



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**  
**Fakulta elektrotechnická**  
**Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**

# **Regulovatelný zdroj napětí do automobilu**

## **Adjustable automobile power port adapter**

Bakalářská práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektrotechnika a management

Vedoucí práce: Ing. Lubor Jirásek, CSc.

**David Hrala**  
**Praha 2019**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hrala** Jméno: **David** Osobní číslo: **459180**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávací katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a management**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Regulovatelný zdroj napětí do automobilu**

Název bakalářské práce anglicky:

**Adjustable Automobile Power Port Adapter**

Pokyny pro vypracování:

1. Prostudujte literaturu týkající se DC/DC měničů a stávající nabídky napájecích zdrojů s nastavitelným výstupním napětím pro použití v automobilech. 2. Na základě 1. navrhnete a realizujete regulovatelný zdroj napětí s indikací úrovně napětí. 3. Otestujte funkčnost realizovaného přístroje, proveďte měření dosažených parametrů. 4. Zhodnoťte možné ekonomické přínosy a výhody nového zařízení proti obdobným zařízením na trhu.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Krejčířík, A.: Napájecí zdroje I.- III. Ben, Praha 1996 v pozdějších opravených vydáních.  
[2] Krejčířík, A.: DC/DC měniče. BEN, Praha 2001 v pozdějších vydáních.

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: **29.01.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **20.09.2020**

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

# Prohlášení

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

V Praze dne

.....  
David Hrala

# Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval Ing. Luboru Jiráskovi, CSc. za ochotu, cenné rady, vstřícnost při konzultacích a věnovaný čas při vedení bakalářské práce. Také bych rád poděkoval Ing. Miroslavu Vítkovi, CSc. za poskytnuté rady k ekonomickému rozboru. V neposlední řadě mé poděkování patří též Ing. Ivaně Beshajové Pelikánové, Ph.D. a Ing. Petru Veselému za spolupráci při konstrukci zařízení.

# Anotace

Bakalářská práce se zaměřuje na výběr nejvhodnějšího typu zdroje k následné konstrukci regulovatelného zdroje napětí do automobilu. V práci jsou popsány lineární zdroje a topologie spínaných zdrojů, dále je provedena komparace jednotlivých typů a je vybrán ten nejvhodnější. Na tento typ je navázáno návrhem, konstrukcí a proměřením zatěžovacích charakteristik. Závěrečná část je věnována zhodnocení zkonstruovaného zařízení z hlediska nákladové kalkulace výroby uvažující varianty dle vyrobeného množství.

**Klíčová slova:** DC-DC měniče, spínaný zdroj, návrh regulovatelného zdroje, ZETA, LT8711.

# Annotation

The bachelor's thesis focuses on the selection of the most appropriate power supply topology for the construction of an adjustable automobile power port adapter. The thesis describes linear regulators and switched mode power supply topologies. Individual topologies are compared and the most appropriate topology is selected. Next part of the thesis describes design of the selected topology, the device construction and load characteristics measurement. The final part is devoted to the cost per unit evaluation of the device including multiple variants based on the quantity produced.

**Keywords:** DC-to-DC converter, switched-mode power supply, adjustable power port design, ZETA, LT8711.

# Obsah

Seznam obrázků	vii
Seznam tabulek	vii
Seznam použitých zkratk a symbolů	viii
Úvod	2
<b>1 Lineární a spínané zdroje</b>	<b>3</b>
1.1 Lineární zdroje	3
1.2 Spínané zdroje	5
1.2.1 Zdroje typu buck	6
1.2.2 Zdroje typu boost	8
1.2.3 Zdroje typu buck-boost	10
1.2.4 Zdroje typu Čuk	12
1.2.5 Zdroje typu SEPIC	13
1.2.6 Zdroje typu ZETA	15
1.3 Zvolení typu zdroje	17
<b>2 Návrh spínaného zdroje</b>	<b>19</b>
2.1 Integrovaný obvod	19
2.2 Výpočet hodnot jednotlivých součástek	20
2.2.1 Frekvence	21
2.2.2 Střída	21
2.2.3 Rezistory snímající proud	21
2.2.4 Cívky	22
2.2.5 Vstupní kondenzátor	22
2.2.6 Výstupní kondenzátor	24
2.2.7 Výstupní napětí	24
2.3 Spínací prvky	24
2.4 Změna vstupního napětí	25
2.5 Schéma zapojení	26
<b>3 Naměřené vlastnosti</b>	<b>28</b>
3.1 Zatěžovací charakteristika	29
3.2 Převodní charakteristika	30
<b>4 Nákladová kalkulace</b>	<b>32</b>
4.1 Kusová výroba	34
4.2 Sériová výroba s nízkou automatizací	35
4.3 Sériová výroba s vysokou automatizací	36
4.4 Zhodnocení nákladových kalkulací	38
<b>Závěr</b>	<b>40</b>
<b>Literatura</b>	<b>41</b>
<b>Seznam příloh</b>	<b>43</b>

# Seznam obrázků

1.1	Principiální schéma lineárního zdroje, převzato z [2] a upraveno . . . . .	3
1.2	Blokové schéma spínaného zdroje, převzato z [3] a upraveno . . . . .	5
1.3	Principiální schéma zdroje typu buck, převzato z [3] a upraveno . . . . .	6
1.4	Buck: sepnutý spínač, převzato z [3] a upraveno . . . . .	6
1.5	Principiální schéma zdroje typu boost, převzato z [3] a upraveno . . . . .	8
1.6	Boost: sepnutý spínač, převzato z [3] a upraveno . . . . .	9
1.7	Principiální schéma zdroje typu buck-boost, převzato z [7] a upraveno . . . .	10
1.8	Buck-boost: sepnutý spínač, převzato z [7] a upraveno . . . . .	11
1.9	Principiální schéma zdroje typu Ćuk, převzato z [4] a upraveno . . . . .	12
1.10	Ćuk: sepnutý spínač, převzato z [4] a upraveno . . . . .	12
1.11	Principiální schéma zdroje typu SEPIC, převzato z [2] a upraveno . . . . .	14
1.12	SEPIC: sepnutý spínač, převzato z [2] a upraveno . . . . .	14
1.13	Principiální schéma zdroje typu ZETA, převzato z [2] a upraveno . . . . .	15
1.14	ZETA: sepnutý spínač, převzato z [2] a upraveno . . . . .	16
1.15	Míra zvlnění výstupního napětí $U_{OUT}$ v závislosti na indukčnosti $L$ pro jednotlivé frekvence $f$ pro typ ZETA a pro výstupní proudy $I_{OUT}$ pro typ SEPIC	18
2.1	Příklad zapojení obvodu LT8711 pro spínaný zdroj typu ZETA, převzato z [15]	20
2.2	Závislost napětí $U_{CPSN}$ na střídě $\delta$ , převzato z [15] . . . . .	21
2.3	Závislost kapacity na stejnosměrné napětí kondenzátoru CL21A226MAQ, převzato z [16] . . . . .	23
2.4	Schéma zapojení spínaného zdroje typu ZETA . . . . .	27
3.1	Naměřené závislosti pro zvolené $U_{OUT} = konst. = 5\text{ V}$ při $U_{IN} = konst. = 12\text{ V}$	29
3.2	Naměřené závislosti pro zvolené $U_{OUT} = konst. = 12\text{ V}$ při $U_{IN} = konst. = 12\text{ V}$	29
3.3	Naměřené závislosti pro zvolené $U_{OUT} = konst. = 20\text{ V}$ při $U_{IN} = konst. = 12\text{ V}$	30
3.4	Převodní charakteristiky pro zvolené $U_{OUT} = konst. = 5\text{ V}$ při $I_{OUT} = 0\text{ A}$ . .	30
3.5	Převodní charakteristiky pro zvolené $U_{OUT} = konst. = 12\text{ V}$ při $I_{OUT} = 0\text{ A}$ .	31
3.6	Převodní charakteristiky pro zvolené $U_{OUT} = konst. = 20\text{ V}$ při $I_{OUT} = 0\text{ A}$ .	31
4.1	Porovnání celkových přímých jednicových nákladů pro jednotlivé typy výroby	38

# Seznam tabulek

1.1	Porovnání jednotlivých typů spínaných zdrojů . . . . .	17
3.1	Dovolené napětí pro zvolené výstupní napětí, převzato z [17] . . . . .	28
4.1	Jednicové ceny za elektronické součástky pro jednotlivé odběry, ceny převzaty z [19] . . . . .	33
4.2	Celkové přímé jednicové náklady při kusové výrobě . . . . .	34
4.3	Celkové náklady při sériové výrobě s nízkou automatizací . . . . .	36
4.4	Ceny potřebných strojů a jejich příkony . . . . .	36
4.5	Celkové přímé jednicové náklady při sériové výrobě s vysokou automatizací .	37

# Seznam použitých zkratek a symbolů

$C$		označení kapacitoru, kondenzátoru
$C$	F	kapacita kapacitoru, kondenzátoru
$C_{IN}$	F	vstupní kapacita
COMP		kompensační smyčka
$C_{OUT}$	F	výstupní kapacita
D		označení diody
DPH		daň z přidané hodnoty
DPS		deska plošného spoje
ESR	$\Omega$	ekvivalentní sériový odpor kondenzátoru
$f$	Hz	kmitočet
GND		označení pro zemní svorku
$I_C$	A	proud kapacitorem, kondenzátorem
$I_{(ef)}$	A	efektivní hodnota proudu
$I_D$	A	proud drainu
$I_L$	A	proud induktoem, cívkou
$I_O$	A	vlastní spotřeba proudu integrovaného obvodu
$I_{OUT}$	A	výstupní proud
$I_{pk}$	A	maximální hodnota protékajícího proudu
L		označení induktoru, cívky
$L$	H	indukčnost induktoru, cívky
MOSFET		označení tranzistoru řízeného polem se strukturou MOS
N-MOSFET		označení MOSFETu s kanálem typu N
OSC		oscilátor
$P_j$	W	Jouleovy ztráty
P-MOSFET		označení MOSFETu s kanálem typu P
$P_{sw}$	W	spínací ztráty
PWM		pulzně šířková modulace
$P_Z$	W	ztrátový výkon
$Q$	C	naboj
$Q_{rr}$	C	náboj závěrného zotavení
R		rezistor
$R$	$\Omega$	odpor rezistoru
$R_{DS(ON)}$	$\Omega$	odpor kanálu MOSFETu v sepnutém stavu
REF		reference
$R_{FB}$	$\Omega$	odpor pro nastavení výstupního napětí zdroje
$R_i$	$\Omega$	vnitřní odpor zdroje
$R_{SENSE}$	$\Omega$	snímací odpor proudu
$R_T$	$\Omega$	odpor pro nastavení opakovací frekvence integrovaného obvodu
$R_Z$		odporová zátěž na výstupních svorkách
S		označení spínače



SEPIC		single ended primary inductor converter, typ zdroje
SEPIC-xA		typ zdroje SEPIC při výstupním proudu x A
T		označení tranzistoru
$T$	s	doba periody spínače
$t_{ON}$	s	čas sepnutí spínače
$T_{ON}$	s	doba sepnutí spínače
$T_{OFF}$	s	doba vypnutí spínače
$t_{rf}$	s	průměrná doba náběhu a sestupu napětí na drainu N-MOSFETu
$U_C$	V	napětí na kapacitoru, kondenzátoru
$U_{CSPN}$	V	napětí na snímacím odporu
$U_{DS}$	V	maximální napětí drain-source tranzistoru
$U_{IN}$	V	vstupní napětí
$U_L$	V	napětí na induktoru, cívce
$U_O$	V	napětí naprázdno
$U_{OUT}$	V	výstupní napětí
$U_{REF}$	V	referenční napětí
$U_{SD}$	V	úbytek napětí v propustném směru vnitřní diody P-MOSFETu
varianta x/y		typ zdroje ZETA při výstupním napětí y a výstupním proudu x
$\eta$	%	účinnost
$\delta$	-	střída (poměr dob zapnutí a vypnutí)
$\Delta I_L$	A	zvlnění proudu induktorem, cívkou
$\Delta I_{L+}$	A	nárůst proudu induktorem, cívkou
$\Delta I_{L-}$	A	pokles proudu induktorem, cívkou
$\Delta Q$	C	změna náboje
$\Delta U_C$	V	zvlnění napětí na kapacitoru, kondenzátoru

# Úvod

V dnešní době lidé tráví nemalou část života v automobilech a během dojíždění z místa A do místa B se postupem času naučili využívat různé elektroniky, ať už telefonu, tabletu, záznamové kamery, navigačního systému nebo dokonce notebooku. Ve vozech mohou také využít vysavač, který umožňuje rychlé a pohodlné vyčištění interiéru vozidla. Všechna tato zařízení mají zabudovaný akumulátor, který slouží jako zdroj elektrické energie. Potíž nastane v okamžiku, kdy se daný akumulátor vybije a je nutné najít vhodný adaptér do zásuvky používané pro automobilový zapalovač, aby se dané zařízení mohlo dobít a nadále používat. Každé zařízení ale využívá svůj specifický adaptér, který se liší jednak v maximálním možném dodávaném proudu, jednak ve výstupním napětí.

Cíl této práce je navrhnout a vyrobit regulovatelný zdroj napětí připojený do automobilové zásuvky, který bude transformovat vstupní stejnosměrné napětí v rozsahu 12 V až 14,7 V na libovolné napětí v rozmezí 5 V až 20 V. Toto výstupní napětí bude moci nastavit uživatel dle momentální potřeby. Tento DC-DC měnič bude navrhnout pro maximální výstupní proud 3,5 A při napětí 20 V, aby byl schopen napájet i běžné kancelářské notebooky.

Stejnoseměrné měniče napětí se dají rozdělit do dvou hlavních skupin, kterými jsou lineární a spínané zdroje. V první kapitole práce bude vysvětlen princip jejich činnosti, zároveň se zvolí vhodný typ zdroje pro samotný návrh a konstrukci, která bude popsána v druhé kapitole. V navazující části bude zahrnuto měření na zdroji z hlediska zatěžovacích a převodních charakteristik. V poslední kapitole bude popsána nákladová kalkulace zhotoveného regulovatelného zdroje pro kusovou i sériovou výrobu a zhotovené zařízení bude porovnáno s obdobnými zařízeními na trhu.

# Kapitola 1

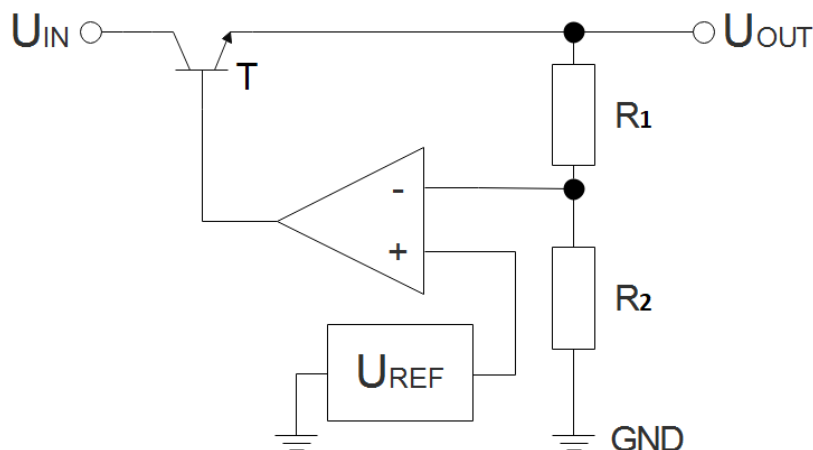
## Lineární a spínané zdroje

Existují dvě základní metody konverze napětí. Starší z nich, nazývaná lineární regulace, využívá principu polovodičových prvků, které jsou provozovány v jejich lineární oblasti voltampérových charakteristik. Hlavní nevýhoda lineární regulace je nízká účinnost, s tím spojená nutnost užití chladičů, velké rozměry, velká hmotnost a nedosažitelnost vyššího napětí na výstupu, než se objevuje na vstupu. Tento typ regulace ale rovněž přináší některé výhody, jako je jednoduchost zapojení, nízká cena součástek nebo nízký šum. Novější metoda konverze, nazývaná spínané zdroje, je založena na přepínání jedné nebo více polovodičových součástek mezi stavem sepnuto a stavem rozepnuto. Proti lineární regulaci takovéto zdroje dosahují vysoké účinnosti, malých rozměrů, nízké hmotnosti, ale zvyšuje se složitost zapojení a cena součástek. [1]

K vysvětlení principu jednotlivých typů zdrojů bude využito ideálních součástek (např. induktor bez parazitního odporu).

### 1.1 Lineární zdroje

Lineární napěťový zdroj dodává stabilní výstupní napětí ze vstupního napětí, které může kolísat. Vzhledem k této vlastnosti ho lze použít jako efektivní filtr zvlnění vstupního napětí. Většina lineárních zdrojů využívá uzavřenou smyčku jako zpětnou vazbu, tento typ je zachycen na Obr. 1.1. [2]



Obr. 1.1: Principiální schéma lineárního zdroje, převzato z [2] a upraveno

Hlavní regulující člen je zde tranzistor T fungující jako proměnný rezistor, který omezuje průchod proudu ze vstupu na výstup. Napěťový dělič  $R_1/R_2$  je zvolen tak, aby při požadovaném výstupním napětí  $U_{OUT}$  bylo napětí na invertujícím vstupu operačního zesilovače stejné jako napětí referenční  $U_{REF}$  na neinvertujícím vstupu. Operační zesilovač v tomto zapojení slouží jako chybový zesilovač, který reguluje svůj výstup tak, aby mezi jeho invertujícím a neinvertujícím vstupem byl nulový napěťový rozdíl. Pokud nastane nárůst výstupního napětí  $U_{OUT}$  například v důsledku snížení zátěže nebo nárůstu vstupního napětí  $U_{IN}$ , vzroste napětí na invertujícím vstupu chybového zesilovače, které bude větší než napětí referenční. Výstup zesilovače bude negativní a dojde k uzavírání tranzistoru. V případě zvýšení zátěže dochází k obdobnému procesu, při kterém se tranzistor více otevře, a tím zvýší výstupní napětí. Je tedy zřejmé, že uzavřená smyčka kompenzuje jak změny vstupního napětí, tak změny zátěže. Samotné výstupní napětí se vypočte jako součet napětí na rezistorech  $R_1$  a  $R_2$  [2]:

$$U_{OUT} = \frac{U_{REF}}{R_2}(R_1 + R_2). \quad (1.1)$$

Rozdíl mezi vstupním a výstupním napětím se ve formě tepla ztrácí na výkonovém tranzistoru. Za předpokladu vstupního napětí 12 V ze zásuvky používané pro automobilový zapalovač a výstupního požadované napětí 5 V pro nabíjení mobilního telefonu, je nutné rozdíl 7 V při požadovaném výstupním proudu  $I_{OUT}$  přeměnit na tepelné ztráty. Tento ztrátový výkon bude tím větší, čím větší je výstupní proud a lze vypočítat podle následujícího vztahu [2]:

$$P_Z = (U_{IN} - U_{OUT})I_{OUT}. \quad (1.2)$$

Při požadavku rychlonabíjení, při kterém je výstupní proud 5 A, vznikají na polovodičové součástce ztráty 35 W. Z toho by vyplynula nutnost užití chladiče, aby se zabránilo poškození součástek během běžného provozu.

Účinnost lineárního zdroje bývá nízká, vypočítá se jako [2]:

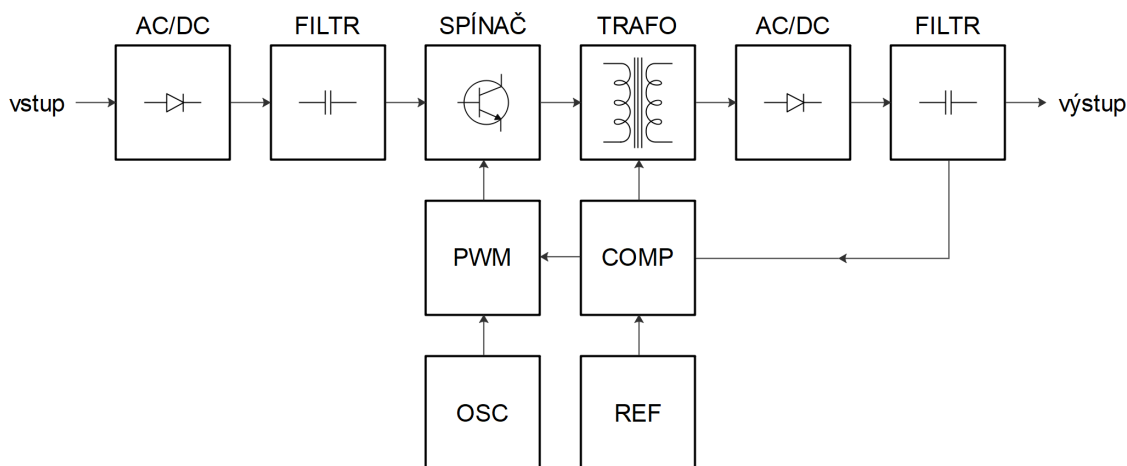
$$\eta = \frac{U_{OUT}I_{OUT}}{U_{IN}(I_{OUT} + I_O)}. \quad (1.3)$$

Vlastní spotřeba proudu integrovaného obvodu  $I_O$  je zanedbatelná, případně účinnost konverze ještě snižuje. V případě rychlonabíjení se jedná o účinnost 41,7%. Z toho vyplývá, že lineární zdroje je nejvhodnější používat v aplikacích, kde dochází ke snižování napětí pouze o malé hodnoty a účinnost již není nepřijatelná. [1, 2]

Ze základního obvodového schématu na Obr. 1.1 je patrné, že lineární zdroj dokáže vstupní napětí pouze snižovat, a nikoliv zvyšovat. Je to dáno tím, že se v zapojení nevyskytuje žádná akumulací součástka, která by se ve vhodný okamžik vybíjela a dokázala na výstupu vytvořit vyšší napětí než na vstupu.

## 1.2 Spínané zdroje

Spínané zdroje nemění přebytečný výkon na ztrátové teplo, ale využívají akumulaci schopnosti induktivních a kapacitních součástí k přenosu stanoveného výkonu bez zbytečných ztrát. To se provádí za pomoci rychlého spínače, u něhož se mění frekvence spínání nebo se reguluje střída, tedy poměr doby sepnutého stavu ku periodě. Blokové schéma je zachyceno na Obr. 1.2. [2]



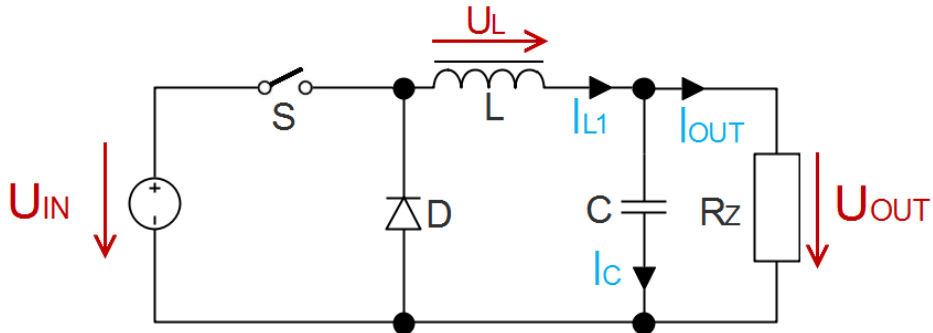
Obr. 1.2: Blokové schéma spínaného zdroje, převzato z [3] a upraveno

Ne vždy musí spínaný zdroj obsahovat všechny bloky (výstupní filtr) a často obsahuje i některé navíc (vstupní usměrňovač), jelikož podmínkou správné činnosti spínaného zdroje je stejnosměrné vstupní napětí zbavené střídavé složky. Z hlediska vstupu existují dvě základní možnosti, buď je vstupní napětí stejnosměrné a nároky na vstupní filtr nejsou vysoké, nebo je vstupní napětí střídavé a po usměrnění je nutné vyhladit jeho zbytkové zvlnění. K samotné transformaci napětí je nutné jej převést na střídavý obdélníkový průběh, k čemuž se používají vysokofrekvenční tranzistory při kmitočtech 20 kHz až 3 MHz. Nejnižší frekvence se zpravidla používá taková, aby nebyla pro člověka slyšitelná, tedy 20 kHz a více. Principiální funkční zapojení spínaných zdrojů lze rozdělit do dvou skupin [1, 3]:

- a) obvody bez induktorů, které k transformaci napětí využívají násobení vstupního napětí na principu přepínání kapacitorů. Metoda vychází z nabíjení kapacitorů paralelně a jejich následném zapojení sériově. Takto konstruované spínané zdroje dokáží dodat pouze nízký výstupní proud a nebudou v této práci dále uvažovány [1, 3],
- b) obvody využívající k transformaci napětí induktory. Ty lze dále rozdělit podle přenosové funkce, definované jako poměr vstupního a výstupního napětí, na zdroje zvyšující napětí (v anglických publikacích také step-up či boost), snižující napětí (step down, buck) a na zdroje snižující i zvyšující napětí (buckboost). Tato zapojení budou dále podrobněji popsána v následujících podkapitolách. [1, 2]

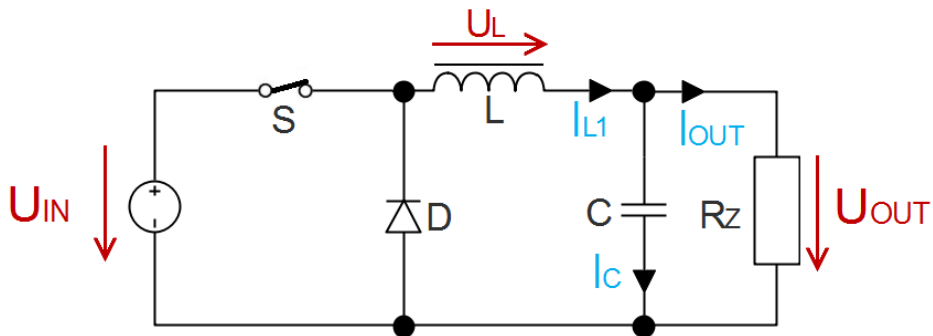
### 1.2.1 Zdroje typu buck

Základní obvodové schéma zdroje snižujícího vstupní napětí je zobrazeno na Obr. 1.3.



Obr. 1.3: Principiální schéma zdroje typu buck, převzato z [3] a upraveno

Princip fungování obvodu je rozdělen do dvou etap v závislosti na spínači S. První etapa trvající po dobu  $T_{ON}$  nastává při sepnutí spínače a druhá etapa nastává při rozepnutí spínače a trvá po dobu  $T_{OFF}$ .



Obr. 1.4: Buck: sepnutý spínač, převzato z [3] a upraveno

Pokud je spínač sepnut po dobu  $T_{ON}$ , dochází k nabíjení výstupního kondenzátoru C proudem  $I_C$  a zároveň na něm roste napětí, a to tím pomaleji, čím větší je jeho kapacita a čím větší je indukčnost induktoru L. Rovněž dochází k akumulování energie v induktoru L vlivem proudu  $I_L$ . Tento proud  $I_L$  narůstá dle vztahu [3, 4]:

$$U_L = LdI_L/dt \Rightarrow \Delta I_{L+} = \frac{1}{L}U_L T_{ON}, \quad (1.4)$$

kde  $U_L$  je napětí na induktoru,  $L$  je indukčnost induktoru a  $dt$  je doba sepnutí  $T_{ON}$ . Z Obr. 1.4 je zřejmé, že napětí na induktoru je rovno  $U_{IN} - U_{OUT}$ , odtud:

$$\Delta I_{L+} = \frac{1}{L}(U_{IN} - U_{OUT})T_{ON}. \quad (1.5)$$

Po rozepnutí spínače, který zůstane rozepnutý po dobu  $T_{OFF}$ , se energie nashromážděná v první etapě v induktoru L mění na dobíjecí proud  $I_C$  kondenzátoru C a proud do zátěže  $I_{OUT}$ . Uzavření proudového obvodu umožňuje dioda D. [2, 3]

V okamžiku rozepnutí spínače se snaží induktor  $L$  udržet směr a velikost proudu  $I_L$  a vzniká na něm indukované napětí:

$$U_L = -LdI_L/dt \Rightarrow \Delta I_{L-} = -\frac{1}{L}U_L T_{OFF}. \quad (1.6)$$

Z Obr. 1.3 je patrné, že  $U_L = -U_{OUT}$ . Dosazením do (1.6) je získán vztah pro pokles proudu induktorem:

$$\Delta I_{L-} = -\frac{1}{L}(-U_{OUT})T_{OFF}. \quad (1.7)$$

Nárůst (1.5) a pokles (1.7) proudu induktorem musí být v ustáleném stavu ekvivalentní. Pokud by tomu tak nebylo, docházelo by k postupnému zvyšování (nebo snižování) proudu během každého cyklu, ale to neodpovídá ustálenému stavu a vznikala by nerovnováha vedoucí ke zničení induktoru. [2, 5]

Porovnáním (1.5) a (1.7):

$$\frac{1}{L}(U_{IN} - U_{OUT})T_{ON} = -\frac{1}{L}(-U_{OUT})T_{OFF}, \quad (1.8)$$

a následným upravením se dostane:

$$\frac{U_{OUT}}{U_{IN}} = \frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}}. \quad (1.9)$$

Pro dobu sepnutí  $T_{ON}$  lze napsat následující vztah:

$$T_{ON} = \delta T, \quad (1.10)$$

kde  $T$  je perioda jednoho cyklu spínače, tedy  $T_{ON} + T_{OFF}$ , a  $\delta$  je střída. Je zřejmé, že dobu vypnutí  $T_{OFF}$  je možné napsat jako:

$$T_{OFF} = (1 - \delta)T. \quad (1.11)$$

Dosazením (1.10) a (1.11) do (1.9) lze získat konečný vztah pro převodní poměr výstupního a vstupního napětí:

$$\frac{U_{OUT}}{U_{IN}} = \delta, \quad (1.12)$$

kde  $\delta$  je vždy menší než jedna, a proto tento typ zdroje vstupní napětí pouze snižuje.

K výpočtu zvlnění výstupního napětí, respektive napětí na kapacitoru  $C$ , se vychází z periody cyklu spínače, pro kterou platí [4]:

$$T = \frac{1}{f} = T_{ON} + T_{OFF} \stackrel{1)}{=} \frac{\Delta I_{L+} L}{U_{IN} - U_{OUT}} + \frac{\Delta I_{L-} L}{U_{OUT}} \stackrel{2)}{=} \frac{\Delta I_L L U_{IN}}{U_{OUT}(U_{IN} - U_{OUT})}, \quad (1.13)$$

kde  $f$  je frekvence spínání, rovnost 1) je dána vyjádřením dob  $T_{ON}$  a  $T_{OFF}$  z rovnic (1.5) a (1.7) a rovnost 2) z podmínky, že nárůst proudu  $\Delta I_{L+}$  a pokles proudu  $\Delta I_{L-}$  je totožný. Pro zvlnění proudu platí:

$$\Delta I_L = \frac{U_{OUT}(U_{IN} - U_{OUT})}{LfU_{IN}}. \quad (1.14)$$

Zvlnění napětí na kapacitoru  $C$  lze odvodit z výpočtu změny náboje  $Q$  na kapacitoru, který je dán [6]:

$$Q = CU_C \Rightarrow \Delta U_C = \frac{\Delta Q}{C}. \quad (1.15)$$

Změna náboje  $\Delta Q$  je způsobena proudem  $\Delta I_L$  a za předpokladu, že zvlnění výstupního proudu je zanedbatelné, tedy platí  $\Delta I_L = \Delta I_C$ , odpovídá změna náboje obsahu trojúhelníka s výškou  $\Delta I_L/2$  a šířkou  $T/2$  [6, 7]:

$$\Delta Q = \frac{1}{2} \frac{\Delta I_L T}{2} = \frac{\Delta I_L T}{4}. \quad (1.16)$$

Dosažením  $\Delta I_L$  z rovnice (1.14) a  $\Delta Q$  z rovnice (1.16) do (1.15) se získá výsledný tvar:

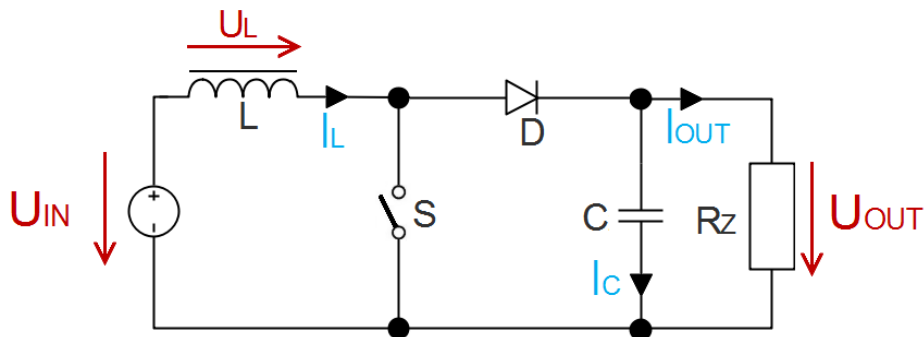
$$\Delta U_C = \frac{U_{OUT}(U_{IN} - U_{OUT})}{8LCf^2U_{IN}} \quad (1.17)$$

nebo

$$\Delta U_C = \frac{U_{IN}\delta(1 - \delta)}{8LCf^2}. \quad (1.18)$$

## 1.2.2 Zdroje typu boost

Zdroje, které mohou vstupní napětí pouze zvyšovat, vychází z principiálního zapojení zobrazeného na Obr. 1.5, které se skládá z induktoru připojeného jedním vývodem na zdroj, paralelního spínače k zemi a diody spojené s výstupem.[2, 3]

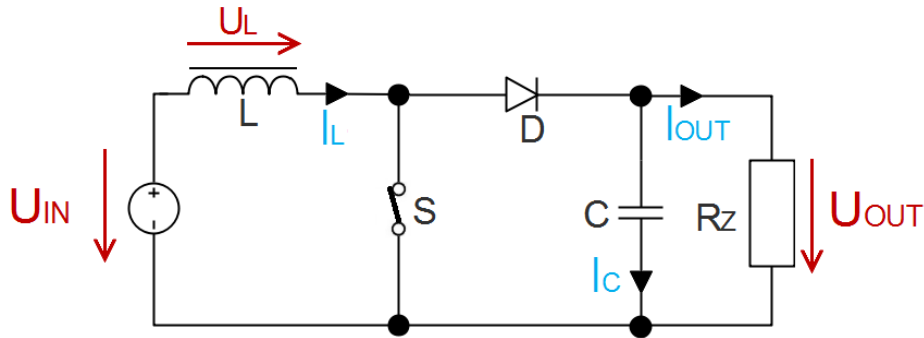


Obr. 1.5: Principiální schéma zdroje typu boost, převzato z [3] a upraveno

V případě sepnutí spínače  $S$ , který je zobrazen na Obr. 1.6, dochází k vybití výstupního kapacitoru  $C$  do zátěže  $R_Z$ . Aby se kapacitor nevybíjel i přes spínač, je oddělen diodou  $D$ , která je polarizována v závěrném směru a nevede proud. Ze zdroje napětí  $U_{IN}$  teče proud  $I_L$



přes induktor  $L$  a spínač  $S$  a dochází k akumulování energie v induktoru až do doby, kdy je spínač rozepnut. [2, 3]



Obr. 1.6: Boost: sepnutý spínač, převzato z [3] a upraveno

V okamžiku rozepnutí, zobrazeno na Obr. 1.5, chce induktor udržet směr a velikost proudu  $I_L$  a vzniká na něm indukované napětí. Ze vztahu (1.6) je zřejmé, že indukované napětí může být teoreticky libovolně vysoké, protože závisí na hodnotě indukčnosti induktoru  $L$ , na velikosti proudu  $I_L$  a na rychlosti rozepnutí spínače. Indukované napětí se sčítá spolu se vstupním napětím  $U_{IN}$  a dohromady prohánějí proud  $I_L$  do výstupního kapacitoru a zátěže. Součet těchto napětí je roven  $U_{OUT}$ . Platí tedy, že výstupní napětí  $U_{OUT}$  je větší než napětí vstupní  $U_{IN}$ . [2, 3]

Matematický popis činnosti je dán po dobu sepnutí dle (1.4):

$$\Delta I_{L+} = \frac{1}{L} U_{IN} \delta T \quad (1.19)$$

a po dobu vypnutí:

$$\Delta I_{L-} = -\frac{1}{L} (U_{IN} - U_{OUT}) (1 - \delta) T. \quad (1.20)$$

Z podmínky ekvivalence nárůstu a poklesu proudu induktorem vychází rovnost (1.19) a (1.20), upravením a vyjádřením převodního poměru se získá vztah:

$$\frac{U_{OUT}}{U_{IN}} = \frac{1}{1 - \delta}. \quad (1.21)$$

Protože  $\delta < 1$ , pak vždy platí  $U_{OUT} > U_{IN}$ .

K vypočítání zvlnění proudu induktorem  $L$  se postupuje analogicky jako v předchozí podkapitole a rovněž se vychází z periody cyklu spínače [4]:

$$T = \frac{\Delta I_L L}{U_{IN}} - \frac{\Delta I_L L}{U_{IN} - U_{OUT}} = \frac{\Delta I_L L U_{OUT}}{U_{IN} (U_{OUT} - U_{IN})} \Rightarrow \Delta I_L = \frac{U_{IN} (U_{OUT} - U_{IN})}{L f U_{OUT}}. \quad (1.22)$$

Ze sepnutého stavu na Obr. 1.6 je zřejmé, že během doby  $T_{ON}$  dodává zátěži veškerý proud kapacitor, musí proto platit, že střední hodnota proudu kapacitorem je během doby  $T_{ON}$  rovna výstupnímu proudu  $I_{OUT} = I_C$ . Napětí na kapacitoru se vypočte jako integrace

proudu od času 0 do času  $t_{ON}$  (tedy po dobu  $T_{ON}$ ) [4]:

$$U_C = \frac{1}{C} \int_0^{t_{ON}} I_C dt + U_C(t=0). \quad (1.23)$$

Dosazením  $I_{OUT}$  za  $I_C$  do (1.23) se získá:

$$U_C = \frac{1}{C} \int_0^{t_{ON}} I_{OUT} dt + U_C(t=0) = \frac{I_{OUT} T_{ON}}{C} + U_C(t=0). \quad (1.24)$$

Pro samotné zvlnění napětí na kapacitoru pak platí:

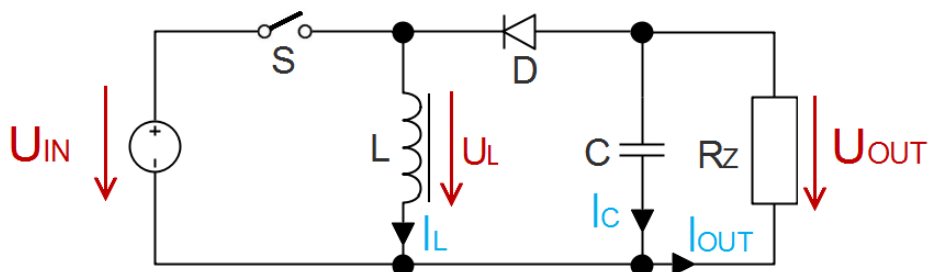
$$\Delta U_C = U_C - U_C(t=0) = \frac{I_{OUT} T_{ON}}{C}, \quad (1.25)$$

dosazením (1.10) do předchozí rovnice vychází pro zvlnění napětí výsledný tvar:

$$\Delta U_C = \frac{I_{OUT} \delta}{Cf}. \quad (1.26)$$

### 1.2.3 Zdroje typu buck-boost

Tento typ spínaného zdroje je schopen dodávat na výstupu invertované napětí, které může být v absolutní hodnotě větší nebo menší než vstupní napětí. Na Obr. 1.7 je zobrazeno základní obvodové zapojení. [7]



Obr. 1.7: Principiální schéma zdroje typu buck-boost, převzato z [7] a upraveno

Jedná se o kaskádové zapojení zdrojů typu buck a boost. Za předpokladu stejné střídy pro oba zdroje vychází z rovnic (1.12) a (1.21) převodní poměr výstupního a vstupního napětí jako [7]:

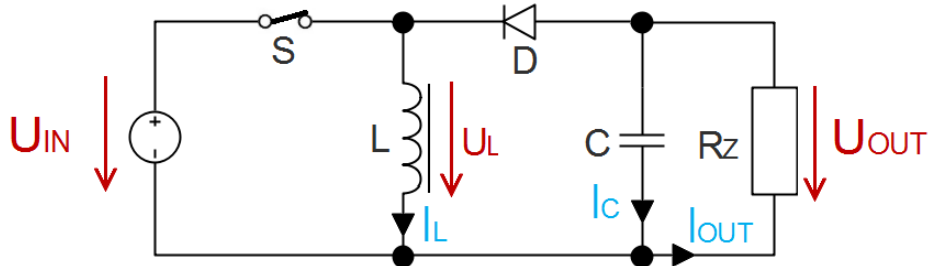
$$\frac{U_{OUT}}{U_{IN}} = -\frac{\delta}{1-\delta}, \quad (1.27)$$

kde záporné znaménko značí pouze otočenou polaritu zdroje typu boost vůči předchozí podkapitole. Z této rovnice je zřejmá schopnost zvyšování či snižování napětí v absolutní hodnotě v závislosti na střídě.

Při sepnutí spínače S, zobrazeno na Obr. 1.8, dochází k nabíjení induktoru L vlivem polarity diody D v závěrném směru. Během sepnutí spínače je na induktoru vstupní napětí  $U_{IN}$ . Ze známého vzorce (1.4) pro napětí  $U_L$  na induktoru je po integrování získán vztah

pro nárůst proudu indukčností [1, 2]:

$$\Delta I_{L+} = \frac{U_{IN}}{L} T_{ON}. \quad (1.28)$$



Obr. 1.8: Buck-boost: sepnutý spínač, převzato z [7] a upraveno

Po kapacitoru  $C$  je požadována velká kapacita, aby byl schopen poskytnout konstantní výstupní napětí  $U_{OUT}$ . Pokud je spínač  $S$  sepnut, dodává kapacitor zátěži veškerý odebíraný proud po dobu  $T_{ON}$ . Pro střední hodnotu vybíjecího proudu platí  $I_C = I_{OUT}$  a zvlnění napětí na kapacitoru  $\Delta U_C$  je [4, 7]:

$$\Delta U_C = \frac{1}{C} \int_0^t I_C dt = \frac{1}{C} \int_0^{t_{ON}} I_{OUT} dt = \frac{I_{OUT} T_{ON}}{C}, \quad (1.29)$$

dosazením (1.10) do předchozí rovnice se dostane výsledný tvar pro zvlnění napětí:

$$\Delta U_C = \frac{I_{OUT} \delta}{C f}. \quad (1.30)$$

Při rozepnutí spínače, zobrazeno na Obr. 1.7, se induktor vybíjí do zátěže  $R_Z$  a napětí  $U_{IN}$  se tohoto cyklu neúčastní. Proud induktorem v této etapě prochází propustně polarizovanou diodou, výstupním kapacitorem a zátěží. [1, 8]

Použitím stejného postupu jako v případě sepnutého spínače vyplývá ze vztahu (1.7) pokles proudu induktorem:

$$\Delta I_{L-} = -\frac{U_{OUT}}{L} T_{OFF}. \quad (1.31)$$

Nárůst a pokles proudu induktorem musí být v ustáleném stavu ekvivalentní a je možné dát pravé strany rovnic (1.28) a (1.31) do rovnosti:

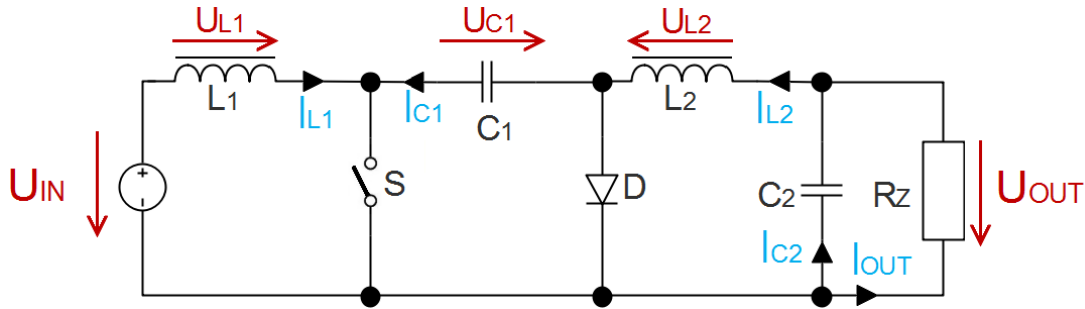
$$\frac{U_{IN}}{L} T_{ON} = -\frac{U_{OUT}}{L} T_{OFF}. \quad (1.32)$$

Upravením (1.32) a dosazením (1.10) a (1.11) se dostane již zmíněný vztah (1.27):

$$\frac{U_{OUT}}{U_{IN}} = -\frac{\delta}{1 - \delta}. \quad (1.33)$$

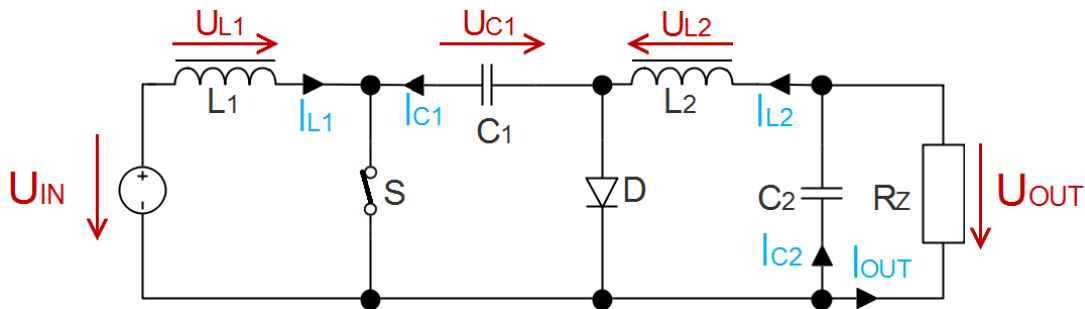
### 1.2.4 Zdroje typu Ćuk

Zdroj typu Ćuk je rovněž schopen dodávat vyšší nebo nižší napětí v absolutní hodnotě, než je napětí vstupní, ale s opačnou polaritou. Velikost výstupního napětí lze regulovat velikostí střídavy. Z obvodového zapojení na Obr. 1.9 je patrné, že se jedná o zdroj typu boost, který je přes kapacitor spojen se zdrojem typu buck s otočenou polaritou. Dále je obvod popsán pomocí obvodových rovnic během sepnutí a rozepnutí spínače. [2]



Obr. 1.9: Principiální schéma zdroje typu Ćuk, převzato z [4] a upraveno

Pokud je spínač rozepnut, proudy induktory  $I_{L1}$  a  $I_{L2}$  tečou skrze diodu D a dochází k nabíjení kapacitoru  $C_1$  pomocí energie ze vstupu a z induktoru  $L_1$ . Proud  $I_{L1}$  postupně klesá, jelikož napětí na kapacitoru  $U_{C1}$  je větší než napětí na vstupu  $U_{IN}$ . Proud  $I_{L2}$  rovněž klesá, protože teče do zátěže  $R_Z$ . [7]



Obr. 1.10: Ćuk: sepnutý spínač, převzato z [4] a upraveno

Při sepnutí spínače, viz Obr. 1.10, dojde k uzavření diody.<sup>1)</sup> Proud  $I_{L1}$  a  $I_{L2}$  tečou sepnutým spínačem. Jelikož platí  $U_{C1} > U_{OUT}$ , kapacitor  $C_1$  se vybíjí přes spínač a předává energii výstupu a induktoru  $L_2$ , tedy  $I_{L2}$  narůstá. Proud  $I_{L1}$  také narůstá vlivem přenosu energie ze vstupu. [7]

Analogickým postupem k (1.8) je možné psát pro induktor  $L_1$ :

$$\frac{1}{L_1} U_{IN} \delta T = -\frac{1}{L_1} (U_{IN} - U_{C1}) (1 - \delta) T, \quad (1.34)$$

$$U_{C1} = \frac{U_{IN}}{1 - \delta}.$$

<sup>1)</sup>na diodě se objeví napětí kapacitoru  $U_{C1}$  se závěrnou polaritou

A pro induktor  $L_2$ :

$$\begin{aligned}\frac{1}{L_2}(U_{C1} + U_{OUT})\delta T &= -\frac{1}{L_2}U_{OUT}(1 - \delta)T, \\ U_{C1} &= -\frac{U_{OUT}}{\delta}.\end{aligned}\tag{1.35}$$

Napětí na kapacitoru  $U_{C1}$  lze považovat za konstantní, může se tedy dát vyjádření tohoto napětí z rovnic (1.34) a (1.35) do rovnosti. Dále lze vyjádřit poměr výstupního a vstupního napětí. [7]

$$\frac{U_{OUT}}{U_{IN}} = -\frac{\delta}{1 - \delta}.\tag{1.36}$$

Zvlnění proudu induktorem  $L_2$  je stejné jako zvlnění proudu kapacitorem  $C_2$ .<sup>2)</sup> Nabíjecí proud tohoto kapacitoru se vypočte pomocí změny náboje  $\Delta Q$ . Zvlnění napětí na kapacitoru  $C_2$  je rovno [4]:

$$\Delta U_{C2} = \frac{\Delta Q}{C_2}.\tag{1.37}$$

Z levé a pravé strany rovnice (1.35) a znalosti, že obě strany rovnice jsou rovny zvlnění proudu  $\Delta I_{L2}$ , se mohou vyjádřit doby  $T_{ON}$  a  $T_{OFF}$  v závislosti na tomto proudu  $\Delta I_{L2}$ . Dosazením do vztahu pro periodu cyklu spínání (1.13) se dostane:

$$T = \frac{\Delta I_{L2}L_2}{U_{C1} + U_{OUT}} - \frac{\Delta I_{L2}L_2}{U_{OUT}} = \frac{-\Delta I_{L2}L_2U_{C1}}{U_{OUT}(U_{C1} + U_{OUT})}.\tag{1.38}$$

Vyjádřením  $I_{L2}$  z předchozí rovnice a dosazením (1.35) a (1.36) se získá:

$$\Delta I_{L2} = -\frac{U_{OUT}(1 - \delta)}{L_2f} = \frac{U_{IN}\delta}{L_2f}.\tag{1.39}$$

Dosazením (1.16) a (1.39) do (1.37) lze pro zvlnění napětí na kapacitoru  $C_2$  psát:

$$\Delta U_{C2} = \frac{U_{IN}\delta}{8L_2C_2f^2}.\tag{1.40}$$

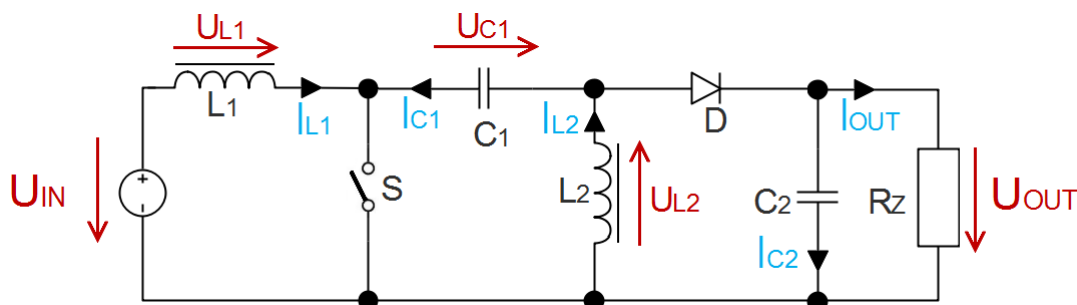
### 1.2.5 Zdroje typu SEPIC

Jednou z nevýhod zdrojů typu buck-boost a Ćuk je invertovaná polarita napětí výstupu proti vstupu. Stejnou polaritu lze získat zapojením SEPIC (Single Ended Primary Inductor Converter), které je schopné dodávat vyšší nebo nižší napětí, než je napětí vstupní. Samotné zapojení je podobné zapojení zdroje typu Ćuk, avšak dioda  $D$  je prohozena s induktorem  $L_2$ , jak je zobrazeno na Obr. 1.11. Vlivem prohození těchto součástek je možné získat na výstupu napětí stejné polarity jako má napětí vstupní. [2]

Funkce jednotlivých součástek se mění v závislosti na sepnutí či rozepnutí spínače  $S$ . Pokud je spínač sepnut, proud induktoru  $L_1$  roste a proud druhého induktoru  $L_2$  rovněž roste.

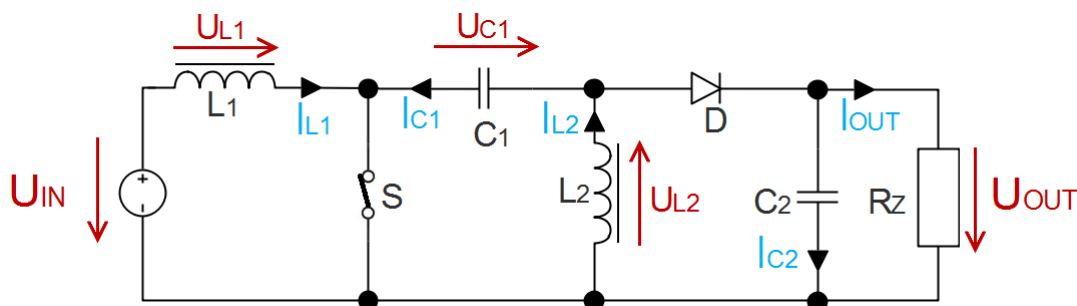
<sup>2)</sup>za předpokladu, že zvlnění výstupního proudu je zanedbatelné

Při samotném sepnutí se na induktoru  $L_1$  objeví napětí  $U_{IN}$  a na induktoru  $L_2$  napětí  $U_{C1}$ , tedy kapacitor  $C_1$  dodává energii ke zvýšení amplitudy proudu  $I_{L2}$ , a tím zvyšuje energii uloženou v induktoru  $L_2$ .



Obr. 1.11: Principiální schéma zdroje typu SEPIC, převzato z [2] a upraveno

Po rozeznutí spínače se z proudu  $I_{C1}$  stane proud  $I_{L1}$ , jelikož indukory v obvodu neumožňují skokovou změnu proudu. Proud  $I_{L2}$  se přidává k proudu  $I_{L1}$ , který následně teče do zátěže  $R_Z$ . Je zřejmé, že během etapy rozeznutého spínače se na dodávání proudu do zátěže podílí oba indukory zároveň. Během této etapy rovněž dochází k nabíjení kapacitoru  $C_1$  induktorem  $L_1$ . [9]



Obr. 1.12: SEPIC: sepnutý spínač, převzato z [2] a upraveno

Výchozí stav pro výpočet převodního poměru je takový stav, při kterém se na induktorech nevyskytuje žádné stejnosměrné napětí. Kapacitor  $C_1$  v takovém případě vidí na jedné straně kladný potenciál vstupního napětí skrze induktor  $L_1$  a na straně druhé záporný potenciál skrze induktor  $L_2$ . Proto musí pro střední hodnotu stejnosměrného napětí na kapacitoru platit vztah [9, 10]:

$$U_{C1} = U_{IN}. \quad (1.41)$$

Použitím poznatků z předchozích podkapitol lze psát pro induktor  $L_1$  v ustáleném stavu následující rovnost:

$$\frac{1}{L_1} U_{IN} \delta T = -\frac{1}{L_1} (U_{IN} - U_{C1} - U_{OUT})(1 - \delta)T, \quad (1.42)$$

kde napětí na induktoru  $L_1$  ve stavu sepnutého a rozeznutého spínače je zřejmé z Obr. 1.12, resp. Obr. 1.11.

Dosazením (1.41) do (1.42) a upravením je získán převodní vztah v závislosti na střídě [10]:

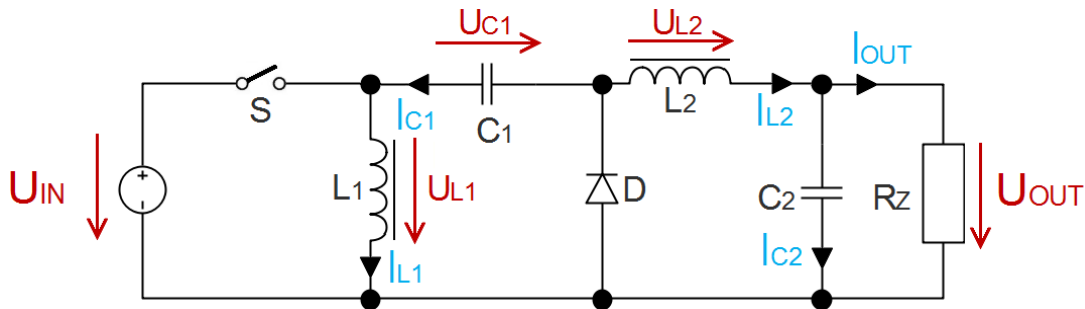
$$\frac{U_{OUT}}{U_{IN}} = \frac{\delta}{1 - \delta}. \quad (1.43)$$

Z Obr. 1.12 je zřejmé, že během doby sepnutí  $T_{ON}$  dodává veškerý výstupní proud  $I_{OUT}$  kapacitor  $C_2$ , tedy platí rovnost  $I_{C2} = I_{OUT}$ . Dosazením do (1.23) se dostane:

$$\Delta U_{C2} = \frac{1}{C_2} \int_0^{t_{ON}} I_{OUT} dt = \frac{I_{OUT} T_{ON}}{C_2} = \frac{I_{OUT} \delta}{C_2 f}. \quad (1.44)$$

### 1.2.6 Zdroje typu ZETA

Zdroj typu ZETA, zobrazeno na Obr. 1.13, je další možné zapojení, které dodává nižší nebo vyšší napětí, než je napětí vstupní. Tato napětí mají stejnou polaritu. [2]



Obr. 1.13: Principiální schéma zdroje typu ZETA, převzato z [2] a upraveno

Během první etapy, kdy je spínač  $S$  sepnut, začíná obvodem protékat proud jednak do induktoru  $L_1$ , na kterém se objeví vstupní napětí  $U_{IN}$  a dochází k akumulaci energie v jeho magnetickém poli, jednak do zátěže  $R_Z$  přes kapacitor  $C_1$  a induktor  $L_2$ . Dioda  $D$  je uzavřena, jelikož se na ní nachází napětí  $U_{L2} + U_{OUT}$  v závěrném směru. Proud prvním induktorem  $L_1$  i druhým induktorem  $L_2$  narůstá dle (1.4) po celou dobu sepnutí spínače [11, 12]:

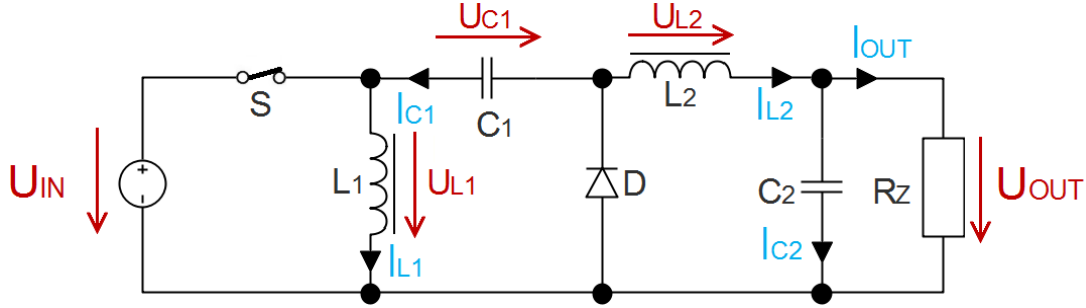
$$\Delta I_{L1+} = \frac{1}{L_1} U_{IN} \delta T, \quad (1.45)$$

$$\Delta I_{L2+} = \frac{1}{L_2} (U_{IN} - U_{C1} - U_{OUT}) \delta T, \quad (1.46)$$

kde označení napětí na induktorech je patrné na Obr. 1.14.

Při vypnutí spínače, viz Obr. 1.13, dojde k otevření diody vlivem indukovaného napětí na induktoru  $L_1$ , které se sčítá s napětím  $U_{C1}$ . Otevření diody umožní proudu  $I_{L2}$  vtékat do zátěže a dochází k jeho poklesu podle (1.7) [11, 12]:

$$\Delta I_{L2-} = -\frac{1}{L_2} (-U_{OUT})(1 - \delta) T. \quad (1.47)$$



Obr. 1.14: ZETA: sepnutý spínač, převzato z [2] a upraveno

Zároveň dochází k dobíjení kapacitoru  $C_1$  proudem  $I_{L1}$ , který klesá podle vztahu:

$$\Delta I_{L1-} = -\frac{1}{L_1} U_{C1} (1 - \delta) T. \quad (1.48)$$

Porovnáním rovnic (1.46) a (1.47) je možné vyjádřit napětí na kapacitoru  $C_1$  [11, 12]:

$$U_{C1} = -U_{OUT}. \quad (1.49)$$

Po zjednodušení vztahu lze psát (1.46):

$$\Delta I_{L2+} = \frac{1}{L_2} U_{IN} \delta T. \quad (1.50)$$

Z podmínky rovnosti (1.47) a (1.50) vychází vztah pro převodní poměr:

$$\frac{U_{OUT}}{U_{IN}} = \frac{\delta}{1 - \delta}. \quad (1.51)$$

Zvlnění proudu induktorem  $L_2$  bude stejné jako zvlnění proudu kapacitorem  $C_2$ .<sup>3)</sup> Zvlnění napětí na kapacitoru  $C_2$  je rovno [6]:

$$\Delta U_{C2} = \frac{\Delta Q}{C_2}. \quad (1.52)$$

Zvlnění proudu  $\Delta I_{L2}$  lze dostat z přepisu periody cyklu spínání a dosazení vyjádřených dob  $T_{ON}$  a  $T_{OFF}$  z rovnic (1.50) a (1.47) jako:

$$T = \frac{\Delta I_{L2} L_2}{U_{IN}} + \frac{\Delta I_{L2} L_2}{U_{OUT}} \Rightarrow \Delta I_{L2} = \frac{U_{OUT} U_{IN}}{L_2 (U_{IN} + U_{OUT}) f} = \frac{U_{IN} \delta}{L_2 f}. \quad (1.53)$$

Dosazením (1.16) a (1.53) do (1.52) se získá vztah pro zvlnění napětí na kapacitor  $C_2$ , a tedy i zvlnění výstupního napětí [6]:

$$\Delta U_{C2} = \frac{U_{IN} \delta}{8 L_2 C_2 f^2}. \quad (1.54)$$

<sup>3)</sup> za předpokladu, že zvlnění výstupního proudu je zanedbatelné



### 1.3 Zvolení typu zdroje

Srovnáním vlastností lineárních a spínaných zdrojů je zřejmá nevhodnost lineárního napětového zdroje pro konstrukci regulovatelného zdroje napětí do automobilového zapalovače kvůli velkým rozměrům a kvůli nízké účinnosti, se kterou je spjat vysoký ztrátový výkon, a tedy značné zahřívání.

Porovnáním jednotlivých typů spínaných zdrojů je zřejmé, že některé typy zdrojů napětí pouze snižují, některé pouze zvyšují, jiné dokáží dodat napětí vyšší i nižší podle potřeby. Z hlediska polarit výstupního napětí se vyskytují pouze dvě možnosti, a to se stejnou, nebo invertovanou polaritou vůči vstupnímu napětí. Další rozdíl je zvlnění výstupního napětí. Následující tabulka Tab. 1.1 shrnuje získané teoretické poznatky.

Tab. 1.1: Porovnání jednotlivých typů spínaných zdrojů

Typ zdroje	buck	boost	buck-boost	Ćuk	SEPIC	ZETA
Snížení napětí	Ano	Ne	Ano	Ano	Ano	Ano
Zvýšení napětí	Ne	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano
Převodní poměr	$\delta$	$\frac{1}{1-\delta}$	$-\frac{\delta}{1-\delta}$	$-\frac{\delta}{1-\delta}$	$\frac{\delta}{1-\delta}$	$\frac{\delta}{1-\delta}$
Polarita výst. napětí <sup>4)</sup>	+	+	-	-	+	+
Zvlnění napětí	$\frac{U_{IN}\delta(1-\delta)}{8LCf^2}$	$\frac{I_{OUT}\delta}{Cf}$	$\frac{I_{OUT}\delta}{Cf}$	$\frac{U_{IN}\delta}{8L_2C_2f^2}$	$\frac{I_{OUT}\delta}{C_2f}$	$\frac{U_{IN}\delta}{8L_2C_2f^2}$

Vhodný typ spínaného zdroje pro regulovatelný zdroj by měl mít:

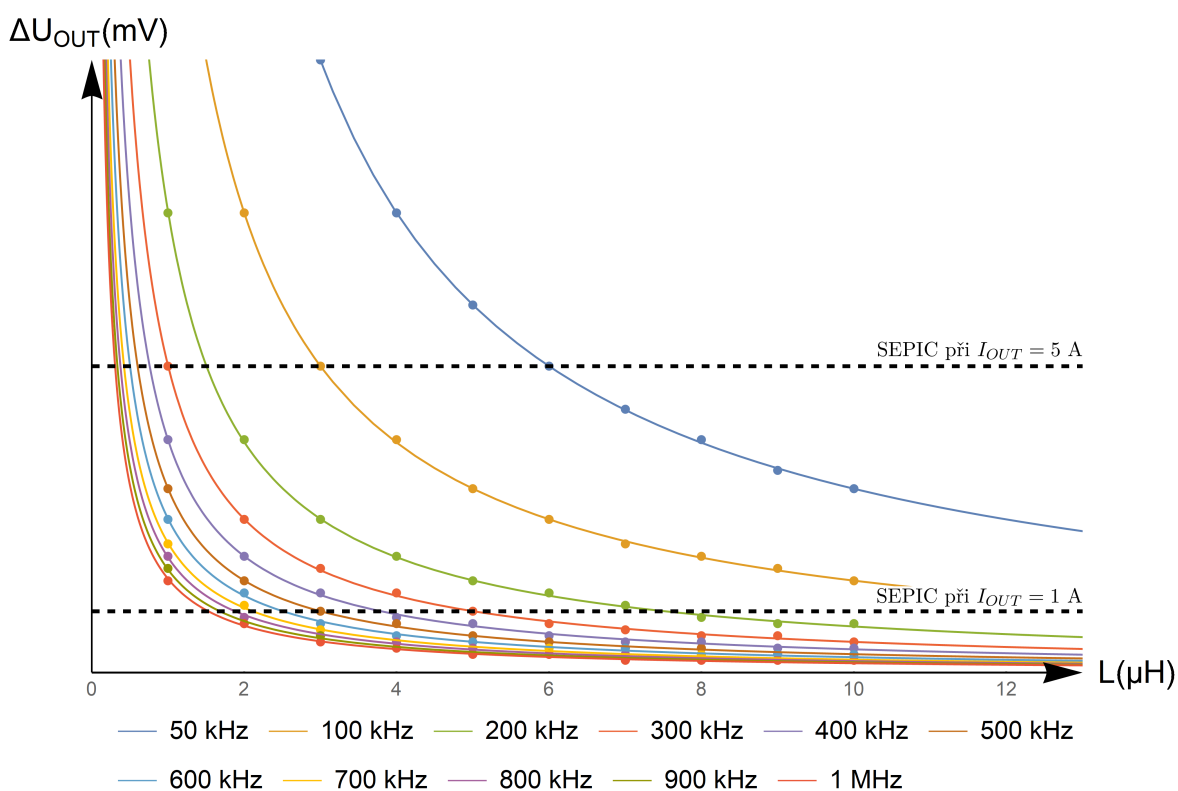
- schopnost dodat výstupní napětí v rozmezí 5 V až 20 V, tedy umožnit zvyšování i snižování vstupního napětí,
- stejnou polaritu výstupního napětí jako napětí vstupní,
- minimální zvlnění výstupního napětí.

Zvyšovat i snižovat vstupní napětí mohou typy zdrojů buck-boost, Ćuk, SEPIC a ZETA. Z těchto čtyř dodávají napětí se stejnou polaritou jako napětí vstupní pouze poslední dva - zdroje typu SEPIC a ZETA. V případě typu SEPIC závisí zvlnění výstupního napětí na výstupním proudu  $I_{OUT}$ , střídě  $\delta$ , kapacitě výstupního kapacitoru  $C_2$  a frekvenci spínání  $f$ . V případě typu ZETA je zvlnění napětí závislé na vstupním napětí  $U_{IN}$ , střídě  $\delta$ , indukčnosti induktoru  $L_2$ , kapacitě výstupního kapacitoru  $C_2$  a frekvenci spínání  $f$  s druhou mocninou. Míru zvlnění lze pro lepší názornost porovnat graficky s frekvencí  $f$  jako parametrem, viz Obr. 1.15. Absolutní hodnota zvlnění zde není uvedena, jelikož závisí na kapacitě výstupního kapacitoru  $C_2$  a střídě  $\delta$ , avšak pro oba typy zdrojů identicky.

Nejvyšší odebíraný proud je při rychlonabíjení telefonu 5 A, nejnižší je pak 1 A při běžném nabíjení staršího telefonu nebo záznamové kamery.

<sup>4)</sup>+ značí stejnou a - opačnou polaritu proti vstupnímu napětí

Je důležité si uvědomit, že nízkých hodnot indukčnosti lze dosáhnout výhradně při vysoké frekvenci spínání, a tedy pro nižší frekvence se musí uvažovat hodnoty vyšší indukčnosti. Z Obr. 1.15 je zřejmé, že pro nízké frekvence ( $\leq 200$  kHz), kdy se uvažují vysoké hodnoty indukčnosti ( $> 8 \mu\text{H}$ ) je zvlnění pro typ ZETA vždy menší, než je zvlnění pro typ SEPIC při výstupním proudu  $5 \text{ A}$ <sup>5)</sup>, a pouze pro frekvenci  $200$  kHz je menší než zvlnění pro SEPIC-1A. Pro střední rozsah frekvencí ( $300$  kHz –  $700$  kHz) lze sledovat, že zvlnění pro typ ZETA je od indukčnosti větší než  $5 \mu\text{H}$  vždy menší, než je zvlnění pro typ SEPIC-5A i SEPIC-1A. Pro vysoké frekvence ( $\geq 800$  kHz), u kterých je možné dosáhnout nejmenších hodnot indukčností, je vidět, že pro velmi malé indukčnosti ( $< 2 \mu\text{H}$ ) je zvlnění pro typ ZETA vždy menší než pro typ SEPIC-5A a pro větší hodnoty indukčnosti je zvlnění pro typ ZETA menší i než pro typ SEPIC-1A.



Obr. 1.15: Míra zvlnění výstupního napětí  $U_{OUT}$  v závislosti na indukčnosti  $L$  pro jednotlivé frekvence  $f$  pro typ ZETA a pro výstupní proudy  $I_{OUT}$  pro typ SEPIC

Typ zdroje ZETA má nižší zvlnění výstupního napětí pro velký rozsah frekvencí i indukčností i při malém odebíraném proudu. Při vyšších proudech je rozdíl v míře zvlnění ještě výraznější. Z tohoto důvodu je zvolen typ ZETA jako nejvhodnější.

<sup>5)</sup>typ zdroje SEPIC při výstupním proudu  $x \text{ A}$  bude dále zapisován ve tvaru SEPIC- $x\text{A}$

## Kapitola 2

# Návrh spínaného zdroje

V předchozí kapitole bylo zjištěno, že nejvhodnějším typem zapojení spínaného zdroje pro regulovatelný zdroj napětí do automobilu je typ ZETA. Dále je důležité určit frekvenci spínání, na které závisí velikost jednotlivých součástek. Dolní hranice frekvence je omezena hranicí slyšitelnosti a požadované kompaktnosti přístroje, jelikož s nižší frekvencí rostou rozměry jednotlivých součástek. Horní hranice je pak dána technologickým omezením především rychlostí spínání spínače a také možnostmi integrovaného obvodu, který frekvenci spínání reguluje. Vysoké frekvence jsou rovněž nevýhodné z hlediska ztrátového výkonu, který vzniká během každého sepnutí a rozepnutí polovodičového spínače. Tento výkon tepelně zatěžuje spínací prvek a snižuje celkovou účinnost přeměny energie.

Z těchto důvodů je zvolena frekvence spínání 400 kHz, která umožní volbu přijatelně malých a technologicky méně náročných součástek.

Spínaný zdroj je realizován do běžné 12 V automobilové zásuvky poskytující vstupní napětí. Toto napětí není přesně 12 V, ale kolísá s úrovní nabití automobilové baterie a s velikostí jejího zatížení. Běžné hodnoty napětí, pro které se dimenzují přístroje do automobilové zásuvky, jsou od 12 V do 14,7 V. Při zatížení je možný pokles až k 9 V. [13, 14]

Při navrhování spínaného zdroje bude uvažována jako nominální hodnota právě 12 V a na konci kapitoly bude provedena analýza chování obvodu při krajních hodnotách vstupního napětí 9 V a 14,7 V.

### 2.1 Integrovaný obvod

V současnosti se výrobě řídicích integrovaných obvodů pro spínané zdroje věnuje velké množství výrobců. Mezi nejznámější patří Analog Devices (tato firma se spojila s Linear Technology), Texas Instruments, ON Semiconductor, Maxim Integrated nebo Infineon Technologies.

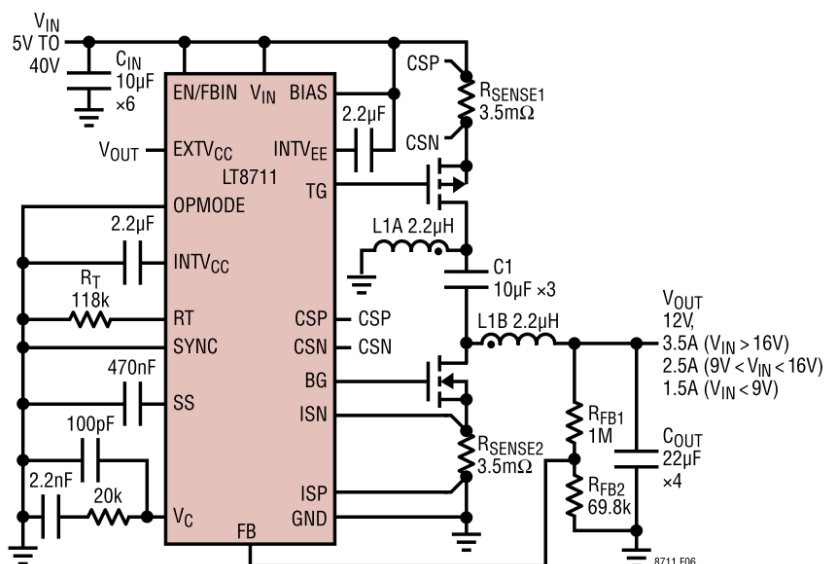
Pro tuto práci je zvolen integrovaný obvod od firmy Analog Devices, jelikož nabízí jednoduchý program pro obvodové simulace s podporou nově vyrobených řídicích obvodů.

Samotný integrovaný obvod musí splňovat následující podmínky:

- pracovní napětí 12 V,
- frekvence spínání alespoň 400 kHz,
- možnost zapojení ZETA<sup>1)</sup>.

Mezi výhody při výběru patří externí spínací prvky a možnost synchronního zapojení dvou spínačů<sup>2)</sup>.

Daným požadavkům vyhovují integrované obvody LT8471 a LT8711 pro spínané zdroje typu ZETA. Oba obvody jsou schopny pracovat v napětovém rozmezí 2,6 V až 50 V, respektive 4,5 V až 42 V, při frekvencích od 100 kHz do 750 kHz, respektive do 1 MHz. Oba obvody umožňují použít dva spínací prvky. Obvod LT8471 má interní spínací prvky, které jsou schopny dodávat pouze 2 A. Pouze obvod LT8711 využívá ke spínání externích spínacích prvků, které lze dimenzovat dle velikosti výstupního proudu. Proto je zvolen obvod LT8711.



Obr. 2.1: Příklad zapojení obvodu LT8711 pro spínaný zdroj typu ZETA, převzato z [15]

## 2.2 Výpočet hodnot jednotlivých součástek

V dostupném datasheetu k LT8711 je uveden postup pro výpočet hodnot jednotlivých součástek. Následující výpočty vycházejí ze zdroje [15], pokud nebude uvedeno jinak. První krok je volba vstupního napětí  $U_{IN} = 12$  V, výstupního napětí  $U_{OUT}$  a výstupního proudu  $I_{OUT}$ , které jsou proměnlivé, a frekvence spínání  $f = 400$  kHz. K získání jednotlivých hodnot pro proměnlivé výstupní napětí a proud se vypočítají krajní hodnoty, tedy 5 A při 5 V a 3,5 A při 20 V<sup>3)</sup>, a zvolí se větší z nich.

<sup>1)</sup>alternativně lze využít řídicí obvody pro zapojení buck, avšak bez doporučeného rozložení součástek na desce plošného spoje a bez doporučeného postupu výpočtu hodnot jednotlivých součástek

<sup>2)</sup>při synchronním zapojení se místo neřiditelné diody využívá druhého spínacího prvku

<sup>3)</sup>dále se na tyto varianty bude odkazovat jako na variantu 5/5 a variantu 3,5/20

### 2.2.1 Frekvence

K nastavení frekvence se používá rezistor spojený s vývodem RT řídicího obvodu LT8711 a se zemí.

$$R_T = \frac{25000}{f} - 2, \quad (2.1)$$

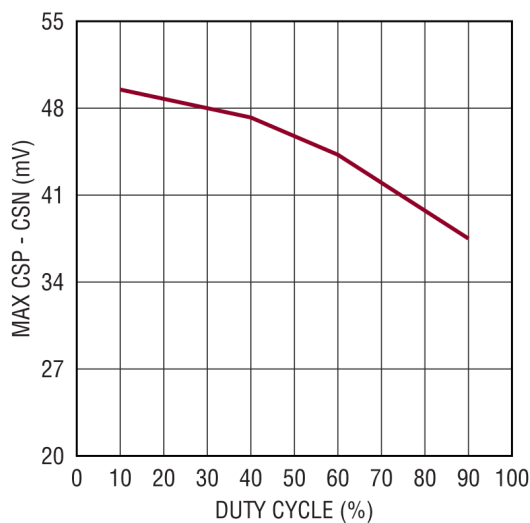
kde frekvence je uvedena v kHz a výsledný odpor v k $\Omega$ . Požadované frekvenci 400 kHz odpovídá odpor 60,5 k $\Omega$ .

### 2.2.2 Střída

K výpočtu střidy se použije upravený vzorec (1.51) ve tvaru:

$$\delta = \frac{U_{OUT}}{U_{IN} + U_{OUT}}. \quad (2.2)$$

Pro variantu 5/5 vyjde střída 0,29 a pro variantu 3,5/20 0,63. Pro tyto hodnoty se určí maximální napětí  $U_{CSPN}$  v závislosti na střídě z charakteristiky na Obr. 2.2. Variantě 5/5 odpovídá hodnota napětí 48 mV a variantě 3,5/20 44 mV.



Obr. 2.2: Závislost napětí  $U_{CPSN}$  na střídě  $\delta$ , převzato z [15]

### 2.2.3 Rezistory snímající proud

Odpor rezistoru  $R_{SENSE}$  se vypočte podle:

$$R_{SENSE} \leq 0,63 \frac{U_{CSPN}}{I_{OUT}} (1 - \delta), \quad (2.3)$$

přičemž  $R_{SENSE1} = R_{SENSE2} = R_{SENSE}$

Pro variantu 5/5 vyjde odpor 4,3 m $\Omega$  a pro variantu 3,5/20 2,9 m $\Omega$ . Je zřejmé, že odpor musí být menší než 2,9 m $\Omega$ , pro další výpočty bude uvažována nejbližší celočíselná hodnota, tedy 2,0 m $\Omega$ .

### 2.2.4 Cívky

Rozmezí indukčnosti cívek se určí z následujících rovnic:

$$L_{typ} = \frac{R_{SENSE}U_{OUT}}{12,5f} \frac{U_{IN}}{U_{IN} + U_{OUT}}. \quad (2.4)$$

$$L_{min} = \frac{R_{SENSE}U_{OUT}}{40f} \left( 1 - \left( \frac{U_{IN}}{U_{OUT}} \right)^2 \right). \quad (2.5)$$

$$L_{max} = \frac{R_{SENSE}U_{OUT}}{5f} \frac{U_{IN}}{U_{IN} + U_{OUT}}. \quad (2.6)$$

Platí, že minimální indukčnost je větší než  $L_{typ}$  a  $L_{min}$  a maximální indukčnost je rovna  $L_{max}$ . Dále platí, že pro spojené cívky je hodnota vypočtené indukčnosti rovna indukčnosti cívky<sup>4)</sup> a pro nespojené cívky je vypočtená indukčnost rovna paralelní kombinaci dvou cívek<sup>5)</sup>. Z rovnic (2.4), (2.5) a (2.6) se získá rozmezí indukčnosti 1,4  $\mu\text{H}$  až 3,5  $\mu\text{H}$  pro variantu 5/5 a rozmezí 3,0  $\mu\text{H}$  až 7,5  $\mu\text{H}$  pro variantu 3,5/20. Výsledná hodnota indukčnosti je průnikem těchto dvou intervalů, tedy 3,0  $\mu\text{H}$  až 3,5  $\mu\text{H}$ .

V případě nespojených cívek se pro zjednodušení používá dvou cívek o stejné indukčnosti, která může být 6,0  $\mu\text{H}$  až 7,0  $\mu\text{H}$ . Této hodnotě odpovídají například cívky firmy FerroCore (model HPI1040-6R8) s indukčností 6,8  $\mu\text{H}$  a pracovním proudem 7,2 A. Pracovní proud cívky se určí ze vztahu (2.7), kde  $\Delta I_L$  je zvlnění odvozené v (1.53) a je pro obě cívky stejné. [12]

$$I_{L1} = I_{OUT} \frac{\delta}{1 - \delta} + \frac{\Delta I_L}{2}. \quad (2.7)$$

Za předpokladu vstupního napětí 12 V, dosahuje pracovní proud cívkou  $L_1$  hodnoty 7,2 A pro variantu 3,5/20 a pro variantu 5/5 pouze 2,7 A. Pokud nastane zvýšení vstupního napětí, bude pracovní proud nabývat nižších hodnot než 7,2 A, resp. 2,7 A. Pracovní proud druhé cívky  $L_2$  je obecně nižší než pracovní proud první cívky a není nutné jej při užití dvou totožných cívek uvažovat. V případě rozdílných cívek musí cívka  $L_2$  mít pracovní proud alespoň  $I_{OUT} + \Delta I_L/2$ . [12]

### 2.2.5 Vstupní kondenzátor

Vstupní kapacita se vypočte pomocí rovnice (2.8) a je zřejmé, že je větší pro variantu 3,5/20 s hodnotou 28,7  $\mu\text{F}$ .

$$C_{IN} \geq \frac{\delta}{0,04Lf^2}. \quad (2.8)$$

Požaduje se minimální ekvivalentní sériový odpor (ESR<sup>6)</sup>) a je doporučeno využít keramických, tantalových či polymerových kondenzátorů. Zároveň musí být kondenzátor dimenzovaný

<sup>4)</sup>  $L = L_1 = L_2$

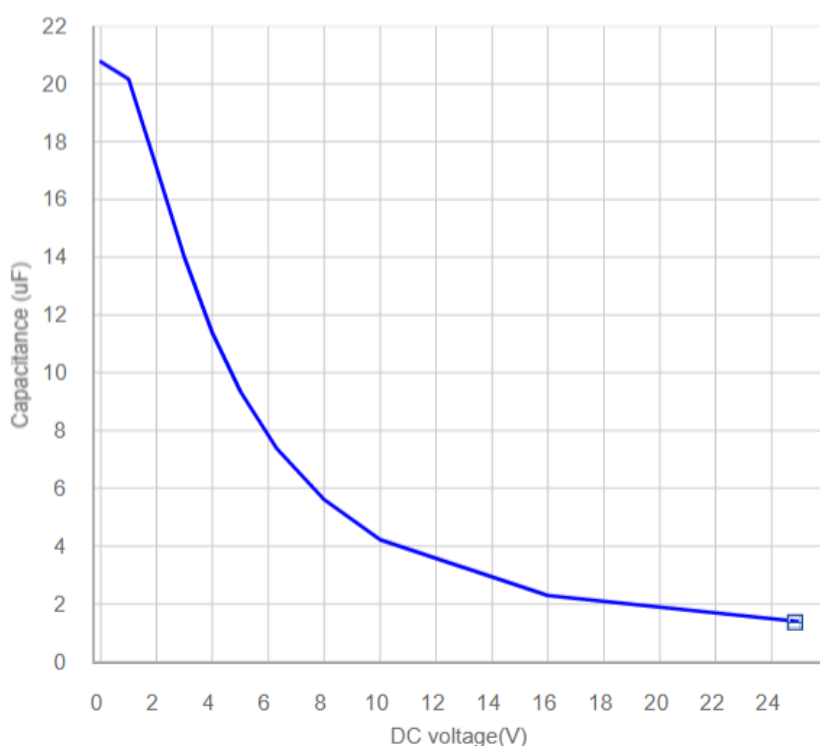
<sup>5)</sup>  $L = L_1 \parallel L_2$

<sup>6)</sup> z anglického equivalent series resistance

na efektivní hodnotu proudu 4,5 A podle: [12]

$$I_{C_{IN}(ef)} = I_{OUT} \sqrt{\frac{U_{OUT}}{U_{IN}}}. \quad (2.9)$$

Velmi nízký ESR (jednotky  $m\Omega$ ) a vysoké hodnoty efektivního proudu (jednotky A) mají zejména keramické kondenzátory. Problém je jejich klesající kapacita, pokud se na nich vyskytuje stejnosměrné napětí. Kapacita běžně dostupného keramického kondenzátoru  $22 \mu\text{F}/25 \text{V}$  (konkrétně model CL21A226MAQNNN firmy Samsung) klesá už při stejnosměrném napětí 12 V na  $3,5 \mu\text{F}$ , viz závislost na Obr. 2.3.



Obr. 2.3: Závislost kapacity na stejnosměrném napětí kondenzátoru CL21A226MAQ, převzato z [16]

Je možné využít paralelní zapojení většího množství kondenzátorů, ale vzhledem k ceně se jedná o nevhodný postup. Vhodnější je kombinace s polymerovými kondenzátory, které již mají větší ESR (desítky  $m\Omega$ ), ale zvládají vysoké hodnoty efektivního proudu a mají podstatně větší kapacitu, která s napětím neklesá. Je doporučeno používat polymerové kondenzátory OS-CON firmy Panasonic, vzhledem k dostupnosti je zvolen polymerový kondenzátor  $56 \mu\text{F}/25 \text{V}$  (model FA1E566M10126VR) s ESR  $28 m\Omega$  a maximální hodnotou efektivního proudu 3,8 A firmy Samwha.

Výsledná kapacita je tvořena paralelní kombinací jednoho polymerového kondenzátoru, který kompenzuje výkyvy napětí v dlouhých časových intervalech, a tří keramických kondenzátorů, které slouží ke kompenzaci výkyvů napětí v krátkých časových intervalech.

### 2.2.6 Výstupní kondenzátor

Pro výstupní kondenzátor platí stejná doporučení jako pro vstupní - použití keramických a polymerových OS-CON kondenzátorů. Z Obr. 2.3 je patrné, že při výstupním napětí 20 V klesá kapacita keramických kondenzátorů na hodnotu 2  $\mu\text{F}$ , a je proto nutná paralelní kombinace s polymerovými kondenzátory. Vypočtená výstupní kapacita je podle (2.10) rovna 147,1  $\mu\text{F}$  pro variantu 5/5 a 54,7  $\mu\text{F}$  pro variantu 3,5/20.

$$C_{OUT} \geq \frac{I_{OUT}\delta}{0,005fU_{OUT}}. \quad (2.10)$$

Nejvhodnější a nejkompaktnější řešení je polymerový OS-CON 150  $\mu\text{F}/20\text{V}$ , který je špatně dostupný a je nahrazen paralelní kombinací tří polymerových kondenzátorů 56  $\mu\text{F}/25\text{V}$  firmy Samwha z předchozí podkapitoly a jedním keramickým kondenzátorem 22  $\mu\text{F}/25\text{V}$  firmy Samsung.

### 2.2.7 Výstupní napětí

Velikost výstupního napětí je dána odporovým děličem  $R_{RFB1}$  a  $R_{RFB2}$ , viz Obr. 2.1. Hodnota odporu  $R_{RFB1}$  je doporučena 1  $\text{M}\Omega$ , druhá hodnota je dána vztahem:

$$R_{RFB2} = \frac{R_{RFB1}}{U_{OUT}/B - 1}, \quad (2.11)$$

kde  $B = konst. = 0,8V$ .

Výstupní napětí 5 V odpovídá hodnotě odporu 190,5  $\text{k}\Omega$  a napětí 20 V odpovídá hodnotě odporu 41,7  $\text{k}\Omega$ . Aby bylo možné výstupní napětí regulovat v rozmezí 5 V až 20 V, je potřeba zařadit do série rezistor s pevnou hodnotou 41,7  $\text{k}\Omega$  a nastavitelný potenciometr 141,8  $\text{k}\Omega$ .

## 2.3 Spínací prvky

Jako spínací prvky je podle datasheetu doporučeno použít dvojici tranzistorů MOSFET s kanálem typu N a s kanálem typu P. U těchto polovodičových součástek je důležité sledovat tyto parametry:

- maximální napětí drain-source  $U_{DS}$ ,
- odpor v sepnutém stavu  $R_{DS(ON)}$ ,
- maximální protékající proud  $I_D$ ,
- dovolený ztrátový výkon  $P_Z$ .

Napětí  $U_{DS}$  je dáno součtem vstupního napětí  $U_{IN}$  a výstupního napětí  $U_{OUT}$  a dosahuje hodnoty 32 V. Stejně požadavky jsou kladeny na P-MOSFET i N-MOSFET. [12]



Odpor v sepnutém stavu  $R_{DS(ON)}$  se u tranzistoru požaduje co nejmenší, jelikož při protékání proudem způsobuje Jouleovy ztráty vedením  $P_j$ , které lze vypočítat podle následujícího vztahu: [15]

$$P_j = I_{ef}^2 R_{DS(on)}, \quad (2.12)$$

kde  $I_{ef}$  je efektivní hodnota protékajícího proudu spínačem. Pro P-MOSFET je největší pro variantu 3,5/20 s hodnotou 7,4 A a pro N-MOSFET nabývá největší hodnoty pro variantu 5/5 a je roven výstupnímu proudu  $I_{OUT}$ . [15]

$$I_{ef} = \frac{I_{OUT} U_{OUT}}{U_{IN} \sqrt{\delta}}. \quad (2.13)$$

Protékající proud může nabývat maximální hodnoty 12,3 A pro variantu 3,5/20:

$$I_{pk} = \frac{I_{OUT}}{1 - \delta} + \Delta I_L. \quad (2.14)$$

Celkový ztrátový výkon je dán Joulovými ztrátami  $P_j$  a ztrátami při spínání včetně ztrát způsobených odčerpáváním náboje závěrného zotavení  $P_{sw}$ :

$$P_{sw(PFET)} = 140 \cdot 10^{-9} \cdot U_{SD} \left( I_{pk} + \frac{I_{pk} - \Delta I_L}{1,6} \right) f + U_{DS} Q_{rr} f, \quad (2.15)$$

$$P_{sw(NFET)} = U_{DS} I_{OUT} f t_{rf} + U_{DS} Q_{rr} f, \quad (2.16)$$

kde  $U_{SD}$  je úbytek napětí v propustném směru vnitřní diody P kanálového MOSFETu,  $Q_{rr}$  je celkový náboj závěrného zotavení a  $t_{rf}$  je průměrná hodnota dob náběhu a sestupu napětí na drainu N kanálového MOSFETu. Všechny tyto údaje jsou uvedeny v datasheetu příslušného tranzistoru.

S ohledem na tyto parametry jsou vybrány tranzistory AOD4189 a AOD4184A firmy Alpha & Omega Semiconductor, které jsou dimenzovány na napětí  $U_{DS}$  40 V, resp. -40 V, proud  $I_D$  -40 A, resp. 50 A a na ztrátový výkon  $P_Z$  2,5 W, resp. 2,3 W. Tento maximální ztrátový výkon je uveden pro tranzistor bez dalšího chlazení osazený na desce plošného spoje s obsahem 6,5 cm<sup>2</sup> a tloušťkou mědi 70 μm. V případě nutnosti je možné připevnit externí chladič. Největší celkový ztrátový výkon vypočtený dle (2.12), (2.15) a (2.16) je 2,3 W, resp. 1,2 W a externí chlazení není potřeba.

## 2.4 Změna vstupního napětí

Předchozí dimenzování součástek bylo provedeno pro nominální vstupní napětí 12 V. V případě poklesu na 9 V je integrovaný obvod LT8711 schopný provozu, avšak zvětší se střída dle (2.2) a při zachování stejné hodnoty odporu  $R_{SENSE}$  se změní dovolené rozmezí indukčnosti cívek od 5 μH do 6,4 μH. Jelikož v obvodu zůstane stejná cívka, tedy cívka

s indukčností  $6,8 \mu\text{H}$ , dojde k nárůstu zvlnění výstupního napětí při požadovaném výstupním napětí  $5 \text{ V}$ . Z rovnic (2.8) a (2.9) je patrné, že dojde k nárůstu požadované vstupní kapacity  $C_{IN}$  na hodnotu  $31,7 \mu\text{F}$  a nárůstu efektivní hodnoty proudu na  $5,2 \text{ A}$ . Výstupní kapacita rovněž vzroste na  $178,6 \mu\text{F}$  dle (2.10). Se snižujícím se vstupním napětím poroste proud protékající spínacími prvky, a tím se bude zvětšovat i ztrátový výkon. Pro P-MOSFET vzroste  $P_Z$  na  $3 \text{ W}$  a pro N-MOSFET naopak klesne na  $1,1 \text{ W}$ .

Pokud se tedy vstupní napětí zmenší, změní se výstupní vlastnosti spínaného zdroje. Dojde k nárůstu zvlnění výstupního napětí  $5 \text{ V}$  při odebíraném proudu  $5 \text{ A}$  kvůli indukčnosti cívek a také bude možné odebírat proud pouze  $3,1 \text{ A}$  při napětí  $20 \text{ V}$ , aby nedocházelo k přehřívání P-MOSFETu.

Pokud se vstupní napětí zvýší na  $14,7 \text{ V}$  je integrovaný obvod LT8711 provozuschopný a zmenší se střída. Analogicky k předchozímu případu dojde k poklesu všech hodnot ( $C_{IN}$ ,  $C_{OUT}$ ,  $I_{C_{IN}(ef)}$ ). Doporučené rozmezí indukčností cívek je od  $6,8 \mu\text{H}$  do  $7,5 \mu\text{H}$  a indukčnost zvolené cívky je v tomto rozmezí. Pro P-MOSFET klesne ztrátový výkon  $P_Z$  na  $2 \text{ W}$  a pro N-MOSFET vzroste na  $1,3 \text{ W}$ . Dojde-li tedy ke zvýšení vstupního napětí,lepší se provozní podmínky a součástky nebudou tolik zatěžovány.

## 2.5 Schéma zapojení

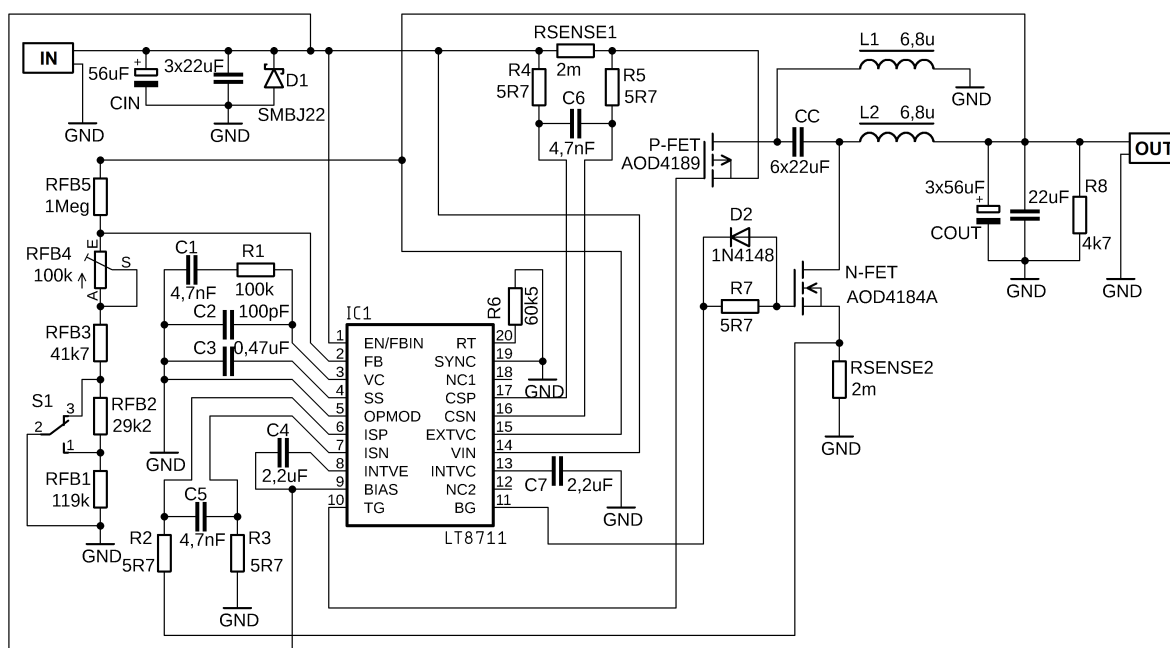
Na Obr. 2.4 je zachyceno schéma zapojení spínaného zdroje typu ZETA, které kromě již popsaných součástek zahrnuje ještě sériovou kombinaci rezistoru  $R_1$  a kondenzátoru  $C_1$  s paralelně připojeným kondenzátorem  $C_2$  k vývodu č. 3 sloužící ke správné kompenzaci zpětnovazební smyčky. Dále je spojen kondenzátor  $C_3$  s vývodem č. 4, tento kondenzátor umožňuje resetování řídicího obvodu v případě přehřátí či nedostatečného napájecího napětí. Kondenzátory  $C_4$  a  $C_7$  (vývod č. 8 a č. 13) slouží k správnému nastavení funkce integrovaného obvodu v zapojení ZETA a jejich hodnoty jsou doporučeny v datasheetu.

Kombinace dvou rezistorů  $R_2$  a  $R_3$  a kondenzátoru  $C_5$  je zařazena ke snímacím vývodům č. 6 a č. 7 a slouží ke snížení vysokofrekvenčního rušení na snímacím rezistoru  $R_{SENSE2}$ . Rezistory  $R_4$  a  $R_5$  a kondenzátor  $C_6$  rovněž snižují vysokofrekvenční rušení na rezistoru  $R_{SENSE1}$ . Rezistor  $R_7$  snižuje rychlost spínání N-MOSFETu, aby se snížilo elektromagnetické rušení, dioda  $D_2$  tento odpor přemostí při vypínání tranzistoru.

Rezistor s odporem  $190,5 \text{ k}\Omega$ , který slouží k nastavení výstupního napětí a jehož hodnota je spočtena z rovnice (2.11), je realizován sériovým zapojením tří rezistorů s pevnou hodnotou odporu  $119 \text{ k}\Omega$ ,  $29,2 \text{ k}\Omega$  a  $41,7 \text{ k}\Omega$  (označeno  $R_{FB1}$ ,  $R_{FB2}$  a  $R_{FB3}$ ) a jedním potenciometrem s hodnotou  $100 \text{ k}\Omega$  (označeno  $R_{FB4}$ ). Tyto hodnoty jsou určeny tak, že při minimálním odporu potenciometru lze přepínačem  $S_1$  měnit výstupní napětí na hodnoty  $5 \text{ V}$ ,  $12 \text{ V}$  a  $20 \text{ V}$ . Při nastavení potenciometru na maximální hodnotu odporu jsou tato napětí  $3,6 \text{ V}$ ,  $5,5 \text{ V}$  a  $6,5 \text{ V}$ , tudíž je možné otáčením potenciometru měnit výstupní napětí v rozmezí  $6,5 \text{ V}$  až  $20 \text{ V}$ , změnou polohy přepínače lze tento rozsah rozšířit až k  $3,6 \text{ V}$ .

Vybíjecí rezistor  $R_8$  slouží k vybití výstupních kondenzátorů  $C_{OUT}$  v případě vypnutí spínaného zdroje nebo v případě snížení požadovaného výstupního napětí, pokud není výstup zatížen.

Transil  $D_1$  nacházející se u vstupu slouží k ochraně integrovaného obvodu před vysokým vstupním napětím a zároveň slouží jako ochrana proti přepólování. Pokud se na vstupu objeví vyšší hodnota napětí než 22 V, na kterou je transil dimenzován, dojde k jeho proražení a zkratování obvodu skrze transil. Při vstupním napětí opačné polaroty je transil v propustném směru a rovněž dojde ke zkratování obvodu skrze transil.



Obr. 2.4: Schéma zapojení spínaného zdroje typu ZETA

Poslední nepopsaný prvek je kondenzátor  $C_C$  jehož hodnota je doporučena v datasheetu jako  $\geq 10 \mu\text{F}/U_{IN}$ . Je použito 6 paralelně spojených keramických kondenzátorů  $22 \mu\text{F}/25 \text{V}$ , aby bylo omezeno zvlnění napětí a byl vykompenzován pokles kapacity, viz Obr. 2.3.

Obvod také obsahuje voltmetr, který není zobrazen na Obr. 2.4. Tento voltmetr funguje jako indikátor napětí a zobrazuje hodnotu výstupního napětí.

Kompletní schéma zapojení je zachyceno v Příloze A. Přílohy C a D zobrazují návrh horní a dolní strany desky plošného spoje a rovněž zobrazují reálné osázení součástkami.

## Kapitola 3

# Naměřené vlastnosti

Na zhotoveném zařízení je měřena zatěžovací charakteristika, která vyjadřuje závislost výstupního napětí  $U_{OUT}$  na výstupním proudu  $I_{OUT}$ . V případě ideálního zdroje je výstupní napětí konstantní v celém rozsahu požadovaných výstupních proudů, v případě reálného zdroje dochází ke kolísání napětí s rostoucím odebíraným proudem. Toto napětí na rozdíl od běžných galvanických zdrojů může v určitém intervalu růst, či naopak klesat. [1]

Dále je uvedena převodní charakteristika vyjadřující závislost výstupního napětí  $U_{OUT}$  na vstupním napětí  $U_{IN}$ . Parametrem převodní charakteristiky může být buď konstantní hodnota výstupního proudu, nebo konstantní hodnota zatěžovacího odporu. [1]

Napětí v automobilové zásuvce se pohybuje v rozmezí 9 V až 14,7 V, proto je převodní charakteristika uvažována pouze od 8 V do 16 V.

Při zvolení výstupního napětí spínačem<sup>1)</sup> je požadována maximální odchylka 5 % od nominální hodnoty jako je požadováno například u spínaných zdrojů do osobních počítačů. Následující tabulka udává minimální, nominální a maximální hodnotu pro jednotlivá zvolená napětí.

Tab. 3.1: Dovolené napětí pro zvolené výstupní napětí, převzato z [17]

Zvolené výstupní napětí	Min.	Nom.	Max.
5 V	4,75 V	5,00 V	5,25 V
12 V	11,40 V	12,00 V	12,60 V
20 V	19,00 V	20,00 V	21,00 V

Důležitým parametrem, který se sleduje během celého měření, je účinnost spínaného zdroje. Hodnota účinnosti lze vypočítat ze vztahu:

$$\eta = \frac{U_{OUT}I_{OUT}}{U_{IN}I_{IN}}. \quad (3.1)$$

Dále jsou uvedeny grafické závislosti pro nominální vstupní napětí 12 V, veškeré naměřené údaje obsahuje Příloha F.

---

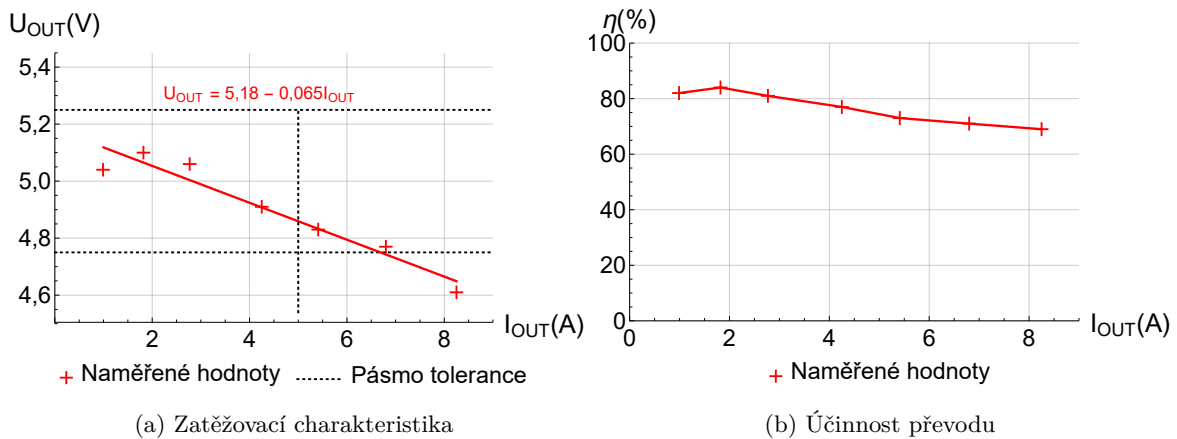
<sup>1)</sup>5 V, 12 V nebo 20 V

### 3.1 Zatěžovací charakteristika

Závislost  $U_{OUT} = f(I_{OUT})$  při  $U_{IN} = konst.$  udává vlastně stabilitu výstupního napětí při změnách výstupního proudu. Proti ideální závislosti klesá výstupní napětí dle předpisu:

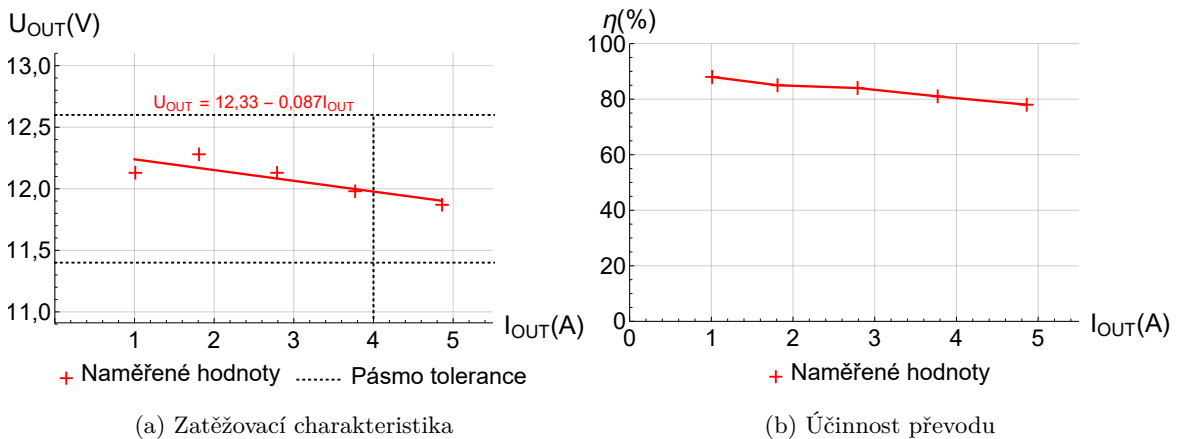
$$U_{OUT} = U_O - R_i I_{OUT}, \quad (3.2)$$

kde  $U_O$  je napětí naprázdno (při nulovém odběru proudu) a  $R_i$  je vnitřní odpor zdroje. Tímto předpisem jsou proloženy zatěžovací charakteristiky na Obr. 3.1a, Obr. 3.2a a Obr. 3.3a.



Obr. 3.1: Naměřené závislosti pro zvolené  $U_{OUT} = konst. = 5$  V při  $U_{IN} = konst. = 12$  V

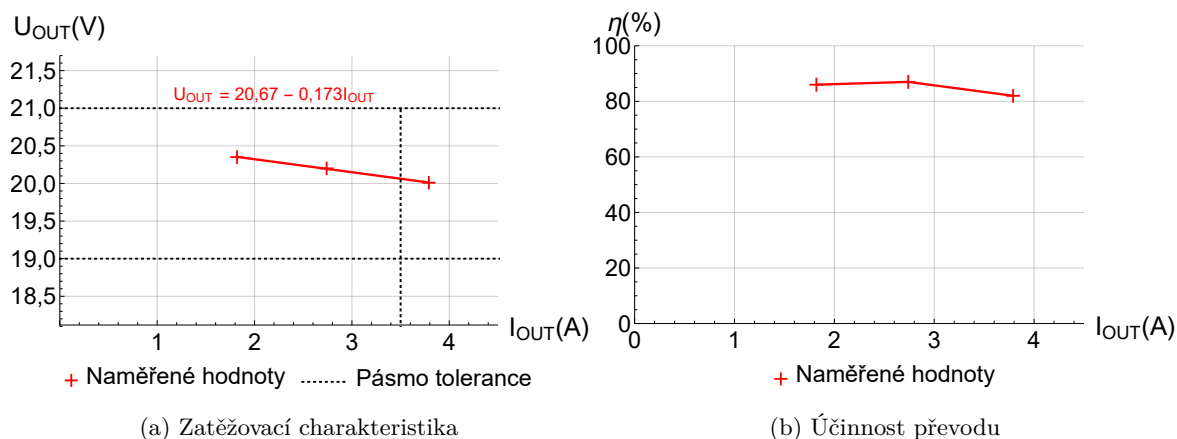
První měření je pro  $U_{OUT} = 5$  V, pro které je doporučená maximální hodnota výstupního proudu 5 A, avšak měření je provedeno až do hodnoty 8,25 A. Z Obr. 3.1a je patrné, že výstupní napětí je v rámci dovolené tolerance 5 % až do hodnoty  $I_{OUT} = 6,6$  A. Účinnost transformace napětí roste až do  $I_{OUT} = 1,8$  A, kdy nabývá největší účinnosti 84 %, ale s rostoucím výstupním proudem klesá k hodnotě 70 %. Pro doporučenou hodnotu  $I_{OUT} = 5$  A je účinnost transformace rovna 75 %. Z předpisu  $U_{OUT} = 5,18 - 0,065 I_{OUT}$  lze zjistit informaci, že vnitřní odpor napěťového zdroje je  $65$  m $\Omega$ , což lze považovat za velmi dobrou hodnotu.



Obr. 3.2: Naměřené závislosti pro zvolené  $U_{OUT} = konst. = 12$  V při  $U_{IN} = konst. = 12$  V

Další měření je pro  $U_{OUT} = 12$  V a je měřeno do hodnoty výstupního proudu 4,86 A.

Účinnost je nejvyšší pro nejmenší odebíraný proud 1 A, při kterém dosahuje 88 %, a postupně klesá až na hodnotu 78 %. Výstupní napětí je v pásmu tolerance po celou dobu měření a není nalezena hodnota  $I_{OUT}$ , pro kterou by napětí přesáhlo dovolenou hodnotu.

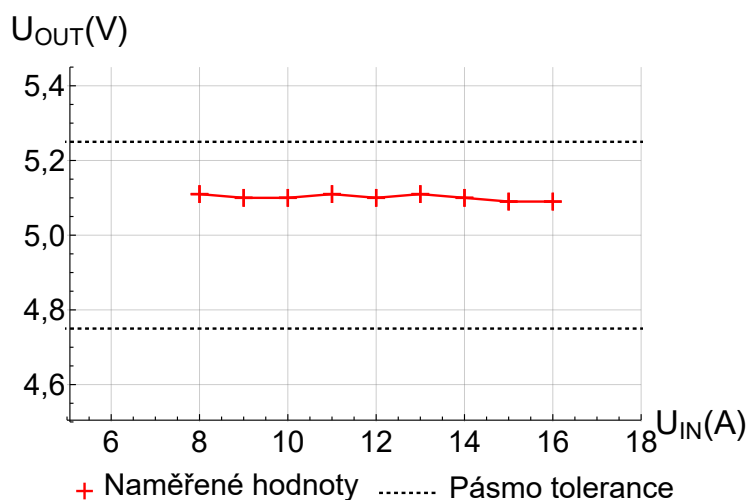


Obr. 3.3: Naměřené závislosti pro zvolené  $U_{OUT} = konst. = 20$  V při  $U_{IN} = konst. = 12$  V

Poslední zatěžovací charakteristika je měřena pro výstupní napětí 20 V. Závislost je proměřena až do hodnoty 3,79 A, při které došlo ke zničení tranzistoru v důsledku špatného odvodu tepla. Při této hodnotě zařízení pracovalo s účinností 82 %.

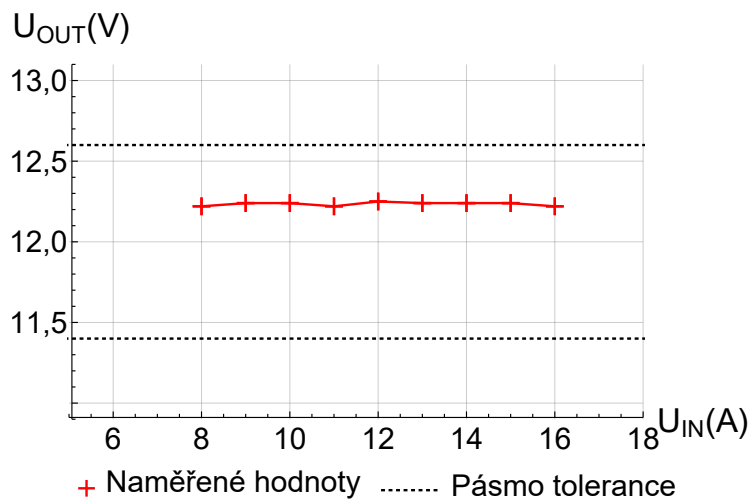
## 3.2 Převodní charakteristika

Závislost  $U_{OUT} = f(U_{IN})$  při  $I_{OUT} = konst.$  charakterizuje zdroj z hlediska změny výstupní veličiny, tedy  $U_{OUT}$ , v závislosti na změně vstupní veličiny, tedy  $U_{IN}$ . Charakteristika nebyla naměřena na zhotoveném zařízení z důvodu jeho poškození při měření zatěžovací charakteristiky, ale hodnoty jsou získány ze simulace v programu LTspice. Převodní charakteristika je měřena naprázdno, tudíž při  $I_{OUT} = 0$  A.



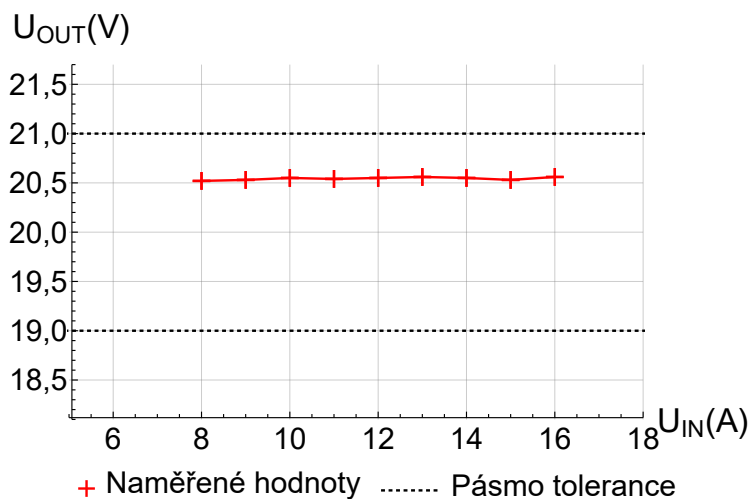
Obr. 3.4: Převodní charakteristiky pro zvolené  $U_{OUT} = konst. = 5$  V při  $I_{OUT} = 0$  A

Uvedené závislosti jsou téměř konstantní při změně vstupního napětí, ve všech případech jsou hodnoty napětí naprázdno větší než hodnoty očekávané (5 V, 12 V a 20 V). Je to způsobeno především tolerancí odporů  $R_{RFB}$  uvedených v kapitole 2.2.7, jelikož tato tolerance je od 1 % do 5 %.



Obr. 3.5: Převodní charakteristiky pro zvolené  $U_{OUT} = konst. = 12\text{ V}$  při  $I_{OUT} = 0\text{ A}$

Řídící obvod LT8711 i voltmetr potřebují ke svému provozu napětí od 4,5 V do 42 V, respektive od 4,7 V do 32 V, spínaný zdroj je tedy schopný fungovat v obou krajních hodnotách vstupního napětí.



Obr. 3.6: Převodní charakteristiky pro zvolené  $U_{OUT} = konst. = 20\text{ V}$  při  $I_{OUT} = 0\text{ A}$

## Kapitola 4

# Nákladová kalkulace

V této kapitole bude popsána nákladová kalkulace zhotoveného výrobku pro kusovou a sériovou výrobu, která bude dále rozdělena podle míry automatizace výrobního procesu. Uvažovány budou pouze přímé, nikoliv režijní náklady. U elektronických součástek je běžné poskytování množstevní slevy, tudíž výroba největšího množství je nejvýhodnější z hlediska koupených součástek, ale je nutné uvažovat např. narůstající počáteční investice do strojů, větší počet zaměstnanců či větší spotřebu elektrické energie. Sériová výroba s nízkou automatizací nevyžaduje automatické osazovací a pájecí stroje, ale je stále potřeba mít k dispozici větší množství zaměstnanců s vyšší kvalifikací, jelikož jsou zodpovědní za veškeré technologické procesy. Zároveň množstevní sleva není tak výrazná. Pro kusovou výrobu je uvažován malý počet zaměstnanců firmy rodinného typu, kteří mají potřebné zkušenosti a již vlastní velké množství potřebného vybavení. Pro každou variantu budou uvažovány nejen náklady na samotné součástky, ale rovněž na pracovní sílu, potřebné vybavení, spotřební materiál a množství spotřebované elektrické energie. Všechny tyto náklady budou posléze přepočteny dle výrobní kapacity na jeden výrobek.

Na trhu lze nalézt podobné výrobky využívající automobilové zásuvky k transformaci vstupního napětí. Nejpodobnější k regulovatelnému zdroji popsanému v této práci je univerzální napájecí adaptér pro notebooky 70 W Ultralim firmy Trust, který je schopen dodávat až 4,5 A při 15, 16 či 19 V, ale nenabízí možnost nastavení napětí uživatelem ani jiné napěťové rozsahy. Právě proto je menších rozměrů 90 x 56 x 17 mm s cenou (bez DPH) 495 Kč.

Další podobné zařízení je univerzální adaptér 100 W manual firmy Eurocase umožňující manuální volbu výstupního napětí 12, 15, 16 a 18 V při výstupním proudu 5,5 A a napětí 19, 20, 22 a 24 V při výstupním proudu 4 A. Zároveň je schopen nezávisle dodávat 1 A při napětí 5 V. Toto zařízení má rozměry 112 x 64 x 25 mm a cenu 396 Kč bez DPH.

Ani jedno z běžně nabízených zařízení nenabízí nastavitelné napětí uživatelem s indikátorem aktuální hodnoty nebo možnost odběru většího proudu při nízkém napětí 5 V. Výrobek popsaný v této práci není z důvodu displeje indikátoru natolik kompaktní jako předchozí zmíněné, má rozměry 96 x 74 x 37 mm, avšak lze očekávat, že při sériové výrobě se rozměry zmenší. Z těchto skutečností lze určit orientační cenu bez DPH jednoho výrobku na 500 Kč.

Následující tabulka Tab. 4.1 zahrnuje ceny bez DPH jednotlivých součástek vč. jejich označení, které odpovídá označení na Obr. 2.4. Ceny začínající symbolem \* jsou pouze odhadnuty na základě snižování cen, jelikož se jedná o velkoobchodní prodej běžně nepřístupný



a oslovené firmy odmítly komentovat obchodní strategii. Cena integrovaného obvodu LT8711 je získána od výrobce Analog Devices a je přepočtena průměrným kurzem 22,26 Kč za 1 \$ za období od 1. 1. 2019 do 29. 3. 2019. [18]

Tab. 4.1: Jednicové ceny za elektronické součástky pro jednotlivé odběry, ceny převzaty z [19]

Součástka	Označení	Počet	Cena za kus při odběru		
			100 ks	5 000 ks	100 000 ks
R0805 100k	R1	1	0,331 Kč	0,047 Kč	0,037 Kč
R0805 5R6	R2,3,4,5,7	5	0,331 Kč	0,047 Kč	0,037 Kč
R0805 56k	R6	1	0,205 Kč	0,029 Kč	*0,023 Kč
R0805 4k7	R6,8	2	0,374 Kč	0,047 Kč	0,037 Kč
R0805 118k	RFB1	1	0,351 Kč	0,057 Kč	0,045 Kč
R0805 1k0		1	0,331 Kč	0,047 Kč	0,037 Kč
R0805 28k	RFB2	1	0,642 Kč	0,072 Kč	0,057 Kč
R0805 1k8		1	0,331 Kč	0,047 Kč	0,037 Kč
R0805 39k	RFB3	1	0,374 Kč	0,053 Kč	0,045 Kč
R0805 2k7		1	0,331 Kč	0,047 Kč	0,037 Kč
R0805 1M0	RFB5	1	0,331 Kč	0,047 Kč	0,037 Kč
R2512 2m0	RSENSE1,2	2	5,711 Kč	2,093 Kč	*1,656 Kč
T910X-100K	RFB4	1	4,234 Kč	3,232 Kč	*2,468 Kč
PK1012 56u/25V	CIN,COUT	4	6,883 Kč	*4,944 Kč	*3,552 Kč
CKS0805 22u/25V	CIN,COUT,CC	10	2,861 Kč	2,055 Kč	*1,626 Kč
CKS0805 4,7n/50V	C1,5,6	3	0,583 Kč	0,141 Kč	*0,111 Kč
CKS0805 100p/50V	C2	1	0,486 Kč	0,117 Kč	*0,092 Kč
CKS0805 470n/16V	C3	1	0,921 Kč	0,305 Kč	*0,241 Kč
CKS0805 2,2u/16V	C4,7	2	0,871 Kč	0,389 Kč	*0,308 Kč
HPI1040-6R8	L1,2	2	5,890 Kč	4,120 Kč	*3,260 Kč
SMBJ22	D1	1	1,470 Kč	*1,115 Kč	*0,882 Kč
1N4148W	D2	1	0,341 Kč	0,213 Kč	0,197 Kč
SL19-123	S1	1	21,090 Kč	*13,164 Kč	*12,211 Kč
LT8711	IC1	1	69,646 Kč	57,275 Kč	45,313 Kč
AOD4189	PFET	1	4,630 Kč	3,860 Kč	* 3,054 Kč
AOD4184A	NFET	1	6,020 Kč	5,042 Kč	*4,677 Kč
Cuprexitit <sup>1)</sup>		1	7,202 Kč	/	16,120 Kč
Voltmetr		1	25,770 Kč	*21,484 Kč	*16,997 Kč
Vidlice		1	7,850 Kč	*6,544 Kč	*5,178 Kč
Krabička		1	21,610 Kč	/	/
USB-C konektor		1	24,850 Kč	20,717 Kč	*16,390 Kč
Konstrukční prvky		7	0,296 Kč	0,080 Kč	*0,063 Kč
<b>Celkem (zaokrouhleno)</b>			<b>286,6 Kč</b>	<b>188,4 Kč</b>	<b>166,1 Kč</b>

<sup>1)</sup>vyšší cena při větším odběru je způsobena nákladnější verzí cuprexititu s fotocitlivou vrstvou

## 4.1 Kusová výroba

Tato varianta zahrnuje jediného pracovníka, který má veškeré znalosti k jednotlivým technologickým procesům. Objem výroby je 100 kusů a množstevní slevy jsou zahrnuty v Tab. 4.1. Návrh desky plošného spoje (DPS) se na cuprexitovou destičku přeneše nažehlovací metodou a odleptá se v roztoku chloridu železitého, a proto je v nákladové kalkulaci zahrnuta levnější cuprexit bez fotocitlivé vrstvy. Tento způsob zpracování DPS je nejméně kvalitní, ale zároveň je nejméně nákladný.

Celkové přímé náklady jsou v této variantě tvořeny náklady na součástky, roztok chloridu železitého, tavidlo, pájku, elektrickou energii a mzdu. Pro malé množství jako je 100 kusů výrobku je dostatečný leptací roztok 500 ml za 89 Kč, kalafunové tavidlo 30 ml za 35 Kč a bezolovnatá pájka (např. Sn95,5Ag3,8Cu0,7) 100 g za 299 Kč. Tyto ceny jsou uvedeny již s DPH. Při tak malé produkci bude obrát menší než 1 mil. Kč a lze očekávat, že většina odběratelů bude soukromými osobami, tedy neplátcí DPH, a pro firmu bude výhodnější, pokud bude rovněž neplátce. Z toho důvodu je nutné přepočítat cenu za součástky uvedenou v Tab. 4.1 jako 286,6 Kč na 346,8 Kč.

K vrtání i pájení využije pracovník své vlastní nářadí, je potřeba pouze doplňovat potřebné tavidlo a pájku. Veškeré spojené činnosti jsou prováděny u pracovníka a lze předpokládat, že distribuční sazba pro dům je D25d. Jelikož fixní náklady za energii jsou hrazeny nehledě na výrobu, jsou uvažovány pouze náklady variabilní způsobené odběrem elektrické energie za účelem užívání vrtačky (příkon 500 W po dobu 10 minut) a pájecí stanice (příkon 50 W po dobu 50 minut). Z těchto hodnot je vypočtena spotřeba elektrické energie na jeden výrobek jako 0,125 kWh. Za předpokladu dodávky elektrické energie firmou ČEZ Prodej, a.s. s produktem Elektřina na dobu neurčitou je cena 4670 Kč/MWh ve vysokém tarifu, tedy náklady na energii na jeden výrobek jsou 0,584 Kč.

Pracovník využívající své vlastní nářadí je placen formou úkolové mzdy ve výši alespoň 200 Kč před zdaněním za jeden výrobek. Po započítání odvodů zaměstnavatelem ve formě sociálního a zdravotního pojištění, které činí dohromady 34 %, je superhrubá mzda 268 Kč.

Tab. 4.2: Celkové přímé jednicové náklady při kusové výrobě

	Náklady
Součástky	346,8 Kč
Spotřební materiál	4,2 Kč
Mzdové náklady	268,0 Kč
Elektrická energie	0,6 Kč
<b>Celkem</b>	<b>619,6 Kč</b>

Neplátce DPH může mít výstupní cenu nezatíženou DPH, proto pro něj platí orientační cena 605 Kč místo ceny 500 Kč, která byla stanovena na základě cen konkurenčních zařízení a byla uvedena bez DPH.

## 4.2 Sériová výroba s nízkou automatizací

Do této varianty je zahrnuta roční výroba 5000 kusů, tedy s odhadovaným ročním obrátem přes 1 mil. Kč, a proto je tato firma plátcem DPH. Z tohoto důvodu jsou dále uvažovány ceny bez DPH, které zaplatí koncový spotřebitel a pro zjednodušení jsou ceny vybavení sloužící k ekonomické činnosti rovněž uvedeny bez DPH. Ke zrychlení a zkvalitnění výrobního procesu jsou DPS vyrobeny a dovezeny externí firmou, pracovníci pouze osazují součástky, tisknou krabičky na 3D tiskárně a dávají výslednou DPS do vytvořené krabičky. Tyto desky lze objednat například u české firmy Printed, kde cena za jeden kus je 36,7 Kč včetně nepáživé masky a provrtání při odběru 5000 kusů. [20]

Odhadovaná produktivita pracovníka jsou dvě osazené DPS za hodinu, tudíž veškeré osazování zvládnou dva pracovníci a třetí pracovník obstarává příjem součástek, začišťování vytištěných krabiček, kompletování dokončených výrobků a veškerou administrativní práci. Tito pracovníci budou ohodnoceni hodinovou mzdou 200 Kč před zdaněním, po započítání odvodů zaměstnavatelem ve výši 34 % z hrubé hodinové mzdy tvoří mzdové náklady na jednoho zaměstnance 268 Kč.

K činnosti firmy je nutné pořídit dvě pájecí stanice (např. Solomon SR-976) za 2 tis. Kč. K tisknutí 3D krabiček je zvolena Gembird 3D tiskárna Flashforge Dreamer s cenou 20 tis. Kč, která má dostatečně velkou pracovní plochu a rychlost k tisku potřebného množství krabiček. K 3D tiskárně je připojen kancelářský počítač, na kterém se ovládá tiskárna a jsou na něm prováděny veškeré administrativní práce. Cena tohoto počítače je 12 tis. Kč. Tato zařízení nelze považovat za dlouhodobý hmotný majetek, jelikož jejich vstupní cena je nižší než 40 tis. Kč. Proto bude do nákladů zahrnuta jejich nákupní cena. Odhadovaná hmotnost jedné krabičky je 40 g, tedy pro výrobu 5000 kusů je potřeba 20 kg tiskové struny PLA s celkovou cenou 6 tis. Kč. Dále je potřeba 5 kg bezolovnaté pájky a 1,5 l kalafunového tavidla s celkovou cenou 12 tis. Kč.

Dodavatel energie je ČEZ Prodej, a.s. s distribuční sazbou pro podnikatele C01d, produkt je Elektřina na 1 rok a nainstalovaný jistič je 3 x 25 A. Tato distribuční sazba má vysoké variabilní náklady 6570 Kč/MWh, ale nejnižší fixní náklady 1830 Kč/rok a je nejvhodnější pro firmy s malým odběrem elektrické energie. Ceny jsou uvedeny včetně DPH. Roční spotřeba elektrické energie vychází z příkonů použitých zařízení (3D tiskárna 300 W, pájecí stanice dohromady 100 W a kancelářský počítač 250 W) a doby využití zařízení, která je při výrobě 4 kusů za hodinu a požadovaném množství 5000 kusů 1250 hodin. Odtud je roční spotřeba elektrické energie 812,5 kWh. Roční variabilní náklady činí 5340 Kč a fixní 1830 Kč, celkové náklady na spotřebovanou elektrickou energii činí 7170 Kč.

Poslední uvažovaný náklad tvoří položka Ostatní, která se skládá ze všech drobných nákladů jako jsou roušky pro pájení, náhradní hlavice a houby pro pájecí stanice, pracovní obleky či náhradní elektronické součástky v případě zničení. Tyto náklady jsou odhadnuty na 10 tis. Kč ročně.

Následující tabulka Tab. 4.3 obsahuje veškeré přímé jednicové náklady spojené s výrobou

regulovatelného zdroje napětí do automobilu při sériové výrobě s nízkou automatizací.

Tab. 4.3: Celkové náklady při sériové výrobě s nízkou automatizací

	Náklady
DPS	36,7 Kč
Součástky	188,4 Kč
Zařízení	6,8 Kč
Spotřební materiál	3,6 Kč
Mzdové náklady	201,0 Kč
Elektrická energie	1,4 Kč
Ostatní	2,0 Kč
<b>Celkem</b>	<b>439,9 Kč</b>

### 4.3 Sériová výroba s vysokou automatizací

Pro sériovou výrobu s vysokou automatizací je charakteristická výroba velkého množství kusů, v tomto případě je to roční výroba 100 000 kusů, a firma je plátcem DPH jako v předchozím případě. Rozdíl proti předchozí variantě je ten, že tato firma dováží pouze elektronické součástky, jinak veškerou výrobu zajišťují zaměstnanci. Použité výrobní stroje jsou převzaty od firmy MSV elektronika, ale jednotlivé ceny jsou pouze orientační, jelikož se jedná o interní informace, které nebyly poskytnuty. V následující Tab. 4.4 jsou vypsány potřebné průmyslové stroje spolu s jejich odhadovanou cenou a spotřebou elektrické energie.

Tab. 4.4: Ceny potřebných strojů a jejich příkony

	Cena	Příkon (kW)
<b>Výroba DPS</b>		
Vrtací/frézovací zařízení	20 000 €	4,0
Drážkovací zařízení	8 000 €	3,0
Galvanická linka	22 000 €	18,0
Fotoplotr	12 000 €	0,5
Leptací a vyvolávací linka	25 000 €	20,0
Halovací zařízení	15 000 €	16,0
<b>Osazování DPS</b>		
Automatický skladovací systém	10 000 €	0,5
DPS Loader	7 000 €	1,0
Dispenzor pájecí pasty	10 000 €	1,5
Osazovací automat	30 000 €	4,0
Kancelářské počítače	3 000 €	1,5
3D tiskárny	10 000 €	3,0
<b>Celkem</b>	<b>172 000 €</b>	<b>73,0</b>

Odpisy vyjadřují opotřebením dlouhodobého hmotného majetku a promítají se do nákladů. Majetek bude odepisován lineárně po dobu jeho životnosti, která se odhaduje na 8 let.

Roční odpisy dlouhodobého majetku jsou 21 500 €, což odpovídá 552 tis. Kč, přepočteno průměrným kurzem za první čtvrtletí roku 2019 25,68 Kč za 1 €<sup>2)</sup>. [21]

Velké množství z uvedených strojů potřebuje ke správné funkci doplňovat spotřební materiál např. pájecí pasty do dispenzeru, tiskové struny do 3D tiskáren, leptací roztok do leptací linky, pokovovací lázeň do galvanické linky, apod. Vzhledem k množství výrobků jsou náklady na spotřební materiál odhadnuty na 800 tis. Kč.

Dodavatel energie je ČEZ Prodej, a.s. s distribuční sazbou pro podnikatele C03d, produkt je Elektřina na dobu neurčitou a nainstalovaný jistič je 3 x 160 A. Jistič musí být dimenzován na vysokou hodnotu především kvůli velkému příkonu galvanické, leptací a vyvolávací linky. Tato distribuční sazba má proti C01d vysoké fixní náklady 217 tis. Kč/rok, ale má nízké variabilní náklady za spotřebovanou elektrickou energii 3660 Kč/MWh. Ceny jsou uvedeny včetně DPH. Roční spotřeba elektrické energie vychází z příkonů použitých strojů a dvousměnného pracovního režimu s pracovní dobou 6 hodin, čemuž odpovídá 2880 hodin za rok. Odtud je vypočtena roční spotřeba elektrické energie 210 MWh. Roční variabilní náklady za spotřebovanou elektrickou energii činí 769 tis. Kč, připočtením fixních nákladů jsou celkové náklady na elektrickou energii 986 tis. Kč.

Zaměstnanců je celkem sedmáct vč. účetní a dvou technických pracovníků. Na každou směnu připadá sedm zaměstnanců a jeden technický pracovník. Účetní pracuje pouze v jednosměnném pracovním režimu. Zaměstnanci vč. účetní jsou ohodnoceni superhrubou hodinovou mzdou 268 Kč, techničtí pracovníci pak superhrubou hodinovou mzdou 335 Kč. Celkové mzdové náklady činí 6,75 mil. Kč.

Lze očekávat další spojené náklady ve formě servisu strojů, přepravních vozíků, oblečení pro zaměstnance, vadných výrobků, aj. Tyto náklady jsou odhadnuty na 200 tis. Kč za rok a jsou uvedeny v Tab. 4.5 jako Ostatní.

Tab. 4.5: Celkové přímé jednicové náklady při sériové výrobě s vysokou automatizací

	Náklady
Součástky	166,1 Kč
Odpisy	5,5 Kč
Spotřební materiál	8,0 Kč
Mzdové náklady	67,5 Kč
Elektrická energie	9,9 Kč
Ostatní	2,0 Kč
<b>Celkem</b>	<b>259,9 Kč</b>

<sup>2)</sup>kurz je brán od 1. 1. 2019 do 29. 3. 2019

#### 4.4 Zhodnocení nákladových kalkulací

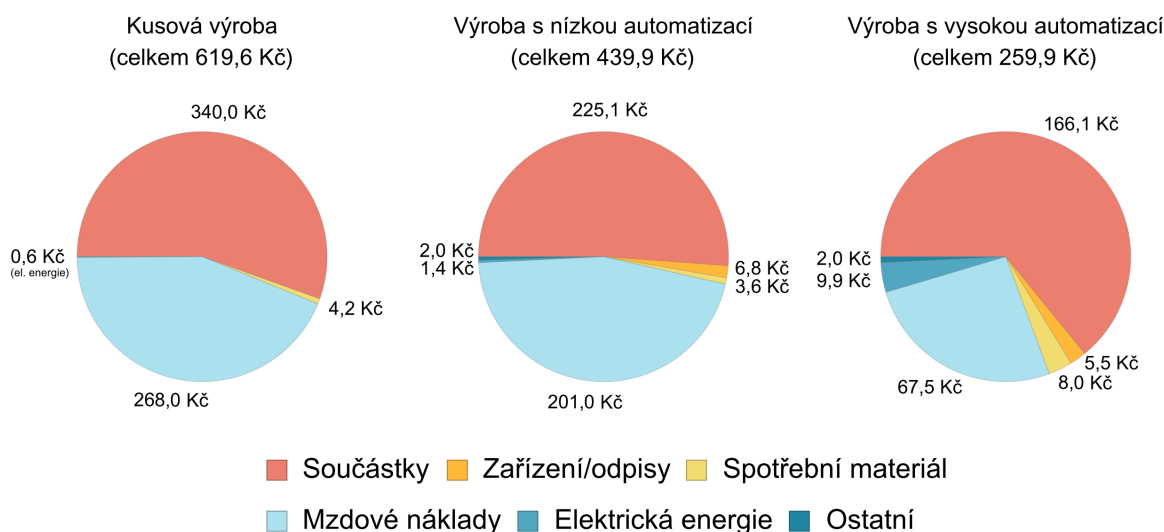
Všechny nákladové kalkulace jsou přímé, tudíž nejsou zahrnuty žádné další režie (skladování, pronájem, vytápění, čisticí prostředky, osvětlení, aj.).

Celkové přímé jednicové náklady pro kusovou výrobu činí 619,6 Kč, avšak prodejní cena je odhadnuta na 605 Kč. Největší část z těchto nákladů tvoří náklady na elektronické součástky a mzdové náklady. První zmíněné nelze snížit, lze zmenšit pouze mzdové náklady.

U této firmy se očekává jediný pracovník, který bude zároveň majitel, a tak o své odměně rozhoduje právě formou mzdy. Kdyby snížil své nároky na odměnu na 189 Kč před zdaněním, byly by náklady právě rovny prodejní ceně. Při průměrné výrobě 0,8 kusu výrobku za hodinu je odpovídající odměna 151,2 Kč před zdaněním na hodinu. Takovýto způsob výroby se jeví jako neperspektivní právě z důvodu nízké finanční odměny.

Pro variantu sériové výroby s nízkou automatizací jsou celkové přímé jednicové náklady 439,9 Kč a platí pro ni odhadovaná prodejní cena 500 Kč, a tudíž za předpokladu nízkých nepřímých nákladů může firma generovat zisk. Struktura nákladů je podobná struktuře kusové výroby, kdy největší část rovněž tvoří náklady na elektronické součástky a druhou největší část činí mzdové náklady. Rovněž přibyly další náklady v podobě potřebného zařízení a ostatní, které zahrnují nutnost dokoupení náhradních součástí zařízení či roušky k zabránění vdechování výparů, které vznikají při pájení.

U poslední varianty sériové výroby s vysokou automatizací je struktura nákladů odlišná, jelikož náklady na elektronické součástky tvoří značnou část celkových přímých jednicových nákladů a mzdové náklady, ačkoliv pořád druhé nejdůležitější, tvoří pouze čtvrtinový podíl proti téměř polovičnímu u předchozích variant. Zároveň výrazně roste spotřeba elektrické energie na provoz všech zařízení. I pro tuto variantu platí prodejní cena 500 Kč a celkové přímé jednicové náklady činí 259,9 Kč, tedy lze považovat firmu za perspektivní a bude generovat zisk. Avšak lze očekávat vysoké režijní náklady zejména za pronájem a vytápění výrobních hal, logistiku a skladování.



Obr. 4.1: Porovnání celkových přímých jednicových nákladů pro jednotlivé typy výroby

Obr. 4.1 graficky porovnává náklady pro jednotlivé typy výroby. Je patrné, že s rostoucí výrobní kapacitou se mění struktura nákladů. Srovnáním struktur nákladů výroby 5000 kusů a 100 000 kusů je zřejmé, že při manuálním osazování firma vydá daleko větší část celkových jednicových nákladů na mzdách, jelikož množství zaměstnanců odpovídá přímou úměrou množství vyrobených kusů, ale náklady na elektrickou energii jsou zanedbatelné. Automatizováním všech technologických procesů již počet vyrobených kusů nezávisí přímo na počtu zaměstnanců, ale na kapacitách strojů, a proto jsou jednicové mzdové náklady podstatně nižší. Spolu s větším využitím strojů rostou i jednicové náklady na elektrickou energii, které již nejsou zanedbatelné jako v předchozí variantě.

U varianty s nízkou automatizací je předpokládána výměna zařízení každý rok, tato skutečnost a také řádově nižší množství výrobků zapříčinily, že jednicové náklady na zařízení (resp. odpisy) jsou u této varianty 6,8 Kč a jsou vyšší, než jsou u varianty s vysokou automatizací, které činí pouze 5,5 Kč. Z důvodu malého vlivu odpisů na celkové jednicové náklady není u varianty vysoké automatizace prováděna citlivostní analýza na životnost použitého zařízení a životnost je zvolena jako 8 let. Kdyby se při výpočtech předpokládala například poloviční životnost, tudíž pouze 4 roky, vzrostly by odpisy na hodnotu 11,0 Kč a byly by celkové přímé jednicové náklady 265,4 Kč proti stávajícím 259,9 Kč, což činí nárůst o 2,1 %.

Jelikož se počítá pouze s orientační pořizovací cenou zařízení a příkonem, je vhodné sledovat změnu celkových nákladů při nárůstu i poklesu orientačních hodnot o 50 %. V případě nárůstu příkonu o 50 % dojde ke zvýšení variabilních nákladů za elektrickou energii na 1,15 mil. Kč, celkově i s fixními náklady je tato částka 1,37 mil. Kč a jednicové náklady na elektrickou energii by činily 13,7 Kč. Změna v odpisech se získá vynásobením stávajících odpisů, tedy 8,3 Kč. Za předpokladu snížené životnosti zařízení na 4 roky by jednicové odpisy vzrostly na 16,6 Kč. Celkové přímé jednicové náklady by se tak v nejméně příznivé variantě změnily na 274,8 Kč proti stávajícím 259,9 Kč, což činí nárůst o 5,7 %. V opačném případě, kdy se sníží orientační hodnoty o 50 %, by klesly náklady na elektrickou energii na 602 tis. Kč (385 tis. Kč tvoří variabilní náklady a 217 tis. Kč tvoří fixní náklady) a jednicové odpisy by klesly na 2,8 Kč. Nejpříznivější varianta by měla celkové přímé jednicové náklady 253,3 Kč, což činí pokles o 2,5 %. Jedná se o velmi malé změny, jelikož dominantní položku nákladů tvoří elektronické součástky, a další sledování změn jednicových nákladů se z tohoto důvodu neprovádí.

# Závěr

V této práci byly shrnuty základní informace o jednotlivých typech zdrojů napětí, které by bylo možné využít k návrhu a realizaci regulovatelného zdroje napětí do automobilu.

Postupně byly v teoretické části popsány lineární zdroje a jednotlivé typy spínaných zdrojů z hlediska principu jejich činnosti spolu s odvozením převodního poměru jednotlivých typů a rovněž s odvozením míry zvlnění výstupního napětí. Na základě porovnání vlastností lineárních a spínaných zdrojů byly vyřazeny první zmiňované kvůli nekompaktním rozměrům a vysokému zahřívání. Pro typy spínaných zdrojů buck a boost byla odvozena schopnost vstupní napětí pouze snižovat, resp. zvyšovat, a byly vyhodnoceny jako nevhodné k realizaci regulovatelného zdroje v rozmezí 5 V až 20 V. Za pomoci typů buck-boost a Čuk bylo již možné vstupní napětí snižovat i zvyšovat dle nutnosti, ale tyto typy dodávaly napětí opačné polarity, a proto byly rovněž vyhodnoceny jako nevhodné. Poslední dva zkoumané typy spínaných zdrojů SEPIC a ZETA byly schopny zvýšit i snížit vstupní napětí a výstupní napětí mělo v tomto případě stejnou polaritu. Při výběru mezi těmito typy byl zvolen typ ZETA, jelikož při požadovaných parametrech měl nižší zvlnění výstupního napětí.

Na zvolený typ zapojení ZETA bylo navázáno návrhem spínaného zdroje, který transformuje vstupní napětí automobilové zásuvky, které je 12 V, na požadované výstupní napětí. Jako nejvhodnější typ řídicího obvodu byl zvolen obvod LT8711 s frekvencí spínání 400 kHz, který umožňuje synchronní zapojení dvou externích spínacích prvků. Zdroj byl navržen tak, aby byl schopen dodávat 5 A při napětí 5 V a 3,5 A při napětí 20 V. Dle tohoto návrhu byl spínaný zdroj zkonstruován a byly na něm změřeny zatěžovací charakteristiky, ze kterých vyplynulo, že výstupní napětí  $U_{OUT}$  nepřekračuje dovolenou toleranci napětí při dodržení doporučené hodnoty odebíraného proudu  $I_{OUT}$ . Během tohoto měření bylo překročeno maximální dovolené oteplení polovodičových součástek a došlo k poškození zařízení. Z tohoto důvodu byly převodní charakteristiky naměřeny pouze pomocí simulace a bylo zjištěno, že zařízení je schopné transformovat napětí v celém rozmezí  $U_{IN}$  od 8 V do 16 V, které se může v krajních případech v automobilové zásuvce objevit.

Dále byl realizovaný výrobek vyhodnocen z hlediska jeho nákladové kalkulace pro kusovou a sériovou výrobu s nízkou a vysokou mírou automatizace výrobního procesu. Došlo se k závěru, že kusová výroba by byla neperspektivní zejména kvůli vysoké ceně součástek, ale sériová výroba v obou variantách měla dostatečně nízké náklady a byla by schopna generovat zisk. Pro všechny způsoby výroby byly dále porovnány struktury jejich nákladů a bylo zjištěno, že s vyšší automatizací klesá podíl jednicových mzdových nákladů na celkových jednicových nákladech a výrazně roste podíl nákladů na součástky.



# Literatura

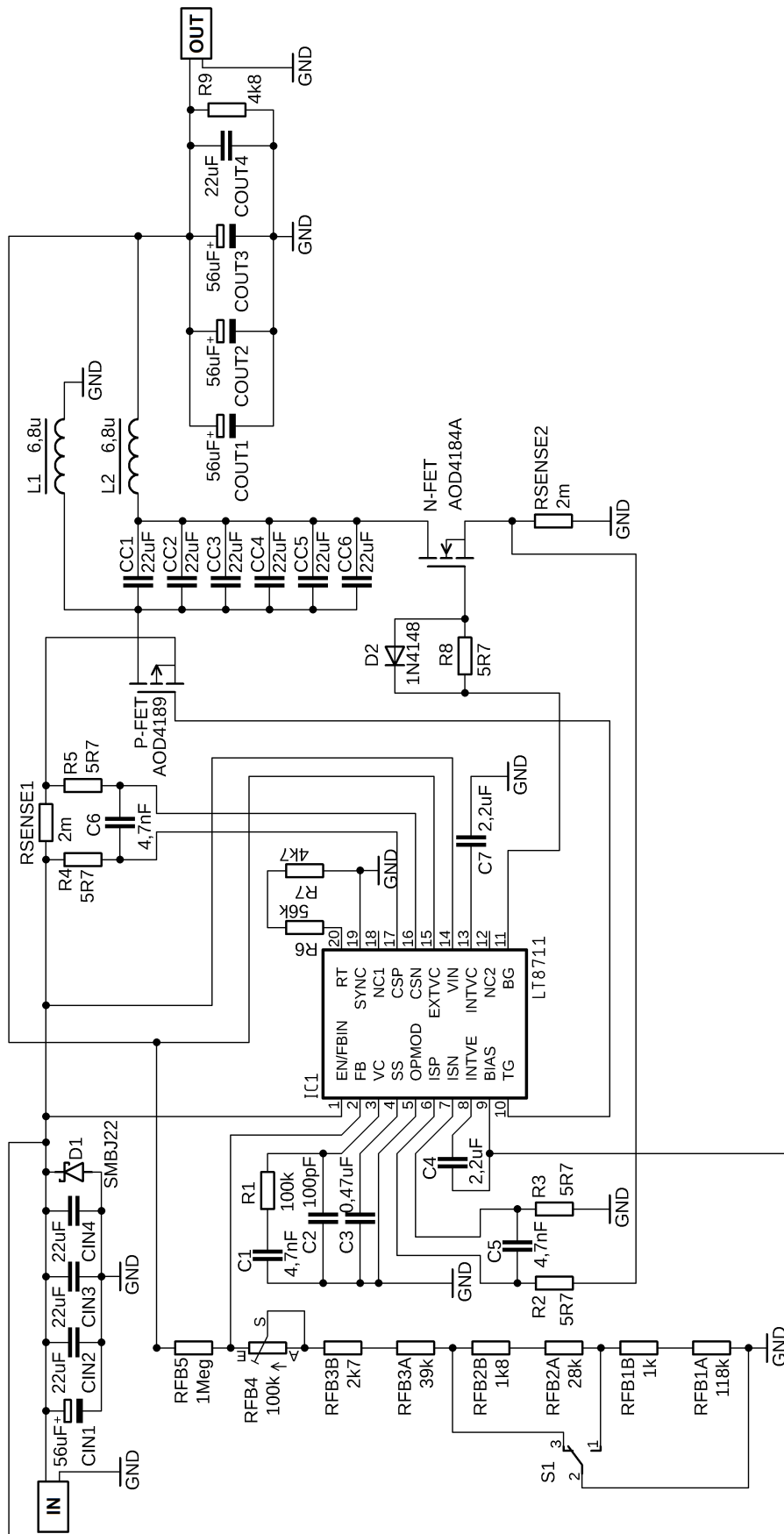
- [1] KREJČIŘÍK, Alexandr. *DC/DC měniče*. Praha: BEN - technická literatura, 2001. ISBN 80-7300-045-8.
- [2] ROBERTS, Steve. *DC/DC Book of Knowledge, 3rd ed.* RECOM, 2016. EAN 2050003850780.
- [3] KREJČIŘÍK, Alexandr. *Napájecí zdroje I. 2. vyd.* Praha: BEN - technická literatura, 1997. ISBN 80-86056-02-3.
- [4] RASHID, Muhammad H. *Power Electronics: Circuits, Devices and Applications, 3rd ed.* Oxford: Elsevier, 2011. ISBN 978-0-12-382036-5.
- [5] HAMMERBAUER, Jiří. *Elektronické napájecí zdroje a akumulátory*. Plzeň: Západočeská univerzita, 1997. ISBN 80-86056-03-1.
- [6] LUO, Fang Lin, HONG, Ye. *Renewable Energy Systems: Advanced Conversion Technologies and Applications*. CRC Press, 2017. ISBN 978-1138077584.
- [7] MOHAN, Ned, UNDELAND, Tore M., ROBBINS, William P. *Power Electronics: Converters, Applications, and Design, 2nd ed.* New York: Wiley, 1995. ISBN 978-0471584087.
- [8] Texas Instruments [online katalogový list]. *Understanding Buck-Boost Power Stages in Switch Mode Power Supplies. SLVA059A*. 2002. [cit. 20.11.2018].  
Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/slva059a/slva059a.pdf>
- [9] Texas Instruments [online katalogový list]. *Designing DC/DC converters based on SEPIC topology. SLYT309*. 2008. [cit. 28.11.2018].  
Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/slyt309/slyt309.pdf>
- [10] Maxim Integrated [online katalogový list]. *SEPIC Equations and Component Ratings*. 2002. [cit. 03.12.2018].  
Dostupné z: <https://pdfserv.maximintegrated.com/en/an/AN1051.pdf>
- [11] Microchip Technology Inc. [online katalogový list]. *High-Power CC/CV Battery Charger Using an Inverse SEPIC (Zeta) Topology. AN1467*. 2012. [cit. 09.12.2018].  
Dostupné z: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/01467A.pdf>
- [12] Texas Instruments [online katalogový list]. *Designing DC/DC converters based on ZETA topology. SLYT372*. 2010. [cit. 16.12.2018].  
Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/slyt372/slyt372.pdf>
- [13] Advance Auto Parts [online]. *Car battery voltage range*. 2018. [cit. 13.01.2019].  
Dostupné z: <https://shop.advanceautoparts.com/r/advice/car-maintenance/car-battery-voltage-range>
- [14] Lifewire [online]. *From car cigarette lighter to 12V accessory socket*. 2018. [cit. 13.01.2019].  
Dostupné z: <https://www.lifewire.com/car-cigarette-lighter-12v-socket-534754>

- [15] Analog Devices [online katalogový list]. *Micropower Synchronous Multitopology Controller with 42V Input Capability. LT8711*. 2017. [cit. 16.01.2019].  
Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/lt8711.pdf>
- [16] Samsung Electro-Mechanics [online katalogový list]. *Samsung Electro-Mechanics Component Library* 2019. [cit. 20.01.2019].  
Dostupné z: <http://weplib.samsungsem.com/mlcc/mlcc-ec.do>
- [17] Intel Corporation. [online]. *Desktop platform form factors power supply*. 2018. [cit. 09.02.2019].  
Dostupné z: <https://www.intel.com/content/dam/www/public/us/en/documents/guides/power-supply-design-guide-june.pdf>
- [18] Kurzy.cz [online]. *USD americký dolar, historie kurzů měn*. 2019. [cit. 16.02.2019].  
Dostupné z: <https://www.kurzy.cz/kurzy-men/historie/USD-americky-dolar/>
- [19] TME Czech Republic [online]. *Distributor elektronických dílů*. [cit. 02.03.2019].  
Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/>
- [20] PRINTED [online]. *Plošné spoje*. [cit. 09.03.2019].  
Dostupné z: <http://www.printed.cz/shop/set-full-mode>
- [21] Kurzy.cz [online]. *EUR euro, historie kurzů měn*. 2019. [cit. 22.03.2019].  
Dostupné z: <https://www.kurzy.cz/kurzy-men/historie/EUR-euro/>
- [22] Energetický regulační úřad [online]. *Srovnání nabídek elektřiny*. 2019. [cit. 24.03.2019].  
Dostupné z: <http://www.eru.cz/cs/srovnani-nabidek-elektriny>

# Seznam příloh

Příloha A - Kompletní schéma zapojení spínaného zdroje typu ZETA . . . . .	x
Příloha B - Seznam součástek . . . . .	xi
Příloha C - DPS horní strana . . . . .	xii
Příloha D - DPS dolní strana . . . . .	xiii
Příloha E - Konstrukční krabička . . . . .	xiv
Příloha F - Naměřené hodnoty . . . . .	xv
Příloha G - Hodnoty zvlnění k porovnání topologie ZETA a SEPIC . . . . .	xvi
Příloha H - Kód v programu Mathematica pro graf v podkapitole 1.3 . . . . .	xvii
Příloha I - Kód v programu Mathematica pro grafy v podkapitolách 3.1 a 3.2 . . . . .	xviii
Příloha J - Kód v programu Mathematica pro graf v podkapitole 4.4 . . . . .	xix
Příloha K - Struktura přiloženého CD . . . . .	xx

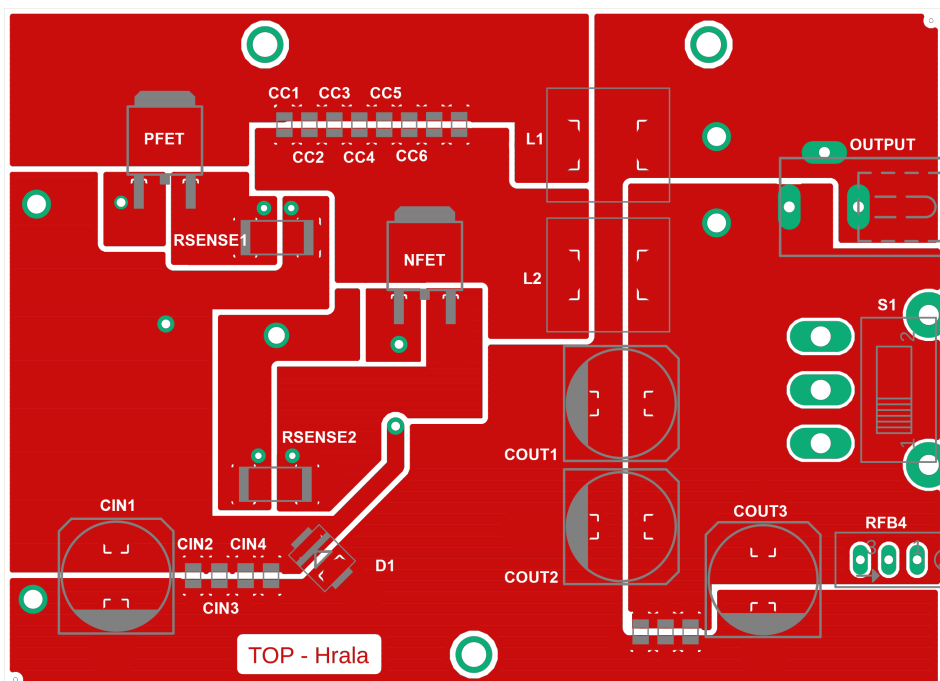
# Příloha A - Kompletní schéma zapojení spínaného zdroje typu ZETA



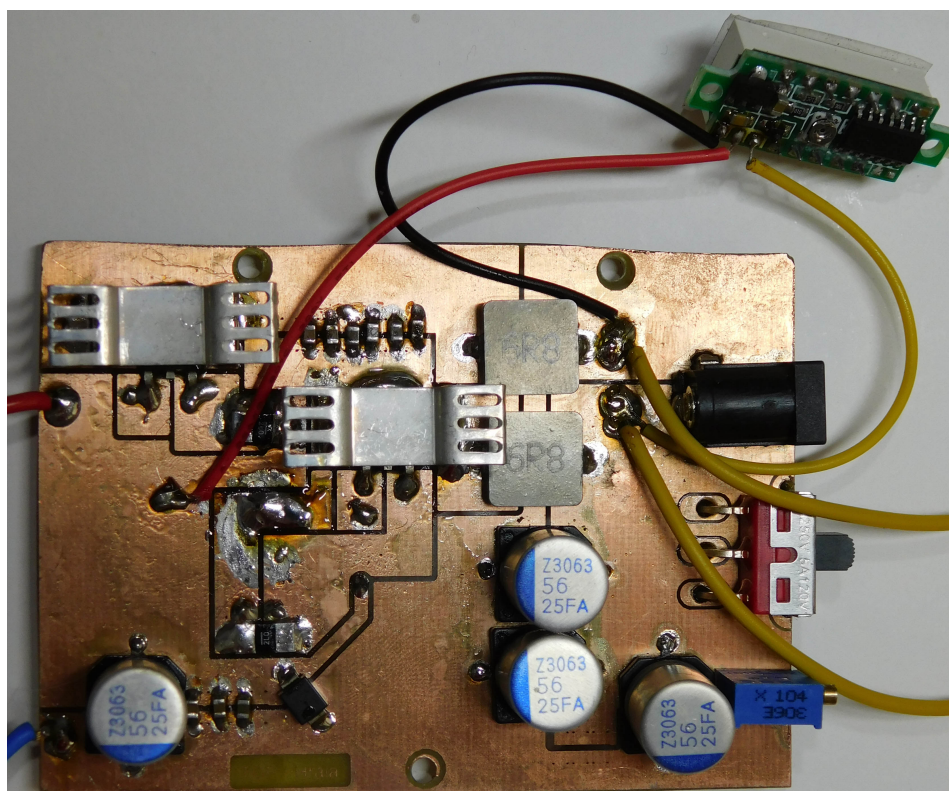
## Příloha B - Seznam součástek

Označení	Součástka	Popis
R1	R0805 100k	5 %, 0,125 W
R2, R3, R4, R5, R8	R0805 5R6	5 %, 0,125 W
R6	R0805 56k	1 %, 0,125 W
R7, R9	R0805 4k7	5 %, 0,125 W
RFB1A	R0805 118k	1 %, 0,125 W
RFB1B	R0805 1k0	1 %, 0,125 W
RFB2A	R0805 28k	1 %, 0,125 W
RFB2B	R0805 1k8	1 %, 0,125 W
RFB3A	R0805 39k	1 %, 0,125 W
RFB3B	R0805 2k7	1 %, 0,125 W
RFB4	T910X-100K	potenciometr, 22 otáček
RFB5	R0805 1M0	1 %, 0,125 W
RSENSE1, RSENSE2	R2512 2m0	1 %, 1 W
C1, C5, C6	CKS0805 4,7n/50V	10 %, keramický X7R
C2	CKS0805 100p/50V	5 %, keramický NPO
C3	CKS0805 470n/16V	20 %, keramický X7R
C4, C7	CKS0805 2,2u/16V	10 %, keramický X7R
CIN1, COUT1, COUT2, COUT3	CK 10x12,6mm 56u/25V	20 %, polymerový, 45 mΩ
CIN2, CIN3, CIN4, COUT4, CC1, CC2, CC3, CC4, CC5, CC6	CKS0805 22u/25V	20 %, keramický X5R
L1, L2	HPI1040-6R8	20 %, tlumivka, 20,7 mΩ
D1	SMBJ22	transil
D2	1N4148W	dioda
S1	SL19-123	přepínač
IC1	LT8711	integrováný obvod
PFET	AOD4189	výkonový P-MOSFET
NFET	AOD4184A	výkonový N-MOSFET

## Příloha C - DPS horní strana

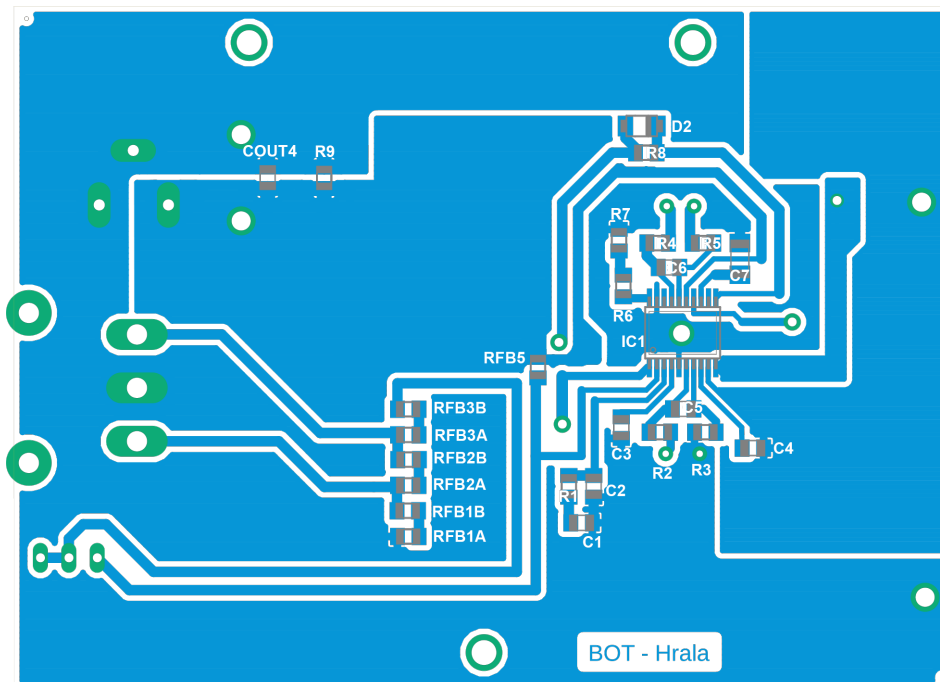


Návrh DPS (měřítko 3:2)

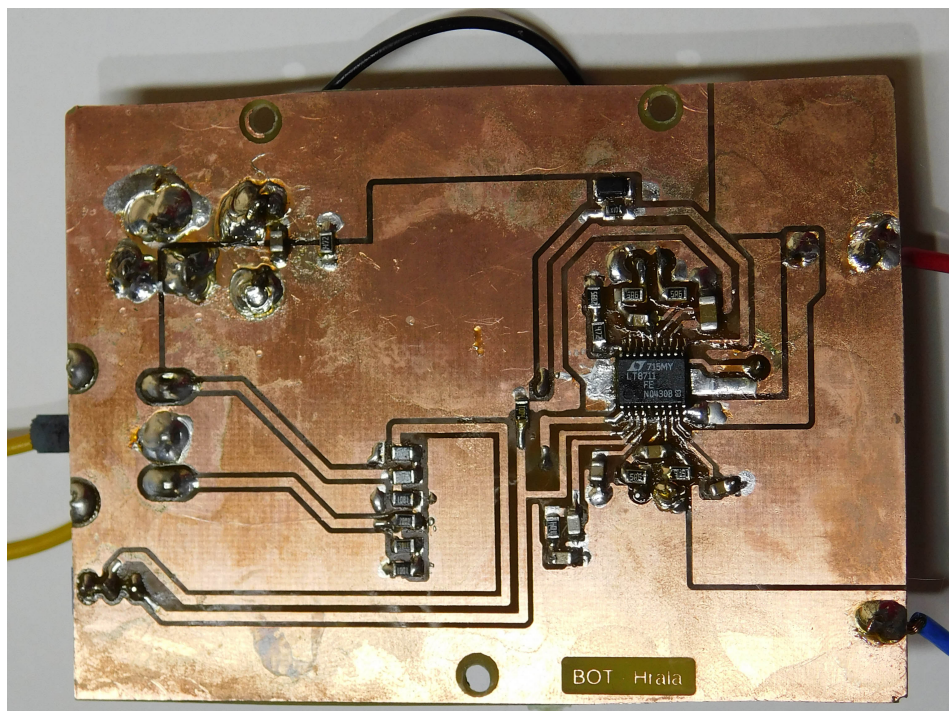


Osazení DPS

Příloha D - DPS dolní strana

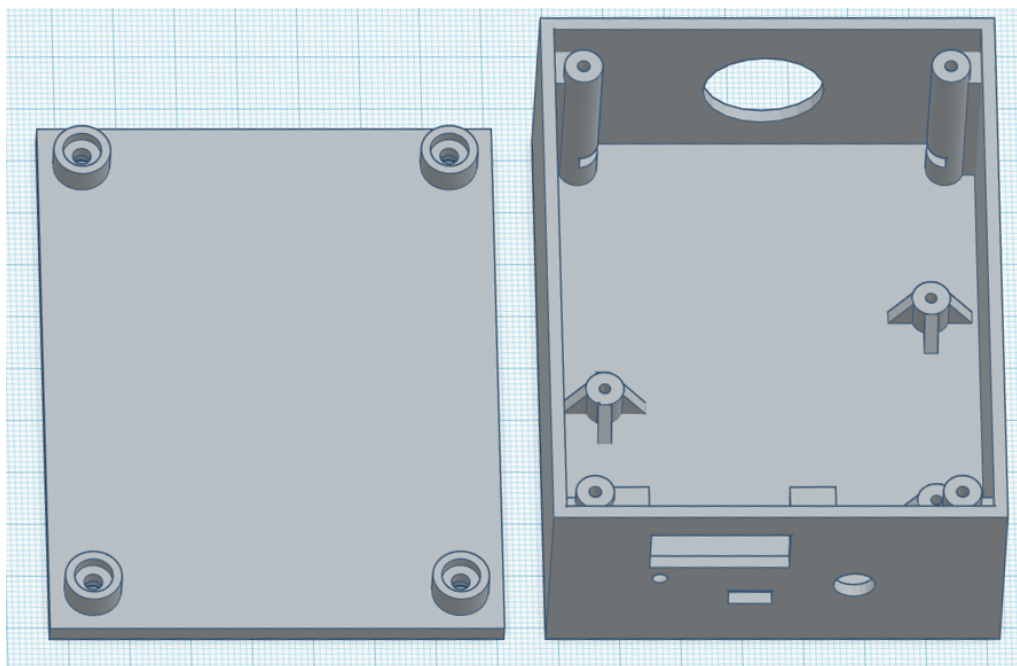


Návrh DPS (měřítko 3:2)

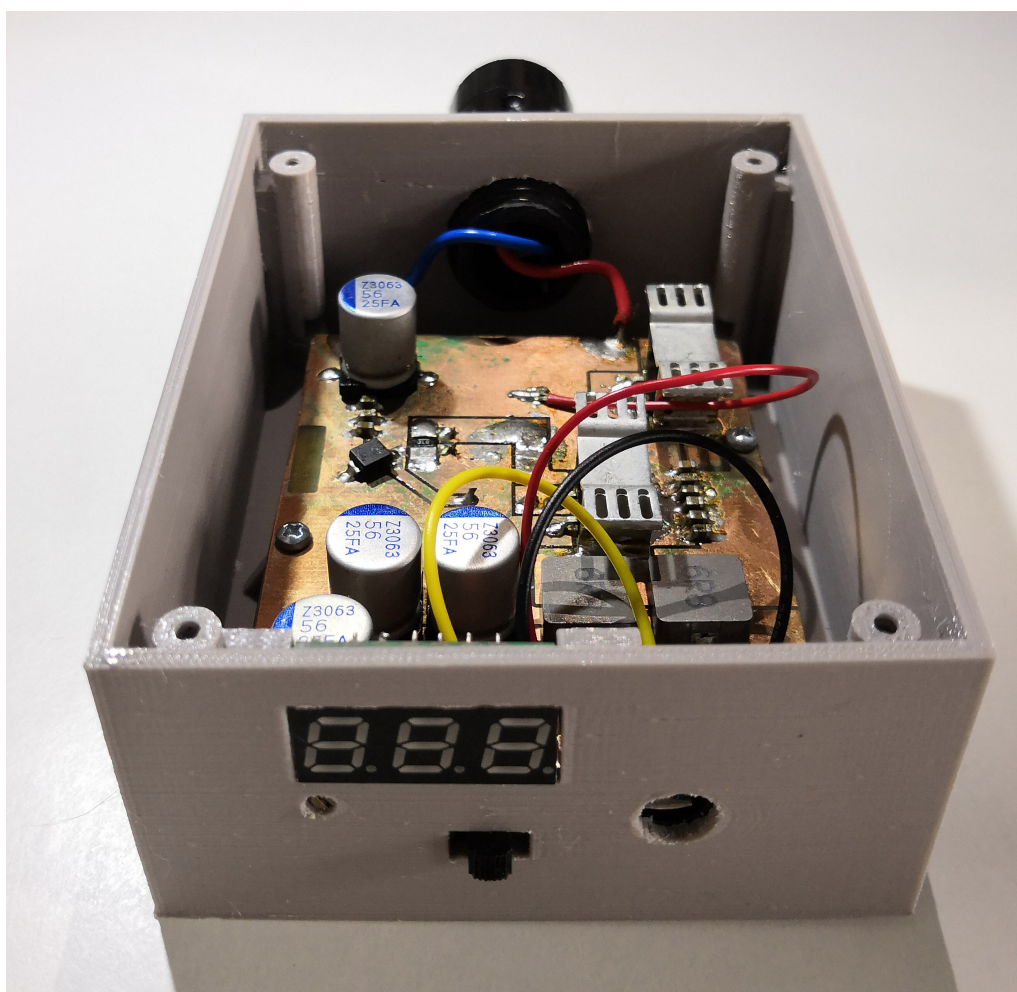


Osazení DPS

## Příloha E - Konstrukční krabička



Návrh krabičky



Osazení krabičky



## Příloha F - Naměřené hodnoty

Zatěžovací charakteristiky			
$U_{OUT} = 5 \text{ V}$			
$U_{OUT}(\text{V})$	$I_{OUT}(\text{A})$	$I_{IN}(\text{A})$	$n(-)$
5,04	0,99	0,51	82 %
5,10	1,82	0,92	84 %
5,06	2,77	1,44	81 %
4,91	4,25	2,25	77 %
4,83	5,41	2,96	73 %
4,77	6,80	3,79	71 %
4,61	8,25	4,62	69 %
$U_{OUT} = 12 \text{ V}$			
$U_{OUT}(\text{V})$	$I_{OUT}(\text{A})$	$I_{IN}(\text{A})$	$n(-)$
12,13	1,01	1,15	88 %
12,28	1,81	2,17	85 %
12,13	2,79	3,37	84 %
11,98	3,77	4,66	81 %
11,87	4,86	6,15	78 %
$U_{OUT} = 20 \text{ V}$			
$U_{OUT}(\text{V})$	$I_{OUT}(\text{A})$	$I_{IN}(\text{A})$	$n(-)$
20,35	1,82	3,60	86 %
20,20	2,74	5,32	87 %
20,01	3,79	7,73	82 %

Převodní charakteristiky			
$U_{IN}(\text{V})$	$U_{OUT} = 5 \text{ V}$	$U_{OUT} = 12 \text{ V}$	$U_{OUT} = 20 \text{ V}$
8	5,11	12,22	20,52
9	5,10	12,24	20,53
10	5,10	12,24	20,55
11	5,11	12,22	20,54
12	5,10	12,25	20,55
13	5,11	12,24	20,56
14	5,10	12,24	20,55
15	5,09	12,24	20,53
16	5,09	12,22	20,56

## Příloha G - Hodnoty zvlnění k porovnání topologie ZETA a SEPIC

ZETA												SEPIC		
f(kHz)	50	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000			
L(μH)	relativní zvlnění													
1	30,00	15,00	7,50	5,00	3,75	3,00	2,50	2,14	1,88	1,67	1,50	5	1	
2	15,00	7,50	3,75	2,50	1,88	1,50	1,25	1,07	0,94	0,83	0,75	5	1	
3	10,00	5,00	2,50	1,67	1,25	1,00	0,83	0,71	0,63	0,56	0,50	5	1	
4	7,50	3,75	1,88	1,25	0,94	0,75	0,63	0,54	0,47	0,42	0,38	5	1	
5	6,00	3,00	1,50	1,00	0,75	0,60	0,50	0,43	0,38	0,33	0,30	5	1	
6	5,00	2,50	1,25	0,83	0,63	0,50	0,42	0,36	0,31	0,28	0,25	5	1	
7	4,29	2,14	1,07	0,71	0,54	0,43	0,36	0,31	0,27	0,24	0,21	5	1	
8	3,75	1,88	0,94	0,63	0,47	0,38	0,31	0,27	0,23	0,21	0,19	5	1	
9	3,33	1,67	0,83	0,56	0,42	0,33	0,28	0,24	0,21	0,19	0,17	5	1	
10	3,00	1,50	0,75	0,50	0,38	0,30	0,25	0,21	0,19	0,17	0,15	5	1	
11	2,73	1,36	0,68	0,45	0,34	0,27	0,23	0,19	0,17	0,15	0,14	5	1	
12	2,50	1,25	0,63	0,42	0,31	0,25	0,21	0,18	0,16	0,14	0,13	5	1	

## Příloha H - Kód v programu Mathematica pro graf v podkapitole 1.3

```
SetDirectory[NotebookDirectory[]];
data = Import["dat.txt", "Table"];
Lval = data[[All, 1]];
f50 = data[[All, 2]];
f100 = data[[All, 3]];
f200 = data[[All, 4]];
f300 = data[[All, 5]];
f400 = data[[All, 6]];
f500 = data[[All, 7]];
f600 = data[[All, 8]];
f700 = data[[All, 9]];
f800 = data[[All, 10]];
f900 = data[[All, 11]];
f1000 = data[[All, 12]];
IMAX = data[[All, 13]];
IMIN = data[[All, 14]];
Listik =
  ListPlot[{f50, f100, f200, f300, f400, f500, f600, f700, f800, f900, f1000}, PlotRange -> {{0, 12}, {0, 30}}];
a50 = Fit[f50, {1 / x}, x];
a100 = Fit[f100, {1 / x}, x];
a200 = Fit[f200, {1 / x}, x];
a300 = Fit[f300, {1 / x}, x];
a400 = Fit[f400, {1 / x}, x];
a500 = Fit[f500, {1 / x}, x];
a600 = Fit[f600, {1 / x}, x];
a700 = Fit[f700, {1 / x}, x];
a800 = Fit[f800, {1 / x}, x];
a900 = Fit[f900, {1 / x}, x];
a1000 = Fit[f1000, {1 / x}, x];

I5 = Fit[IMAX, {1}, x];
I1 = Fit[IMIN, {1}, x];

Proudy = Plot[{I5, I1}, {x, 0, 13}, PlotRange -> {{0, 13}, {0, 30}},
  PlotStyle -> {{Thick, Black, Dashed}, {Thick, Black, Dashed}}];

Plotik = Plot[{a50, a100, a200, a300, a400, a500, a600, a700, a800, a900, a1000}, {x, 0, 13},
  PlotLegends -> Placed[LineLegend[{"50 kHz", "100 kHz", "200 kHz", "300 kHz", "400 kHz", "500 kHz",
  "600 kHz", "700 kHz", "800 kHz", "900 kHz", "1 MHz"}, LegendLayout -> {"Row", 2}], Below],
  PlotRange -> {{0, 13}, {0, 30}}, PlotStyle -> Thickness[0,002]];

g = Show[Listik, Plotik, Proudy, AxesStyle -> Arrowheads[{{0,0, 0,04}], Ticks -> {Automatic, None},
  AxesLabel -> {Style["L ( $\mu$ H)", Black, FontSize -> 16], Style[" $\Delta U_{OUT}$  (mV)", Black, FontSize -> 16]},
  PlotRange -> {{0, 13}, {0, 10}}, ImageSize -> 600]

Export["Porovnani.png", g, ImageResolution -> 500];
```

## Příloha I - Kód v programu Mathematica pro grafy v podkapitolách 3.1 a 3.2

```
SetDirectory[NotebookDirectory[]];
cross = Graphics[{{Line[{{-1, 0}, {1, 0}}, Line[{{0, -1}, {0, 1}}]}}];

Z1205 = {{0,99, 5,04}, {1,82, 5,10}, {2,77, 5,06}, {4,25, 4,91}, {5,41, 4,83}, {6,8, 4,77}, {8,25, 4,61}};
Z1205n = {{0,99, 82}, {1,82, 84}, {2,77, 81}, {4,25, 77}, {5,41, 73}, {6,8, 71}, {8,25, 69}};

g = Plot[{{4,75, 5,25, 11,4, 12,6, 19, 21}, {x, 0, 9}}, PlotStyle -> {{Black, Dotted}}, PlotLegends -> Placed[
  LineLegend[{{Style[Row[{"Pásmo tolerance"}], FontSize -> 20}], LegendLayout -> {"Row", 1}], Below]];

line5 = Fit[Z1205, {1, x}, x];

l5 = ListPlot[{{Z1205}, PlotRange -> {{0, 9}, {4,50, 5,45}},
  PlotMarkers -> {cross, 0,05}, PlotStyle -> Red, PlotLegends ->
  Placed[LineLegend[{{Style[Row[{"Naměřené hodnoty"}], FontSize -> 20}], LegendLayout -> {"Row", 1}], Below],
  Epilog -> {Thickness[0,0045], Black, Dotted, Line@{{5, 4,54}, {5, 5,25}}},
  AxesStyle -> {{Black, Thickness[0,002]}, {Black, Thickness[0,002]}},
  AxesLabel -> {Style[Framed[Row[{"I", Subscript["", "OUT"], "(A)"}], FrameStyle -> None, FrameMargins -> 0],
  Black, FontFamily -> "Arial", FontSize -> 22],
  Style[Framed[Row[{"U", Subscript["", "OUT"], "(V)"}], FrameStyle -> None, FrameMargins -> 5], Black,
  FontFamily -> "Arial", FontSize -> 22]}, ImageSize -> 500, TicksStyle -> 20, GridLines -> Automatic];

n05 = ListPlot[{{Z1205n}, PlotRange -> {{0, 9}, {0, 100}},
  PlotMarkers -> {cross, 0,05}, PlotStyle -> Red, PlotLegends -> Placed[
  PointLegend[{{Style[Row[{"Naměřené hodnoty"}], FontSize -> 20}], LegendLayout -> {"Row", 1}], Below],
  AxesStyle -> {{Black, Thickness[0,002]}, {Black, Thickness[0,002]}},
  AxesLabel -> {Style[Framed[Row[{"I", Subscript["", "OUT"], "(A)"}], FrameStyle -> None, FrameMargins -> 0],
  Black, FontFamily -> "Arial", FontSize -> 22],
  Style[Framed["η(%)", FrameStyle -> None, FrameMargins -> 0], Black, FontFamily -> "Arial", FontSize -> 22]},
  ImageSize -> 500, TicksStyle -> 20, GridLines -> Automatic];

n05line = ListPlot[{{0,99, 82}, {1,82, 84}, {2,77, 81}, {4,25, 77}, {5,41, 73}, {6,8, 71}, {8,25, 69}},
  Joined -> True, PlotStyle -> Directive[Red, Thick]];

line = Plot[line5, {x, 1, 8,25}, PlotStyle -> Directive[Red, Thick]];

txt = Graphics[Text[Style[Row[{"U", Subscript["", "OUT"], "= 5,18 - 0,065", "I", Subscript["", "OUT"]}],
  Red, FontFamily -> "Arial", FontSize -> 15], {4,2, 5,35}, {0, 1}]];
out = Show[l5, g, line, txt]
outn = Show[n05, n05line]

Export["Z1205.pdf", out, ImageResolution -> 1600];
Export["Z1205n.pdf", outn, ImageResolution -> 1600];
```

## Příloha J - Kód v programu Mathematica pro graf v podkapitole 4.4

```
SetDirectory[NotebookDirectory[]];
SetOptions[$FrontEnd, PrintingStyleEnvironment -> "Printout"]
(*soucastky, zarizeni, spotrebni mat., mzdy, el.energie, ostatni*)
kusovka = {340, 0, 4,2, 268, 0,6, 0};
nizka = {225,1, 6,8, 3,6, 201, 1,4, 2};
vysoka = {166,1, 5,5, 8,01, 67,5, 9,9, 2,01};

g1 = PieChart[kusovka, ChartStyle -> "DarkRainbow",
  LabelingFunction -> (Placed[Row[{"#", " Kč"}], "RadialOutside"] &)];
g2 = PieChart[nizka, ChartStyle -> "DarkRainbow",
  ChartLabels -> Placed[{"a", "b", "c", "b", "c", "b"}, "RadialOutside"]];
g3 = PieChart[vysoka, ChartStyle -> "DarkRainbow",
  LabelingFunction -> (Placed[Row[{"#", " Kč"}], "RadialOutside"] &)];

out = Legended[Grid[{{PieChart[kusovka, ChartStyle -> {{EdgeForm[{Thin, Gray]}]}, 24],
  LabelingFunction -> (Placed[Row[{"#", " Kč"}], "RadialOutside"] &), PlotLabel -> "Kusová výroba",
  PlotTheme -> "Monochrome"}, {PieChart[nizka, ChartStyle -> {{EdgeForm[{Thin, Gray]}]}, 24],
  LabelingFunction -> (Placed[Row[{"#", " Kč"}], "RadialOutside"] &),
  PlotLabel -> "Výroba s nízkou automatizací", PlotTheme -> "Monochrome"}, {PieChart[vysoka, ChartStyle -> {{EdgeForm[{Thin, Gray]}]}, 24],
  LabelingFunction -> (Placed[Row[{"#", " Kč"}], "RadialOutside"] &),
  PlotLabel -> "Výroba s nízkou automatizací", PlotTheme -> "Monochrome"}], SpanFromLeft}],
  Placed[SwatchLegend[24, {"Součástky", "Zařízení/odpisy", "Spotřební materiál", "Mzdové náklady",
  "Elektrická energie", "Ostatní"}, LegendLayout -> {"Row", 2}], Below]]

Export["legenda.pdf", out, ImageResolution -> 1600];
```

## Příloha K - Struktura přiloženého CD

Obsah adresářové struktury je následující:

- navrh\_zdroje\_ZETA/
  - ZETA.sch - Schéma zapojení (doporučený program: Eagle).
  - ZETA.brd - Návrh desky plošného spoje (doporučený program: Eagle).
  - MyLibraryCoil.lbr - Knihovna použitých součástek do programu Eagle.
- konstrukci\_krabicka/
  - Box.stl - Soubor obsahující 3D návrh konstrukční krabičky.
- data/
  - Data.xlsx - Soubor s daty obsahující 4 listy (doporučený program: Microsoft Excel).