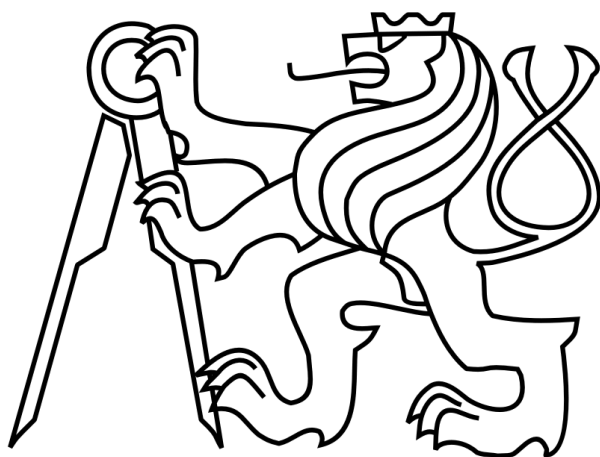


České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra mikroelektroniky



Bakalářská práce

Napájecí zdroj se SEPIC koncepcí

Autor: Ondřej Jirčák

Vedoucí práce: Ing. Lubor Jirásek, CSc.

2018

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Jirčák** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **457081**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektronika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Napájecí zdroj se SEPIC koncepcí

Název bakalářské práce anglicky:

Power Supply with SEPIC Concept

Pokyny pro vypracování:

1. Prostudujte dostupnou literaturu týkající se vlastností napájecích zdrojů s DC-DC měniči. Zaměřte se především na měniče typu SEPIC.
2. Na základě 1) navrhnete a realizujete přípravku pro výuku umožňující demonstrovat vlastnosti napájecího zdroje s měničem typu SEPIC z diskretních prvků a s využitím integrovaného obvodu se SEPIC strukturou pro porovnání jejich vlastností.
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] Krejčířik, A.: Napájecí zdroje I. - III. BEN, Praha 1996 a pozdější vydání. ISBN 80-86056-02-3
- [2] SEPIC Equations and Component Ratings. <https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/1051> (7.2.2018)
- [3] Katalogové listy součástek a aplikační poznámky fy IR, TI, LT, Sipex.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Lubor Jirásek, CSc., katedra mikroelektroniky FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **07.02.2018** Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

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

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
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 Napájecí zdroj se SEPIC koncepcí 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 studenta

Anotace

V předložené práci je popsáno dělení a použití DC-DC měničů. Zaměřuje se především na spínaný zdroj se SEPIC koncepcí. Tento typ spínaného zdroje je prakticky realizován dvěma způsoby. První varianta realizovaná pomocí diskretních součástek by měla lépe umožnit pochopení principu spínaných zdrojů. Druhá varianta demonstruje spínaný zdroj se SEPIC koncepcí s využitím moderního integrovaného obvodu. Oba přípravky budou určeny pro výuku. Dále porovnává vlastnosti těchto dvou technologických řešení, což je realizováno pomocí ověřovacího měření. V práci je také uveden vzorový protokol měření k vytvořeným přípravkům.

Klíčová slova: DC-DC měnič, spínaný zdroj, SEPIC, přípravek pro výuku

Abstract

The present work describes the division and use of DC-DC convertors. It focuses especially on a switched mode power supply with SEPIC concept. This type of power supply is realized in two ways. The first variant is to realize SEPIC using discrete components. The second variant demonstrates the switch mode power supply as an integrated circuit. The preparations will be designed for educational purposes. It also compares properties of these two technological solutions, which is realized by measurement. A protocol of measurement is also contained in this work.

Key words: DC-DC converter, switched mode power supply, SEPIC (single-ended primary-inductor converter), training device

Poděkování

Chtěl bych poděkovat panu Ing. Luboru Jiráskovi, CSc. za trpělivost a cenné rady, které mi pomohly tuto práci vytvořit. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za dostatek podpory.

Obsah

Úvod	16
1. DC-DC měniče	17
1.1 Porovnání.....	17
1.2 Měniče s lineárními obvody	17
1.3 Spínané zdroje	18
1.3.1 Spínané zdroje využívající kondenzátory	19
1.3.2 Spínané zdroje využívající indukčnosti	20
2. SEPIC	22
2.1 Popis funkce	22
2.1.1 Definice přenosu.....	22
2.1.2 Proudové poměry.....	24
2.1.3 Vazební kondenzátor	25
2.1.4 Cívky	26
2.1.5 Vstupní a výstupní kondenzátor	28
2.2 Oblasti použití.....	29
3. Návrh spínaného zdroje s integrovaným obvodem	29
3.1 Výběr integrovaného obvodu	29
3.2 Požadavky na spínaný zdroj	31
3.3 Výběr komponent pro obvod.....	32
3.3.1 Cívky	32
3.3.2 Vazební kondenzátor	33
3.3.3 Vstupní a výstupní kondenzátor	33
3.3.4 Usměrnovací dioda	34
3.3.5 Výstupní dělič.....	34
3.4 Schéma zapojení.....	36
4. Návrh spínaného zdroje z diskretních součástek.....	37
4.1 Požadavky na spínaný zdroj	37

4.2 Výběr prvků obvodu.....	38
4.2.1 Cívky	38
4.2.2 Vazební kondenzátor	38
4.2.3 Vstupní a výstupní kondenzátor	38
4.2.4 Usměrnovací dioda.....	39
4.2.5 Spínací tranzistor	39
4.3 Zpětná vazba.....	40
4.3.1 Chybový zesilovač.....	40
4.3.2 Generátor trojúhelníkové průběhu.....	41
4.3.3 Komparátor a MOSFET driver.....	43
4.4 Schéma zapojení.....	44
5. Měření na přípravcích	46
5.1 Měřené parametry.....	46
5.1.1 Zatěžovací charakteristika	46
5.1.2 Převodní charakteristika	47
5.2 SEPIC s integrovaným obvodem.....	47
5.2.1 Zatěžovací charakteristika	47
5.2.2 Převodní charakteristika	48
5.3 SEPIC z diskretních součástek	49
5.3.1 Zatěžovací charakteristika	49
5.3.2 Převodní charakteristika	50
5.4 Porovnání přípravků	51
6. Závěr.....	52
7. Literatura	54
8. Přílohy	56
8.1 Měřicí protokol.....	56
8.2 Seznam použitých součástek pro integrovaný přípravek	62
8.3 Seznam použitých součástek pro diskretní přípravek.....	63
8.4 Šablona DPS přípravku s integrovaným obvodem.....	65
8.5 Šablona DPS přípravku z diskretních součástek	66

8.6 Fotografie přípravku s integrovaným obvodem	67
8.7 Fotografie přípravku s diskrétními součástkami.....	68
8.8 Měření na přípravku s integrovaným obvodem.....	69
8.9 Měření na přípravku s diskrétními součástkami.....	70

Seznam použitých zkratek a symbolů

U	V	Napětí
U_C		Napětí na kondenzátoru
U_{Cvz}		Napětí na vazebním kondenzátoru
U_D		Úbytek napětí na diodě v propustném směru
U_N		Napájecí napětí
U_O		Výstupní napětí operačního zesilovače
U_{ref}		Referenční napětí
U_V		Výstupní napětí
ΔU_V		Zvlnění výstupního napětí
U_{ZV}		Napětí zpětné vazby
I	A	Proud
I_{L1}		Proud cívku L_1
ΔI_{L1}		Zvlnění proudu cívku L_1
I_{L2}		Proud cívku L_2
ΔI_{L2}		Zvlnění proudu cívku L_2
I_N		Napájecí proud
I_V		Výstupní proud
C	F	Kapacita
C_N		Kapacita vstupního kondenzátoru
C_V		Kapacita výstupního kondenzátoru
C_{vz}		Kapacita vazebního kondenzátoru
L	H	Indukčnost
L_1		Indukčnost cívky L_1
L_2		Indukčnost cívky L_2
T	s	Spínací perioda

t		Čas
t_{rr}		Doba závěrného zotavení PN přechodu diody
f	Hz	Spínací frekvence
E	J	Energie
R	Ω	Odpor
R_{Cvz}		Sériový odpor vazebního kondenzátoru
R_{L1}		Odpor cívky L_1
R_{L2}		Odpor cívky L_2
R_S		Odpor spínacího prku
Q	C	Náboj
P	W	Výkon
P_N		Příkon
P_V		Výstupní výkon
A_i	-	Ideální přenos
A_r		Reálný přenos
S		Činitel stabilizace
Φ	Wb	Magnetický indukční tok
η	%	Účinnost
φ		Činitel zvlnění výstupního napětí
γ		Zvlnění napětí na vazebním kondenzátoru
α		Střída

Úvod

DC-DC měniče se v současnosti staly nezbytnou součástí většiny zařízení. Prakticky transformují napětí ze vstupních svorek na jiné napětí na výstupních svorkách. Lze je rozdělit do tří skupin podle principu činnosti.

První a nejstarší typ je lineární zdroj, který se vyznačuje snadným návrhem. Ve většině aplikací je již překonán spínaným zdrojem využívajícím indukčnost, který tvoří druhý typ DC-DC měničů. Poslední typ je spínaný zdroj využívající kondenzátory, který má pouze omezenou možnost aplikace. Je to způsobeno především tím, že ve většině případech nedokáže dodat velký výstupní proud.

Tato práce bude rozdělena do tří hlavních částí. V první části bude popsána teorie DC-DC měničů. Druhá část detailně popíše spínaný zdroj se SEPIC koncepcí. A závěrečná část bude zaměřena na jejich návrh, a to v diskrétní a integrované formě.

1. DC-DC měniče

1.1 Porovnání

Spínané zdroje jsou v současnosti stále více používány. Mají spoustu výhod proti lineárním zdrojům, právě proto je začínají zastupovat ve spoustě aplikací. Nelze je ovšem nahradit úplně, protože vlivem rychlého spínání akumulacních prvků vzniká velké rušení a zvlnění výstupního napětí, což znesnadňuje jejich použití, například v audiotechnice. Tomuto jevu lze zamezit pomocí frekvenčních filtrů na výstupu spínaného zdroje, ani tak se v tomto ohledu nevyrovnají zdrojům lineárním.

Jejich výhody ovšem převyšují jejich nevýhody. Největší výhodou jsou malé rozměry, které lze dále redukovat se zvyšující frekvencí. Zpravidla se frekvence spínání pohybuje nad prahem slyšitelnosti (tj. od 25 kHz), aby se zamezilo nepříjemnému pískání. Horní hranice není určena, ale většina zdrojů pracuje s frekvencí do 1 MHz. Při vyšších frekvencích dochází ke zbytečně velkým ztrátám na spínacím prvku.

Další výhodou spínaných zdrojů je jejich vysoká efektivita, která dosahuje u integrovaných obvodů až nad hranici 90 %. Což může být až trojnásobek efektivity lineárního zdroje.

Proti tomu měniče s lineárními obvody je výhodné používat především pro jejich snadný návrh a nízkou cenu součástek. Je nutné také vyzvednout jejich slabé rušení okolí.

1.2 Měniče s lineárními obvody

Měniče s lineárními obvody, nebo lineární stabilizátory mají schopnost snížit napětí a stabilizovat jej na určité hodnotě. Je výhodné je používat v aplikacích, kde potřebujeme nižší napětí než napájecí a nevádí nám relativně velké výkonové ztráty.

Své uplatnění najdou především u snižování napětí o malé hodnoty, protože v těchto aplikacích dosahuje účinnost převodu napětí poměrně vysokých hodnot. Vyplývá to z tvrzení, že účinnost je dána poměrem výkonu a příkonu. Pro velké rozdíly vstupního a výstupního napětí dochází k velkému ztrátovému výkonu, proto je nutné použití chladiče a účinnost klesá.

Toto téma je podrobněji popsáno v [1] a [3].

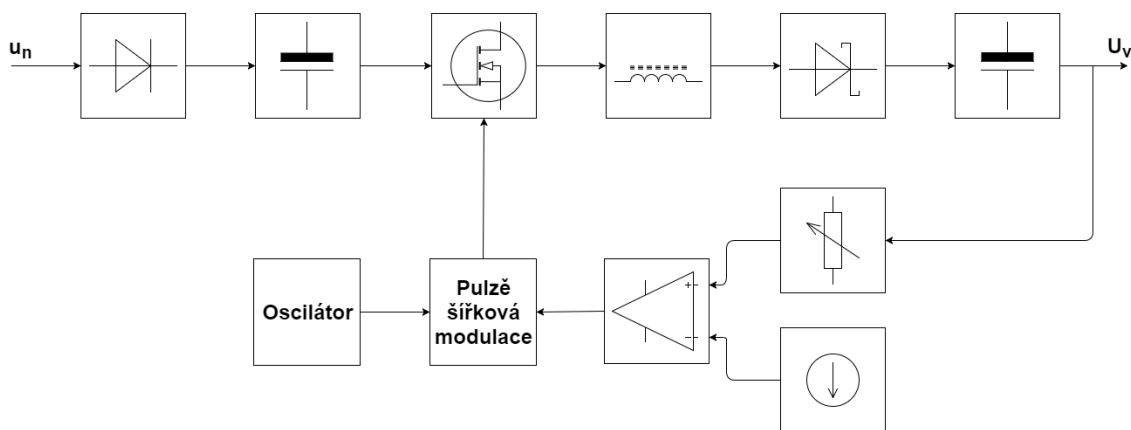
1.3 Spínané zdroje

Spínaný zdroj je obecně zařízení, které dokáže transformovat napětí. Tedy napětí na výstupních svorkách spínaného zdroje může být menší, stejné, nebo větší než napětí na vstupních svorkách.

Na obrázku 1.3.1 je znázorněno blokové schéma spínaného zdroje. Neplatí ovšem obecně pro všechny spínané zdroje, jednotlivé bloky se mohou lišit v závislosti na aplikaci, nebo typu spínaného zdroje. První blok znázorňuje usměrňovač, který je potřeba použít v případě, kdy máme k dispozici střídavý zdroj napětí (v případě stejnosměrného napájení lze usměrňovač vynechat). Stejnosměrné napětí na vstupu je tedy nezbytné pro správnou funkci zdroje.

Následuje nabíjecí kondenzátor, který vyhladí vstupní napětí a bude schopný zásobovat spínaný zdroj dostatkem náboje pro jeho činnost. Stejnosměrné napětí je přivedeno na spínací prvek, který ho přemění na střídavé o vysoké frekvenci (25 kHz až 1 MHz). Poté nastane samotná transformace napětí, která probíhá na akumulacním prvku. Akumulacním prvkem může být buď cívka, kondenzátor, nebo spojení obou těchto prvků.

Transformované napětí je střídavé, proto se používá výstupní usměrňovač, který je složen většinou ze Schottkyho diody (může být použita i jiná velmi rychlá dioda), na kterou jsou kladeny vysoké nároky, a výstupního kondenzátoru. Mezi její nezbytné vlastnosti patří malý úbytek napětí v propustném směru a dostatečně nízká doba závěrného zotavení.



Obr.: 1.3.1 Typické blokové schéma spínaného zdroje

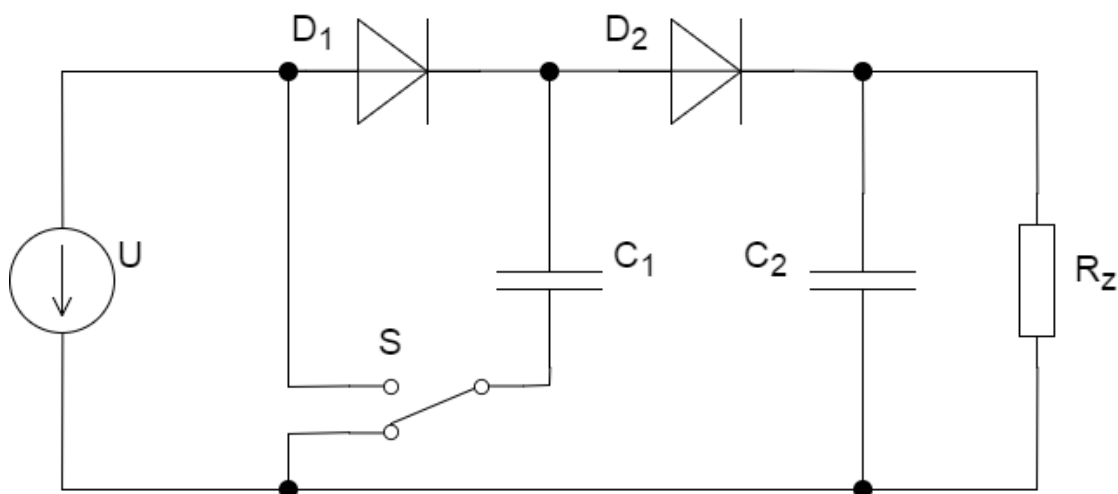
Každý spínaný zdroj musí využívat zpětné vazby, která je znázorněna ve spodní části schématu. Zpětná vazba slouží pro stabilizaci napětí. Pokud by nebyla zapojena, tak by docházelo k velkým poklesům výstupního napětí v závislosti na zatížení zdroje. Skládá se z výstupního děliče, který přivádí podělené napětí z výstupu spínaného zdroje na vstup operačního zesilovače.

Operační zesilovač zesiluje jeho rozdíl s napětím na napěťové referenci, který je pomocí oscilátoru převeden na pulzně šířkovou modulaci. Prakticky je možné ovlivňovat i frekvenci oscilátoru. Těmito signály je řízen spínací prvek. Podrobnější popis lze nalézt v [1].

1.3.1 Spínané zdroje využívající kondenzátory

Tento typ spínaných zdrojů nevyužívá k transformaci napětí indukčnosti, ale kondenzátory. Spínací prvky jsou poskládány tak, aby vlivem jejich spínání docházelo k přepojování kondenzátorů.

Spínané zdroje využívající kondenzátor nejsou ve většině případů schopné dodat velký proud, proto se hodí spíše pro nízko příkonové aplikace. Typicky jsou schopné dodat proud v řádu mA. Představitelem této skupiny je zdvojovač napětí. Jeho principiální schéma zapojení je znázorněno na obrázku 1.3.1.1.



Obr.: 1.3.1.1 Principiální zapojení zdvojovače napětí

Předpokládejme, že kondenzátor C_1 je nabit na hodnotu napájecího napětí. Potom lze říci, že v první fázi cyklu, kdy je přepínač v horní poloze, je kondenzátor C_1 zařazen sériově ke zdroji napětí. Vlivem toho se výstupní kondenzátor C_2 nabije na hodnotu $2U_N$ (napětí na kondenzátoru C_1 se sečte s napájecím napětím).

V druhé fázi cyklu, kdy je spínač v dolní poloze, je kondenzátor C_1 zapojen paralelně k napájecímu napětí a nabíjí se. Kondenzátor C_2 se vybíjí do zátěže, protože dioda D_2 brání vybíjení zpět do kondenzátoru C_1 .

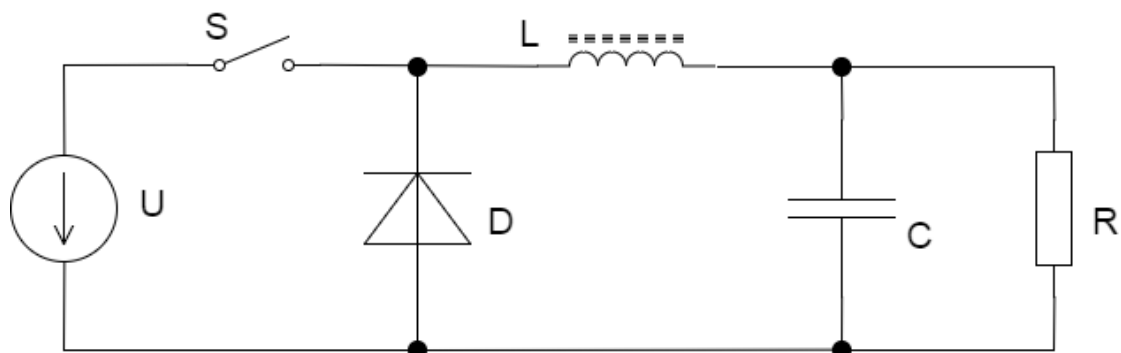
1.3.2 Spínané zdroje využívající indukčnosti

Tento typ spínaných zdrojů využívá k transformaci napětí indukčnosti. Proti spínaným zdrojům využívajících kondenzátory jsou schopné dodat mnohonásobně větší proud. Jeho velikost je závislá na použitých součástkách.

Rozlišujeme tři základní typy těchto spínaných zdrojů podle přenosové funkce, definované jako poměr vstupního a výstupního napětí (U_V / U_N). V prvním případě je tento poměr menší než jedna. Jedná se tedy o snižující spínaný zdroj. Jeho principiální schéma zapojení je znázorněno na obrázku 1.3.2.1.

Při sepnutém spínači se akumuluje v cívce energie. Po jeho rozeznutí se cívka snaží udržet stejnou velikost a směr proudu jako doposud. Tento proud dobíjí výstupní

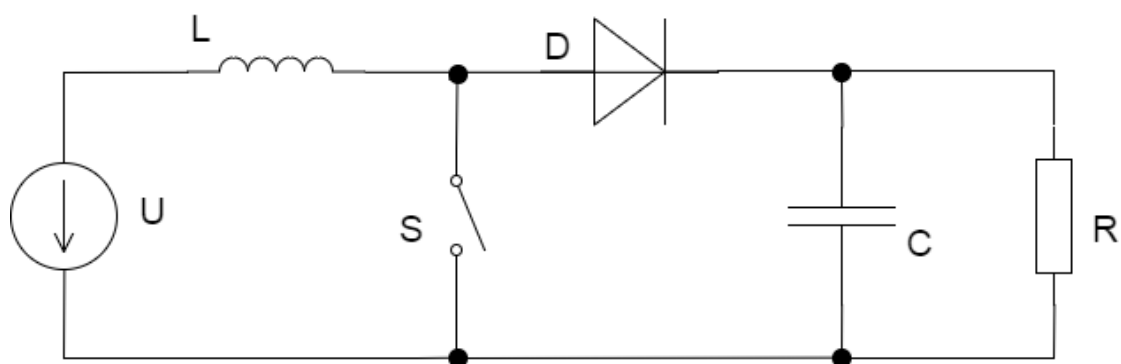
kondenzátor. Dioda uzavírá obvod tvořený cívkou a při sepnutém spínači je zavřena, tímto způsobem umožňuje nabíjení cívky.



Obr.: 1.3.2.1 Principiální zapojení snižujícího spínaného zdroje

Druhý typ je spínaný zdroj, jehož přenosová funkce je větší než jedna. Česky se tento typ nazývá zvyšující spínaný zdroj. Jeho principiální schéma zapojení můžeme vidět na obrázku 1.3.2.2.

Schéma je tvořeno ze stejných stavebních prvků jako snižující spínaný zdroj, prvky jsou ovšem odlišně zapojené. V prvním pracovním cyklu je spínač sepnut. Cívkou protéká proud a ukládá se do ní energie. Dioda brání vybíjení výstupního kondenzátoru přes spínač. V druhé části pracovního cyklu je spínač rozepnut. Cívka se snaží udržet stejnou velikost a směr proudu a začne se na ní indukovat napětí, jehož hodnota se sečte s napájecím napětím. Proud cívkou začne dobíjet výstupní kondenzátor.



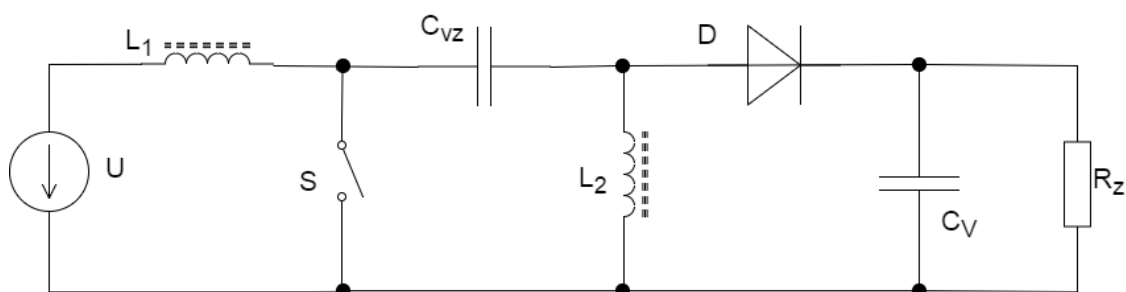
Obr.: 1.3.2.2 Principiální zapojení zvyšujícího spínaného zdroje

Poslední typ je spínaný zdroj, který dokáže napětí ze vstupních svorek snížit i zvýšit. Díky tomu se stal nezbytnou součástí spousty mobilních aplikací. Popis tohoto typu bude podrobně rozebrán dále.

2. SEPIC

2.1 Popis funkce

Základem pro zapojení SEPIC je zvyšující měnič. Zapojení je upraveno tak, aby na výstupu bylo možné nastavit jak vyšší napětí než je na vstupu, tak i nižší. K základu zvyšujícího měniče je navíc připojena cívka L_2 a vazební kondenzátor, který je přes cívku L_1 spojen s kladnou svorkou napájecího zdroje a cívka L_2 jej připojuje k záporné svorce. Jeho principiální schéma zapojení je zobrazeno na obrázku 2.1.1.



Obr.: 2.1.1 Principiální schéma zapojení spínaného zdroje typu SEPIC

Následující popis funkce spínaného zdroje typu SEPIC vychází především z [4].

2.1.1 Definice přenosu

Označme periodu spínání T . Potom bude spínač sepnut po dobu αT , a proto pro dobu rozeptutí platí $(1 - \alpha)T$, kde α značí střídu spínání. Jelikož střední hodnota napětí na cívce

L_1 je nulová, tak musí platit, že napětí na cívce během doby rozeptnutí spínače je kompenzováno hodnotou napětí na cívce během doby sepnutí spínače. Tento jev popisuje následující vztah:

$$\alpha T U_N = (1 - \alpha) T (U_V + U_D + U_{Cvz} - U_N). \quad (2.1.1.1)$$

Vztah demonstruje, že magnetický indukční tok cívky za první část periody se rovná magnetickému indukčnímu toku za druhou část periody. Dále je důležité poznamenat, že stejnosměrná složka napětí na vazebním kondenzátoru je stejná jako napájecí napětí, proto se ve vztahu (2.1.1.1) odečtou obě napětí.

Po jednoduché úpravě vztahu (2.1.1.1) lze odvodit přenos, který má v ideálním případě tvar:

$$A_i = \frac{U_{V(\max)} + U_D}{U_{N(\min)}} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}. \quad (2.1.1.2)$$

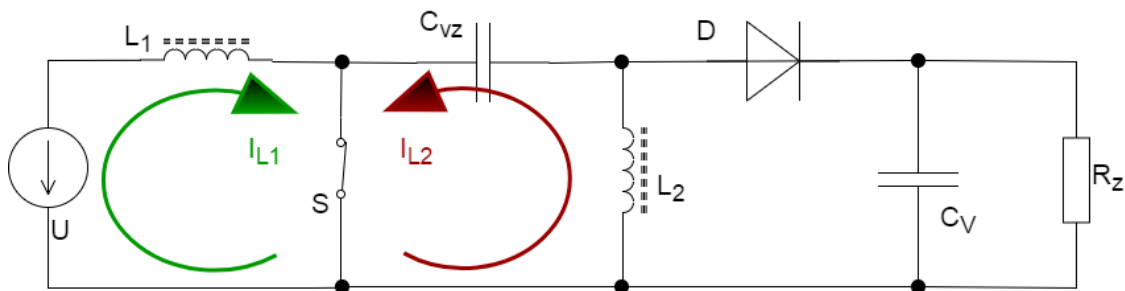
Tento vztah bere v úvahu ideální součástky a ve skutečnosti je k čitateli zlomku nutné přičíst ztráty vzniklé na vazebním kondenzátoru a na cívce L_2 . Hodnotu ve jmenovateli ovlivní ztráty na spínacím prvku a ztráty na cívce L_1 . Po dosazení dostáváme vztah pro reálný přenos:

$$A_r = \frac{U_{V(\max)} + U_D + I_{L1} R_{cvz} + I_{V(\max)} R_{L2}}{U_{N(\min)} - I_{L1} (R_{L1} + R_S) - I_{V(\max)} R_S}. \quad (2.1.1.3)$$

Pokud je přenos menší než jedna, potom SEPIC funguje jako snižující měnič a pokud je vyšší než jedna, potom napětí ze vstupu na výstup zvyšuje.

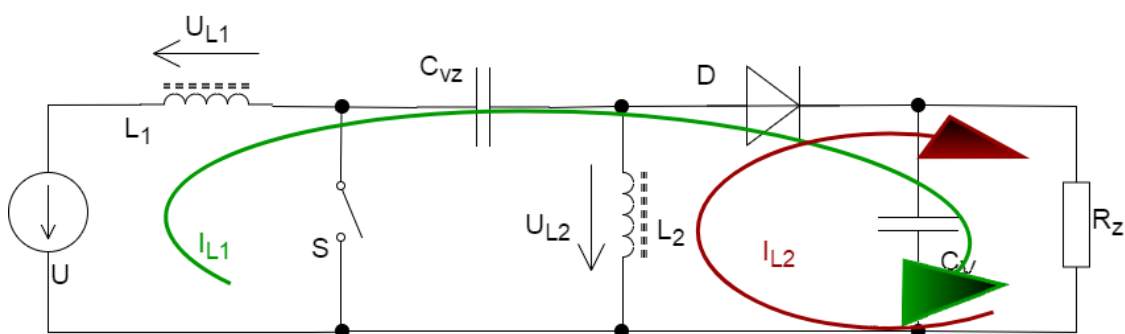
2.1.2 Proudové poměry

Celkem můžeme popsat čtyři různé proudové smyčky v obvodu. Dvě pro sepnutý spínač a dvě pro rozepnutý. Na obrázku 2.1.2.1 můžeme vidět znázorněné proudové smyčky pro sepnutý spínač.



Obr.: 2.1.2.1 Proudové smyčky pro sepnutý spínač

Při sepnutém spínači je v uzlu mezi cívku L_1 a vazebním kondenzátorem nulové napětí, neboť je přes spínač připojen k záporné svorce napájecího zdroje. To znamená, že v uzlu mezi vazebním kondenzátorem a diodou musí být napětí rovno $-U_N$. Proto je dioda zavřená a proudová smyčka I_{L2} se uzavírá přes cívku L_2 , spínač a vazební kondenzátor, který funguje jako napěťový zdroj. Do cívky L_2 se v této části cyklu akumulují energie z vazebního kondenzátoru. Dále je důležité si uvědomit, že přes vazební kondenzátor neprochází stejnosměrná složka proudu. Z toho plyne, že stejnosměrná složka výstupního proudu je tvořena, pouze proudem I_{L2} ($I_V = I_{L2}$). Proudová smyčka I_{L1} se v této části cyklu uzavírá přes cívku L_1 , do které se také akumulují energie, a spínač.



Obr.: 2.1.2.2 Proudové smyčky pro rozepnutý spínač

V druhé fázi cyklu je spínač rozepnut. Akumulovaná energie v cívce L_2 se přenáší přes diodu do výstupního kondenzátoru. Proud I_{L1} nabíjí vazební kondenzátor. Tyto jevy jsou znázorněny na obrázku 2.1.2.2, kde jsou zobrazeny proudové smyčky pro rozepnutý spínač.

Z uvedených jevů lze odvodit velikost proudu I_{L1} . Jelikož víme, že přes vazební kondenzátor neprochází stejnosměrná složka proudu, musí být náboj dodaný proudem I_{L1} za dobu $(1 - \alpha)T$ roven náboji, který se z kondenzátoru odebírá za dobu αT ve formě proudu I_{L2} :

$$\alpha T I_{L2} = I_{L1} (1 - \alpha) T. \quad (2.1.2.1)$$

Po úpravě rovnice (2.1.2.1) dostaneme vztah pro proud I_{L1} :

$$I_{L1} = A_i \cdot I_{L2}. \quad (2.1.2.2)$$

Pro přesnější výpočet lze nahradit ideální přenos za reálný.

2.1.3 Vazební kondenzátor

Jako vazební kondenzátor by měl být správně zvolen kondenzátor s nízkým sériovým odporem a nízkou parazitní indukčností. Například keramický kondenzátor je vhodný pro tuto aplikaci. Zde je důležité si dát pozor na maximální povolené napětí kondenzátoru, protože napěťové špičky mohou dosahovat poměrně vysokých hodnot.

Aby vazební kondenzátor správně fungoval, musí splňovat minimálně tyto dvě podmínky. První podmínka vychází ze vztahu $Q = C U$:

$$C_{vz} \geq \frac{\alpha T I_{L2}}{\gamma U_{N(\min)}}, \quad (2.1.3.1)$$

kde v čitateli zlomku je popsán náboj, který se odebírá z vazebního kondenzátoru proudem I_{L2} a ve jmenovateli je určeno zvlnění napětí na vazebním kondenzátoru (typicky $\gamma = 1\%$ až 5%). Je to bráno pro nejhorší možný případ, kdy má napájecí napětí nejnížší možnou hodnotu.

Druhá podmínka je, že energie, která se uloží ve vazebním kondenzátoru, musí být vyšší, než energie uložená do cívky L_2 . Důvod jsou ztráty, které vzniknou na parazitních odporech reálných součástek.

$$\frac{1}{2} C_{vz} U_{Cvz}^2 \geq \frac{1}{2} L_2 I_{L2}^2. \quad (2.1.3.2)$$

2.1.4 Cívky

Volba cívek je pro správnou funkci měniče velmi důležitá. Velikost jejich indukčností by měla mít přiměřenou hodnotu s ohledem ke spínací frekvenci. Pro zvolení správné hodnoty cívek je nutné zohlednit energii, která se bude do cívek ukládat v podobě magnetického indukčního toku. Velikost energie uložená v cívce je rovna:

$$E = \frac{1}{2} L I^2. \quad (2.1.4.1)$$

Ze vztahu (2.1.4.1) vyjádříme indukčnost a energii nahradíme součinem výkonu a času. Výsledný vztah bude mít následující tvar:

$$L = \frac{2Pt}{I^2} = \frac{2UIt}{I^2} = \frac{2tU}{I}. \quad (2.1.4.2)$$

Ve vztahu (2.1.4.2) jsou již uvedeny všechny požadované veličiny pro výpočet, proto je možné vyjádřit vztahy pro výpočet velikosti indukčností cívek. Velikost indukčnosti cívky L_1 vychází z energie, kterou z ní odebíráme za dobu $(1 - \alpha)T$ do vazebního

kondenzátoru. Za napětí dosadíme maximální možnou hodnotu napětí. Po dosazení dostáváme vztah:

$$L_1 = \frac{2(1-\alpha)TU_{N(max)}}{I_V}. \quad (2.1.4.3)$$

Vztah (2.1.4.3) vychází z [4]. Ve jmenovateli zlomku je uveden výstupní proud, kterým se zřejmě zanedbávají ztráty na neideálních součástkách. Pokud by se ztráty braly v úvahu, tak by se výstupní proud nahradil proudem I_{L1} .

Velikost indukčnosti cívky L_2 volíme podle energie, která se do ní přemístí za dobu αT z vazebního kondenzátoru. Za napětí volíme maximální hodnotu napětí, které může být na vazebním kondenzátoru (jeho hodnota je rovna maximálnímu napájecímu napětí). Z toho dostaneme vztah:

$$L_2 = \frac{2\alpha TU_{Cvz(max)}}{I_{L2}}. \quad (2.1.4.4)$$

Pro správnou funkci přenosu energie v měniči se volí stejná hodnota obou cívek. Zvolíme tedy vypočtenou hodnotu, která má vyšší hodnotu indukčnosti. Pokud by se hodnoty cívek nerovnal, docházelo by ke ztrátám, při přenosu energie.

Je možné a v mnoha ohledech i výhodnější navinout obě vinutí cívek na jedno jádro, protože pokud jsou obě cívky stejné a jsou napájeny ze stejných zdrojů napětí ($U_N = U_{Cvz}$), potom se na nich indukuje stejné napětí. To nás přímo navádí na užití společného jádra. Při užití společného jádra se vlivem vzájemné indukčnosti sníží potřebná hodnota cívek na polovinu, viz [5].

Další důležitý parametr, který u cívek nelze přehlížet je maximální špičkový proud, který může dosahovat vysokých hodnot. Při jeho překročení nastanou dva nežádoucí stavy. Nastane pokles indukčnosti cívky, který je způsoben změnou relativní permeability jádra. Druhý je ohřátí drátu, které může mít za následek i jeho přepálení.

Špičkový proud cívkou je dán součtem střední hodnoty proudu cívkou a zvlňněním proudu. Pro cívku L_1 zvolíme minimální hodnotu napájecího napětí, protože při nižším

napětí je potřeba odebrat vyšší proud ze zdroje pro stejný výkon na výstupu. Bude tedy platit:

$$I_{L1(\max)} = I_{L1} + 0,5 \cdot \Delta I_{L1} = A_r I_V + \frac{0,5\alpha T U_{N(\min)}}{L_1}. \quad (2.1.4.5)$$

Pro cívku L_2 bude platit obdobný vztah:

$$I_{L2(\max)} = I_{L2} + 0,5 \cdot \Delta I_{L2} = I_V + \frac{0,5\alpha T U_{Cvz(\max)}}{L_2}. \quad (2.1.4.6)$$

2.1.5 Vstupní a výstupní kondenzátor

Hlavní smysl výstupního kondenzátoru spočívá ve vyhlazení výstupního napětí a zásobování zátěže dostatkem náboje. Jeho hodnota je odvozena ze vztahu $Q = C U$:

$$C_v \geq \frac{A_i I_v \alpha T}{\Delta U_v}. \quad (2.1.5.1)$$

V čitateli je popsán náboj, který se odebrá z kondenzátoru za dobu sepnutí spínače a ve jmenovateli je popsáno maximální povolené zvlnění výstupního napětí.

V tomto znění je vztah (2.1.5.1) uveden v [4]. Za proud by zřejmě bylo lepší dosadit výstupní proud, který je za dobu αT odebrán zátěží.

Díky uchování energie v samotném spínaném zdroji, není potřeba použít vstupní kondenzátor o velké hodnotě kapacity. Typicky postačí pouze desetina z hodnoty výstupního kondenzátoru:

$$C_N = \frac{C_v}{10}. \quad (2.1.5.2)$$

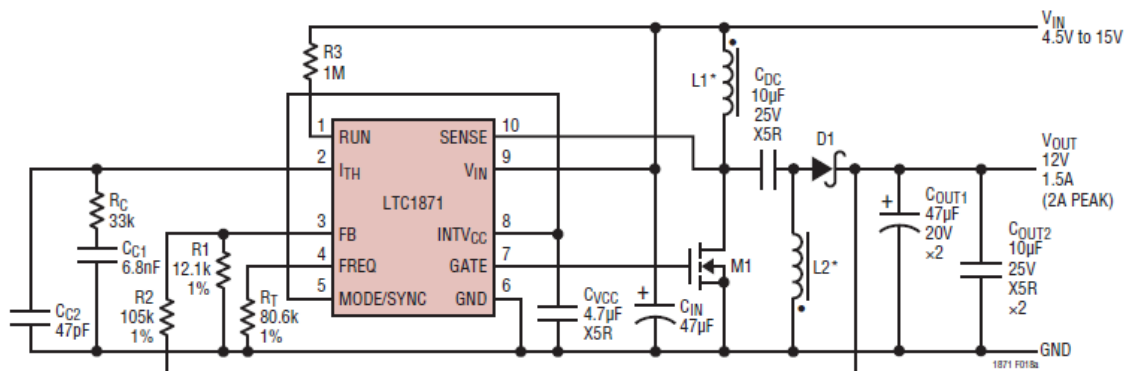
2.2 Oblasti použití

Obrovská výhoda spínaného zdroje typu SEPIC je ta, že dokáže napětí ze vstupu na výstup snížit i zvýšit. Těto vlastnosti se využívá u bateriového napájení, kdy je potřeba pro správnou funkci napájeného obvodu udržet neměnné napětí (například 12 V v automobilu). Ve skutečnosti může být napětí na akumulátoru vyšší i nižší v závislosti na jeho vybití. Při použití spínaného zdroje lze udržet napájecí napětí konstantní bez ohledu na napětí akumulátoru.

3. Návrh spínaného zdroje s integrovaným obvodem

3.1 Výběr integrovaného obvodu

V současnosti existuje na trhu velké množství výrobců zabývajících se výrobou řídicích integrovaných obvodů pro spínané zdroje. Mezi nejznámější patří Linear Technology (dnes součást Analog Devices), On Semiconductor, nebo Texas Instruments.

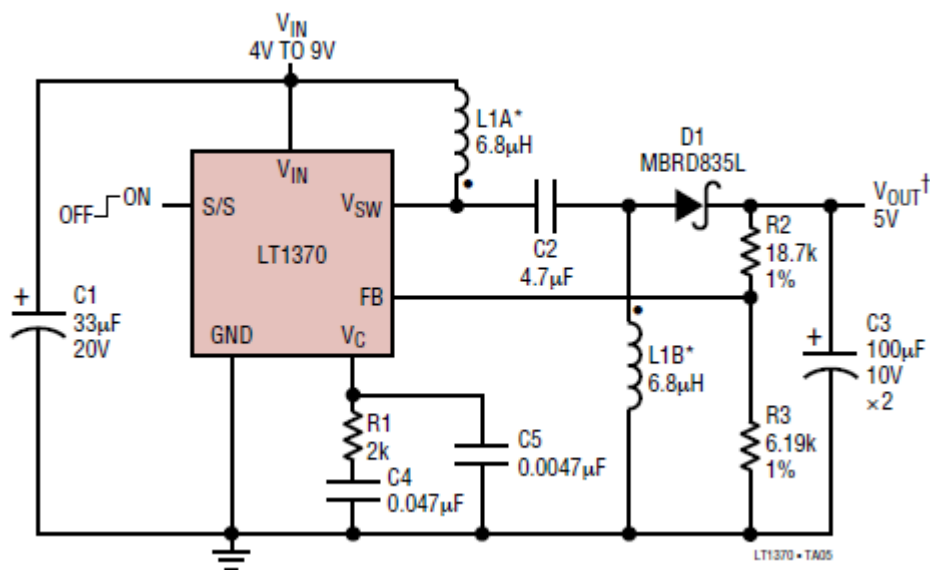


Obr.: 3.1.1 Příklad zapojení obvodu LTC1871 pro spínaný zdroj se SEPIC koncepcí

(převzato z [5])

Pro tuto práci byla zvolena firma Linear Technology, především díky snadné a rychlé simulaci jejich dostupných obvodů. Vzhledem k požadované SEPIC koncepci, velikosti vstupního napětí a výstupního výkonu byly vybrány tři integrované obvody. První je obvod LTC1871, který pouze řídí chod spínaného zdroje a je potřeba k němu připojit externí spínací prvek. Obrázek 3.1.1 demonstuje jeho ukázkové zapojení pro spínaný zdroj se SEPIC koncepcí.

Druhý vybraný obvod nese označení LT1370HV. Tento integrovaný obvod v sobě již integruje spínací prvek, což se projeví na jeho rozměrech, které jsou větší než u LTC1871. Jeho hlavní výhodou je jednoduché zapojení, ke kterému stačí přidat málo dalších komponent pro správnou funkci spínaného zdroje. Na obrázku 3.1.2 je znázorněno zapojení spínaného zdroje se SEPIC koncepcí za použití obvodu LT1370HV. Při porovnání se schématem zapojení, které je zobrazeno na obrázku 3.1.1, je patrné, že počet použitých součástek je značně zredukován.



Obr.: 3.1.2 Příklad zapojení obvodu LTC1370HV pro spínaný zdroj se SEPIC koncepcí

(Převzato z [6])

Poslední představovaný obvod LT1170HV má obdobné zapojení jako LT1370HV, ale není schopný pracovat na tak vysoké frekvenci. Vlastnosti výše zmíněných obvodů jsou shrnuty v tabulce 4.1.1 (viz [5-7]):

Tab.: 4.1.1 Vlastnosti integrovaných obvodů

	LTC1871	LT1370HV	LT1170HV
Minimální napájecí napětí (V)	2,5	2,7	3
Maximální napájecí napětí (V)	36	30	60
Maximální výstupní napětí (V)	72	42	60
Pracovní frekvence (kHz)	50 - 1000	500	100
Maximální výstupní proud (A)	20	6	5
Integrovaný spínač	Ne	Ano	Ano
Pouzdro	MS-10	TO-220	TO-220

Jak je z tabulky 4.1.1 zřejmé, tak pro větší výkony se používají externí tranzistory a integrovaný obvod má pouze řídicí funkci. V našem případě bude přípravek sloužit pro výukové účely, proto není potřeba dosáhnout velkého výstupního výkonu.

Navzdory nižší pracovní frekvenci, která má za následek vyšší hodnoty indukčnosti a kapacit použitých součástek, byl zvolen obvod LT1170HV. Především kvůli jeho odolnosti vůči vyšším napětím.

3.2 Požadavky na spínaný zdroj

Spínaný zdroj bude sloužit pro výukové účely, proto je potřeba zajistit měřicí body ve význačných větvích obvodu. Druhý důležitý požadavek je SEPIC koncepce spínaného zdroje.

Ostatní parametry jsou voleny s ohledem na použití a možnosti integrovaného obvodu, kde největší omezení je dáno maximálním proudem spínače. U spínaného zdroje typu SEPIC je nutné brát v úvahu, že v jeden moment spínačem protékají proudy dvou proudových smyček. První proudová smyčka vychází z napájecího zdroje a druhá uzavírá obvod přes vazební kondenzátor. Celkový proud spínačem je dán součtem těchto proudů.

Pokud vezmeme v úvahu všechny výše uvedené aspekty, vyplynou z nich následující parametry spínaného zdroje:

1. $U_N = 10 \text{ V} - 20 \text{ V}$
2. $U_V = 1,5 \text{ V} - 25 \text{ V}$
3. $I_V = 0,8 \text{ A}$

Další potřebné hodnoty pro výpočet jsou spínací frekvence, úbytek napětí na výstupní diodě a parazitní odpory reálných součástek. Tyto hodnoty zjistíme z katalogů použitých součástek.

1. $T = 0,00001 \text{ s}$ (tj. $f = 100 \text{ kHz}$) [7]
2. $U_D = 0,95 \text{ V}$ [24]
3. $R_{Cvz} = 0,15 \Omega$ [22]
4. $R_S = 0,24 \Omega$ [7]
5. $R_{L1} = 0,126 \Omega$ [20]
6. $R_{L2} = 0,126 \Omega$ [20]

Z těchto hodnot je již možné spočítat přenos podle vztahu (2.1.1.2). Dostaneme $A_i = 2,6$, vzhledem k použitým součástkám spočítáme i reálný zesilovací faktor a z něho maximální střidu spínání ($A_r = 2,91$; $\alpha = 74,4 \%$).

3.3 Výběr komponent pro obvod

3.3.1 Cívky

Když ze vztahů (2.1.4.3) a (2.1.4.4) spočítáme hodnoty indukčností cívek, zjistíme, že cívka L_2 má vyšší hodnotu indukčnosti, proto zvolíme pro obě cívky její indukčnost. Pro spínaný zdroj s integrovaným obvodem použijeme dvě cívky se společným jádrem, proto vypočtenou indukčnost vydělíme dvěma, viz kapitola 2.1.4.

S ohledem na vypočtenou indukčnost a dostupnost cívek je zvolena cívka s hodnotou indukčnosti $100 \mu\text{H}$. Dále je potřeba nepřekročit saturační proudy cívek. Hodnoty těchto

proudů spočteme podle vztahů (2.1.4.5) a (2.1.4.6). Pro cívku L_1 vyjde proud 2,52 A a pro cívku L_2 1,17 A.

Celkový saturační proud dvojitého induktoru je pro SEPIC dán součtem saturačních proudů obou cívek. Tato hodnota by neměla překročit hodnotu udávanou výrobcem, jinak hrozí poškození cívky. Podrobněji v [9].

Také je důležité ověřit pro jaký rozsah frekvencí je hodnota indukčnosti cívky, kterou výrobce udává, měřená. Při používání cívky na vyšší frekvenci, než je stanoveno, prudce klesne její indukčnost.

3.3.2 Vazební kondenzátor

Hodnotu kapacity vazebního kondenzátoru spočítáme ze vztahu (2.1.3.1). Dále je potřeba se ujistit, že výsledná hodnota splňuje nerovnost (2.1.3.2). S ohledem na tyto podmínky a dostupnost byl zvolen hliníkový elektrolytický kondenzátor s hodnotou kapacity 330 μF a maximálním napětím 63 V.

3.3.3 Vstupní a výstupní kondenzátor

Hodnotu kapacity výstupního kondenzátoru vypočítáme podle vztahu (2.1.5.1), kde jako maximální povolené zvlnění výstupního napětí uvažujeme hodnotu 40 mV. Při zohlednění všech ovlivňujících faktorů je zvolen hliníkový elektrolytický kondenzátor s hodnotou kapacity 470 μF . Pro rychlejší reakci na změnu zátěže je spojen paralelně s keramickým kondenzátorem s hodnotou kapacity 1 μF . Jejich jmenovité napětí je odvozeno od maximálního výstupního napětí. Vzhledem k dostupnosti kondenzátorů je tato hodnota určena na 63 V.

Jako vstupní kondenzátor je také zvolena paralelní kombinace elektrolytického kondenzátoru a keramického. Jejich hodnoty kapacit jsou odvozeny ze vztahu (2.1.5.2). Pro keramický kondenzátor je zvolena hodnota kapacity 1 μF a pro elektrolytický 47 μF .

3.3.4 Usměrňovací dioda

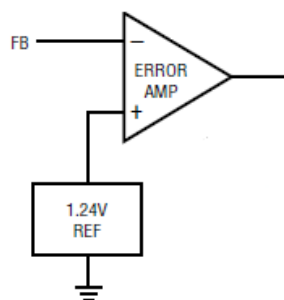
Mezi hlavní parametry, které nás budou zajímat u usměrňovací diody, patří její doba závěrného zotavení. Tato hodnota by měla být alespoň o dva řády vyšší než je perioda spínání spínacího prvku (viz [1]), jinak by docházelo ke zbytečným ztrátám, které by byly způsobené vybíjením výstupního kondenzátoru přes cívku L_2 . Dále by dioda měla mít co nejmenší úbytek napětí v propustném směru a nesmějí se překročit jmenovité hodnoty proudu a napětí.

Pro tento spínaný zdroj je zvolena dioda s označením ES3B+ [24], která se označuje jako ultrarychlá dioda. Její doba zotavení je 35 ns, což je pro tuto aplikaci dostačující. Její nevýhoda je poměrně vysoký úbytek napětí v propustném směru (950 mV).

Podrobnější popis lze nalézt v [2].

3.3.5 Výstupní dělič

Výstupní napětí je dáno poměrem odporů rezistorů výstupního děliče. Ten představují sériově zapojené rezistory R2 a R3, které jsou znázorněny na obrázku 3.4.1. Do uzlu mezi nimi je připojen vývod z LT1170HV s označením feedback (FB). Za tímto vývodem se ukrývá invertující vstup chybového zesilovače. Jeho neinvertující vstup tvoří napěťová reference (u LT1170HV odpovídá 1,25 V, viz [7]). Zjednodušené zapojení lze vidět na obrázku 3.3.5.1.



Obr.: 3.3.5.1 Principiální zapojení chybového zesilovače

(Převzato z [7])

Chybový zesilovač se snaží udržet na obou vstupech stejné napětí (což je napětí reference). Pokud tedy napětí na napěťovém děliči vzroste, nebo klesne, tak rozdíl od reference je zesílen a předává se dále ke zpracování. Na tento signál reaguje spínač, který dané odchylce přizpůsobí střídou spínání, tak aby rozdíl vyrovnal. Podrobněji v [7].

Mezi rezistory je tedy konstantní napětí, které má hodnotu reference. Z tohoto faktu lze snadno odvodit velikost odporů rezistorů výstupního děliče, viz [6]. Napětí na rezistoru R_3 je tedy dáno vztahem:

$$U_{R3} = U_V \frac{R_3}{R_2 + R_3}. \quad (3.3.5.1)$$

Ze vztahu 3.3.5.1 lze již snadno odvodit hodnotu odporů rezistorů a výstupního napětí. Po dosazení dostaneme vztah:

$$U_V = 1,25 \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right). \quad (3.3.5.2)$$

Ze vztahu 3.3.5.2 se spočítají hodnoty odporů rezistorů, jejich celková velikost bývá doporučena výrobcem a proud jimi protékající by měl být zanedbatelný vůči očekávanému odebíranému proudu. Pro tuto aplikaci je zvolen rezistor R_3 s hodnotou odporu 560Ω a potenciometr R_2 s hodnotou $10 \text{ k}\Omega$.

Jako potenciometr je zvolen rezistor R_2 , protože ze vztahu 3.3.5.2 vyplývá, že pokud by byl rezistor R_3 proměnný, tak by probíhala nelineární změna výstupního napětí vůči změně jeho odporu.

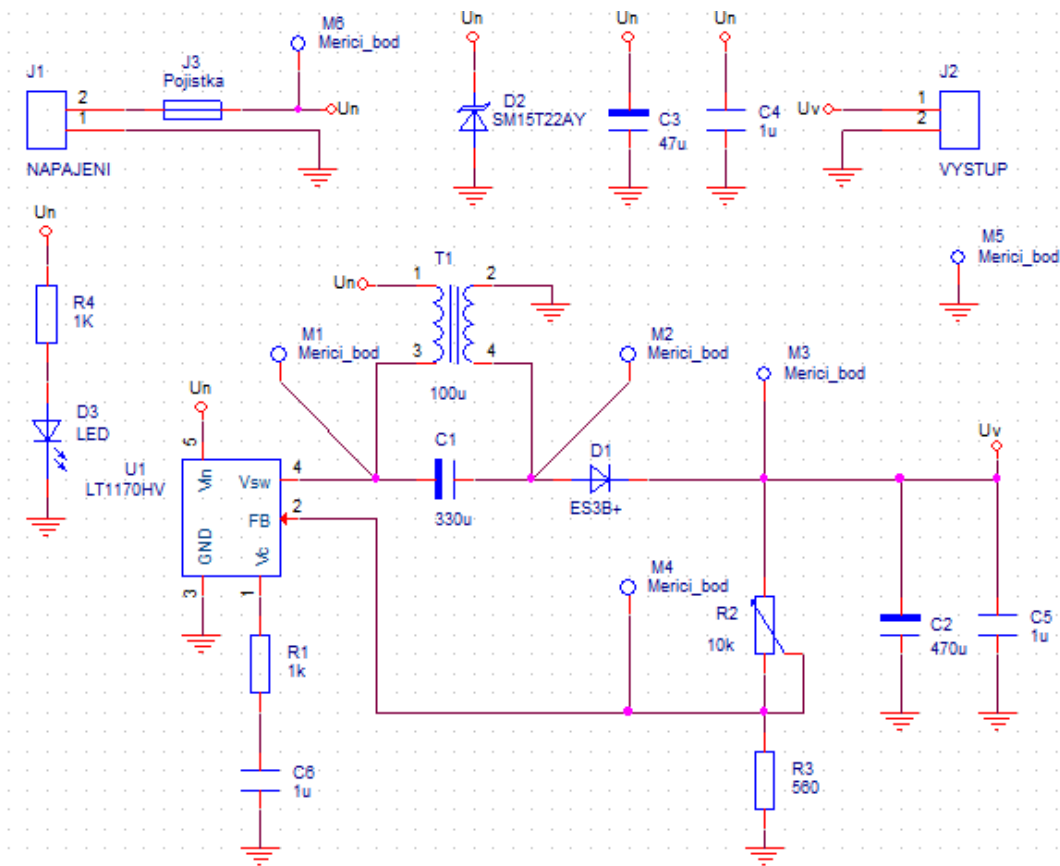
Vztah pro výstupní napětí, také říká, že minimální výstupní napětí je rovno napětí referenčnímu (při $R_2 = 0 \Omega$).

3.4 Schéma zapojení

Na obrázku 3.4.1 je zobrazeno celkové schéma zapojení spínaného zdroje se SEPIC koncepcí za použití integrovaného obvodu LT1170HV. Schéma obsahuje mimo vypočtené součástky a připojovací konektory také měřicí body, které jsou umístěny do význačných větví obvodu.

Dále je zde použita ochrana proti vysokému napájecímu napětí a proti přepólování. Realizuje se pomocí transilu (ve schématu D₂), který pro vysoké napětí a opačnou polaritu napětí funguje jako zkrat. Bude jím tedy procházet maximální proud zdroje při chybném napájení a vznikne na něm velký ztrátový výkon, který je transil schopný vydržet krátkou dobu. Z tohoto důvodu je do série s napájecím zdrojem zařazena pojistka, která v takovém případě celý obvod odpojí od napájení.

Dioda D₃ s rezistorem R₄ slouží pro indikaci připojeného napájení a ke kontrole porušení pojistky.



Obr.: 3.4.1 Celkové schéma zapojení spínaného zdroje SEPIC s použitím LT1170HV

4. Návrh spínaného zdroje z diskretních součástek

4.1 Požadavky na spínaný zdroj

Pro spínaný zdroj z diskretních součástek platí podobné požadavky jako pro spínaný zdroj s integrovaným obvodem (tj. SEPIC koncepce, měřicí body).

V této variantě návrhu zmizí problém s nízkou hodnotou maximálního proudu spínačem, protože na rozdíl od LT1170HV využívá externí tranzistor, který lze zvolit podle potřebné aplikace.

Při zohlednění výše uvedených skutečností a dostupnosti součástek jsou zvoleny pro spínaný zdroj následující parametry:

1. $U_N = 10 \text{ V} - 20 \text{ V}$
2. $U_V = 5 \text{ V} - 23 \text{ V}$
3. $I_V = 0,8 \text{ A}$
4. $T = 0,00001 \text{ s}$ (tj. $f = 100 \text{ kHz}$)

Potřebné katalogové hodnoty součástek jsou:

1. $U_D = 1,25 \text{ V}$ [18]
2. $R_{Cvz} = 0,15 \Omega$ [22]
3. $R_S = 0,85 \Omega$ [17]
4. $R_{L1} = 0,142 \Omega$ [21]
5. $R_{L2} = 0,142 \Omega$ [21]

Po dosazení do vzorce pro přenos dostaneme hodnoty ($A_i = 2,43$; $A_r = 3,33$). Z reálného zesilovacího faktoru spočítáme maximální hodnotu střídny, která je rovna 76,9 %.

4.2 Výběr prvků obvodu

4.2.1 Cívky

Ze vztahů (2.1.4.3) a (2.1.4.4) spočítáme velikosti indukčnosti cívek. Vzhledem k větší hodnotě indukčnosti cívky L_2 zvolíme její indukčnost. Mezi vhodné typy cívky patří například toroid, protože má minimální rozptyl magnetického toku do okolí, viz [8].

Vzhledem k dostupnosti cívek a uvedeným skutečnostem jsou zvoleny toroidní cívky s hodnotou indukčnosti 330 μH . Opět je nutné ověřit, že není překročen saturační proud cívek. Maximální frekvence, na které jsou schopny, pracovat je stanovena výrobcem na 100 kHz, viz [21].

4.2.2 Vazební kondenzátor

Hodnotu kapacity vazebního kondenzátoru vypočteme ze vztahů (2.1.3.1) a (2.1.3.2). Po zohlednění dostupnosti součástek je zvolen elektrolytický kondenzátor s hodnotou kapacity 330 μH a jmenovitou hodnotou napětí 63 V. Je potřeba zvolit kondenzátor s minimální hodnotou sériového odporu, aby na něm nedocházelo ke zbytečným ztrátám.

4.2.3 Vstupní a výstupní kondenzátor

Kapacitu výstupního kondenzátoru vypočítáme podle vztahu (2.1.5.1). Při maximálním povoleném zvlnění výstupního napětí 40 mV, lze použít elektrolytický kondenzátor s kapacitou 470 μF a jmenovitým napětím 63 V.

Pro vstupní kondenzátor, jeho kapacitu vypočítáme podle vztahu (2.1.5.1), je zvolena hodnota kapacity 47 μF a jmenovité napětí 25 V. Jak je již v kapitole 3.3.3 popsáno, tak vstupní i výstupní kondenzátor jsou doplněny paralelně keramickými kondenzátory.

4.2.4 Usměrňovací dioda

Pro usměrňovací diodu platí stejné požadavky, které jsou uvedeny v kapitole 3.3.4. Proto je zvolena dioda s označením SF26 [18]. Její doba závěrného zotavení má hodnotu 35 ns, což je pro frekvenci 100 kHz dostačující doba. Její nevýhoda spočívá ve vyšším úbytku napětí v propustném směru. Jeho hodnota má velikost 1,25 V.

4.2.5 Spínací tranzistor

Volba spínacího tranzistoru je další důležitý bod při návrhu spínaného zdroje. Musí se zohlednit spousta parametrů, aby správně fungoval. Mezi nejdůležitější patří maximální proud tranzistorem, který musí být mnohonásobně větší než výstupní proud, neboť tranzistorem protékají proudy obou proudových smyček, což má za následek vysoké hodnoty proudu. Samozřejmě se nesmí překročit ani jeho jmenovité napětí.

Další důležitý parametr je odpor tranzistoru v sepnutém stavu, který by měl být co nejnižší, aby nedocházelo ke ztrátám.

Posledním zmíněným parametrem je maximální spínací frekvence tranzistoru. Tato hodnota by měla být až o dva řády vyšší než, jaká je skutečná spínací frekvence zdroje, viz [1].

Pro tuto aplikaci je zvolen MOSFET tranzistor s označením IRF840 [17], který má odpor v sepnutém stavu o hodnotě 0,85 Ω . Jeho výhoda je poměrně nízký náboj na hradle (38 nC) a tím způsobená vysoká spínací frekvence, která odpovídá asi 12,5 MHz.

4.3 Zpětná vazba

4.3.1 Chybový zesilovač

Chybový zesilovač zjišťuje informaci, o kolik se liší napětí na výstupu U_V (podělené poměrem odporů rezistorů R_1 a R_2) od nastavené reference U_{ref} . Tuto hodnotu dále předává jako napětí zpětné vazby U_{ZV} na vstup komparátoru, jehož činnost bude popsána dále.

Schéma zapojení chybového zesilovače je znázorněné na obrázku 4.3.1.1. Ve zpětné vazbě chybového zesilovače se nachází sériová kombinace kondenzátoru a odporu. Toto zapojení se také v některých publikacích označuje jako PI regulátor (proporciálně integrační regulátor). Kondenzátor je zde z toho důvodu, aby potlačoval zvlnění výstupního napětí, které může ovlivnit přesnost zpětné vazby, a tím způsobit nižší stabilitu výstupního napětí.

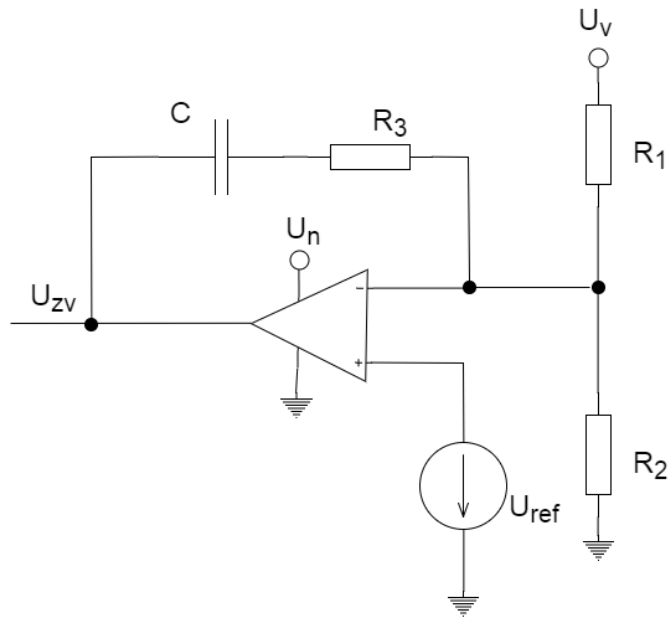
Velikost kapacity kondenzátoru musí mít takovou hodnotu, aby jeho reaktance měla dostatečně malou hodnotu pro zvlnění výstupního napětí, jehož frekvence je stejná jako spínací frekvence. Její hodnota je dána vztahem:

$$X_c = \frac{1}{\omega C}. \quad (4.3.1.1)$$

Odpor rezistorů R_1 a R_2 určíme stejným způsobem jako u integrované formy spínaného zdroje. Tedy podle vztahu (3.3.5.1), kde po dosazení dostaneme:

$$U_V = R_{ref} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right). \quad (4.3.1.2)$$

Aby byl demonstrován odlišný způsob regulace, který lépe pomůže vysvětlit funkci chybového zesilovače, bude využita regulace pomocí nastavitelné reference napětí na neinvertujícím vstupu. Pro tuto aplikaci je využit obvod s označením TL431 [15].



Obr.: 4.3.1.1 Schéma zapojení chybového zesilovače

Dále je již možné určit přenos chybového zesilovače a nastavit odpor rezistoru R_3 . Výstupní napětí chybového zesilovače, a tedy napětí zpětné vazby je dáno vztahem:

$$U_{zv} = U_{ref} \frac{R_1 \parallel R_2 + R_3 + \frac{1}{j\omega C}}{R_1 \parallel R_2} - U_V \frac{R_3 + \frac{1}{j\omega C}}{R_1}. \quad (4.3.1.3)$$

4.3.2 Generátor trojúhelníkové průběhu

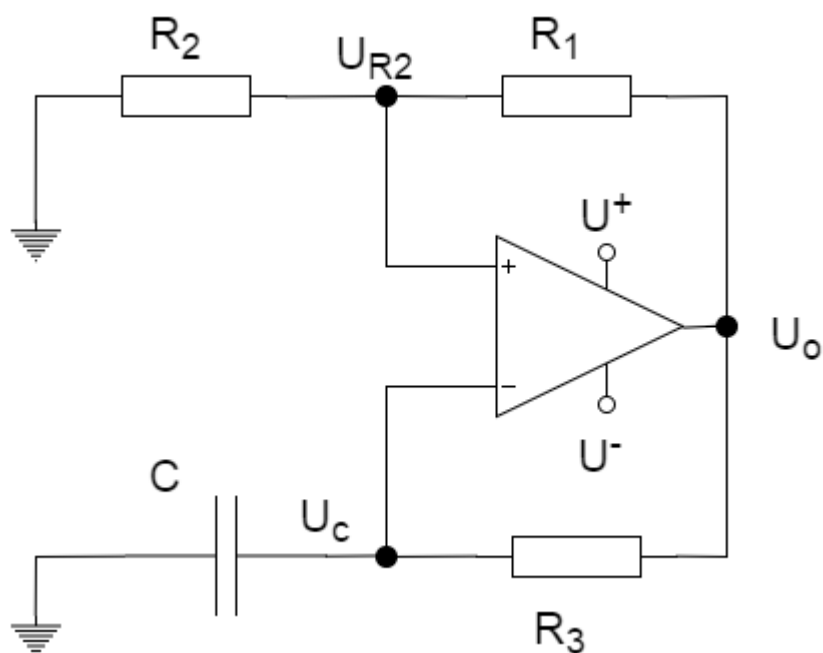
Existuje velké množství možností, jak vyrobit trojúhelníkový průběh. Zřejmě nejsnadnější a relativně levnou variantou je použití operačního zesilovače jako astabilního klopného obvodu.

Jeho principiální schéma zapojení je zobrazeno na obrázku 4.3.2.1. Řekněme, že na počátku nebude kondenzátor C nabit a napětí na výstupu operačního zesilovače (U_O) bude mít hodnotu kladné saturace. Potom hodnota napětí U_{R2} je dána poměrem odporů rezistorů R_1 a R_2 (vždy musí platit $U_O > U_{R2}$, samozřejmě pokud $R_1 > 0 \Omega$!).

V invertující větvi je rezistor R_3 , přes který se nabíjí kondenzátor C . Jakmile nabude napětí U_C hodnoty U_{R2} , tak se výstupní napětí operačního zesilovače překloupí do záporné saturace. Celý proces se opakuje s tím, že kondenzátor se vybíjí až na hodnotu napětí, které je rovno U_{R2} .

Tímto způsobem vzniká na výstupu operačního zesilovače obdélníkový průběh a napětí U_C je popsáno nabíjením a vybíjením kondenzátoru (kladnou a zápornou exponenciálou), které se velice podobá trojúhelníkovému průběhu. Vztah pro frekvenci nestabilního klopného obvodu je dán vztahem (viz [28]):

$$T = \frac{1}{f} = 2CR_3 \cdot \ln \left(1 + \frac{2R_2}{R_1} \right). \quad (4.3.2.1)$$



Obr.: 4.3.2.1 Principiální schéma zapojení oscilátoru s operačním zesilovačem

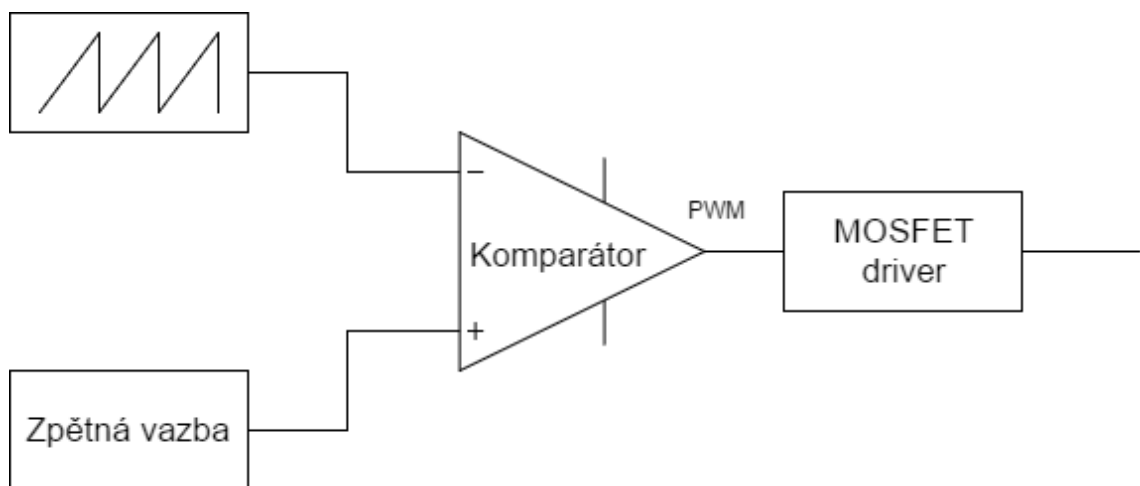
Pro zapojení SEPIC z diskretních součástek budeme využívat napětí U_o . Průběh napětí by u ideálního operačního zesilovače byl sice obdélníkový, ale v našem případě bude vlivem doby přeběhu zkreslen a jeho průběh bude připomínat trojúhelníkový. Při použití operačního zesilovače UA741 [15] lze tímto způsobem odebírat trojúhelníkový průběh i na frekvenci 100 kHz.

Tato frekvence je zvolena, protože není příliš vysoká a lze ji snadno pozorovat na osciloskopu a ani není příliš nízká, protože při nízké frekvenci roste velikost použitých součástek, což by mělo za následek zvětšení celého přípravku.

4.3.3 Komparátor a MOSFET driver

Získaný trojúhelníkový průběh a napětí zpětné vazby se přivedou na vstupy komparátoru. Jak je znázorněno na obrázku 4.3.3.1. Komparátor tyto hodnoty porovnává a na jeho výstupu se tímto způsobem objevuje obdélníkový signál, kterému se mění střída.

Na výstup komparátoru je připojen MOSFET driver, který proudově posílí impulsy z komparátoru a výsledný signál je přenesen na hradlo spínacího tranzistoru.



Obr.: 4.3.3.1 Principiální schéma zapojení komparátoru a MOSFET driveru

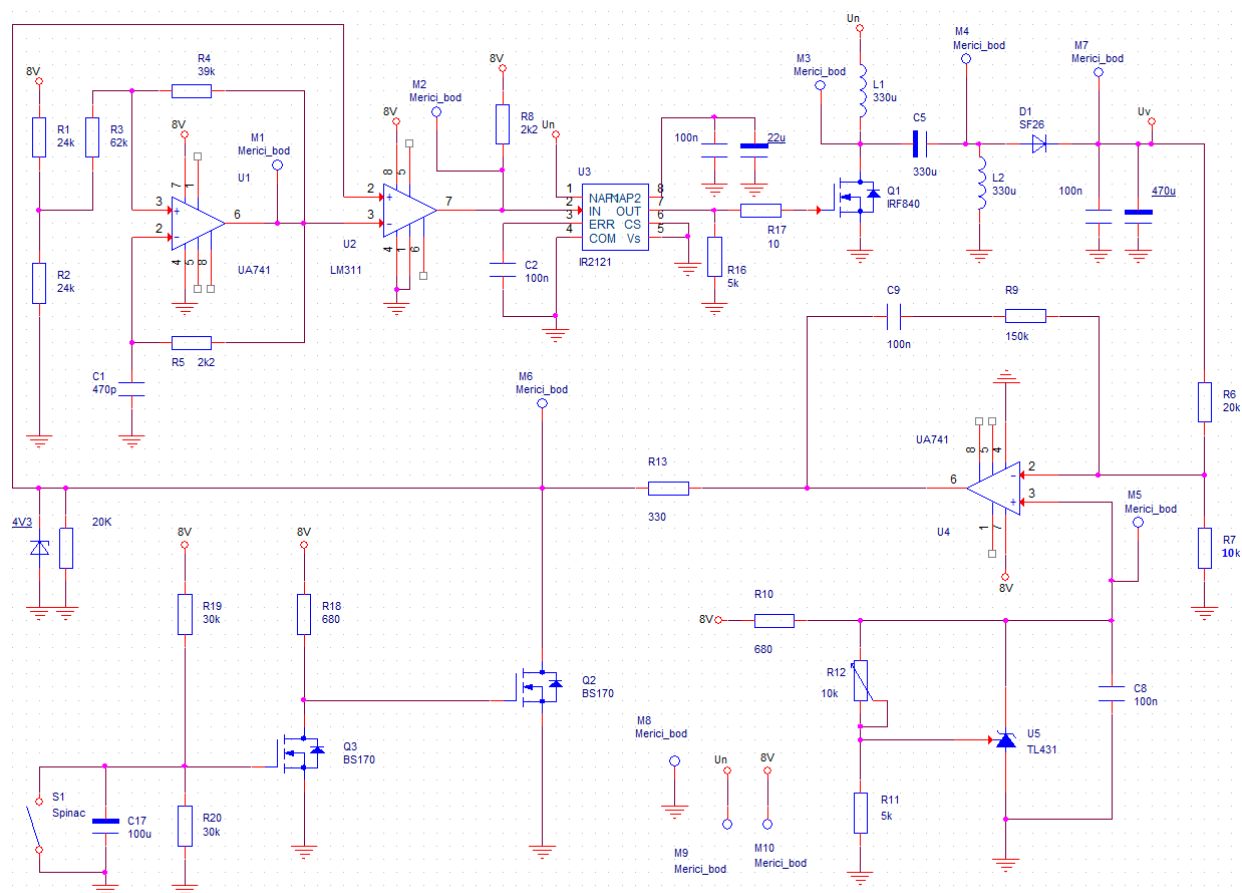
Jako komparátor je použit obvod s označením LM311 [14], který má na výstupu tranzistor, proto je nutné na jeho výstup připojit napájení přes rezistor. Jako MOSFET driver je vybrán obvod s označením IR2121 [16]. Tento obvod má řadu výhod proti MOSFET driverům od ostatních výrobců.

MOSFET drivery od firmy IR (International Rectifier) mají kontrolu poklesu napájecího napětí. Pokud dojde k poklesu napájecího napětí, pod určitou úroveň, tak se zablokuje činnost spínacích prvků, které jsou k MOSFET driveru připojeny. Tato funkce

je pro zapojení SEPIC z diskretních součástek výhodná, protože při zkratování napájecího zdroje přes spínací tranzistor dojde k poklesu napájecího napětí, což aktivuje podpěťovou ochranu a spínací tranzistor se rozezne. Tímto způsobem je spínací tranzistor chráněn před poškozením.

4.4 Schéma zapojení

Schéma zapojení lze rozdělit do dvou částí. První část popisuje samotný spínaný zdroj, silovou část a řídicí obvody. Druhá část popisuje napájení a ochranu obvodu.



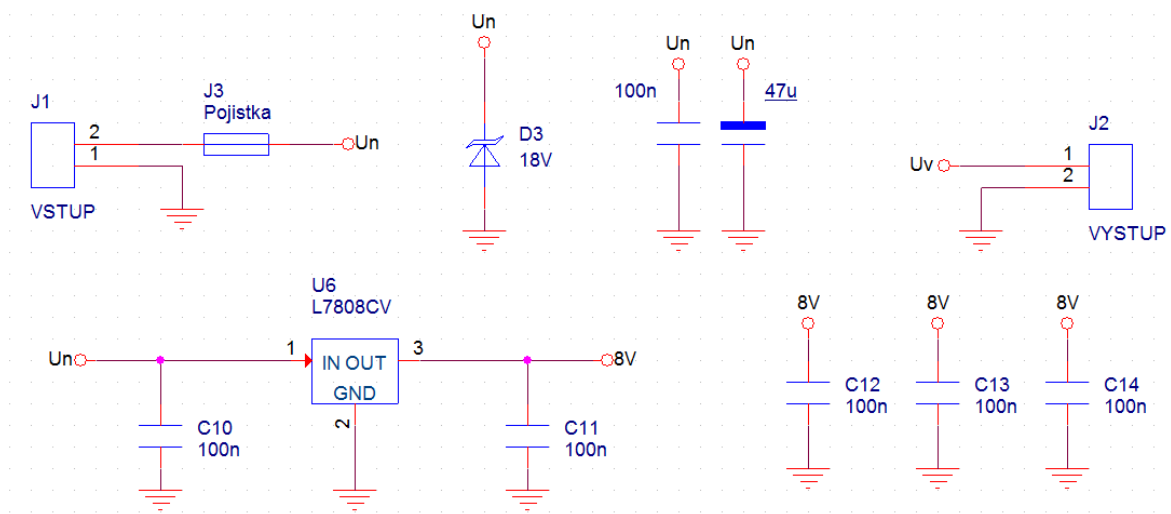
Obr.: 4.4.1 Celkové schéma zapojení spínaného zdroje SEPIC z diskretních součástek

Na obrázku 4.4.1 lze vidět první část schématu. Mimo popsané části se zde nachází tzv. startovací obvod, který je zakreslen v levém dolním rohu schématu. Po připojení

napájení se zpětná vazba pohybuje na příliš vysokém napětí kvůli velkému rozdílu napětí reference a výstupního napětí, které je při zapnutí zdroje rovno nule.

Napětí zpětné vazby je tedy potřeba nějakým způsobem snížit pro rozběhnutí zdroje. To zajišťuje kondenzátor C_{17} , dokud se nenabije, tak je tranzistor Q_3 uzavřen a drží úroveň zpětné vazby na zemním potenciálu. Jakmile se kondenzátor nabije, tak se i sepne tranzistor Q_3 a zpětná vazba již funguje normálně.

Tento jev může nastat i po přetížení zdroje, z tohoto důvodu je připojen paralelně ke kondenzátoru spínač, kterým se vykratuje a napětí na něm klesne na nulu.



Obr.: 4.4.2 Schéma zapojení napájení

Druhá část schématu je znázorněna na obrázku 4.4.2. Je zde použit tranzistor a pojistka, která slouží pro ochranu proti prepólování a přepětí, stejně jako u integrované formy spínaného zdroje. Dále se zde nachází lineární stabilizátor napětí s označením LT7808 [27], který funguje jako zdroj napětí pro řídicí obvody. Jak značí jeho název, tak používané referenční napětí je 8 V. Tato hodnota je zvolena vzhledem k napájecím napětím obvodů.

5. Měření na přípravcích

5.1 Měřené parametry

5.1.1 Zatěžovací charakteristika

Zatěžovací charakteristika vyjadřuje závislost výstupního napětí na výstupním proudu. V ideálním případě by se výstupní napětí nemělo měnit v závislosti na odebíraném proudu, což ve skutečnosti není pravda, neboť ideální napěťový zdroj má nulový vnitřní odpor. Takového stavu nelze dosáhnout, proto dochází k poklesům napětí v závislosti na odebíraném proudu.

Pokud dáme do poměru výstupní a vstupní výkon, dostaneme účinnost zdroje, která se u spínaných zdrojů pohybuje až nad 90 % (viz [5-7]). Účinnost je tedy dána vztahem:

$$\eta = 100 \frac{P_V}{P_N}. \quad (5.1.1.1)$$

Další parametr, který je možné použít pro porovnání spínaných zdrojů, se nazývá činitel zvlnění. Jeho hodnota se udává v procentech a říká, jaký je poměr zvlnění výstupního napětí, vůči střední hodnotě napětí.

$$\varphi = 100 \frac{\Delta U_V}{U_V} \quad (5.1.1.2)$$

Tyto parametry popisuje [11].

5.1.2 Převodní charakteristika

Převodní charakteristika je závislost výstupního a vstupního napětí. Vlastností spínaných zdrojů je, že pokud se vstupní napětí pohybuje v mezích, ve kterých jsou schopny pracovat, potom by jejich výstupní napětí mělo být konstantní.

Ve skutečnosti tomu tak není, proto se zavádí pro jejich porovnávání parametr s názvem činitel stabilizace. Udává poměr změny vstupního napětí vůči změně výstupního napětí. Tedy čím je jeho hodnota větší, tím lépe pro spínaný zdroj (viz [11]).

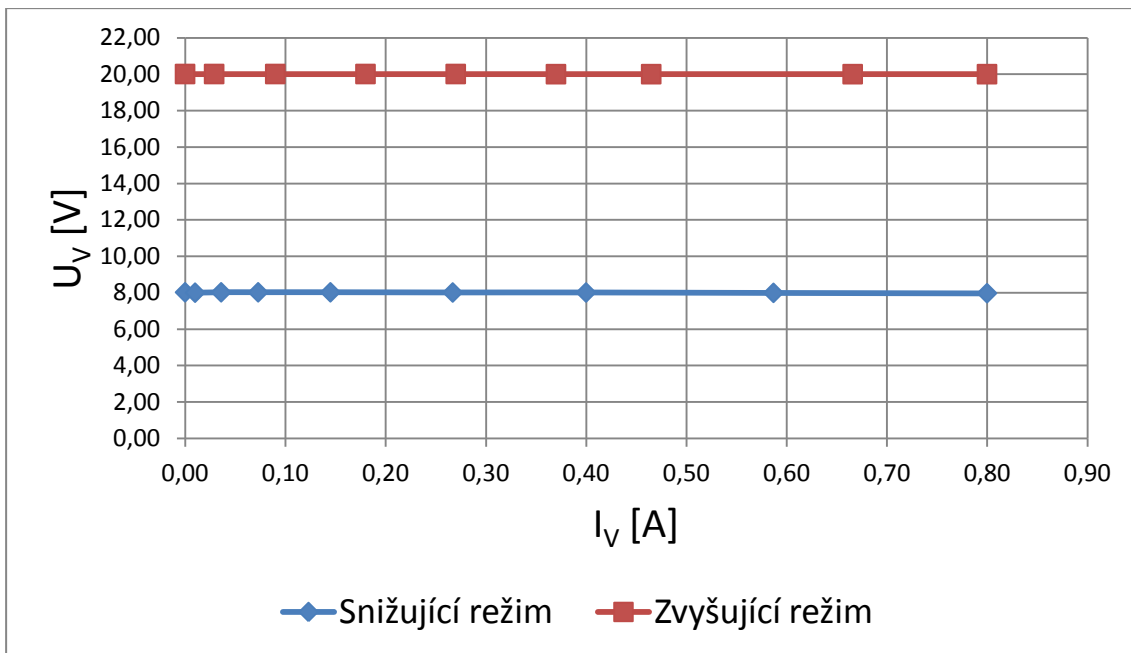
$$S = \frac{\Delta U_N}{\Delta U_V} \quad (5.1.2.1)$$

5.2 SEPIC s integrovaným obvodem

5.2.1 Zatěžovací charakteristika

Hodnoty zatěžovací charakteristiky jsou změřeny pro dvě různá napětí. První ve snižujícím režimu a druhé ve zvyšujícím. Naměřené a vypočtené hodnoty jsou zaznamenány v tabulce, která je součástí přílohy 8.8. Zatěžovací charakteristiky jsou zobrazeny v grafu na obrázku 5.2.1.1.

Zatěžovací charakteristika byla proměřena do 800 mA, protože spínaný zdroj je navržen tak, aby správně fungoval do tohoto proudu. Při překročení této hodnoty hrozí poškození spínaného zdroje. Maximální hodnota vypočtené účinnosti se blíží k 85 %. Tato hodnota přibližně odpovídá účinnosti, kterou udává výrobce (viz [7]).

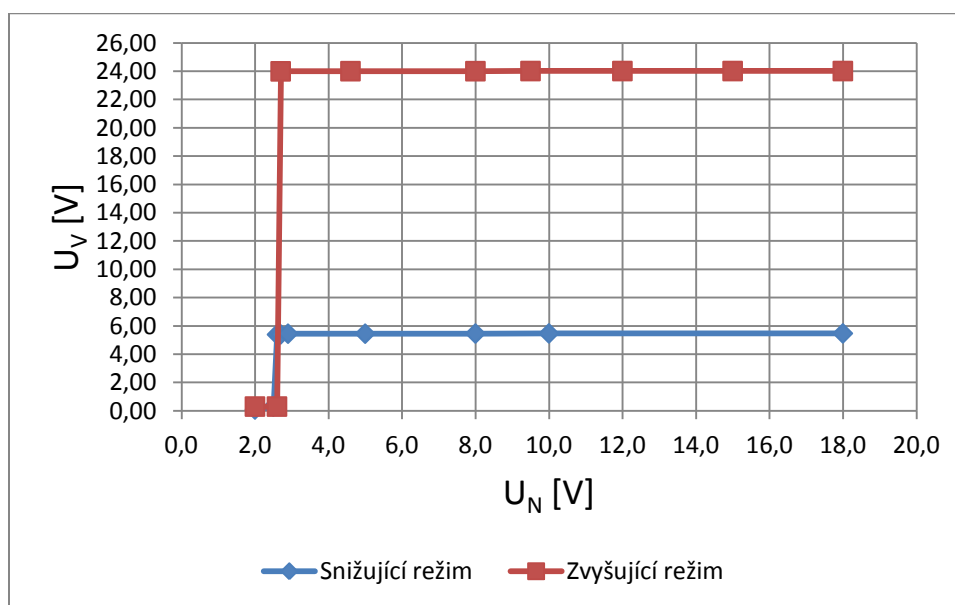


Obr.: 5.2.1.1 Zatěžovací charakteristiky pro SEPIC s integrovaným obvodem

5.2.2 Převodní charakteristika

Stejně jako zatěžovací charakteristika, tak i převodní charakteristika je proměřena pro snižující a zvyšující režim. Maximální povolená hodnota napájení přípravku je rovna 20 V. Převodní charakteristika je měřena od 1 V do 18 V (omezení napájecím zdrojem).

Charakteristiky jsou vyneseny do grafu na obrázku 5.2.2.1.



Obr.: 5.2.2.1 Graf převodních charakteristik pro SEPIC s integrovaným obvodem

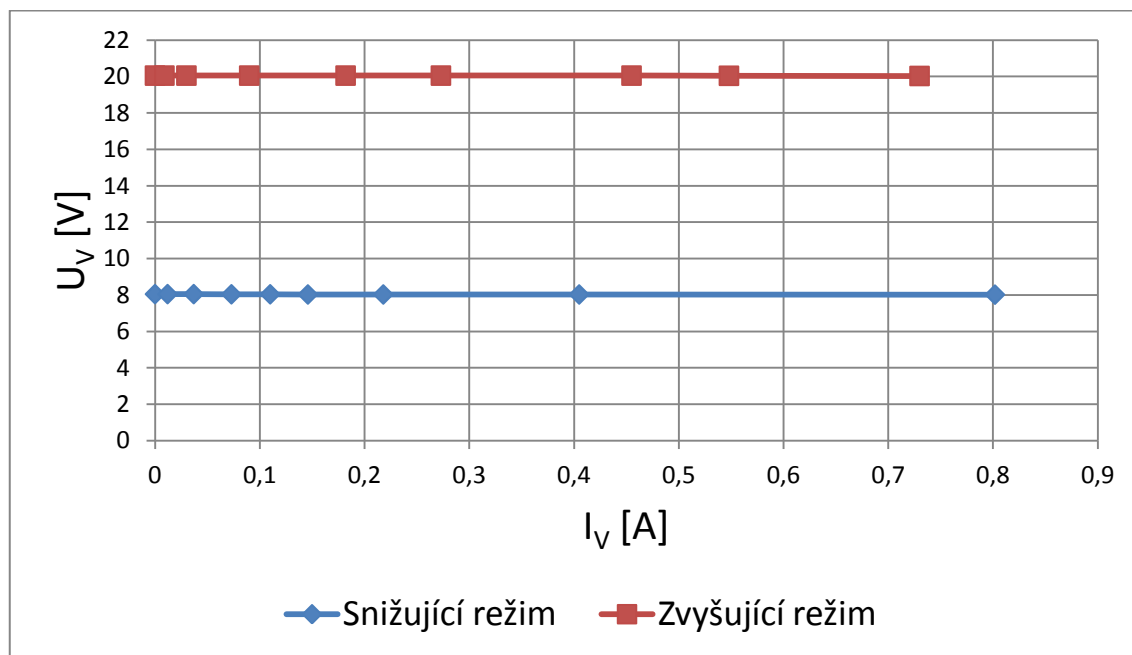
Výrobce udává minimální hodnotu napájecího napětí 3 V. Měřený obvod funguje od hodnoty napětí 2,7 V bez problémů. Činitel stabilizace dosahuje pro snižující režim hodnoty 192,5 a pro zvyšující režim 765. Naměřené hodnoty jsou zaznamenány v tabulce, která je součástí přílohy 8.8.

5.3 SEPIC z diskretních součástek

5.3.1 Zatěžovací charakteristika

Hodnoty zatěžovací charakteristiky jsou změřeny pro dvě různé hodnoty napětí, zvolené tak aby spínaný zdroj jednou fungoval v režimu snižujícím a podruhé ve zvyšujícím. Naměřené hodnoty a k nim vypočtené parametry jsou uvedeny v tabulce, která je součástí přílohy 8.9.

Obě zatěžovací charakteristiky jsou vyneseny do společného grafu, který je znázorněn na obrázku 5.3.1.1.



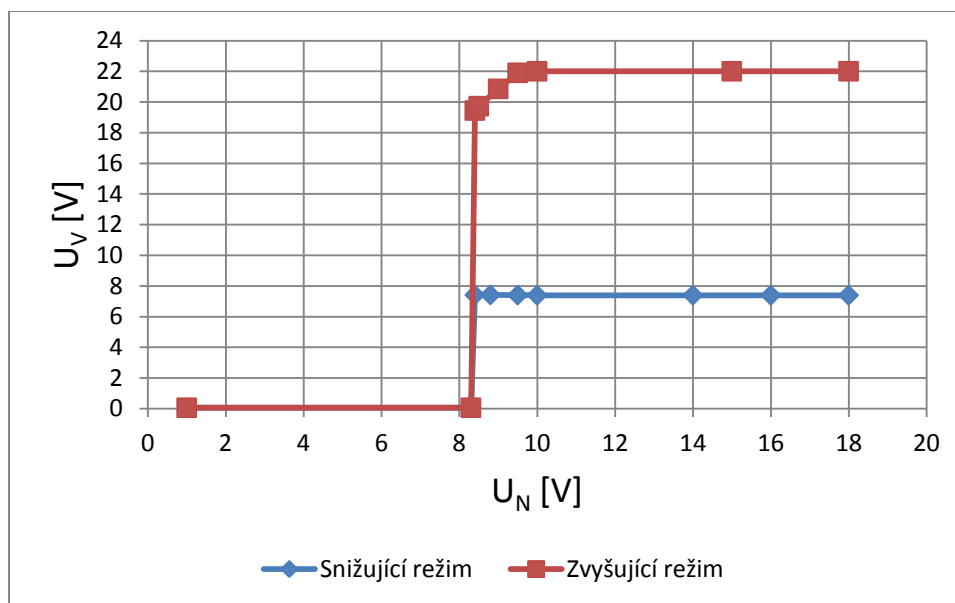
Obr.: 5.3.1.1 Zatěžovací charakteristiky pro SEPIC z diskretních součástek

Zatěžovací charakteristika byla proměřena do 800 mA, protože tato hodnota odpovídá maximálnímu proudu, na který je spínaný zdroj zkonstruován. Hodnoty účinností dosahují až k hodnotě 75 %, pro vyšší odběr proudu (viz příloha 8.9).

5.3.2 Převodní charakteristika

Převodní charakteristika byla proměřena od 1 V do 18 V (maximální hodnota, která lze nastavit na používaném napájecím zdroji), pro dvě různá výstupní napětí a nulový výstupní proud. Výstupní napětí jsou volena tak, aby spínaný zdroj fungoval jednou ve snižujícím a podruhé ve zvyšujícím režimu.

Naměřené a vypočtené hodnoty převodní charakteristiky jsou uvedeny v příloze 8.9 a jejich závislost je znázorněna na obrázku 5.3.2.1.



Obr.: 5.3.2.1 Graf převodních charakteristik pro SEPIC z diskretních součástek

Přípravek je konstruován tak, aby fungoval od 10 V do 20 V. V tomto rozmezí se jeví převodní charakteristika jako ideální, neboť nedochází k poklesům výstupního napětí (hodnota činitele stabilizace jde do nekonečna). Pokud ovšem budeme brát v úvahu

i interval od 8,3 V, od kterého spínaný zdroj ve skutečnosti funguje, potom dostaneme hodnotu činitele stabilizace pro snižující režim 480 a pro zvyšující 85.

Minimální hodnota vstupního napětí je omezena napájecím napětím IR2121 a stabilizátorem LT7808.

5.4 Porovnání přípravků

Z naměřených hodnot zatěžovací charakteristiky lze usoudit, že oba přípravky mají podobné vlastnosti. Největší rozdíl lze zaznamenat u zvlnění výstupního napětí, které u přípravku s integrovaným obvodem dosahuje nižších hodnot. To by mohlo být způsobeno tím, že integrovaný obvod minimalizuje vzdálenost jednotlivých prvků, a tak i velikost celého spínaného zdroje, proto je méně ovlivněn rušením okolních prvků. Také je zredukována na minimum indukčnost a odpor vodičů. Další příčinou může být rozdílná kapacita výstupních kondenzátorů, neboť kapacita udávaná výrobcem má z výrobních důvodů určitou toleranci.

Účinnost obou přípravků je srovnatelná. Maximální hodnoty účinností přípravků se liší asi o 5 %. Pro malé odběry proudu je účinnost nízká, protože odběr proudu do zátěže je srovnatelný s odběrem proudu pro řídicí obvody.

Převodní charakteristiky jsou si také velice podobné. Přípravek z diskretních součástek lépe stabilizuje napětí, ale není schopen pracovat s tak velkým rozsahem vstupních napětí jako přípravek s integrovaným obvodem, protože je limitován napájecím napětím řídicích obvodů.

Co se týče naměřených parametrů přípravků, tak jsou srovnatelné. Do velké výhody se dostává přípravek s integrovaným obvodem při porovnání rozměrů, neboť plocha jeho plošného spoje je poloviční proti přípravku z diskretních součástek. Rozměry by bylo i dále možné redukovat, pokud by nebylo nutné vyvádět měřicí body, což by přípravku s diskretními součástkami příliš na rozměrech neubralo.

6. Závěr

Cíl bakalářské práce:

1. Navrhnout a postavit spínaný zdroj se SEPIC koncepcí z diskretních součástek.
2. Navrhnout a postavit spínaný zdroj se SEPIC koncepcí za použití integrovaného obvodu.
3. Přizpůsobit přípravky výuce.
4. Provést ověřovací měření obou přípravků.
5. Vytvořit vzorový protokol měření k přípravkům.

Výsledky práce:

1. Byl sestrojen plně funkční spínaný zdroj se SEPIC koncepcí z diskretních součástek, který má srovnatelné parametry jako moderní integrovaný obvod. Viz přílohy 8.3 (seznam použitých součástek), 8.5 (šablona pro výrobu DPS), 8.7 (fotografie přípravku).
2. Podařilo se zhotovit spínaný zdroj se SEPIC koncepcí za použití integrovaného obvodu od firmy LT (Linear Technology). Viz přílohy 8.2 (seznam použitých součástek), 8.4 (šablona pro výrobu DPS), 8.6 (fotografie přípravku).
3. Oba přípravky jsou navrženy tak, aby bylo možné snadno rozeznat jednotlivé funkční bloky, a jsou od nich vyvedeny měřicí body. Dále jsou chráněny proti přepólování a přepětí vstupního napětí.
4. Bylo provedeno ověřovací měření. Viz příloha 8.8 (přípravek s integrovaným obvodem) a příloha 8.9 (přípravek z diskretních součástek).
5. Protokol měření je součástí přílohy 8.1.

Možné úpravy přípravků do budoucna:

- a) Přípravek z diskretních součástek
 - Umožnit větší rozsah napájecího napětí.
 - Umožnit změnu pracovní frekvence.
 - Použití LED pro indikaci možných stavů obvodu.
 - Pro snížení výstupního zvlnění by bylo možné použít LC filtr, nebo větší hodnotu kapacity výstupního kondenzátoru.
- b) Přípravek s integrovaným obvodem
 - Použít integrovaný obvod, který by měl možnost nastavení pracovní frekvence.
- c) Pro oba přípravky
 - Vytvořit na plošném spoji elektronickou zátěž pro zatěžování spínaného zdroje.
 - Použít nepájivou masku, aby nehrozilo zkratování některých částí obvodů.
 - Použít konektory, které by umožňovaly lepší kompatibilitu se školními měřicími zařízeními.
 - Vyřešit ochranu proti přepólování a přepětí šetrnějším způsobem.

7. Literatura

- [1] Krejčířík, A.: *Napájecí zdroje I.*, BEN Praha 1996
- [2] Krejčířík, A.: *Napájecí zdroje III.*, BEN Praha 1999
- [3] Krejčířík, A.: *DC-DC měniče*, BEN Praha 2001
- [4] SEPIC Equations and komponent ratings, <https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/1051> (20.3.2018)
- [5] Linear technology: LTC1871 datasheet (2001)
<http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/1871fe.pdf>
- [6] Linear technology: LT1370HV datasheet (1998)
<http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/1370fs.pdf>
- [7] Linear technology: LT1170HV datasheet (1991)
<http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/117012fi.pdf>
- [8] Záhlava, V.: *Návrh a konstrukce DPS*, BEN Praha 2011
- [9] Selecting coupled inductor for SEPIC application,
https://www.coilcraft.com/pdfs/doc639_Selecting_SEPIC_Inductors.pdf (22.4.2108)
- [10] Hospodka, J.: Soubor přednášek ČVUT Praha, Analogové obvody, Zimní semestr 2016
- [11] Hospodka, J. a Náhlík, J.: Soubor přednášek a cvičení ČVUT Praha, Laboratoř elektronických systémů, Letní semestr 2018, druhá část
- [12] Záhlava, V.: Soubor přednášek ČVUT Praha, Principy a pravidla elektronického návrhu, letní semestr 2017
- [13] Texas instruments: μ A741, datasheet (2000)
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm741.pdf>
- [14] ST Microelectronics: LM311, datasheet (2006)
<http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/2d/22/50/0e/7e/39/43/64/CD00001072.pdf/files/CD00001072.pdf/jcr:content/translations/en.CD00001072.pdf>
- [15] Texas instruments: TL431, datasheet (2005)
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl431.pdf>

- [16] International rectifier: IR2121, datasheet (2004)
<https://www.infineon.com/dgdl/ir2121.pdf?fileId=5546d462533600a4015355c84fa31691>
- [17] Vishay: IRF840, datasheet (2016)
<http://www.vishay.com/docs/91070/sihf840.pdf>
- [18] WTE: SF26, datasheet (22.8.2012)
https://www.wontop.com/uploadfiles/56/sort_excel/pdf/sf21.pdf
- [19] Fairchild: BS170, datasheet (1997)
<http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/fairchild/BS170.pdf>
- [20] Coilcraft: Coupled inductors, datasheet (5.6.2016)
<http://www.coilcraft-cps.com/pdf/ms612pnd.pdf>
- [21] Talema (NT MAGNETICS): Low cost power inductors, datasheet (2017)
<http://www.talemagroup.com/uploads/documents/product-datasheets/DP%20Series.pdf>
- [22] HITANO: Aluminium Electrolytic Capacitors – EXR series (25.5.2016)
<http://www.datasheetspdf.com/pdf-down/E/K/H/EKH-HITANO.pdf>
- [23] Kingbright: GL-0805GW (2014 - 2015)
<http://www.kingbrightusa.com/webimages/2013/catalog/SMD%20LED.pdf>
- [24] Multicomp: ES3B+, datasheet (2012)
http://www.farnell.com/datasheets/1662478.pdf?_ga=2.89850008.2061680028.1526385728-618528475.1519653699
- [25] ST Microelectronics: SM15T22AY, datasheet (2012)
<http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/83/5f/b6/7b/63/85/41/b5/CD00283429.pdf/files/CD00283429.pdf/jcr:content/translations/en.CD00283429.pdf>
- [26] ST Microelectronics: 1,5KE22A, datasheet (2002)
<http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/wte/1.5KE180A.pdf>
- [27] ST Microelectronics: L7808CV, datasheet (2016)
<http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/41/4f/b3/b0/12/d4/47/88/CD00000444.pdf/files/CD00000444.pdf/jcr:content/translations/en.CD00000444.pdf>
- [28] Punčochář, J.: *Operační zesilovače v elektronice*, 5. vydání BEN Praha 2002

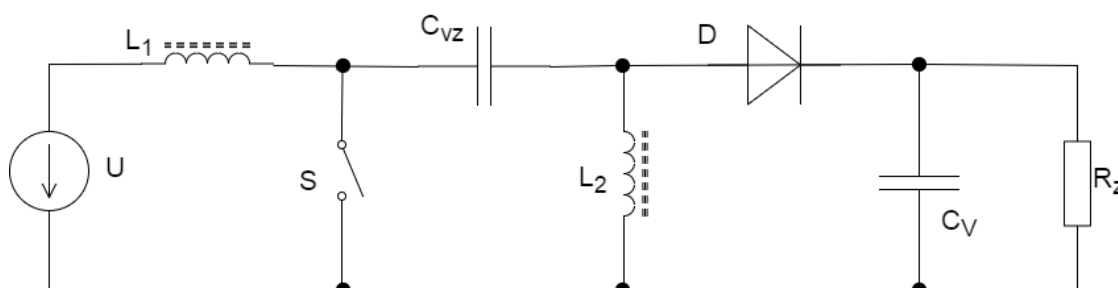
8. Přílohy

8.1 Měřicí protokol

Měření vlastností napájecího zdroje se SEPIC koncepcí

1. Popis úlohy

Spínaný zdroj typu SEPIC (Single-ended primary-inductor converter) je druh zapojení spínaného zdroje, který dokáže napětí na svém vstupu jak zvyšovat, tak i snižovat. Jeho využití lze nalézt především v mobilních aplikacích, kdy napětí na bateriích kolísá okolo jmenovité hodnoty v závislosti na jejich vybití. SEPIC dokáže toto napětí stabilizovat na neměnné hodnotě.



Obr.: 1.1 Zapojení SEPIC

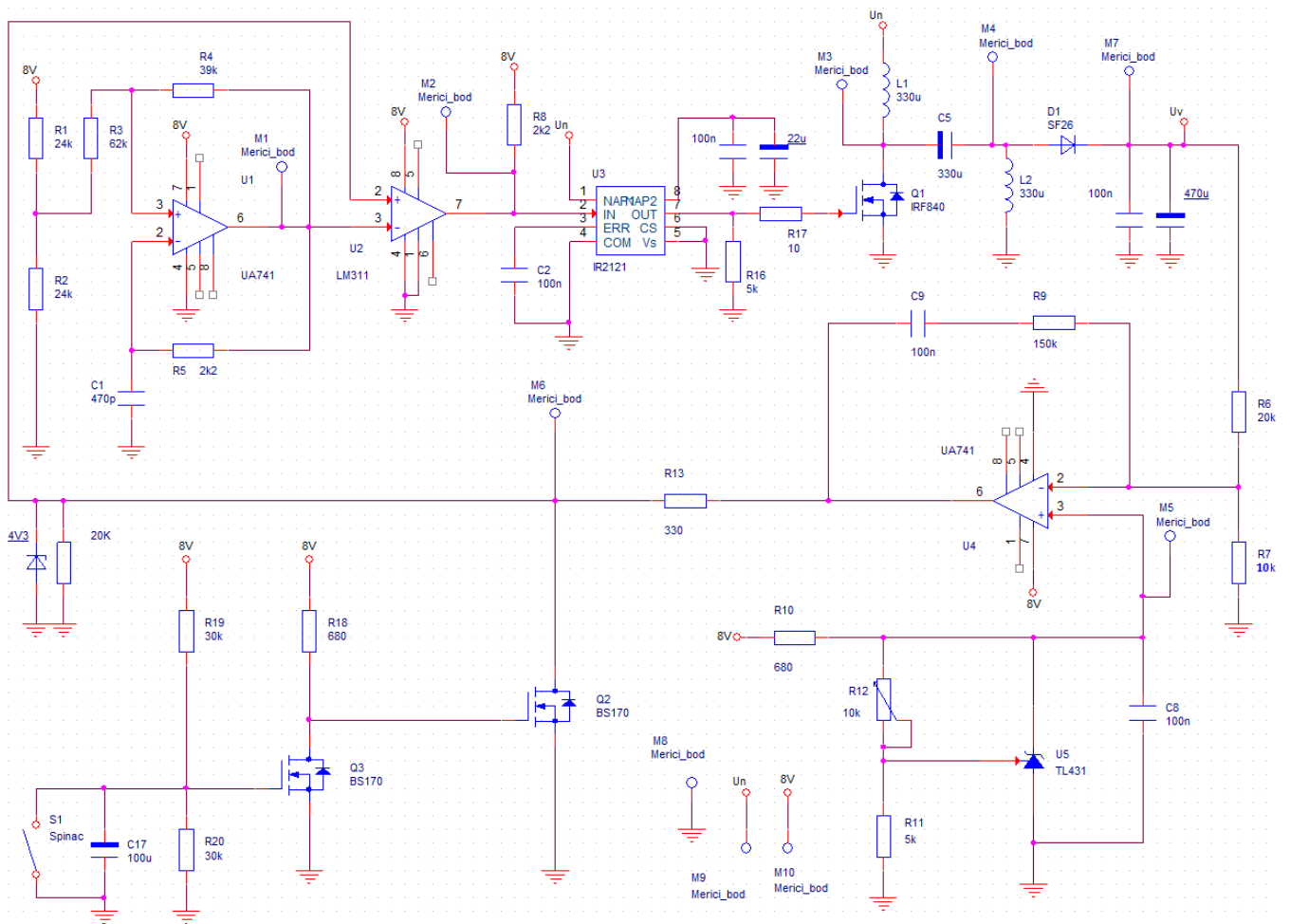
Obrázek 1.1 znázorňuje principiální schéma zapojení. Nastávají dvě možné situace při chodu spínaného zdroje. V první fázi je spínač S sepnut a předpokládáme, že vazební kondenzátor C_{vz} je nabit na napětí zdroje. Cívka L_1 se nabíjí z napájecího zdroje a C_{vz} se vybíjí přes cívku L_2 , která se také nabíjí. Tímto způsobem se do nich ukládá energie ve formě magnetického indukčního toku.

Ve druhé fázi se spínač rozezne, přeruší se tedy proudy obou proudových smyček. Cívky se ovšem snaží udržet stejný směr a velikost proudu, proto se na nich začne

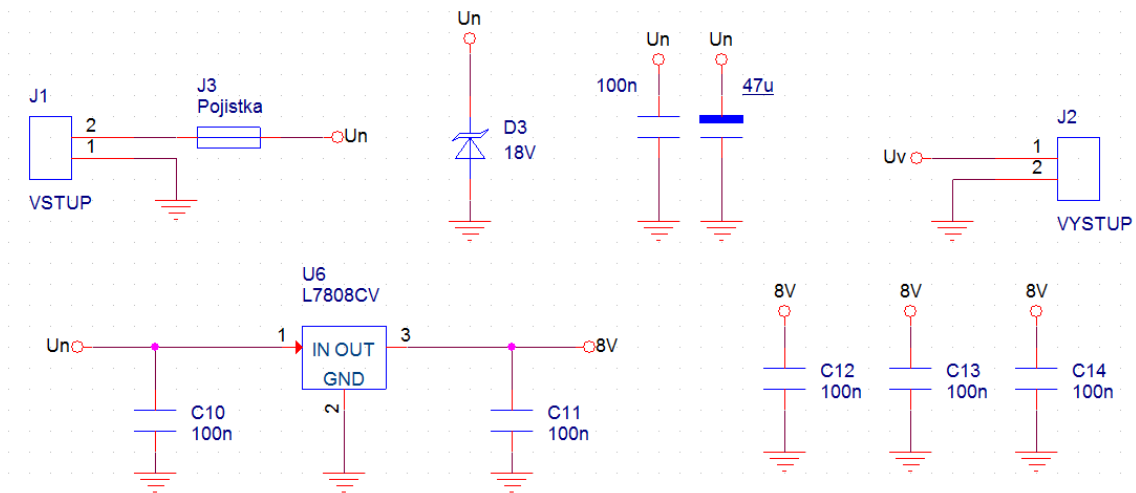
indukovat napětí. Proud cívkou L_1 tímto způsobem nabíjí C_{VZ} a L_2 předává svou energii výstupnímu kondenzátoru.

Pokud dřívější návrháři chtěli použít spínaný zdroj, čekal je poměrně náročný úkol, který spočíval ve složitých výpočtech součástek a zavádění zpětné vazby. V dnešní době je tento problém odstraněn, neboť spousta výrobců (Linear technology, On semiconductor...) nabízí integrované obvody, ke kterým mnohdy stačí připojit několik málo součástek, aby spínaný zdroj správně fungoval.

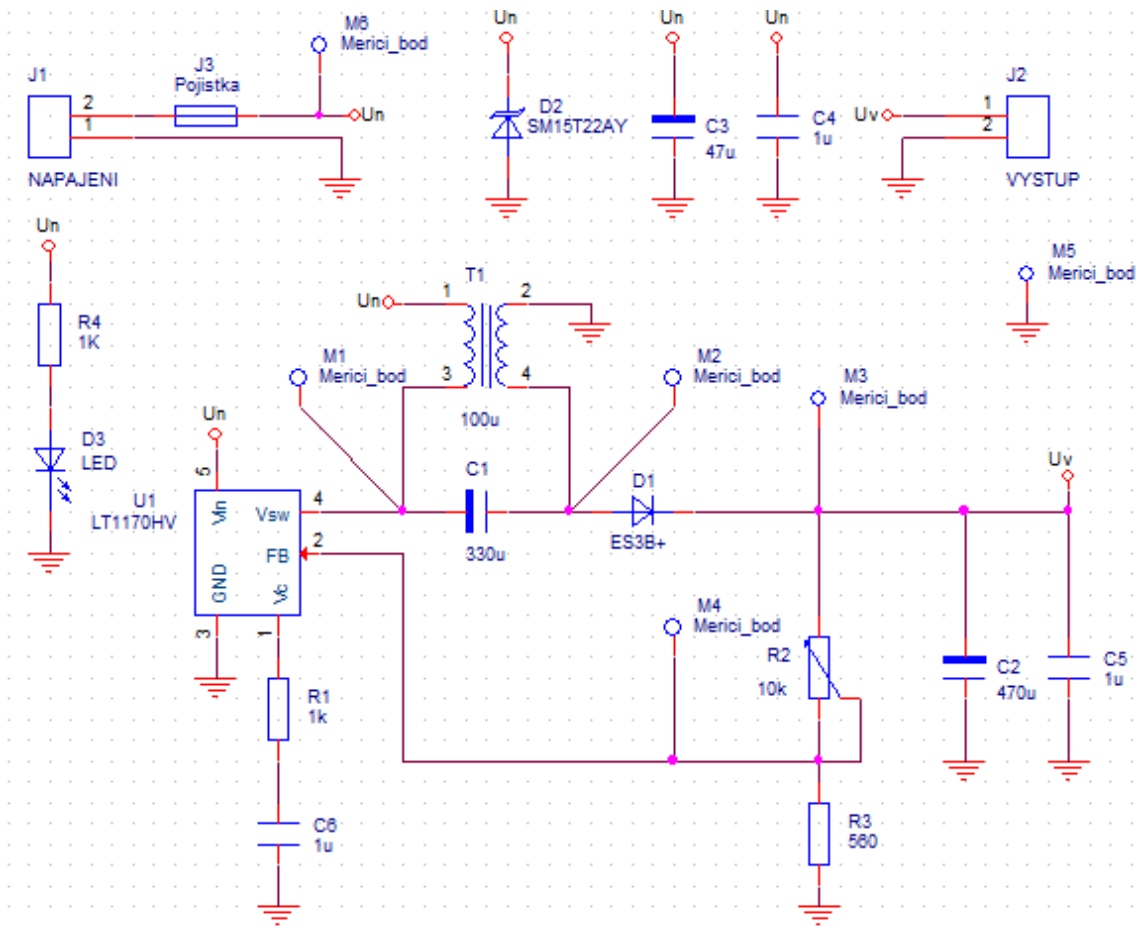
2. Schéma zapojení



Obr.: 2.1 SEPIC z diskrétních součástek – řídicí a silová část



Obr.: 2.2 SEPIC z diskretních součástek – napájení

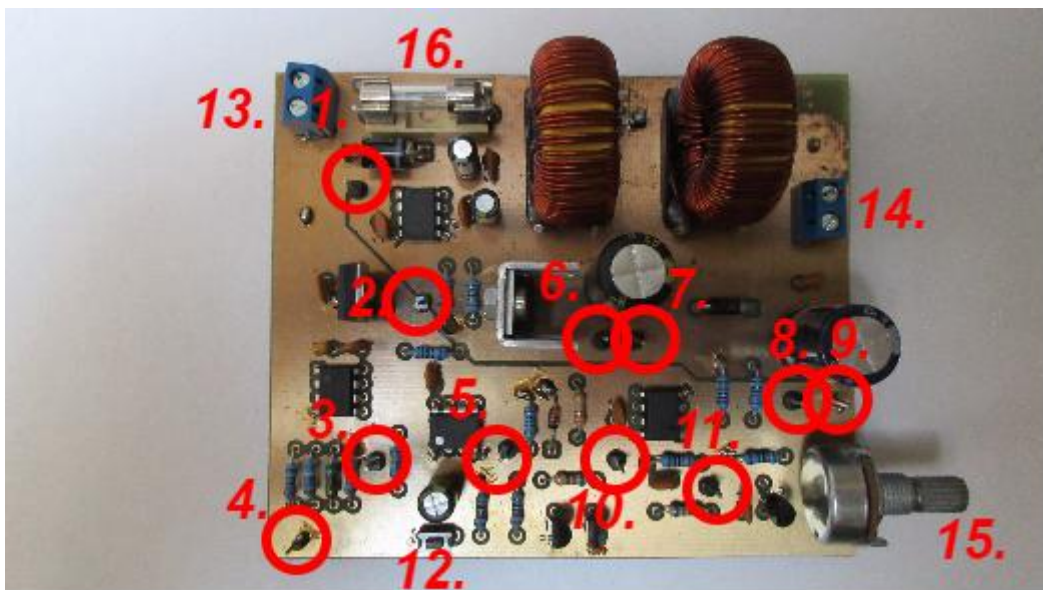


Obr.: 2.3 SEPIC s integrovaným obvodem LT1170HV

3. Popis přípravků

a) Přípravek s diskrétními součástkami

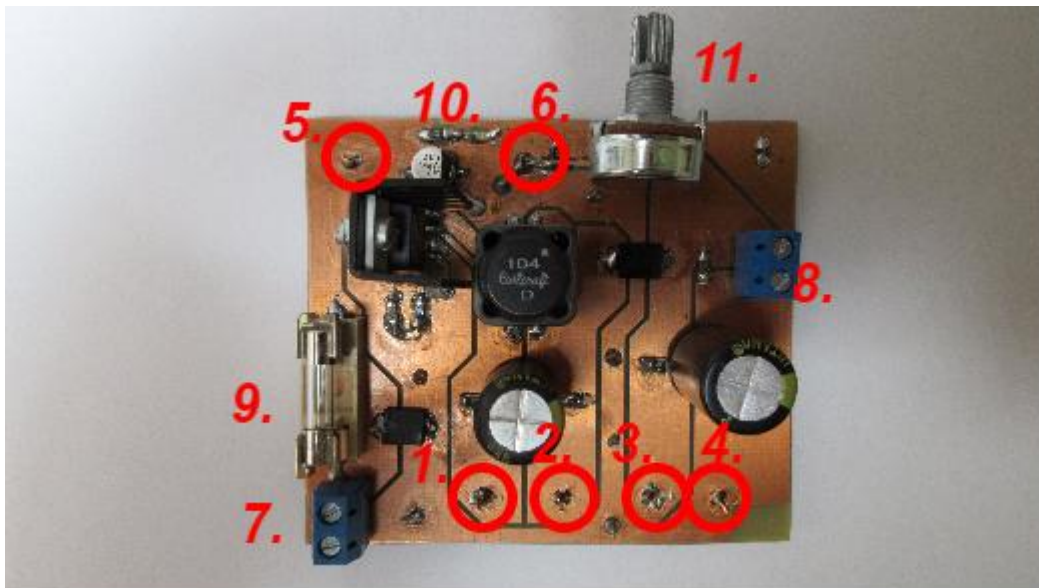
- | | |
|---------------------------------|--------------------------------|
| 1. Napájecí napájení | 9. GND |
| 2. PWM signál řídicí tranzistor | 10. Napájení pro řídicí obvody |
| 3. Trojúhelníkový signál | 11. Napětí reference |
| 4. GND | 12. Restart obvodu |
| 5. Zpětná vazba | 13. Napájecí konektor |
| 6. Drain spínacího tranzistoru | 14. Výstupní konektor |
| 7. Anoda diody | 15. Regulace výstupního napětí |
| 8. Výstupní napětí | 16. Pojistka |



Obr.: 3.1 Popis přípravku s diskrétními součástkami

b) Přípravek s integrovaným obvodem

1. Spínací prvek
2. Anoda diody
3. Výstupní napětí
4. GND
5. Napájecí napětí
6. Zpětná vazba
7. Napájecí konektor
8. Výstupní konektor
9. Pojistka
10. LED kontrolka
11. Regulace výstupního napětí



Obr.: 3.2 Popis přípravku s integrovaným obvodem

4. Varování

- Maximální hodnota napájecího napětí obou přípravků je 20 V! Doporučená hodnota napájení je 15 V, pokud není uvedeno jinak.
- Nezatěžovat přípravky vysokou hodnotou proudu jinak hrozí jejich poškození (maximální hodnota zatěžovacího proudu je 500 mA)!
- Nesahat na chladič, může být rozpálen a při dotyku hrozí popálení kůže!
- Pokud spínanému zdroji z diskretních součástek spadne výstupní napětí na nulu, je nutné stisknout restartovací tlačítko.

5. Úkoly měření

Následující měření provedte pro oba dva přípravky:

I. Měření zatěžovací charakteristiky $U_V = f(I_V)$

- Zakreslete do společného grafu 2 zatěžovací charakteristiky pro každý přípravek.
- Jak se liší odebíraný proud ze zdroje při zvyšujícím a snižujícím módu?

II. Měření převodní charakteristiky $U_V = f(U_N)$

- Zakreslete převodní charakteristiky obou přípravků do společného grafu. Nastavte nulový výstupní proud a napájecí napětí měňte od 0 V do 20 V.
- V čem se převodní charakteristiky liší?

III. Kontrolní otázky

- Čím je určeno výstupní napětí? Odvodte vztah, který ho určuje.
Nápověda: Proměřte napětí na výstupním děliči pro různá výstupní napětí.
- Co se děje se zpětnou vazbou a řídicími signály na hradle tranzistoru při zvyšujícím se výstupním proudem?

8.2 Seznam použitých součástek pro integrovaný přípravek

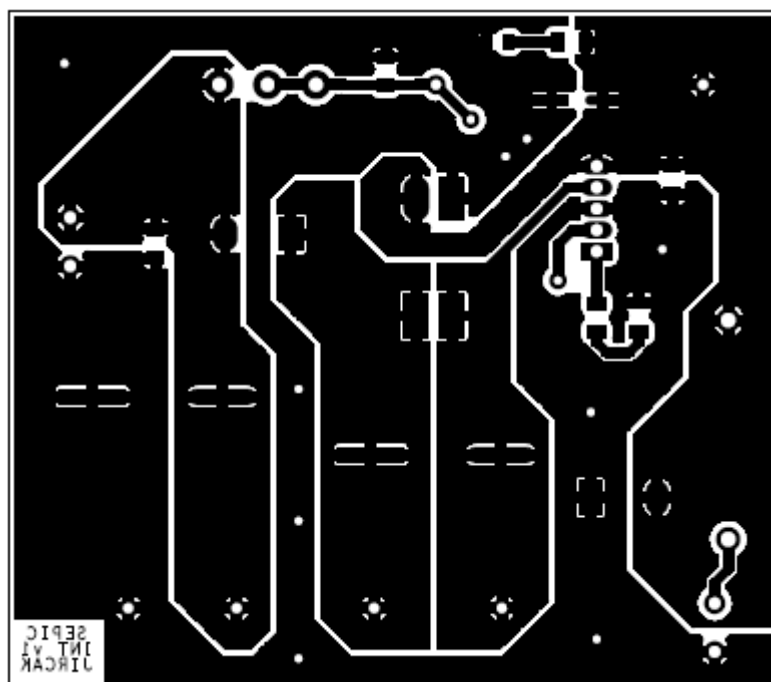
- R ₁ =	1 kΩ	0,25W
- R ₂ =	10 kΩ	Potenciometr
- R ₃ =	603 Ω	0,25W
- R ₄ =	1 kΩ	0,25W
- C ₁ =	330 μF	63V, low ESR elektrolytický
- C ₂ =	470 μF	50V, low ESR elektrolytický
- C ₃ =	47 μF	35 V, low ESR elektrolytický
- C ₄ =	47 μF	50 V, keramický
- C ₅ =	47 μF	50 V, keramický
- C ₆ =	47 μF	50 V, keramický
- D ₁ =	ES3B+	superrychlá
- D ₂ =	SM15T22AY	jednocestný transil 22 V
- D ₃ =	GL-0805GW	zelená LED
- U ₁ =	LT1170HV	
- L ₁ =	100 μH	spojený induktor, saturační proud 4,2 A

8.3 Seznam použitých součástek pro diskrétní přípravek

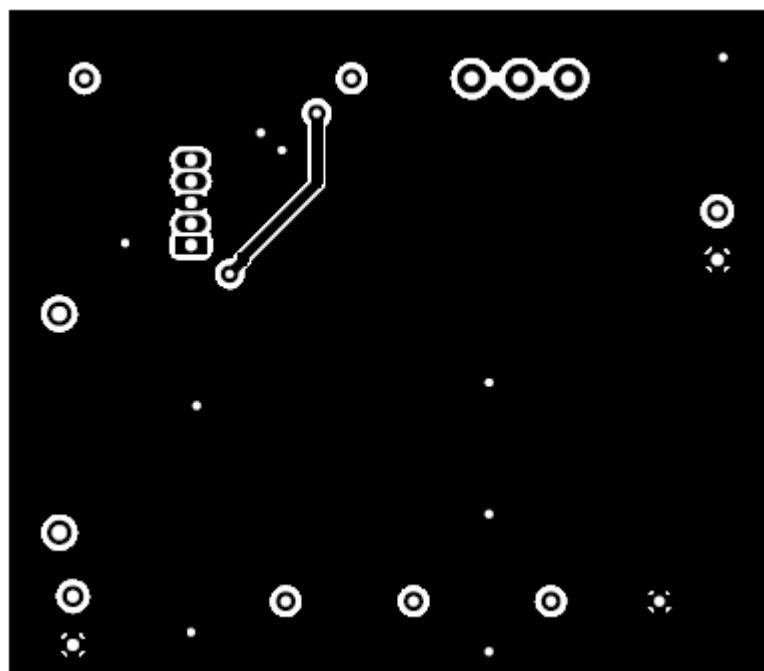
- R ₁ =	24 kΩ	0,6 W
- R ₂ =	24 kΩ	0,6 W
- R ₃ =	62 kΩ	0,6 W
- R ₄ =	39 kΩ	0,6 W
- R ₅ =	2,2 kΩ	0,6 W
- R ₆ =	20 kΩ	0,6 W
- R ₇ =	10 kΩ	0,6 W
- R ₈ =	2,2 kΩ	0,6 W
- R ₉ =	150 kΩ	0,6 W
- R ₁₀ =	680 Ω	0,6 W
- R ₁₁ =	5 kΩ	0,6 W
- R ₁₂ =	10 kΩ	potenciometr
- R ₁₃ =	330 Ω	0,6 W
- R ₁₄ =	20 kΩ	0,6 W
- R ₁₆ =	5 kΩ	0,6 W
- R ₁₇ =	10 Ω	0,6 W
- R ₁₈ =	680 Ω	0,6 W
- R ₁₉ =	30 kΩ	0,6 W
- R ₂₀ =	30 kΩ	0,6 W
- C ₁ =	470 pF	50 V, keramický
- C ₂ =	100 nF	50 V, keramický
- C ₃ =	100 nF	50 V, keramický
- C ₄ =	22 μF	35 V, elektrolytický
- C ₅ =	330 μF	63 V, low ESR elektrolytický
- C ₆ =	100 nF	50 V, keramický
- C ₇ =	470 μF	63 V, low ESR elektrolytický
- C ₈ =	100 nF	50 V, keramický

- C ₉ =	100 nF	50 V, keramický
- C ₁₀ =	100 nF	50 V, keramický
- C ₁₁ =	100 nF	50 V, keramický
- C ₁₂ =	100 nF	50 V, keramický
- C ₁₃ =	100 nF	50 V, keramický
- C ₁₄ =	100 nF	50 V, keramický
- C ₁₅ =	100 nF	50 V, keramický
- C ₁₆ =	47 μF	35 V, low ESR elektrolytický
- C ₁₇ =	100 μF	16 V, elektrolytický
- D ₁ =	SF26	superrychlá dioda
- D ₂ =	BZX55C4V3	Zenerova dioda 4,3 V
- D ₃ =	1,5KE22CA	jednocestný transil 22 V
- L ₁ =	330 μH	jmenovitý proud 3 A
- L ₂ =	330 μH	jmenovitý proud 3 A
- Q ₁ =	IRF840	výkonový MOSFET
- Q ₂ =	BS170	signálový MOSFET
- Q ₃ =	BS170	signálový MOSFET
- U ₁ =	UA741	operační zesilovač
- U ₂ =	LM311	komparátor
- U ₃ =	IR2121	MOSFET driver
- U ₄ =	UA741	operační zesilovač
- U ₅ =	TL431	napěťová reference
- U ₆ =	L7808CV	lineární stabilizátor

8.4 Šablona DPS přípravku s integrovaným obvodem

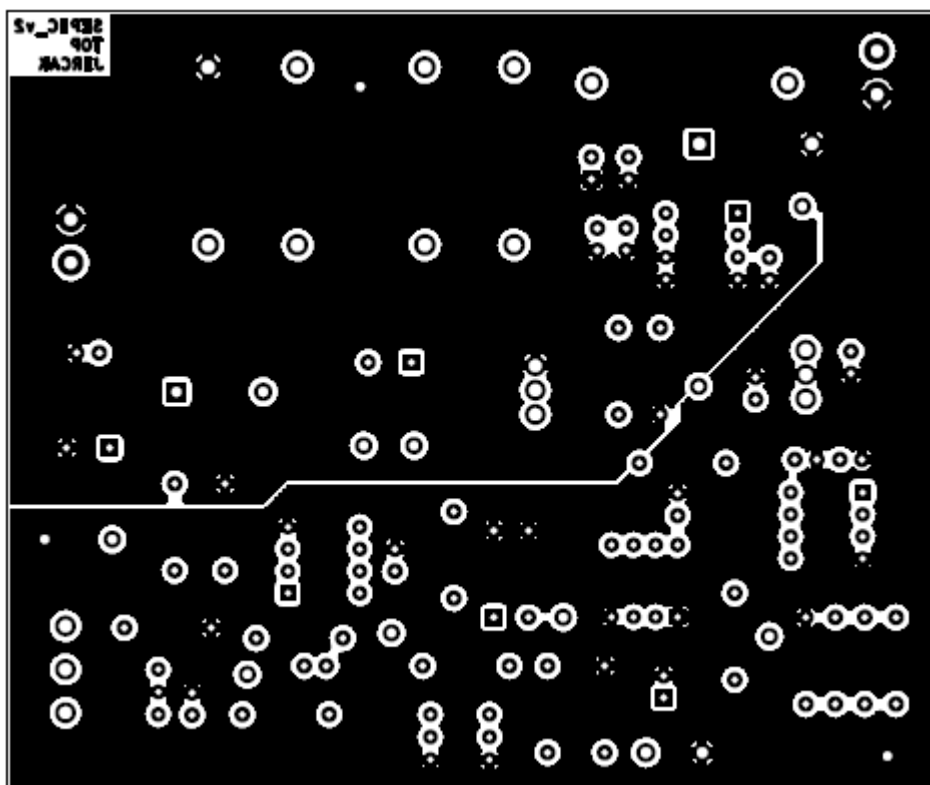


Pohled na šablonu DPS z horní strany

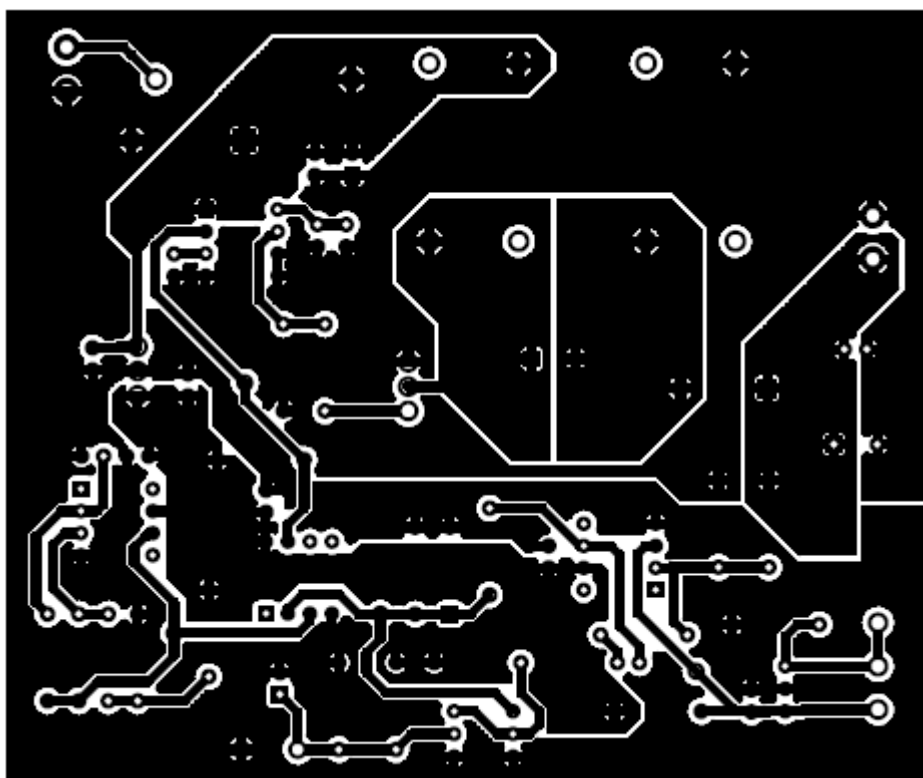


Pohled na šablonu DPS ze spodní strany

8.5 Šablona DPS přípravku s diskrétními součástkami

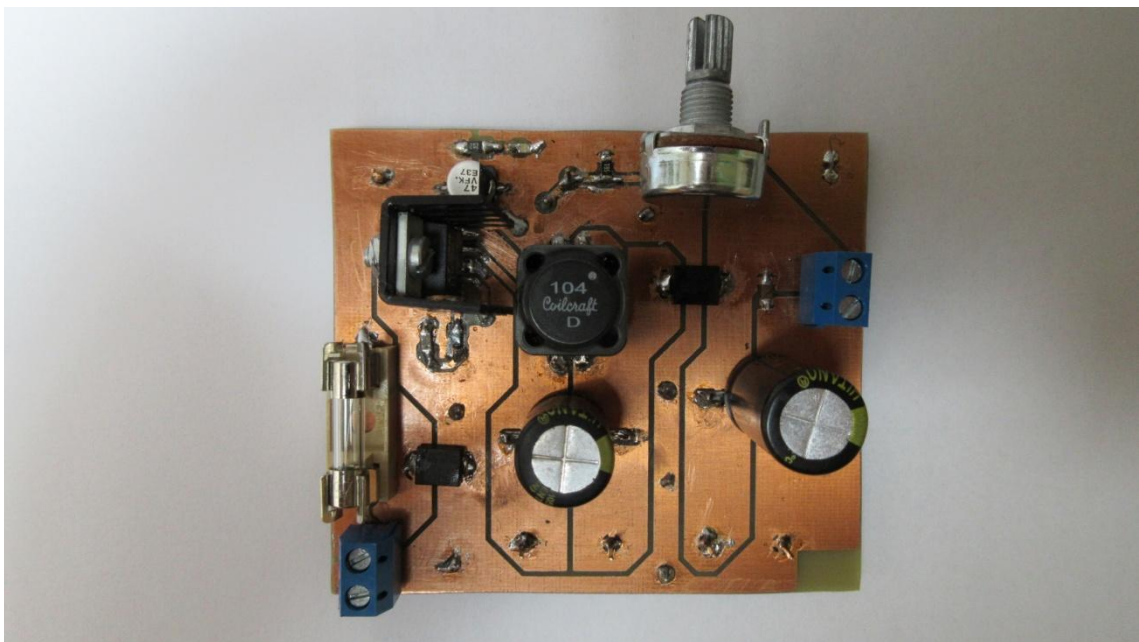


Pohled na šablonu DPS z horní strany

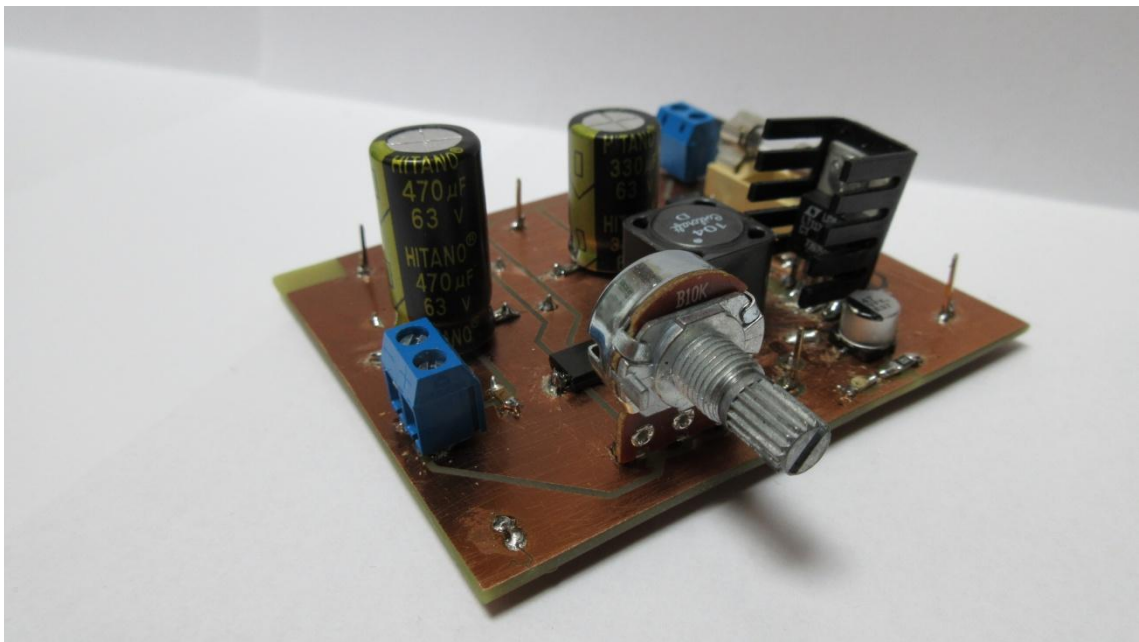


Pohled na šablonu DPS ze spodní strany

8.6 Fotografie přípravku s integrovaným obvodem

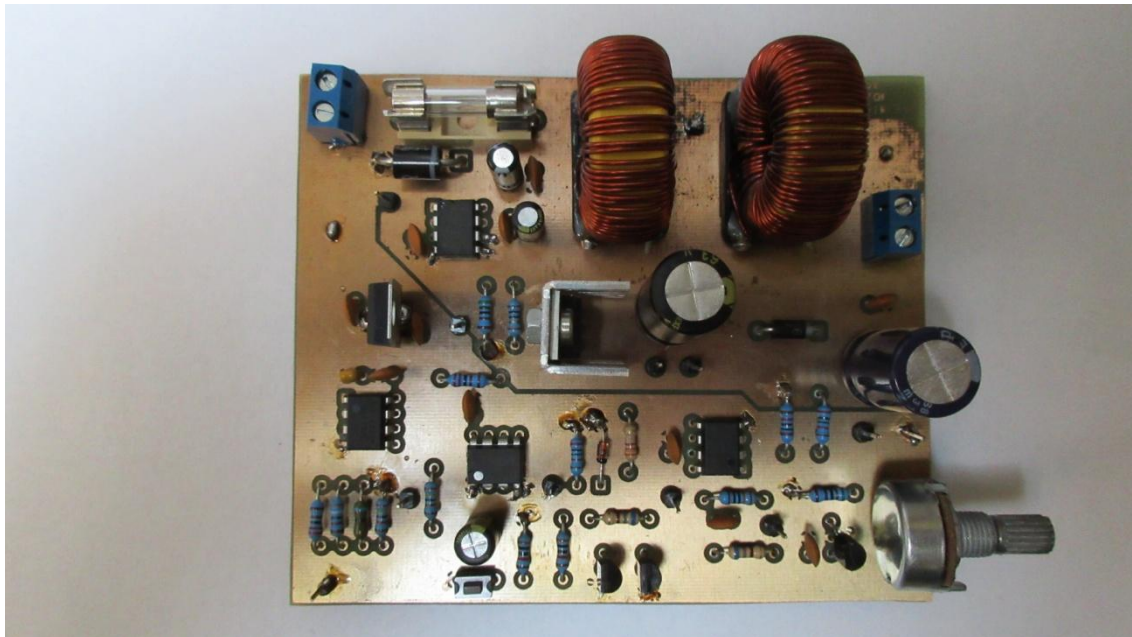


Pohled na přípravek shora

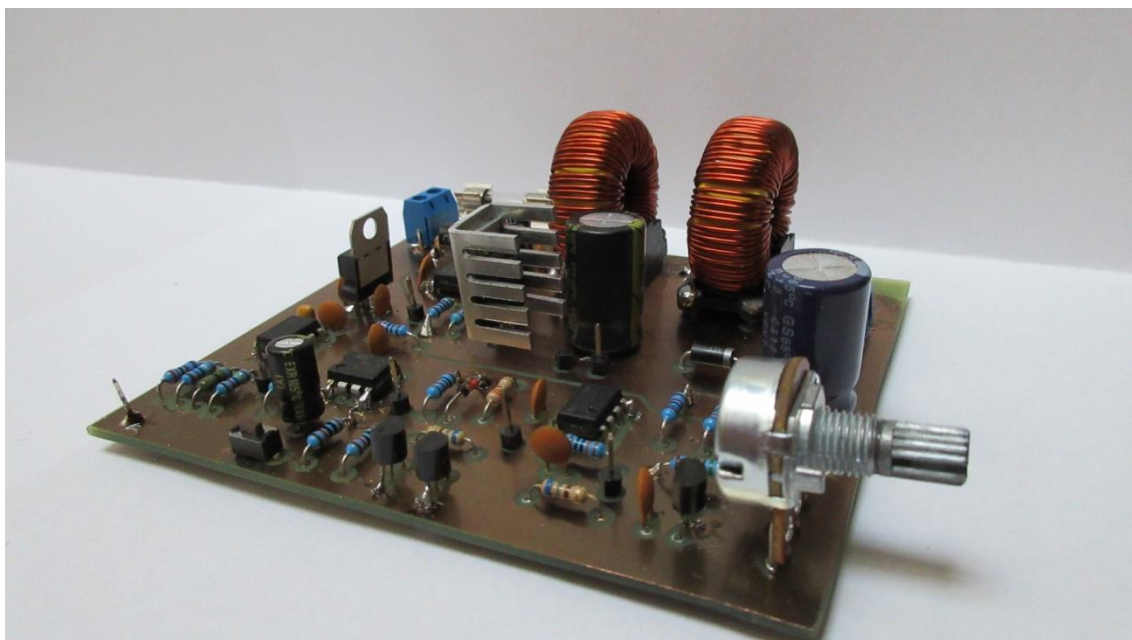


Pohled na přípravek ze strany

8.7 Fotografie přípravku s diskretními součástkami



Pohled na přípravek shora



Pohled na přípravek ze strany

8.8 Měření přípravku s integrovaným obvodem

Snižující režim									
U_N (V)	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
I_N (A)	0,02	0,03	0,04	0,07	0,11	0,18	0,27	0,37	0,52
P_N (W)	0,30	0,45	0,60	1,05	1,65	2,70	4,05	5,55	7,80
U_V (V)	8,02	8,00	8,02	8,02	8,02	8,01	8,01	7,99	7,97
I_V (A)	0,00	0,01	0,04	0,07	0,15	0,27	0,40	0,59	0,80
P_V (W)	0,00	0,08	0,29	0,58	1,16	2,14	3,20	4,69	6,38
η (%)	0,00	17,78	48,12	55,68	70,48	79,21	79,11	84,51	81,74
ΔU (V)	0,03	0,04	0,05	0,07	0,09	0,15	0,22	0,30	0,45
φ (%)	0,37	0,50	0,62	0,87	1,12	1,87	2,75	3,75	5,65

Naměřené a vypočtené hodnoty zatěžovací charakteristiky pro snižující režim

Zvyšující režim									
U_N (V)	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
I_N (A)	0,02	0,07	0,16	0,31	0,44	0,61	0,78	1,06	1,30
P_N (W)	0,30	1,05	2,40	4,65	6,60	9,15	11,70	15,90	19,50
U_V (V)	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,00	20,00	20,00	20,00
I_V (A)	0,00	0,03	0,09	0,18	0,27	0,37	0,47	0,67	0,80
P_V (W)	0,00	0,58	1,80	3,60	5,40	7,40	9,30	13,32	16,00
η (%)	0,00	55,27	75,04	77,46	81,86	80,87	79,49	83,77	82,05
ΔU (V)	0,03	0,10	0,15	0,23	0,37	0,44	0,48	0,50	0,63
φ (%)	0,15	0,50	0,75	1,15	1,85	2,20	2,40	2,50	3,15

Naměřené a vypočtené hodnoty zatěžovací charakteristiky pro zvyšující režim

Snižující režim								S	192,5
U_N (V)	2,0	2,5	2,6	2,7	2,9	5,0	8,0	10,0	18,0
U_V (V)	0,10	0,30	5,39	5,40	5,45	5,45	5,46	5,47	5,47

Naměřené hodnoty převodní charakteristiky pro snižující režim

Zvyšující režim								S	765
U_N (V)	2,0	2,6	2,7	4,6	8,0	9,5	12,0	15,0	18,0
U_V (V)	0,30	0,30	23,99	24,00	24,00	24,01	24,01	24,01	24,01

Naměřené hodnoty převodní charakteristiky pro zvyšující režim

8.9 Měření přípravku s diskretními součástkami

Snižující režim									
U_N (V)	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
I_N (A)	0,03	0,04	0,06	0,09	0,11	0,13	0,17	0,30	0,59
P_N (W)	0,45	0,60	0,90	1,35	1,65	1,95	2,55	4,50	8,85
U_V (V)	8,05	8,05	8,05	8,04	8,04	8,03	8,03	8,03	8,02
I_V (A)	0,00	0,01	0,04	0,07	0,11	0,15	0,22	0,41	0,80
P_V (W)	0,00	0,10	0,30	0,59	0,88	1,17	1,75	3,25	6,43
η (%)	0,00	16,10	33,09	43,48	53,60	60,12	68,65	72,27	72,68
ΔU (V)	0,02	0,04	0,08	0,12	0,13	0,20	0,30	0,50	0,70
φ (%)	0,27	0,50	0,99	1,43	1,64	2,49	3,74	6,23	8,73

Naměřené a vypočtené hodnoty zatěžovací charakteristiky pro snižující režim

Zvyšující režim									
U_N (V)	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
I_N (A)	0,03	0,05	0,09	0,18	0,32	0,47	0,77	0,94	1,30
P_N (W)	0,45	0,75	1,35	2,70	4,80	7,05	11,55	14,10	19,50
U_V (V)	20,05	20,05	20,05	20,05	20,05	20,05	20,05	20,04	20,03
I_V (A)	0,00	0,01	0,03	0,09	0,18	0,27	0,46	0,55	0,73
P_V (W)	0,00	0,18	0,60	1,80	3,65	5,47	9,12	10,98	14,62
η (%)	0,00	24,06	44,56	66,83	76,02	77,64	78,98	77,89	74,98
ΔU (V)	0,02	0,05	0,12	0,28	0,40	1,40	1,70	2,00	2,80
φ (%)	0,08	0,24	0,60	1,40	2,00	6,98	8,48	9,98	13,98

Naměřené a vypočtené hodnoty zatěžovací charakteristiky pro zvyšující režim

Snižující režim								S	480
U_N (V)	1,0	8,3	8,4	8,8	9,5	10,0	14,0	16,0	18,0
U_V (V)	0,05	0,05	7,41	7,41	7,40	7,39	7,39	7,39	7,39

Naměřené hodnoty převodní charakteristiky pro snižující režim

Zvyšující režim								S	85
U_N (V)	1,0	8,3	8,4	8,5	9,0	9,5	10,0	15,0	18,0
U_V (V)	0,05	0,05	19,44	19,72	20,85	21,90	22,00	22,00	22,00

Naměřené hodnoty převodní charakteristiky pro zvyšující režim