206, keramický, 50 V
C11	47 μ F	tantalový, 50 V
C12	47 μ F	tantalový, 50 V
C13	10 nF	CKS1206, keramický, 50 V
CB1	100 nF	CKS1206, keramický, 50 V
D1	MUR420	ultrarychlá dioda
L1	470 μ H	toroidní tlumivka, $f_{\max} = 100$ kHz
L2	1 mH	toroidní tlumivka, $f_{\max} = 100$ kHz
L3	1 mH	toroidní tlumivka, $f_{\max} = 100$ kHz
L4	470 μ H	toroidní tlumivka, $f_{\max} = 100$ kHz
Q1	BC547B	NPN
Q2	IRFL4315	NMOS
Q3	IRFL4315	NMOS
R1	5,1 k Ω	R1206 0,25 W
R2	5,1 k Ω	R1206 0,25 W
R3	2,2 k Ω	R1206 0,25 W
R4	33 k Ω	R1206 0,25 W
R5	15 k Ω	R1206 0,25 W
R6	100 k Ω	R1206 0,25 W
R7	2,7 k Ω	R1206 0,25 W
R8	1 k Ω	R1206 0,25 W
R9	10 k Ω	R1206 0,25 W
R10	3 k Ω	R1206 0,25 W
R11	10 Ω	R1206 0,25 W
R12	10 Ω	R1206 0,25 W
RV1	50 k Ω	trimr 0,15 W
U1	UC3843	PWM regulátor, SO14
U2	4069	CMOS invertor, SO14
U3	2EDF7275	MOSFET DRIVER, DSO16

8.4 Šablona DPS pro přípravek SEPIC

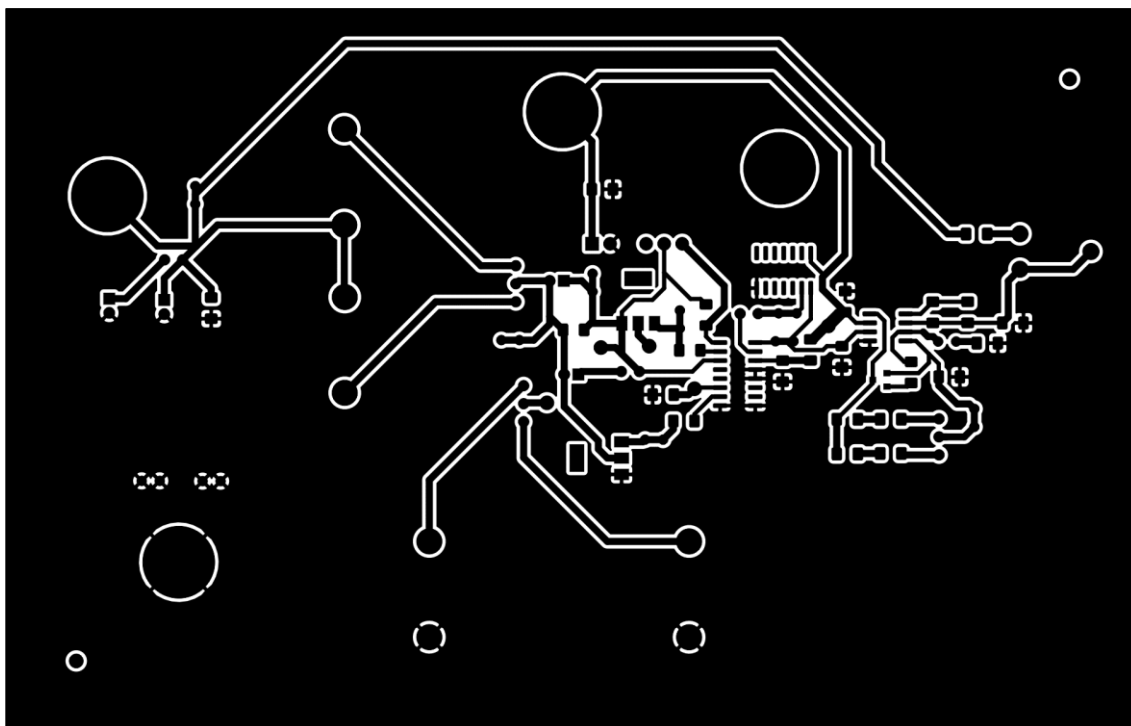


Šablona DPS přípravku SEPIC, jednostranný plošný spoj

8.5 Šablona DPS pro přípravek ZETA

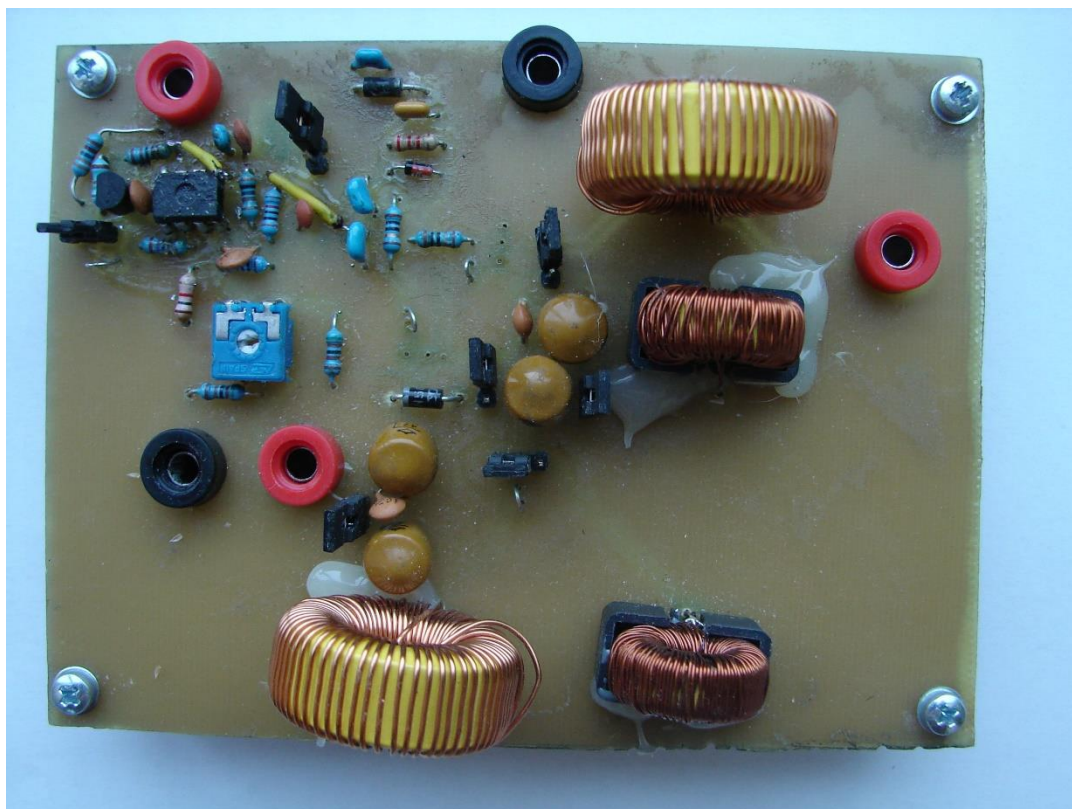


Šablona DPS přípravku ZETA, strana B

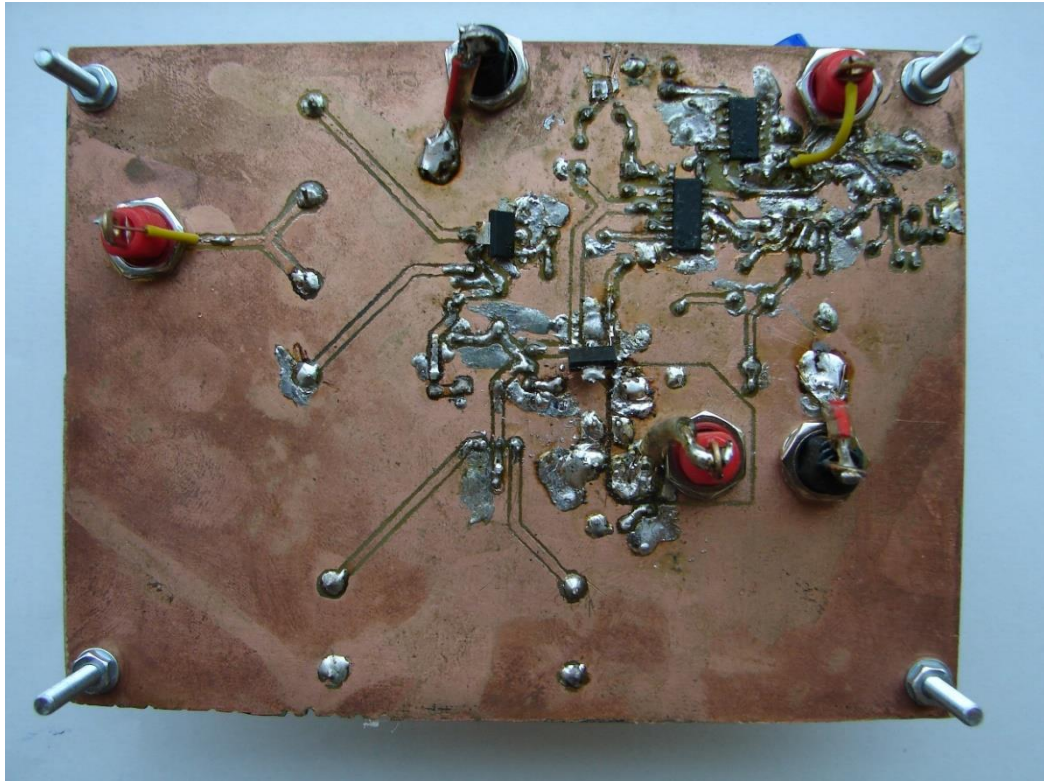


Šablona DPS přípravku ZETA, strana F

8.6 Fotografie přípravku SEPIC

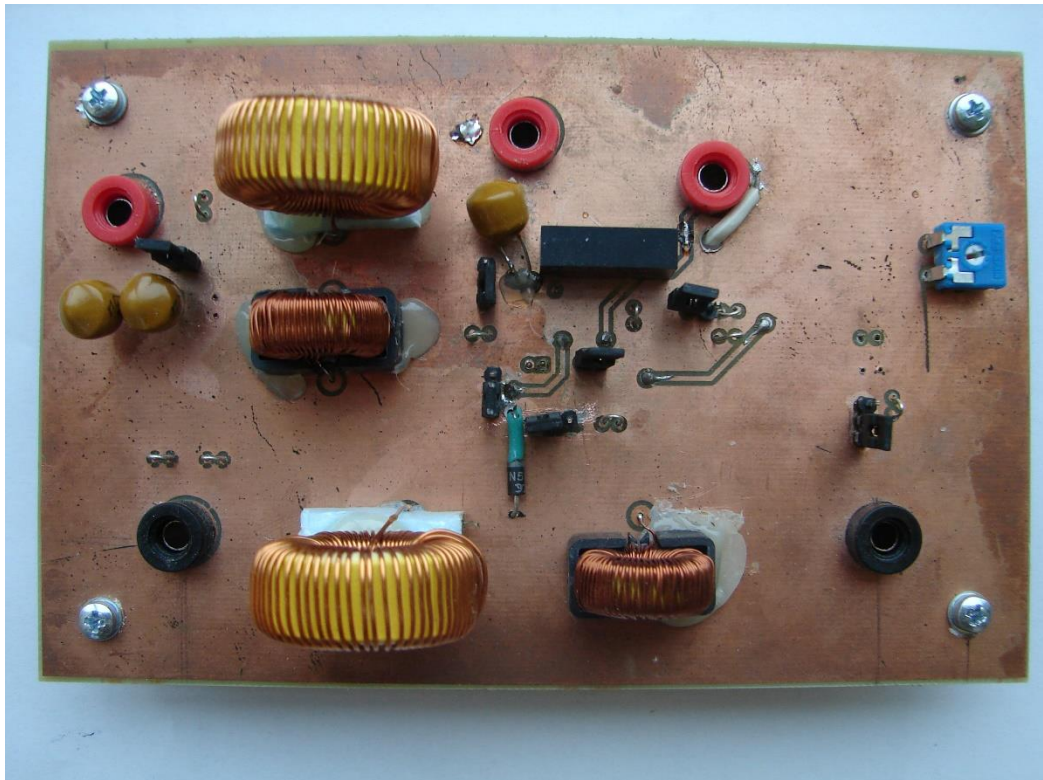


SEPIC, horní strana

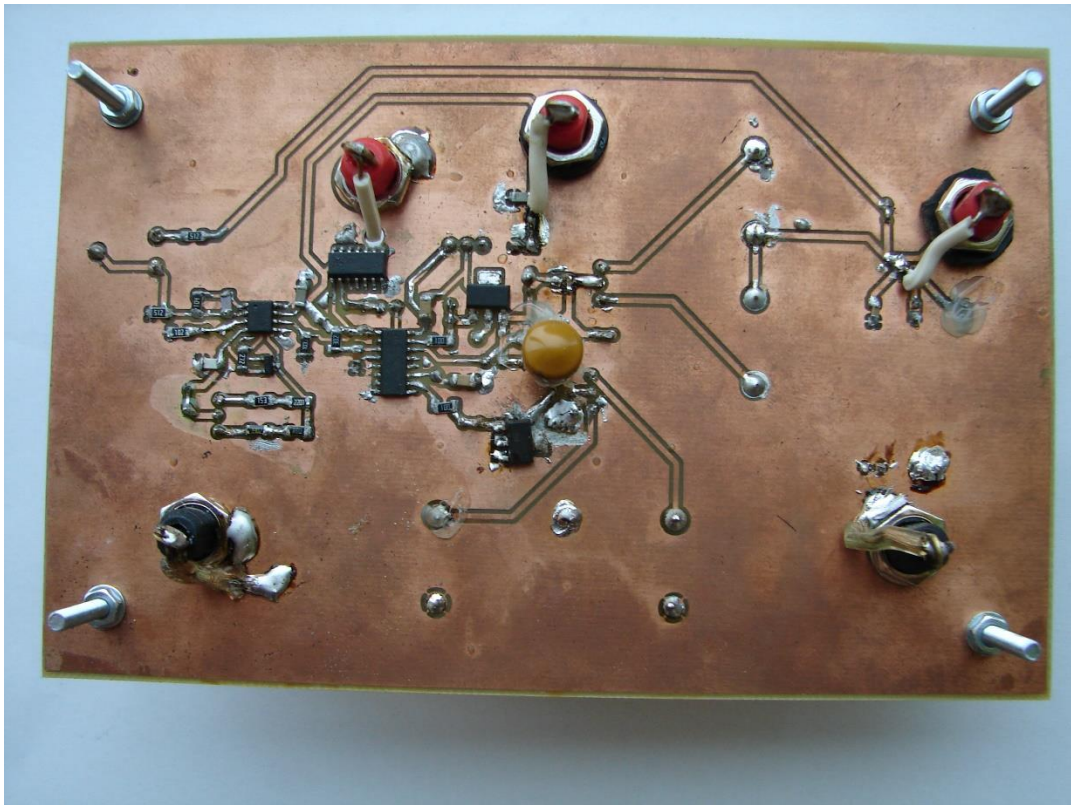


SEPIC, dolní strana

8.7 Fotografie přípravku ZETA

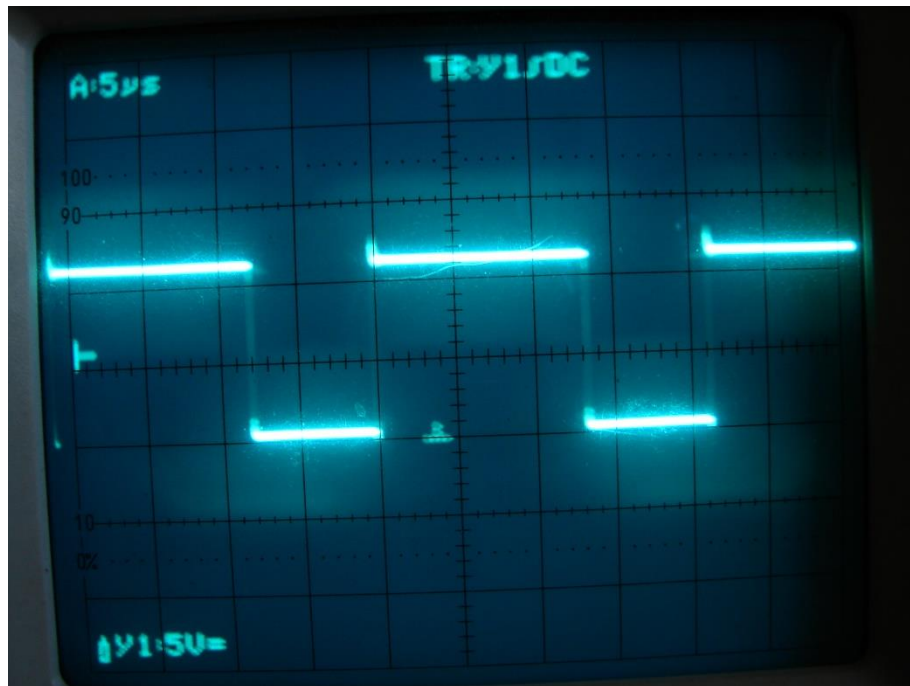


ZETA, horní strana

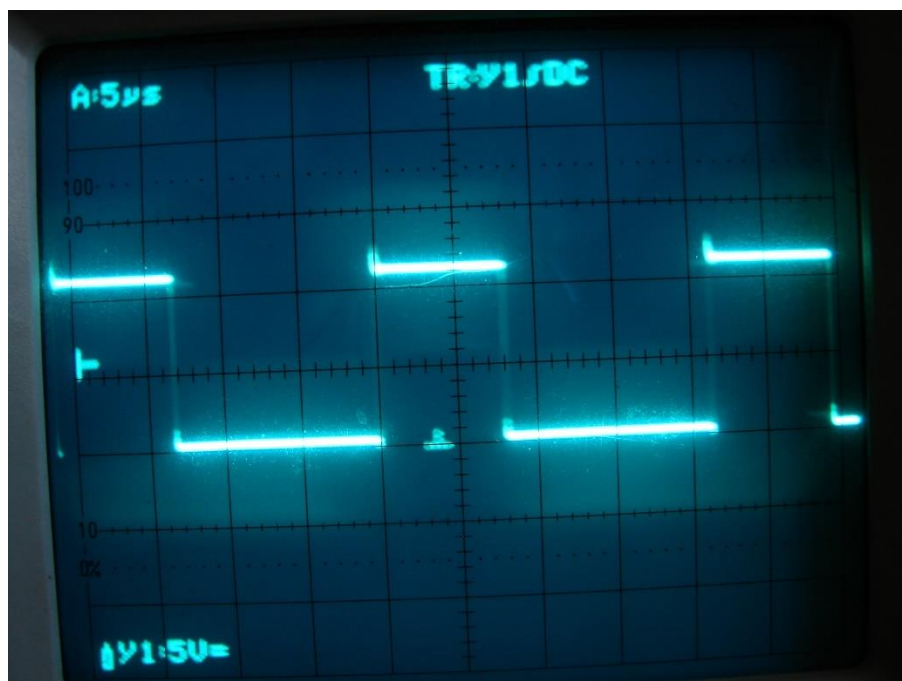


ZETA, dolní strana

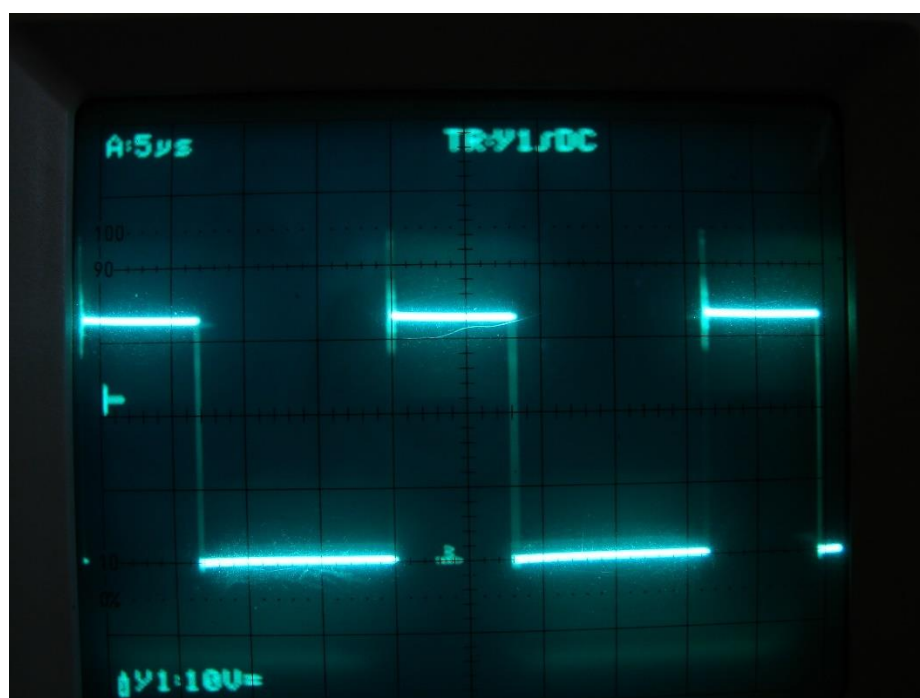
8.8 Ukázky průběhů napětí v přípravku



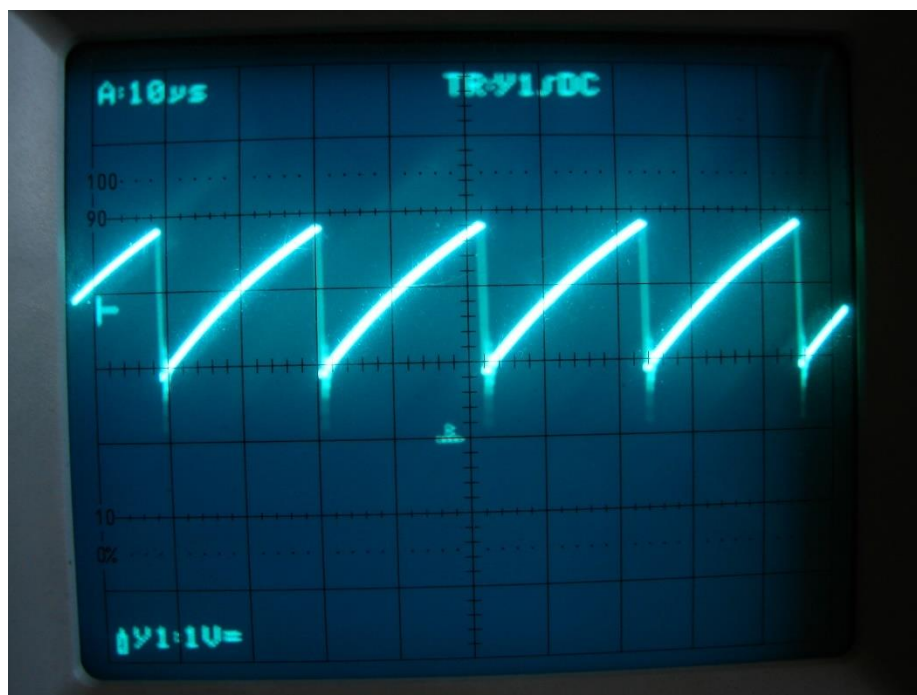
Průběh napětí řídicího signálu tranzistoru Q2, ZETA, převod z 12 V na 20 V, $I_2 = 50 \text{ mA}$



Průběh napětí řídicího signálu tranzistoru Q2, ZETA, převod z 20 V na 12 V, $I_2 = 50$ mA



Průběh napětí na cínce L1, ZETA, převod z 20 V na 12 V, $I_2 = 50$ mA



Signál z oscilátoru PWM regulátoru, měřeno na pinu RT/CT

8.9 Naměřené zatěžovací charakteristiky

sepic, 100 kHz, 470 µH, 15 V / 5 V						
U_1 (V)	I_1 (mA)	U_2 (V)	I_2 (mA)	P_1 (W)	P_2 (W)	η (%)
15	0	5,02	0,5	0,01	0,00	35
15	1	5,02	1	0,01	0,01	44
15	1	5,02	2	0,02	0,01	55
15	3	5,02	5	0,04	0,03	64
15	5	5,02	10	0,07	0,05	68
15	7	5,02	15	0,10	0,08	72
15	9	5,01	20	0,14	0,10	73
15	11	5,01	25	0,17	0,13	75
15	13	5,01	30	0,20	0,15	76
15	15	5,01	35	0,23	0,18	77
15	17	5,01	40	0,26	0,20	78
15	19	5,01	45	0,29	0,23	79
15	21	5,01	50	0,31	0,25	80
15	23	5,01	55	0,34	0,28	81
15	24	5,01	60	0,37	0,30	82
15	26	5,01	65	0,40	0,33	82
15	29	5,01	70	0,44	0,35	81
15	31	5,01	75	0,46	0,38	82
15	33	5,01	80	0,49	0,40	82
15	35	5,01	85	0,53	0,43	81
15	38	5,01	90	0,57	0,45	80
15	41	5,01	95	0,62	0,48	77
15	43	5,01	100	0,65	0,50	78

sepic, 100 kHz, 470 μ H, 15 V /15 V						
U_1 (V)	I_1 (mA)	U_2 (V)	I_2 (mA)	P_1 (W)	P_2 (W)	η (%)
15	2	15,05	0,5	0,02	0,01	30
15	2	15,04	1	0,04	0,02	41
15	4	15,04	2	0,06	0,03	53
15	8	15,02	5	0,12	0,08	61
15	15	14,99	10	0,22	0,15	68
15	20	14,97	15	0,30	0,22	76
15	26	14,95	20	0,39	0,30	77
15	32	14,94	25	0,48	0,37	77
15	39	14,93	30	0,59	0,45	77
15	44	14,91	35	0,66	0,52	79
15	50	14,9	40	0,74	0,60	80
15	55	14,89	45	0,82	0,67	82
15	60	14,89	50	0,90	0,74	82
15	66	14,89	55	0,98	0,82	83
15	71	14,89	60	1,06	0,89	84
15	76	14,89	65	1,14	0,97	85
15	81	14,89	70	1,22	1,04	85
15	87	14,89	75	1,30	1,12	86
15	92	14,89	80	1,38	1,19	86
15	98	14,89	85	1,47	1,27	86
15	104	14,89	90	1,55	1,34	86
15	109	14,89	95	1,63	1,41	87
15	115	14,89	100	1,72	1,49	87

sepic, 100 kHz, 470 μ H, 15 V /30 V						
U_1 (V)	I_1 (mA)	U_2 (V)	I_2 (mA)	P_1 (W)	P_2 (W)	η (%)
15	4	29,6	0,5	0,06	0,01	24
15	6	29,6	1	0,08	0,03	35
15	8	29,5	2	0,12	0,06	49
15	16	29,4	5	0,23	0,15	63
15	28	29,3	10	0,42	0,29	70
15	40	29,3	15	0,59	0,44	74
15	52	29,2	20	0,79	0,58	74
15	64	29,2	25	0,96	0,73	76
15	78	29,1	30	1,17	0,87	75
15	88	29,1	35	1,32	1,02	77
15	99	29,1	40	1,49	1,16	78
15	109	29,1	45	1,64	1,31	80
15	119	29,1	50	1,79	1,46	82
15	128	29,1	55	1,92	1,60	83
15	139	29,1	60	2,09	1,75	84
15	149	29,1	65	2,24	1,89	85

15	161	29,1	70	2,42	2,04	84
15	172	29,1	75	2,58	2,18	85
15	184	29,1	80	2,76	2,33	84
15	194	29,1	85	2,91	2,47	85
15	205	29,1	90	3,08	2,62	85
15	216	29,1	95	3,24	2,76	85
15	230	29,1	100	3,45	2,91	84

sepic, 100 kHz, 1000 μ H, 15 V /15 V						
U_1 (V)	I_1 (mA)	U_2 (V)	I_2 (mA)	P_1 (W)	P_2 (W)	η (%)
15	2	15,07	0,5	0,03	0,01	30
15	3	15,06	1	0,04	0,02	39
15	4	15,05	2	0,06	0,03	51
15	8	15,02	5	0,12	0,08	63
15	14	14,97	10	0,21	0,15	70
15	19	14,96	15	0,29	0,22	77
15	26	14,92	20	0,39	0,30	77
15	31	14,91	25	0,47	0,37	80
15	37	14,91	30	0,55	0,45	81
15	42	14,91	35	0,63	0,52	83
15	47	14,91	40	0,71	0,60	85
15	52	14,91	45	0,79	0,67	85
15	58	14,91	50	0,86	0,75	86
15	62	14,91	55	0,94	0,82	88
15	69	14,91	60	1,03	0,89	87
15	74	14,91	65	1,11	0,97	87
15	80	14,91	70	1,20	1,04	87
15	86	14,91	75	1,30	1,12	86
15	92	14,91	80	1,38	1,19	87
15	99	14,91	85	1,49	1,27	85
15	104	14,91	90	1,57	1,34	86
15	111	14,91	95	1,67	1,42	85
15	119	14,91	100	1,79	1,49	84

sepic, 50 kHz, 470 μ H, 15 V /15 V						
U_1 (V)	I_1 (mA)	U_2 (V)	I_2 (mA)	P_1 (W)	P_2 (W)	η (%)
15	1	15,06	0,5	0,02	0,01	39
15	2	15,06	1	0,03	0,02	50
15	3	15,06	2	0,05	0,03	63
15	7	15,06	5	0,11	0,08	71
15	13	15,05	10	0,20	0,15	75
15	19	15,03	15	0,29	0,23	78
15	26	15,02	20	0,39	0,30	78
15	31	15,01	25	0,47	0,38	80
15	38	15	30	0,57	0,45	78

15	44	14,99	35	0,65	0,52	80
15	50	14,98	40	0,75	0,60	80
15	57	14,97	45	0,85	0,67	79
15	60	14,97	50	0,90	0,75	83
15	68	14,96	55	1,02	0,82	81
15	74	14,95	60	1,12	0,90	80
15	81	14,94	65	1,21	0,97	80
15	86	14,94	70	1,30	1,05	81
15	92	14,93	75	1,38	1,12	81
15	97	14,93	80	1,46	1,19	82
15	103	14,93	85	1,55	1,27	82
15	109	14,93	90	1,63	1,34	82
15	114	14,93	95	1,71	1,42	83
15	119	14,93	100	1,79	1,49	83

zeta, 100 kHz, 470 μ H, 15 V /5 V						
U_1 (V)	I_1 (mA)	U_2 (V)	I_2 (mA)	P_1 (W)	P_2 (W)	η (%)
15	0,7	5,09	0,5	0,01	0,00	24
15	1,1	5,09	1	0,02	0,01	31
15	1,9	5,09	2	0,03	0,01	36
15	3,6	5,08	5	0,05	0,03	47
15	5,4	5,08	10	0,08	0,05	63
15	7,7	5,07	15	0,12	0,08	66
15	10	5,07	20	0,15	0,10	67
15	12	5,07	25	0,18	0,13	70
15	14	5,07	30	0,21	0,15	72
15	16	5,07	35	0,24	0,18	74
15	18	5,07	40	0,27	0,20	75
15	19	5,07	45	0,29	0,23	80
15	21	5,07	50	0,32	0,25	80
15	23	5,07	55	0,35	0,28	81
15	25	5,07	60	0,38	0,30	81
15	26	5,07	65	0,39	0,33	85
15	28	5,07	70	0,42	0,35	85
15	30	5,07	75	0,45	0,38	85
15	32	5,07	80	0,48	0,41	85
15	34	5,07	85	0,51	0,43	85
15	36	5,07	90	0,54	0,46	85
15	38	5,07	95	0,57	0,48	85
15	40	5,07	100	0,60	0,51	85

zeta, 100 kHz, 470 μ H, 15 V /15 V						
U_1 (V)	I_1 (mA)	U_2 (V)	I_2 (mA)	P_1 (W)	P_2 (W)	η (%)
15	2,5	15	0,5	0,04	0,01	20
15	3,5	14,98	1	0,05	0,01	29

15	4,6	14,95	2	0,07	0,03	43
15	9,3	14,9	5	0,14	0,07	53
15	16	14,88	10	0,23	0,15	64
15	20	14,83	15	0,30	0,22	74
15	27	14,8	20	0,41	0,30	73
15	32	14,8	25	0,48	0,37	77
15	37	14,79	30	0,56	0,44	80
15	43	14,79	35	0,64	0,52	81
15	47	14,79	40	0,70	0,59	85
15	52	14,78	45	0,78	0,67	86
15	57	14,78	50	0,85	0,74	87
15	62	14,78	55	0,93	0,81	88
15	68	14,78	60	1,02	0,89	87
15	72	14,77	65	1,08	0,96	89
15	77	14,77	70	1,16	1,03	89
15	82	14,77	75	1,23	1,11	90
15	88	14,77	80	1,32	1,18	90
15	93	14,77	85	1,40	1,26	90
15	98	14,77	90	1,47	1,33	90
15	104	14,77	95	1,56	1,40	90
15	109	14,77	100	1,64	1,48	90

zeta, 100 kHz, 470 μ H, 30 V /30 V						
U_1 (V)	I_1 (mA)	U_2 (V)	I_2 (mA)	P_1 (W)	P_2 (W)	η (%)
15	5,5	27,6	0,5	0,08	0,01	17
15	6,7	27,6	1	0,10	0,03	27
15	9,6	27,5	2	0,14	0,06	38
15	18	27,4	5	0,27	0,14	51
15	27	27,4	10	0,41	0,27	68
15	40	27,2	15	0,60	0,41	68
15	53	27,2	20	0,80	0,54	68
15	63	27,2	25	0,95	0,68	72
15	75	27,1	30	1,13	0,81	72
15	84	27,1	35	1,26	0,95	75
15	92	27,1	40	1,38	1,08	79
15	101	27,1	45	1,52	1,22	80
15	110	27,1	50	1,65	1,36	82
15	119	27,1	55	1,79	1,49	84
15	130	27,1	60	1,95	1,63	83
15	141	27,1	65	2,12	1,76	83
15	151	27,1	70	2,27	1,90	84
15	160	27,1	75	2,40	2,03	85
15	169	27,1	80	2,54	2,17	86
15	179	27,1	85	2,69	2,30	86
15	191	27,1	90	2,87	2,44	85

15	203	27,1	95	3,05	2,57	85
15	210	27,1	100	3,15	2,71	86

zeta, 100 kHz, 470 μ H, 15 V /15 V, synchronní usměrnění						
U_1 (V)	I_1 (mA)	U_2 (V)	I_2 (mA)	P_1 (W)	P_2 (W)	η (%)
15	21	14,98	1	0,32	0,01	5
15	22	14,98	2	0,33	0,03	9
15	26	14,98	5	0,39	0,07	19
15	31	14,98	10	0,47	0,15	32
15	37	14,97	15	0,56	0,22	40
15	42	14,96	20	0,63	0,30	47
15	48	14,95	25	0,71	0,37	52
15	53	14,94	30	0,80	0,45	56
15	58	14,93	35	0,87	0,52	60
15	65	14,93	40	0,97	0,60	61
15	70	14,92	45	1,05	0,67	64
15	77	14,91	50	1,16	0,75	64
15	82	14,91	55	1,22	0,82	67
15	87	14,87	60	1,31	0,89	68
15	93	14,83	65	1,39	0,96	69
15	97	14,81	70	1,46	1,04	71
15	103	14,79	75	1,55	1,11	72
15	110	14,76	80	1,65	1,18	72
15	114	14,75	85	1,71	1,25	73
15	120	14,73	90	1,80	1,33	74
15	128	14,7	95	1,92	1,40	73
15	134	14,68	100	2,01	1,47	73

zeta, 100 kHz, 1000 μ H, 15 V /15 V						
U_1 (V)	I_1 (mA)	U_2 (V)	I_2 (mA)	P_1 (W)	P_2 (W)	η (%)
15	3,6	14,99	0,5	0,05	0,01	14
15	4,1	14,98	1	0,06	0,01	24
15	5	14,98	2	0,08	0,03	40
15	7,9	14,98	5	0,12	0,07	63
15	16	14,79	10	0,23	0,15	63
15	20	14,75	15	0,30	0,22	73
15	26	14,76	20	0,39	0,30	77
15	31	14,75	25	0,47	0,37	79
15	36	14,73	30	0,54	0,44	82
15	41	14,72	35	0,62	0,52	84
15	48	14,72	40	0,71	0,59	83
15	51	14,72	45	0,77	0,66	87
15	62	14,72	55	0,92	0,81	88
15	67	14,71	60	1,00	0,88	88
15	73	14,71	65	1,10	0,96	87

15	77	14,71	70	1,16	1,03	89
15	85	14,7	75	1,28	1,10	86
15	89	14,7	80	1,34	1,18	88
15	96	14,7	85	1,44	1,25	87
15	102	14,7	90	1,53	1,32	86
15	106	14,7	95	1,59	1,40	88
15	112	14,7	100	1,68	1,47	88

zeta, 50 kHz, 1000 μ H, 15 V /15 V						
U_1 (V)	I_1 (mA)	U_2 (V)	I_2 (mA)	P_1 (W)	P_2 (W)	η (%)
15	2	15,05	0,5	0,03	0,01	25
15	2,3	15,04	1	0,03	0,02	44
15	3,4	15,03	2	0,05	0,03	59
15	7,4	15	5	0,11	0,08	68
15	13	14,97	10	0,20	0,15	76
15	20	14,93	15	0,30	0,22	75
15	33	14,9	25	0,50	0,37	75
15	40	14,88	30	0,60	0,45	74
15	46	14,85	35	0,69	0,52	75
15	52	14,83	40	0,78	0,59	76
15	56	14,83	45	0,84	0,67	79
15	62	14,83	50	0,93	0,74	80
15	66	14,83	55	0,99	0,82	82
15	73	14,83	60	1,10	0,89	81
15	77	14,82	65	1,16	0,96	83
15	84	14,82	70	1,26	1,04	82
15	88	14,82	75	1,32	1,11	84
15	93	14,82	80	1,40	1,19	85
15	99	14,82	85	1,49	1,26	85
15	106	14,82	90	1,59	1,33	84
15	110	14,82	95	1,65	1,41	85
15	115	14,82	100	1,73	1,48	86

8.10 Naměřené převodní charakteristiky

sepic, 100kHz, 470μH $U_2 = 30\text{ V}$ $I_2 = 50\text{ mA}$		sepic, 100kHz, 470μH $U_2 = 15\text{ V}$ $I_2 = 50\text{ mA}$		sepic, 100kHz, 470μH $U_2 = 5\text{ V}$ $I_2 = 50\text{ mA}$	
$U_1\text{ (V)}$	$U_2\text{ (V)}$	$U_1\text{ (V)}$	$U_2\text{ (V)}$	$U_1\text{ (V)}$	$U_2\text{ (V)}$
0	0	0	0	0	0
0,5	0	0,5	0	0,5	0,18
1	3,2	1	3,70	1	0,98
1,5	13,4	1,5	13,78	1,5	4,81
2	27,2	2	14,77	2	4,99
3	29,1	3	15,01	3	5,32
4	29,2	4	15,10	4	5,65
5	29,3	5	15,44	5	5,01
6	29,3	6	15,30	6	5,00
7	29,3	7	14,96	7	5,00
8	29,0	8	14,97	8	5,00
9	29,1	9	14,97	9	5,00
10	29,1	10	14,98	10	5,00
11	29,1	11	14,98	11	5,01
12	29,1	12	14,99	12	5,01
13	29,1	13	14,99	13	5,01
14	29,1	14	15,00	14	5,01
15	29,1	15	15,00	15	5,01
16	29,1	16	15,01	16	5,01
17	29,1	17	15,01	17	5,01
18	29,1	18	15,01	18	5,01
19	29,1	19	15,01	19	5,01
20	29,1	20	15,02	20	5,01
21	29,2	21	15,02	21	5,01
22	29,2	22	15,03	22	5,01
23	29,2	23	15,04	23	5,01
24	29,2	24	15,04	24	5,01
25	29,2	25	15,05	25	5,01
26	29,2	26	15,06	26	5,01
27	29,2	27	15,06	27	5,01
28	29,2	28	15,06	28	5,01
29	29,2	29	15,06	29	5,01
30	29,2	30	15,06	30	5,01
31	29,2	31	15,06	31	5,01

zeta, 100kHz, 470μH $U_2 = 30\text{ V}$ $I_2 = 50\text{ mA}$		zeta, 100kHz, 470μH $U_2 = 15\text{ V}$ $I_2 = 50\text{ mA}$		zeta, 100kHz, 470μH $U_2 = 5\text{ V}$ $I_2 = 50\text{ mA}$	
$U_1\text{ (V)}$	$U_2\text{ (V)}$	$U_1\text{ (V)}$	$U_2\text{ (V)}$	$U_1\text{ (V)}$	$U_2\text{ (V)}$
0	0	0	0	0	0
0,5	0	0,5	0	0,5	0
1	0,3	1	1,30	1	0,15
1,5	2,0	1,5	10,64	1,5	1,7
2	7,7	2	12,30	2	4,93
3	24,8	3	14,86	3	5,02
4	25,7	4	14,87	4	5,03
5	26,9	5	14,89	5	5,04
6	26,9	6	14,90	6	5,04
7	26,9	7	14,91	7	5,05
8	26,9	8	14,92	8	5,05
9	26,9	9	14,93	9	5,05
10	27,0	10	14,94	10	5,05
11	27,0	11	14,95	11	5,05
12	27,0	12	14,96	12	5,05
13	27,0	13	14,97	13	5,05
14	27,1	14	14,98	14	5,05
15	27,1	15	15,00	15	5,05
16	27,1	16	15,01	16	5,06
17	27,1	17	15,01	17	5,06
18	27,1	18	15,02	18	5,06
19	27,1	19	15,02	19	5,06
20	27,1	20	15,03	20	5,07
21	27,1	21	15,03	21	5,07
22	27,1	22	15,03	22	5,07
23	27,2	23	15,04	23	5,07
24	27,2	24	15,04	24	5,07
25	27,2	25	15,05	25	5,07
26	27,2	26	15,05	26	5,08
27	27,2	27	15,06	27	5,08
28	27,2	28	15,06	28	5,08
29	27,2	29	15,06	29	5,08
30	27,2	30	15,06	30	5,08
31	27,2	31	15,06	31	5,08