



Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektroniky a informačních technologií

# BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Spínané napájecí zdroje

Autor práce: Lukáš Chlad  
Vedoucí práce: Prof. Ing. Milan Štork, CSc.

Plzeň 2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2021/2022

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Lukáš CHLAD**  
Osobní číslo: **E19B0091P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**  
Téma práce: **Spínané napájecí zdroje**  
Zadávající katedra: **Katedra elektroniky a informačních technologií**

### Zásady pro vypracování

Navrhněte a realizujte spínané napájecí zdroje DC=DC typu: snižovací měnič, zvyšovací měnič a SEPIC. Realizované moduly budou sloužit pro výuku napájecích zdrojů. U zdrojů by měla být možnost elektronicky řídit hodnotu zátěže, případně dalších prvků, např. vyhlazovací kapacity.



Rozsah bakalářské práce: **30 – 40**  
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**  
Forma zpracování bakalářské práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

DC to DC Converters, <https://www.site.uottawa.ca/rhabash/ELG4139LNDCDC2012.pdf>  
Ing. Eva Havlátová, SPÍNANÝ ZDROJ, [https://kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/06\\_Elektrotechnika\\_17/15\\_IUT/038\\_Spinany-zdroj—Havlatova—P1.pdf](https://kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/06_Elektrotechnika_17/15_IUT/038_Spinany-zdroj—Havlatova—P1.pdf)  
Alexandr Krejčířík: *Spínané napájecí zdroje s obvody TOPSwitch, BEN* – technická literatura

Vedoucí bakalářské práce: **Prof. Ing. Milan Štork, CSc.**  
Katedra elektroniky a informačních technologií

Datum zadání bakalářské práce: **8. října 2021**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **26. května 2022**

  
**Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.**  
děkan

  
**Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.**  
vedoucí katedry

V Plzni dne 8. října 2021

# Abstrakt

Cílem bylo navrhnout spínané napájecí zdroje typu dc-dc pro výukové účely. Zdroje jsou realizovány s možností změny zátěže, kapacity, případně dalších parametrů. Pro řešení byly vybrány obvody, které jsou aktuálně dostupné, proto zde nebylo dbáno na úplnou aktuálnost obvodů. Pro měnič zvyšující a zvyšující invertující je použit obvod MC34063ap, jedná se o jednočipové řešení dc-dc měničů s menším výkonem. Pro snižující měnič je použit obvod LM lm2596t-adj/nopbc, který na rozdíl od MC34063ap je výkonový. Obvod je ve verzi adj., což umožňuje případnou změnu výstupního napětí. Měnič typu SEPIC je realizován moderním obvodem max16990, tento obvod představuje příklad měniče s externím tranzistorem. Změna kapacity je realizována pomocí jumperů, které připínají kondenzátory na zem, jejich kombinací je možné dosáhnout mnoho hodnot výstupní kapacity. Změna zátěže je realizována elektronicky na přípravku k tomu určeném, pro měření skokové změny zátěže je navrhnout přípravek, který připíná definovanou zátěž k zemi s možností změny testovací frekvence. Měření je zaměřeno na zjištění závislosti zvlnění výstupního napětí a odezvy na skokové připojení zátěže na kapacitě. Byly také proměřeny zatěžovací charakteristiky zdrojů pro různé zátěže a byla určena jejich účinnost. Výsledky měření ukázaly značné vlivy výstupní kapacity a vstupního napětí měničů na jejich parametrech.

## Klíčová slova

dc-dc měniče, napájecí zdroje, měnič zvyšující a snižující, step down, step up, step up inv, sepic, buck-boost

# Abstract

Chlad, Lukáš. *Switching power supplies [Spínané napájecí zdroje]*. Pilsen, 2022. Bachelor thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Electronics and Information Technologies. Supervisor: Milan Štork

---

The aim was to design dc-dc switching power supplies for educational purposes. The power supplies are implemented with the possibility of changing the load, capacity or other parameters. The circuits that are currently available were selected for the solution, therefore no attention was paid to the full actuality of the circuits. For the step up and step up-inverting inverter the MC34063ap circuit is used, it is a single-chip solution for dc-dc converters with lower power. For the step-down inverter, the LM lm2596t-adj/nopbc circuit is used, which unlike the MC34063ap is a power inverter. The circuit is in the adj. version, which allows possible change of the output voltage. The SEPIC type of dc-dc inverter is implemented with the modern max16990 circuit, this circuit is an example of an inverter with an external transistor. The change of capacitance is realized by jumpers that connect capacitors to the ground, by combining them it is possible to achieve many values of output capacitance. The load change is implemented electronically on a fixture designed for this purpose, to measure step load changes a fixture is designed that connects a defined load to the ground with the possibility of changing the test frequency. The measurements are aimed at determining the dependence of the output voltage ripple and the response to the step load connection on the capacitance. The load characteristics of the sources for different loads were also measured and their efficiency was determined. The measurement results showed significant effects of the output capacitance and input voltage of the converters on their parameters.

## Keywords

dc-dc converters, power supplies, boost and buck inverter, step down, step up, step up inv, sepic, buck-boost

## Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

Také prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 24. května 2022

Lukáš Chlad

.....

Podpis

# Obsah

Seznam obrázků	vii
Seznam tabulek	viii
Seznam symbolů a zkratek	ix
<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2 Teoretický úvod</b>	<b>2</b>
2.1 Základní rozdělení měničů	2
2.2 Měniče bez transformátoru	3
2.2.1 Zvyšující měnič STEP-UP (boost)	3
2.2.2 Zvyšující/snižující měnič invertující (buck-boost)	4
2.2.3 Snížující měnič STEP-DOWN (buck)	5
2.2.4 Měnič SEPIC (Single-ended primary-inductor converter)	5
2.3 Měniče s transformátorem	7
2.3.1 Jednočinný blokující měnič (flyback)	7
2.3.2 Jednočinný propustný měnič	8
2.3.3 Dvočinný měnič-polomůstek	9
2.3.4 Dvočinný měnič-můstkový	9
2.4 Shrnutí k měničům	10
2.5 Moderní obvody pro realizaci měničů	10
2.5.1 PWM kontrolér MAX16990	11
2.5.2 Obvody řady LYTSWitch-6	11
2.5.3 Integrovaný měnič XL6009	12
<b>3 Návrh zapojení jednotlivých typů měničů</b>	<b>13</b>
3.1 Návrh měničů s MC34063AP	13
3.1.1 Určení hodnot součástek pro zvyšující měnič s MC34063AP	14
3.1.2 Určení hodnot součástek pro zvyšující invertující měnič s MC34063AP	17
3.2 Návrh snížujícího měniče s LM2596T-ADJ/NOPB	18
3.2.1 Určení hodnot součástek pro snížující měnič s LM2596T-ADJ/NOPB	19
3.3 Návrh měniče SEPIC s MAX16990	21

3.3.1	Určení hodnot součástí pro SEPIC měnič s MAX16990 . . . . .	22
<b>4</b>	<b>Návrh přípravků pro měření</b>	<b>28</b>
4.1	Návrh přípravku pro dynamické a statické testování zdrojů . . . . .	28
4.2	Návrh přípravku pro dynamické testování zdroje záporného napětí . . . . .	29
4.3	Návrh přípravku pro měření zatěžovacích charakteristik . . . . .	29
<b>5</b>	<b>Návrhy desek plošných spojů</b>	<b>31</b>
<b>6</b>	<b>Měření na zdrojích</b>	<b>33</b>
6.1	Cíle měření . . . . .	33
6.2	Měření výstupních charakteristik zdrojů . . . . .	33
6.3	Měření reakce na skokovou změnu zátěže zdrojů . . . . .	34
6.4	Měření zvlnění výstupního napětí při změně kapacity . . . . .	35
6.5	Měření účinnosti měničů . . . . .	36
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>38</b>
	<b>Reference, použitá literatura</b>	<b>40</b>
	<b>Přílohy</b>	<b>42</b>
<b>A</b>	<b>Měření měničů</b>	<b>42</b>
A.1	Měření zatěžovacích charakteristik . . . . .	42
A.2	Měření zvlnění výstupního napětí na zvyšujícím měniči . . . . .	43
A.3	Měření reakce na skokovou změnu zátěže na zvyšujícím měniči . . . . .	45
A.4	Měření zvlnění výstupního napětí na zvyšujícím invertujícím měniči . . . . .	47
A.5	Měření reakce na skokovou změnu zátěže na zvyšujícím invertujícím měniči . . . . .	50
A.6	Měření zvlnění výstupního napětí na snižujícím měniči . . . . .	52
A.7	Měření reakce na skokovou změnu zátěže na snižujícím měniči . . . . .	54
A.8	Měření zvlnění výstupního napětí měniče SEPIC . . . . .	56
A.9	Měření reakce na skokovou změnu zátěže měniče SEPIC . . . . .	57
<b>B</b>	<b>Desky plošných spojů</b>	<b>59</b>



# Seznam obrázků

2.1	Zapojení zvyšujícího měniče  Převzato z [5]  . . . . .	3
2.2	Zapojení zvyšujícího měniče invertujícího  Převzato z [5]  . . . . .	4
2.3	Zapojení snižujícího měniče  Převzato z [5]  . . . . .	5
2.4	Zapojení SEPIC měniče  Převzato z [5]  . . . . .	6
2.5	Měnič ve stavu sepnutého spínače  Převzato z [4]  . . . . .	6
2.6	Měnič ve stavu rozepnutého spínače  Převzato z [4]  . . . . .	7
2.7	Základní zapojení flyback měniče  Převzato z [5]  . . . . .	7
2.8	Základní zapojení jednočinného měniče  Převzato z [5]  . . . . .	8
2.9	Základní zapojení dvojčinného měniče v polomůstku  Převzato z [5]  . . . . .	9
2.10	Základní zapojení dvojčinného měniče v můstku  Převzato z [5]  . . . . .	10
2.11	Zapojení měniče s LYTSWitch-6  Převzato z [11]  . . . . .	12
2.12	Zapojení měniče SEPIC se XL6009 . . . . .	12
3.1	Zapojení zvyšujícího měniče . . . . .	13
3.2	Zapojení zvyšujícího invertujícího měniče . . . . .	17
3.3	Zapojení snižujícího měniče . . . . .	19
3.4	Volba vhodné indukčnosti cívky vzhledem k maximálnímu výstupnímu proudu a konstanty $E \cdot T$  Převzato z [8]  . . . . .	20
3.5	Zapojení měniče typu SEPIC . . . . .	21
4.1	Zapojení přípravků pro testování zdrojů . . . . .	28
4.2	Zapojení přípravků pro testování zdroje se záporným napětím . . . . .	29
4.3	Zapojení elektronické zátěže . . . . .	29
5.1	Realizace DPS pro měnič SEPIC (bez rozlité mědi) . . . . .	31
5.2	Realizace DPS pro zvyšující měnič (bez rozlité mědi) . . . . .	32
6.1	Zatěžovací charakteristika pro zvyšující měnič . . . . .	34
6.2	Reakce na skokovou změnu zátěže u snižujícího měniče $\mu F$ . . . . .	35
6.3	Zvlnění výstupního napětí u zvyšujícího měniče s výstupní kapacitou 2440 $\mu F$ . . . . .	36
A.1	Zatěžovací charakteristiky měničů pro různá vstupní napětí . . . . .	42

A.2	Zvlnění výstupního napětí u zvyšujícího měniče s výstupní kapacitou 940 $\mu F$ . . . . .	43
A.3	Zvlnění výstupního napětí u zvyšujícího měniče s výstupní kapacitou 470 $\mu F$ . . . . .	44
A.4	Skoková změna zátěže u zvyšujícího měniče s výstupní kapacitou 2440 $\mu F$ . . . . .	45
A.5	Skoková změna zátěže u zvyšujícího měniče s výstupní kapacitou 940 $\mu F$ . . . . .	46
A.6	Skoková změna zátěže u zvyšujícího měniče s výstupní kapacitou 470 $\mu F$ . . . . .	46
A.7	Zvlnění výstupního napětí u zvyšujícího invertujícího měniče pro výstupní kapacitu 2440 $\mu F$ . . . . .	47
A.8	Zvlnění výstupního napětí u zvyšujícího invertujícího měniče pro výstupní kapacitu 940 $\mu F$ . . . . .	48
A.9	Zvlnění výstupního napětí u zvyšujícího invertujícího měniče pro výstupní kapacitu 470 $\mu F$ . . . . .	49
A.10	Skoková změna zátěže zvyšujícího invertujícího měniče zátěže s výstupní kapacitou 2440 $\mu F$ . . . . .	50
A.11	Skoková změna zátěže u zvyšujícího invertujícího s výstupní kapacitou 940 $\mu F$ . . . . .	51
A.12	Skoková změna zátěže u zvyšujícího invertujícího s výstupní kapacitou 470 $\mu F$ . . . . .	51
A.13	Zvlnění výstupního napětí u snižujícího měniče s výstupní kapacitou 2440 $\mu F$ . . . . .	52
A.14	Zvlnění výstupního napětí u snižujícího měniče s výstupní kapacitou 940 $\mu F$ . . . . .	53
A.15	Zvlnění výstupního napětí u snižujícího měniče s výstupní kapacitou 470 $\mu F$ . . . . .	53
A.16	Skoková změna zátěže u snižujícího měniče s výstupní kapacitou 940 $\mu F$ . . . . .	54
A.17	Skoková změna zátěže u snižujícího měniče s výstupní kapacitou 470 $\mu F$ . . . . .	55
A.18	Zvlnění výstupního napětí pro u měniče SEPIC pro výstupní kapacitu 40 $\mu F$ a 80 $\mu F$ . . . . .	56
A.19	Reakce na skokovou změnu zátěže u měniče SEPIC pro výstupní kapacitu 40 $\mu F$ . . . . .	57
A.20	Reakce na skokovou změnu zátěže u měniče SEPIC pro výstupní kapacitu 80 $\mu F$ . . . . .	58
A.21	Reakce na skokovou změnu zátěže u měniče SEPIC pro výstupní kapacitu 40 $\mu F$ při použití větší zátěže, která přetížívá měnič . . . . .	58
B.1	Deska plošného spoje pro snižující měnič (bez rozlité mědi) . . . . .	59
B.2	Deska plošného spoje pro zvyšující měnič invertující (bez rozlité mědi) . . . . .	60
B.3	Desky plošných spojů pro měřicí přípravky (bez rozlité mědi) . . . . .	61
B.4	Fotka všech DPS měničů a přípravků pro měření . . . . .	62

# Seznam tabulek

6.1	Měření účinnosti pro snižující měnič . . . . .	37
6.2	Měření účinnosti pro zvyšující měnič . . . . .	37
6.3	Měření účinnosti pro zvyšující invertující měnič . . . . .	37
6.4	Měření účinnosti pro SEPIC měnič . . . . .	37

# Seznam symbolů a zkratek

STEP UP .....	Step up voltage converter. Zvyšující měnič napětí.
STEP DOWN .....	Step down voltage converter. Snižující měnič napětí.
Boost .....	Step up voltage converter. Zvyšující měnič napětí.
Buck .....	Step down voltage converter. Snižující měnič napětí.
SEPIC .....	Single-ended primary-inductor converter. Snižující a zvyšující neinvertující měnič.
Buck-boost .....	Step up/down voltage inverting converter. Snižující a zvyšující invertující měnič napětí.
Flyback .....	Single-acting pass-through voltage converter. Jednočinný propustný měnič napětí.
Mosfet .....	Type of unipolar transistor. Druh unipolárního tranzistoru.
Snubber network ....	Damping element for suppression of voltage peaks. Tlumící členek pro potlačení napěťových špiček.
$E \cdot T$ .....	Constant for determining the components of a step-down converter. Konstanta pro určení součástek u snižující měniče [ $V \cdot \mu s$ ].
ESR .....	Equivalent series resistance of capacitor. Ekvivalentní sériový odpor kondenzátoru [ $\Omega$ ].
GATE .....	Electrode of unipolar transistor. Elektroda unipolárního tranzistoru .
SOURCE .....	Electrode of unipolar transistor. Elektroda unipolárního tranzistoru .
DRAIN .....	Electrode of unipolar transistor. Elektroda unipolárního tranzistoru .
DPS .....	Printed circuit board. Deska plošného spoje .
SMD .....	Surface mounted device. Součástky pro povrchovou montáž.
THT .....	Through hole technology. Součástky pro montáž skrze díru.
LOW ESR .....	Capacitor type. Druh kondenzátoru.
CNC .....	Computer Numerical Control. Počítačem řízený stroj.
OZ .....	Operational amplifier. Operační zesilovač.
LIR .....	Ratio of the peak-to-peak inductor current and the average input current. Poměr mezi špičkovou a střední hodnotou proudu na cívce.

---

PWM .....	Pulse Width Modulation. Pulzně šířková modulace.
GND .....	Ground. Společní svorka země.
$C_{FF}$ .....	Feedforward Capacitor. Kodenzátor pro zvýšení stability.
jumper .....	Type of connector. Druh konektoru.

# 1

## Úvod

Spínané měniče jsou používány na změnu výstupního napětí, proudu. Jejich velkou výhodou oproti starším lineárním zdrojům je mnohem větší účinnost. Toho je docíleno provozem tranzistoru v režimu spínače. V sepnutém a vypnutém stavu jsou na něm ztráty téměř nulové, dochází k nim pouze během přechodu mezi stavy. Jejich účinnost se běžně pohybuje od 80-90 %. Tím se velmi zmenšily nároky na velikost zdroje, odpadá nutnost velikých chladičů. Další zmenšení umožňuje spínací frekvence, která se běžně pohybuje v jednotkách až stovkách kHz. Zvýšení frekvence umožnilo použití malých transformátorů s feritovým jádrem, které ve své velikosti zvládají mnohem větší proudy oproti klasickým transformátorům na 50/60 Hz.

Zásadní nevýhoda je VF rušení, které je způsobeno vysokými spínacími kmitočty. Je tedy nutno dbát na patřičné vyfiltrování výstupního napětí. Dále je nutné zdroj dobře odstínit pomocí krytů, aby nevyzařoval do okolí.

V práci se zaměříme na návrh a konstrukci měničů bez galvanického oddělení pro výukové účely. Měniče tudíž nebudou zcela optimalizované, ale budou vybaveny možnostmi změny výstupní kapacity, případně změny výstupního napětí. K těmto zdrojům bude realizován modul pro elektronickou změnu zátěže, na kterém bude možné zdroje testovat buďto dynamicky nebo staticky.

Z měření předpokládáme, že změnou kapacity budeme měnit výstupní zvlnění napětí a také tím budeme snižovat zákmity při testování na skokovou zátěž. Vzhledem k použité kombinaci kondenzátorů bude možné testovat i vliv ESR kondenzátorů na zvlnění. Při testování zdrojů na maximální proud očekáváme stabilní napětí v celém rozsahu proudů na který jsou měniče navrženy. Při překročení očekáváme snížení výstupního napětí nebo vypnutí zdroje.

# 2

## Teoretický úvod

### 2.1 Základní rozdělení měničů

Měniče můžeme rozdělit na několik základních typů:

1. Měniče typu DC-DC-využívají cívku jako akumulátor energie. V první fázi se do cívky akumuluje energie, která je následně předána na výstup. Dobu akumulace energie určuje doba sepnutí spínacího prvku, který je řízen pomocí PWM, tím dosáhneme řízení výstupního napětí. Tyto typy měničů nedisponují galvanickým oddělením, což zjednodušuje jejich konstrukci, ale znemožňuje to jejich použití jako síťové napájecí zdroje. Používají se uvnitř zařízení k vytvoření potřebných napájecích napětí. Můžeme je rozdělit na:[1]
  - Zvyšující měnič STEP-UP (boost).
  - Zvyšující/snižující měnič invertující (buck-boost).
  - Snížující měnič STEP-DOWN (buck).
  - Snížující a zvyšující měnič SEPIC (Single-ended primary-inductor converter) .
2. Měniče s transformátorem -pro změnu výstupního napětí používají transformátor. Oproti DC-DC měničům zvládají výkony až v jednotkách kW. Měnič s transformátorem lze použít i jako síťový zdroj, protože transformátor zajistí galvanické oddělení. Při tomto použití je však nezbytné galvanicky oddělit i zpětnou vazbu a to nejčastěji pomocí optočlenu. Tyto typy měničů lze však využít i bez galvanicky odděleného výstupu např. pro výrobu vysokého napětí. Můžeme je rozdělit na:[2]
  - Jednočinný blokující měnič (flyback), na malé výkony do 100w.
  - Jednočinný propustný měnič, tento typ lze využít pro větší výkony.
  - Dvočinný měnič.
  - Dvočinný měnič-můstkový.

3. Ostatní měniče- Do této kategorie můžeme zařadit střídače, které dělíme na:

- Napěťový střídač.
- Proudový střídač.

Dále zde můžeme zařadit měniče s proměnným kmitočtem, které dělíme na:

- Přímý měnič kmitočtu
- Nepřímý měnič kmitočtu, které dále dělíme na:
  - S proudovým meziobvodem.
  - S napěťovým meziobvodem.

[6]

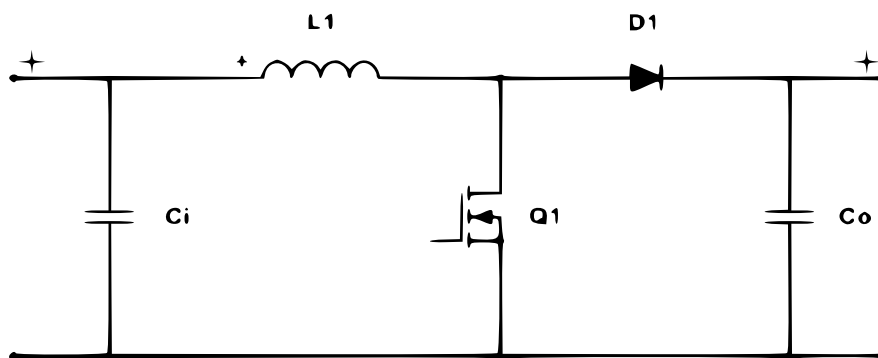
## 2.2 Měniče bez transformátoru

### 2.2.1 Zvyšující měnič STEP-UP (boost)

Tento typ měniče slouží pro zvyšování napětí. Výstupní napětí se pohybuje v rozsahu daným vztahem:

$$U_2 = n \cdot U_1 \quad [V] \quad (2.1)$$

Kde  $U_2$  výstupní napětí [V],  $U_1$  vstupní napětí [V],  $n$  tato konstanta nám určuje kolikrát měnič zvyšuje napětí  $n > 1[-]$ .



**Obr. 2.1:** Zapojení zvyšujícího měniče |Převzato z [5]|

Dle obrázku 2.1 můžeme určit funkci měniče. V první fázi sepne spínací tranzistor a tím připojí cívku na napětí  $U_2$  (polarita vyznačena na obrázku), na cívce  $L_1$  začne narůstat proud (dochází k akumulaci energie). Doba sepnutí je dána řídicím obvodem za účelem regulace výstupního napětí a proudu. Po celou tuto dobu je dioda  $D_1$  v závěrném směru a proud přes ní neprotéká. V druhé fázi je tranzistor vypnut a proud přes něj přestane protékat, cívka si snaží zachovat proud a dojde na ní ke změně polarity, dioda  $D_1$  se otevře a skrze ní proud z cívky nabíjí výstupní kondenzátor a začne na něm růst napětí, které je

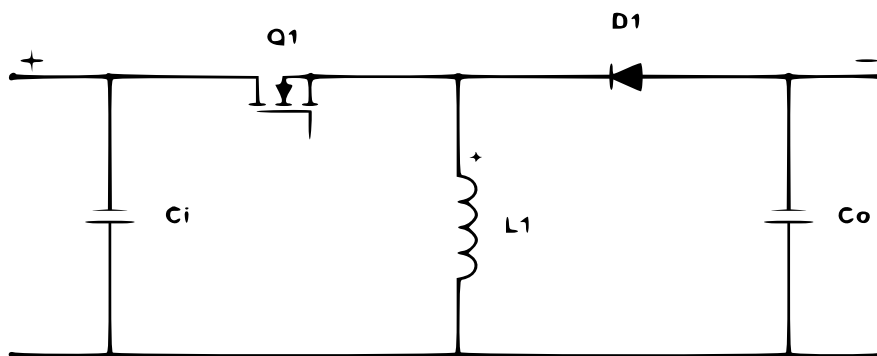


dáno součtem napětí zdroje a napětí na cívce. Tento proud může zcela zaniknout nebo se jen zmenší na určitou hodnotu, to je dáno řízením zdroje a zátěží. Následně se celý proces opakuje. Jelikož výstup zdroje je vždy připojen přes zpětnou vazbu, můžeme výstupní napětí zcela stabilizovat. Výstupní kondenzátor má důležitou funkci ve měničích, proto je jeho volba velmi důležitá. Při jeho výběru je třeba zhodnotit pracovní frekvenci, podle které volíme kondenzátor, který má co nejnižší ESR (sériový) odpor. Toho můžeme dosáhnout zařazením více kondenzátorů paralelně. Výstupní kapacita je volena s ohledem na minimální požadované zvlnění napětí na výstupu zdroje. Kondenzátor na vstupu zajistí, aby zdroj nepřenášel rušení do ostatních obvodů zapojených na stejnou větev, umísťuje se co nejbližší ke obvodu [1] [3].

Výhoda této realizace měniče spočívá v připojení tranzistoru jehož vývod (source) je připojen k zemi, proto není potřeba plovoucí buzení, lze také zařadit rezistor mezi zem a tím jednoduše snímat proud tranzistorem [1].

### 2.2.2 Zvyšující/snižující měnič invertující (buck-boost)

Účel toho měniče je nejen zvyšovat výstupní napětí (může i snižovat), proto se v některé literatuře uvádí, že se jedná o Inverting Buck-Boost Converter. Mimo změnu hodnoty napětí dokáže tento měnič také změnit jeho polaritu (vytváří záporné napětí).<sup>1</sup>



Obr. 2.2: Zapojení zvyšujícího měniče invertujícího [Převzato z [5]]

Funkce je podobná měničům zvyšujícím, avšak je zde nutné použít plovoucí buzení (source tranzistoru není spojen se zemí). Dle obrázku 2.2 určíme funkci. V první fázi se opět připojí napájecí napětí pomocí tranzistoru na cívku, do které se akumulují energie (na obrátku zobrazena polarita v tomto stavu). Po vypnutí je proud z cívky přenášen na výstupní kondenzátor. Díky vhodnému zapojení cívky a diody se v bodě spojení cívky s diodou objeví záporné napětí, které umožní tok proudu. Cívka je na výstup připojena paralelně, tudíž výstupní napětí je možné regulovat spínáním, proto tento měnič může být jak snižující tak zvyšující. Kondenzátory volíme stejně jako v případě zvyšujícího měniče [1].

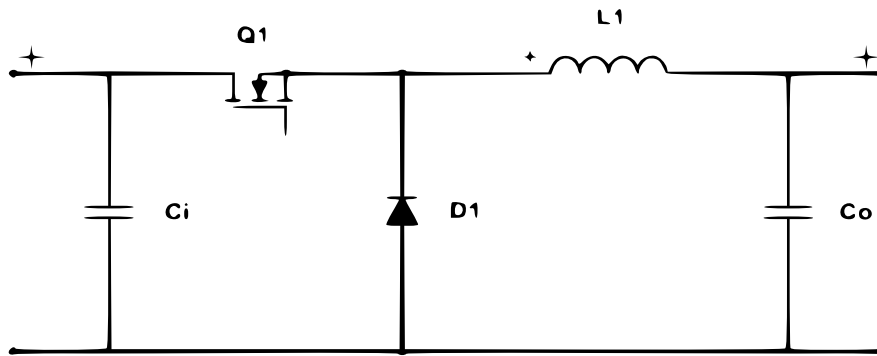
<sup>1</sup>Kombinací tohoto měniče s měničem zvyšujícím můžeme např. z 5 V vytvořit symetrické napájení +15 a -15 V pro operační zesilovače.

### 2.2.3 Snižující měnič STEP-DOWN (buck)

Tento typ měniče slouží pro snižování napětí. Výstupní napětí se pohybuje v rozsahu daným vztahem:

$$U_2 = n \cdot U_1 \quad [V] \quad (2.2)$$

Kde  $U_2$  výstupní napětí [V],  $U_1$  vstupní napětí [V],  $n$  tato konstanta nám určuje kolikrát měnič snižuje napětí  $0 < n < 1$ [-]. Tento měnič je přímou náhradou klasického snižujícího regulátoru s tranzistorem v sériovém spojení, na kterém vznikají velké úbytky, které velmi snižují jeho účinnost, toto řeší tento typ spínaného měniče. Vzhledem k zapojení tranzistoru opět musíme řešit plovoucí buzení [1].



**Obr. 2.3:** Zapojení snižujícího měniče |Převzato z [5]|

S pomocí obrázku 2.3 popíšeme funkci. V první fázi sepne tranzistor, tím se na cívce objeví napětí  $(U_1 - U_2)$ , proud cívkou začne narůstat a dioda je v závěrném směru. Na cívce se akumuluje rozdílová energie dle rovnice 2.3 [1].

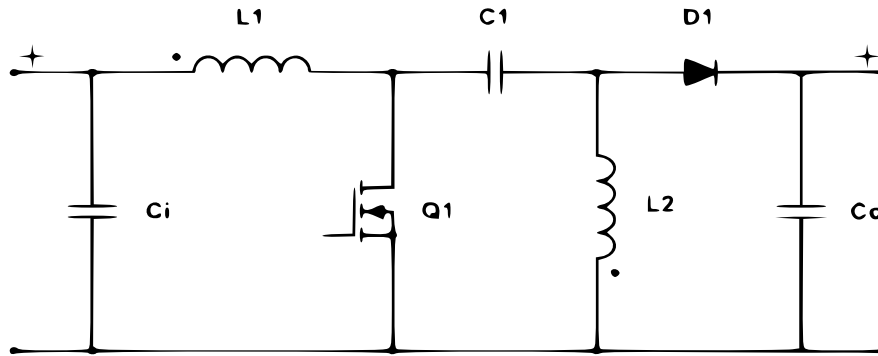
$$E = t \cdot I \cdot (U_1 - U_2) \quad [J] \quad (2.3)$$

Kde  $E$  energie akumulovaná na cívce [J],  $U_2$  výstupní napětí [V],  $U_1$  vstupní napětí [V],  $I$  proud protékající cívkou [A],  $t$  doba sepnutí tranzistoru [s]. Ve druhé fázi se spínač rozeptne a cívka si zachovává proud, dojde ke změně napětí, které otevře diodu přes kterou se předává energie do výstupního kondenzátoru [1].

### 2.2.4 Měnič SEPIC (Single-ended primary-inductor converter)

Tento typ měniče, je vhodný tam, kde potřebujeme výstupní napětí udržovat stabilní, i když vstupní napětí je po určitou dobu větší než výstupní a následně je menší než výstupní napětí. Toto je typické pro použití s akumulátory, kdy k tomuto efektu dochází postupným vybíjením. SEPIC topologie vychází z klasické buck-boost s tím rozdílem, že je zde výstupní napětí kladné oproti společné svorce [4].

Základní zapojení na obrázku 2.4. Analýzu provedeme pro (continuous mode), tzn. proud cívkami nikdy nebude klesat do 0. Nejdříve zjistíme střední hodnotu napětí na kondenzátoru dle rovnice 2.4. V ustáleném stavu  $U_{L1}$  a  $U_{L2}=0$ ;

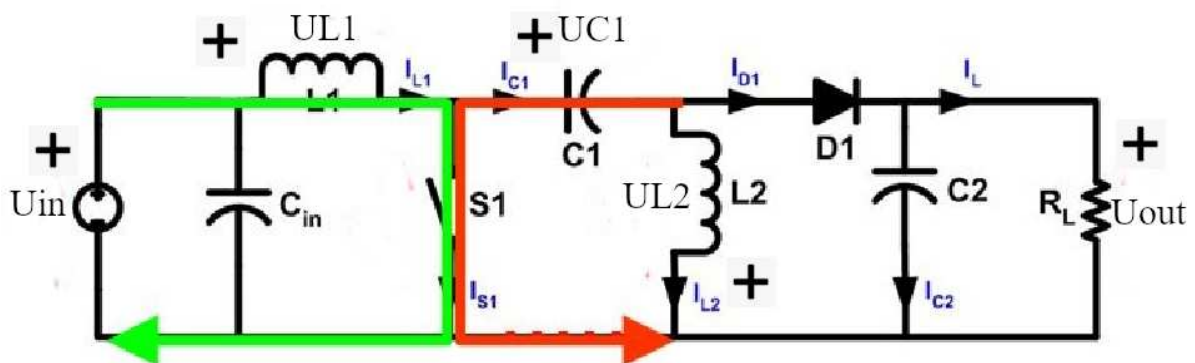


Obr. 2.4: Zapojení SEPIC měniče [Převzato z [5]]

$$-U_{in} + U_{L1} - U_{L2} + U_{C1} = 0 \quad [V] \quad (2.4)$$

$$U_{in} = U_{C1} \quad [V] \quad (2.5)$$

kde  $U_{in}$ , napětí na vstupu [V],  $U_{C1}$  střední hodnota napětí na blokovacím kondenzátoru [V],  $U_{L1}$  a  $U_{L2}$  napětí na cívkách [V]. Dostáváme, že střední hodnota napětí na kondenzátoru je rovna vstupnímu napětí.



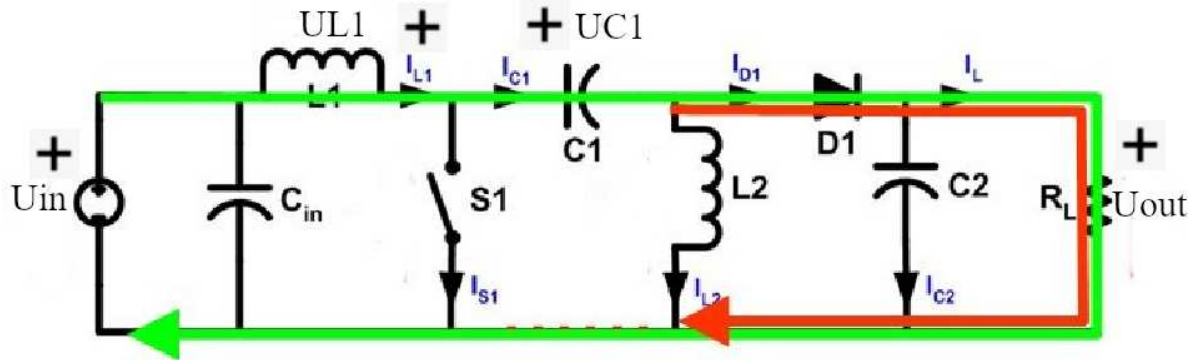
Obr. 2.5: Měnič ve stavu sepnutého spínače [Převzato z [4]]

V sepnutém stavu spínače se připojí vstupní napětí  $U_{in}$  na cívku  $L_1$ , kterou začne protékat proud a začne se akumulovat energie. Zároveň se začne vybíjet vazební kondenzátor přes cívku  $L_2$ , na které je napětí kondenzátoru  $U_{in}$  viz obrázek 2.5.

V další fázi, když se tranzistor rozeptne je proud cívkou  $L_1$  zachován, tento proud nabíjí zpět vazební kondenzátor, který byl vybit do  $L_2$ , k tomuto proudu se ještě přidává proud, který si zachovává cívka  $L_2$ , oba tyto proudy jdou do zátěže přes diodu  $D1$ . Výstupní napětí pro tento stav je dáno rovnicí 2.6 viz obrázek 2.6 [4].

$$U_{out} = U_{in} + U_{L1} - U_{C1} \quad [V] \quad (2.6)$$

kde  $U_{in}$ , napětí na vstupu [V],  $U_{out}$  výstupní napětí [V],  $U_{C1}$  napětí na blokovacím kondenzátoru [V],  $U_{L1}$  napětí na cívce [V]. Napětí na cívce  $L_1$  je dáno dobou sepnutí spínacího prvku z rovnice 2.6 je patrné, že výstupní napětí může být větší nebo nižší než vstupní.



Obr. 2.6: Měníč ve stavu rozepnutého spínače [Převzato z [4]]

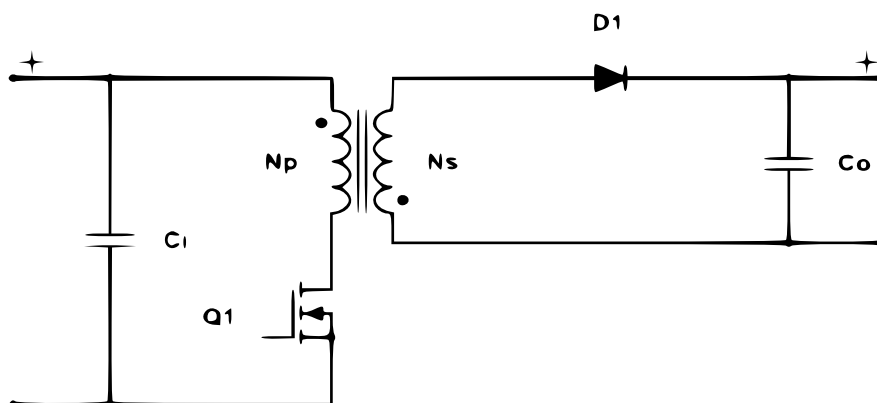
Výběr blokovacího kondenzátoru. Při výběru je nutné zohlednit napětí, které na kondenzátor bude přivedené, měl by být dimenzován minimálně na maximální vstupní napětí zdroje. Jeho kapacita by měla být taková, aby pro spínací frekvence byla jeho reaktance zanedbatelná (blížící se k nule) [4].

Jelikož se měnič skládá z cívek a kondenzátorů může v důsledku špatné volby součástek dojít k rezonanci, která by mohla zničit měnič. Tomuto je možné předejít spojením cívek magnetickou vazbou nebo přidáním rezistoru a kondenzátoru (jeho kapacita by měla být minimálně 5x kapacita  $C_1$ ) paralelně k blokovacímu kondenzátoru [4].

## 2.3 Měníče s transformátorem

### 2.3.1 Jednočinný blokující měnič (flyback)

Tato topologie je tou nejjednodušší, nemusí obsahovat výstupní tlumivku, rekuperační vinutí, ani dvojcestné usměrnění. Používá se ve většině zařízeních malého výkonu jako jsou nabíječky, malé televize, rádia, DVB-T tunery apod. V minulosti byla tato topologie hojně využívána v CRT televizích v koncovém stupni řádkového rozkladu pro výrobu vysokého napětí. Základní zapojení na obrázku 2.7 [2].



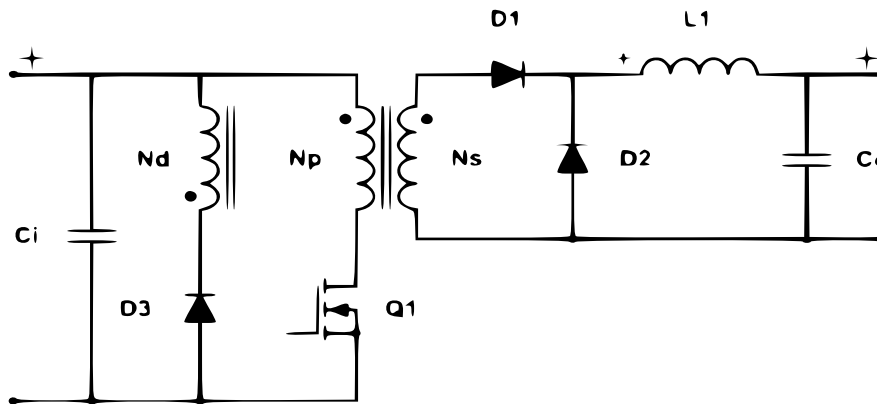
Obr. 2.7: Základní zapojení flyback měniče [Převzato z [5]]

Tyto měniče musí mít vždy transformátor se vzduchovou mezerou, spínací tranzistor je vhodně umístěn, proto není potřeba plovoucí buzení a je možné velmi jednoduše zařadit rezistor (mezi zem a source) pro snímání proudu. Při sepnutém spínači se do transformátoru akumuluje energie, nejedná se tedy o přímou transformaci.<sup>2</sup> Do zátěže proud neteče, protože dioda  $D_1$  je v závěrném směru, toho je dosaženo zapojením konců vinutí transformátoru [2]. Vzhledem k spínání do indukčnosti budou na primární straně vznikat napěťové špičky, které by prorazily tranzistor. Toto je řešeno přidáním tlumícího členu často nazývaného snubber network, paralelně ke primárnímu vinutí [2].

Po rozepnutí spínače dojde k změně polarity na sekundárním vinutí a proud teče do kondenzátoru a do zátěže. Jelikož výstupní napětí je dáno dobou akumulace, je možné tento měnič provozovat ve velkém rozmezí vstupního napětí<sup>3</sup>[2].

### 2.3.2 Jednočinný propustný měnič

Jednočinný propustný měnič se hodí pro výkony nad 100 W, toho je dosaženo pomocí transformátoru bez vzduchové mezery. Používá se v zařízeních až do 3000 W s variantou se 2 tranzistory (běžné ATX počítačové zdroje). Hlavní výhodou je jednodušší konstrukce oproti dvojjinným zdrojům a jednoduše realizovaný návrat magnetické energie zpět do primárního kondenzátoru pomocí rekuperačního vinutí. Na obrázku 2.8 je zobrazeno základní zapojení měniče [2].



Obr. 2.8: Základní zapojení jednočinného měniče |Převzato z [5]|

Při sepnutí spínače začne téct proud primárním vinutím a zároveň i sekundárním vinutím přes diodu do kondenzátorů a do zátěže. Během sepnutého stavu se do transformátoru akumuluje magnetická energie, která není využita na rozdíl od flybacku. V době rozepnutí spínače se tato energie vrací zpět přes rekuperační vinutí a diodu  $D_3$  do kondenzátoru. Jelikož zde nedochází k akumulaci energie v transformátoru je nutné použít

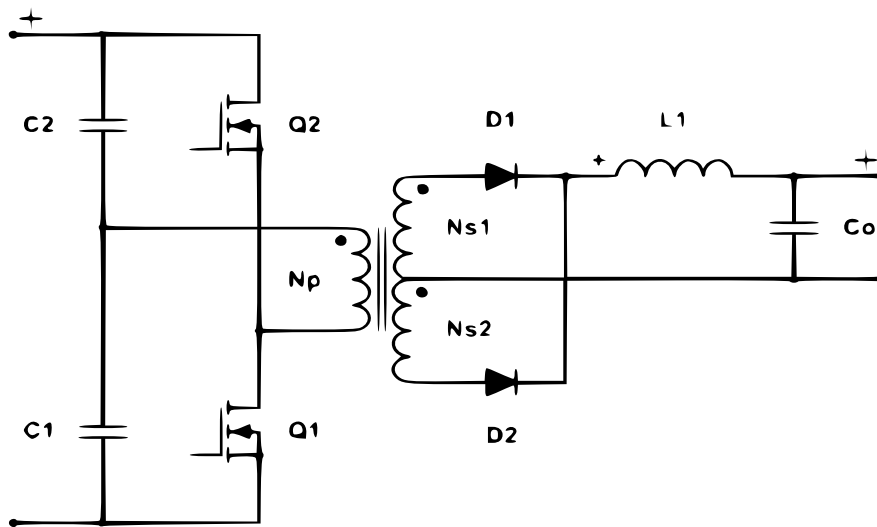
<sup>2</sup>Hlavním důvodem, proč se tento měnič používá jen pro malé výkony. Pro výkony nad 100 W by bylo nutné používat velmi velké transformátory, mnohem větší než u dvojjinných topologií.

<sup>3</sup>Není třeba řešit přepínání napětí, to je velkou výhodou pro právě zmíněné nabíječky, které mohou jednoduše pracovat v rozmezí napětí mezi 100-240 VAC

tlumivku na výstupu. Dioda  $D_1$  usměřňuje napětí z transformátoru a dioda  $D_2$  slouží k zachování toku proudu tlumivky v době kdy je spínací prvek rozepnut [2].

### 2.3.3 Dvojčinný měnič-polomůstek

Dvojčinný měnič je jako jednočinný propustný vhodný pro výkony nad 100 W, také používá transformátor bez vzduchové mezery, avšak tento měnič využívá transformátor s nejvyšší účinností, což je jeho největší výhoda. Využíván v ATX zdrojích a ve variantě s vyvedeným středem transformátoru je tento měnič často používán v UPS jako střídač. Základní zapojení na obrázku 2.9 [2].



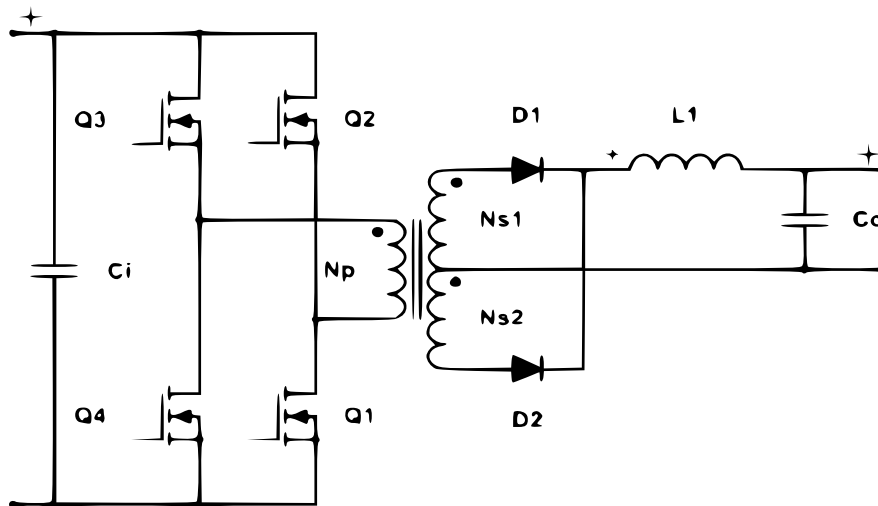
**Obr. 2.9:** Základní zapojení dvojčinného měniče v polomůstku |Převzato z [5]|

Tranzistory střídavě spínají primární vinutí, na sekundárním vinutí je pomocí dvojcestného usměřňovače vytvořeno pulzující napětí o dvojnásobném kmitočtu, díky tomu je použita menší filtrační tlumivka a kapacita na výstupu [2].

Zapojení dle obrázku 2.9 je nevýhodné, protože buzení  $Q_2$  musí být plovoucí. Je výhodné použít transformátor s vyvedeným středem, pokud toto není splněno je potřeba vytvořit virtuální střed napětí pomocí kondenzátorů, které musí být určené na impulzní použití, nejčastěji polypropylénové kondenzátory. Každý tranzistor musí být chráněn diodou v případě použití mosfetů není třeba přidávat diody, jsou integrovány uvnitř. Dále pro ochranu polovodičů se doporučuje použití tzv. snubber networků připojených paralelně na spínací tranzistor a na primární vinutí [2].

### 2.3.4 Dvojčinný měnič-můstkový

Jedná se o nejvýkonnější typ měniče, má velmi obdobné vlastnosti jako polomůstkový měnič. Jeho hlavní výhoda oproti jednoduššímu polomostu spočívá v tom, že není třeba používat transformátor s vyvedeným středem a ani není potřeba tento střed vytvářet pomocí kondenzátorů. Základní zapojení na obrázku 2.10.



**Obr. 2.10:** Základní zapojení dvojjmenného měniče v můstku |Převzato z [5]|

Pro vytvoření střídavého napětí na primární straně je potřeba vždy spínat protější tranzistor tzn.  $Q_3$  a  $Q_1$  v první fázi a následně  $Q_4$  a  $Q_2$  [2].

U všech dvojjmenných měničů je třeba zajistit, aby tranzistory nebyly sepnuté tak, že by šlo napájecí napětí do zkratu, to je řešeno definováním doby, kdy jsou obě dvojice tranzistorů vypnuté tzv. dead time. Tento čas umožní sepnutým tranzistorům bezpečně vypnout a následně umožní bezpečné zapnutí dalších dvojic tranzistorů. V době tohoto času je proud z transformátoru zachován pomocí ochranných diod, které jsou součástí struktury mosfetet tranzistorů (na obrázku nejsou zobrazeny) [2].

## 2.4 Shrnutí k měničům

Spínané měniče jsou velkým pokrokem, co se týče minimalizace a zvýšení účinnosti napájecího zařízení. Jejich hlavní nevýhoda a to rušení, je v dnešní době velmi potlačena vhodným stíněním a filtračními obvody. To umožňuje spínané měniče používat i v obvodech, kde by dříve neobstály, jako jsou audio zesilovače, zvukové karty, měřicí technika apod. DC-DC měniče spolehlivě a účinně vytvářejí všechny napájecí napětí uvnitř zařízení a měniče s transformátory vhodně snižují nebo zvyšují síťové napětí, díky jejich galvanickému oddělení. Dále se zaměříme hlavně na DC-DC měniče a jejich moderní řešení.

## 2.5 Moderní obvody pro realizaci měničů

První typy měničů byly realizovány zcela za pomoci diskrétních součástek, což jejich konstrukce značně komplikovalo a prodražovalo. Tato realizace měla hlavní výhodu v tom, že v případě poruchy bylo možné součástky nahradit a zdroj dále provozovat, u moderních integrovaných obvodů je často problém s nedostupností náhradních čipů. S vývojem se postupně přecházelo na integrované obvody, které umožnili jednodušší realizaci (s menším

počtem okolních součástek), tyto obvody již dokázaly splnit všechny požadavky na funkci měničů. Vývoj však šel dál a nové obvody byly vybaveny možnostmi komplexního řízení a diagnostiky pomocí komunikace s okolními obvody v zařízení, což umožnilo jednoduchou diagnostiku a zabezpečení v případě poruchy. V následující části se zaměříme na některé z moderních obvodů.

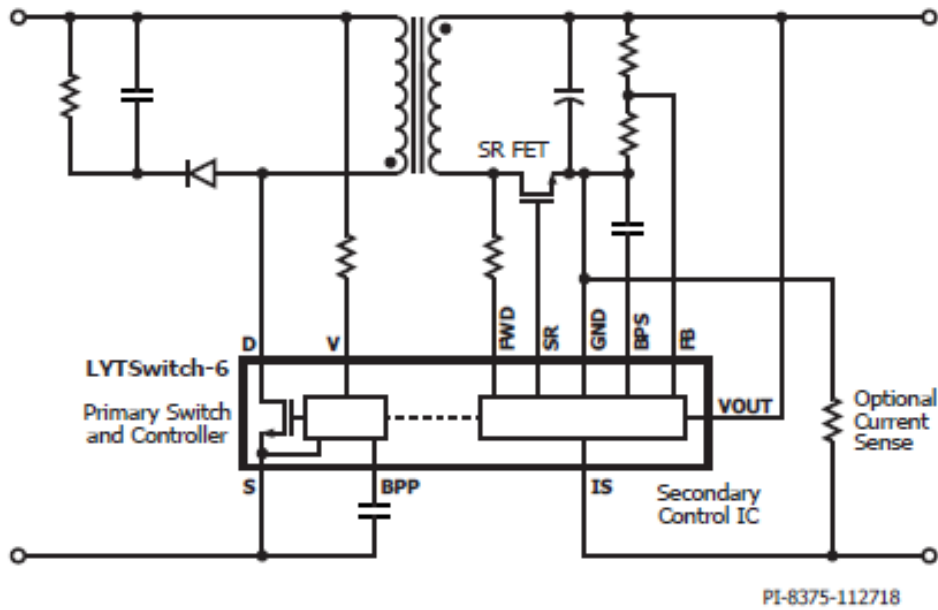
### 2.5.1 PWM kontrolér MAX16990

Jedná se o obvod pro řízení zvyšujících nebo SEPIC měničů pro automotive využití. Spínací frekvence se pohybuje od stovek kHz až po 2,5 MHz. Použití nejvyšší pracovní frekvence je výhodné, protože se nachází nad pásmem středních vln radiopřijímačů, tudíž můžeme předpokládat velmi malé nebo žádné rušení těchto příjmů. Další výhodou spočívá ve velkém rozmezí pracovního napětí, to se běžně pohybuje od 3 až 36 V. Obvod obsahuje možnost jeho vypnutí signálem na vstupu EN, napětí na tomto vstupu může být buď 5 V nebo případně větší až do napájecího napětí v případě spojení s napájecí linkou. Ve stavu sepnutého obvodu se jeho spotřeba pohybuje od 0,75 do 1,5 mA v režimu vypnutí je spotřeba 4 až 7  $\mu\text{A}$ . Obvod obsahuje výstup signálu PGOOD, který hlásí zda měnič funguje správně. Mezi další výhody patří ochrana proti přehřátí, snímání proudu spínacím tranzistorem, možnost vnější kompenzace, případně použité 10 vývodové pouzdro  $\mu\text{MAX}$  nebo 12 vývodové TQFN pouzdro pro kompaktní realizace [9].

### 2.5.2 Obvody řady LYTSWitch-6

Tento obvod je primárně určen pro flyback napájecí zdroje s možností napájení LED diod v modu konstantního napětí nebo proudu, případně pro vysokonapěťové zdroje. Měniče této řady jsou velmi výhodné svým jedinečným pouzdem, které zasahuje od primární strany k sekundární se zachováním galvanického oddělení, kterého je dosaženo magneticou vazbou uvnitř obvodu. Měniče s tímto obvodem dosahují účinnosti až 94 % v celém zatěžovacím rozsahu. Ve výkonnějších variantách, je možné měnič provozovat s výkonem až 100 W bez použití chladiče na obvodu. Takto velké účinnosti je dosaženo použitím interního spínacího tranzistoru s malým úbytkem napětí a na sekundární straně využitím synchronního usměrňovače. Mezi pokročilé funkce patří snímání napětí na primární straně a případná přepěťová ochrana, detekce gatu mosfetu synchronního usměrňovače, přepěťová a podpěťová ochrana výstupu s automatickým restartem, ochrana proti přehřátí. Většina flyback zdrojů mají na transformátoru i pomocné vinutí pro napájení řídicího obvodu, u tohoto obvodu je tento problém vyřešen. V neposlední řadě je dobré zmínit možnost připojení externího snímacího rezistoru proudu na sekundární straně pokud je potřeba, jinak je tento vývod pevně spojen se zemí. Základní realizace obvodu na obrázku 2.11 [11].

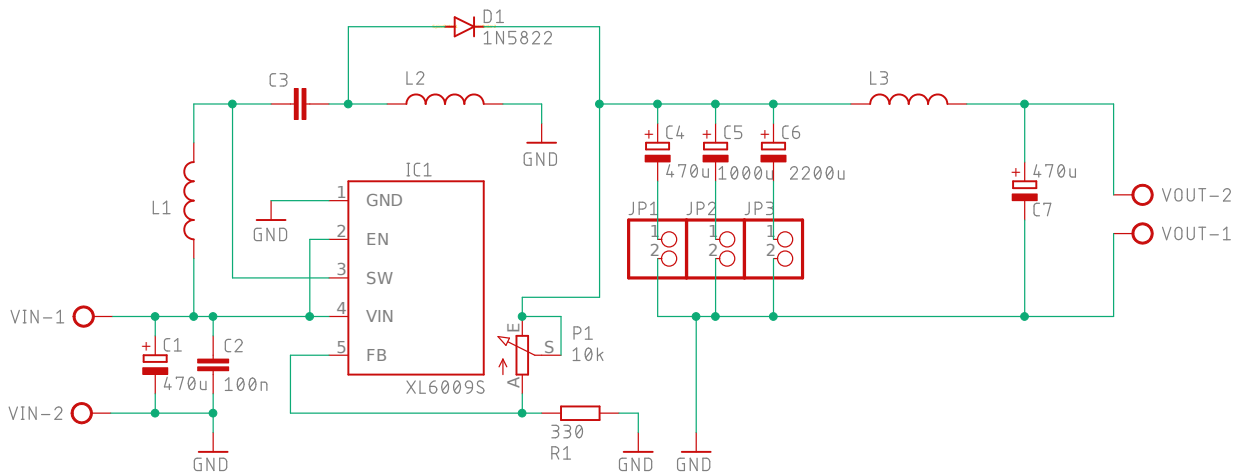




Obr. 2.11: Zapojení měniče s LYTSwitch-6 [Převzato z [11]]

### 2.5.3 Integrovaný měnič XL6009

Tento obvod poskytuje jednočipové řešení pro zvyšující a SEPIC měniče. Je velmi oblíbený v čínských modulech pro zvyšování napětí. Výhodou je jeho poměrně veliký výkon, díky použitému pouzdru TO263-5L a jednoduchost realizace. Obvod pracuje v rozsahu napětí od 5 do 32 V na pevně definované frekvenci a to 400 kHz. Výstupní proudy se pohybují až do 4 A. Mezi další výhody patří velká účinnost, která dosahuje až 94 %, zabudovaná frekvenční kompenzace, ochrana proti zkratu a přehřátí. O tomto typu obvodu bylo původně uvažováno pro realizaci SEPIC měniče, nakonec bylo doporučeno využít obvod, který je běžně dostupný u známých prodejců elektrosoučástek a tak by zvolen obvod MAX16990. Na obrázku 2.12 je zobrazen první návrh měniče s obvodem XL6009 [12].



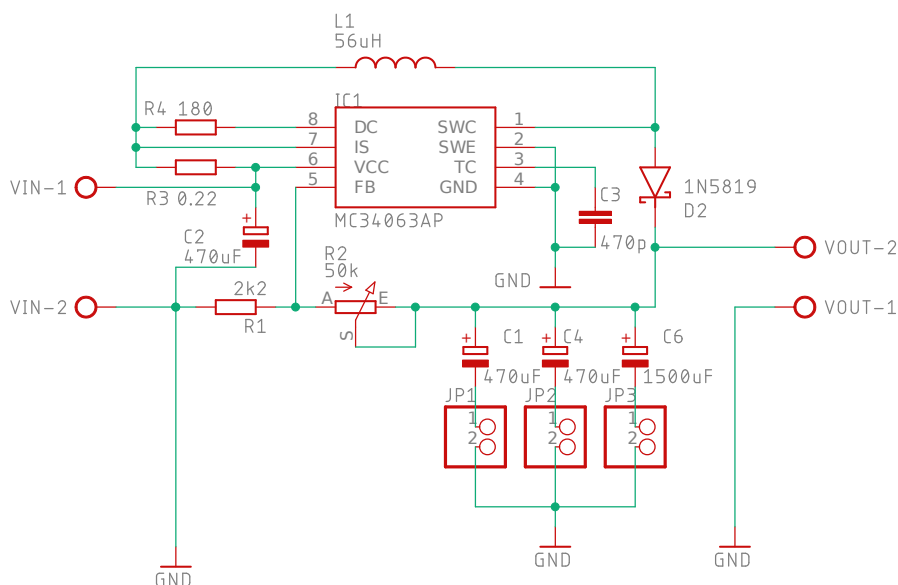
Obr. 2.12: Zapojení měniče SEPIC se XL6009

# 3

## Návrh zapojení jednotlivých typů měničů

### 3.1 Návrh měničů s MC34063AP

Obvod MC34063AP [7] má napěťový rozsah od 3 do 40 V, maximální zatížení výstupního spínače až do 1,5 A, pracovní frekvenci je možné zvolit až do 100 kHz. Tyto parametry musí být během návrhu dodrženy, jinak by hrozilo nenávratné zničení obvodu. Pro zvyšující typ měniče (STEP-UP) bylo zadáno, že vstupní napětí se má pohybovat v rozsahu od 5 do 9 V a na výstupu má být 12 V při maximálním proudu 0,2 A. Pro měnič zvyšující invertující (BUCK-BOOST) jsou vstupní parametry stejné. Na výstupu je požadováno napětí -12 V při maximálním proudu 0,2 A. Pro oba měniče bylo zadáno, že pracovní frekvence bude minimálně 60 kHz.



Obr. 3.1: Zapojení zvyšujícího měniče

### 3.1.1 Určení hodnot součástek pro zvyšující měnič s MC34063AP

Schéma zapojení neinvertujícího měniče na obrázku 3.1 Rovnice převzaty z katalogového listu obvodu MC34063AP [7]. Na začátek musíme určit poměr sepnutí a vypnutí spínacího prvku. Dle rovnice 3.1

$$\begin{aligned} \frac{T_{on}}{T_{off}} &= \frac{U_{out} + U_F - U_{in(min)}}{U_{in(min)} - U_{sat}} \\ &= \frac{12 + 0,5 - 5}{5 - 1,3} \\ &= 2,027 \quad [-] \end{aligned} \quad (3.1)$$

Kde  $\frac{T_{on}}{T_{off}}$ ,  $[-]$  představuje poměr sepnutí spínacího prvku,  $U_{out}$  výstupní napětí zdroje  $[V]$ ,  $U_F$  úbytek napětí na diodě  $[V]$ ,  $U_{sat}$  úbytek napětí na spínacím prvku při požadovaném proudu  $[V]$ ,  $U_{in(min)}$  minimální vstupní napětí  $[V]$ .

Dále je třeba určit čas jedné periody, což odpovídá součtu času  $T_{on}$  a  $T_{off}$ , tento čas je dán požadovanou pracovní frekvencí.

$$\begin{aligned} (T_{on} + T_{off}) &= \frac{1}{f} \\ &= \frac{1}{60000} \\ &= 1,66 \cdot 10^{-5} \quad [s] \end{aligned} \quad (3.2)$$

Kde  $T_{on}$  doba sepnutí spínacího prvku  $[s]$ ,  $T_{off}$  doba vypnutí spínacího prvku  $[s]$ ,  $f$  -požadovaná spínací frekvence  $[Hz]$

Nyní již můžeme určit dobu po kterou bude spínací prvek vypnut.

$$\begin{aligned} T_{off} &= \frac{T_{on} + T_{off}}{\frac{T_{on}}{T_{off}} + 1} \\ &= \frac{1,66 \cdot 10^{-5}}{2,027 + 1} \\ &= 5,48 \cdot 10^{-6} \quad [s] \end{aligned} \quad (3.3)$$

Kde  $T_{on}$ -doba sepnutí spínacího prvku  $[s]$ ,  $T_{off}$  doba vypnutí spínacího prvku  $[s]$ ,  $\frac{T_{on}}{T_{off}}$  poměr sepnutí a vypnutí spínače  $[-]$ .

Čas když je spínací prvek zapnut určením z celkového času periody a z již známého času  $T_{off}$  následovně

$$\begin{aligned} T_{on} &= (T_{on} + T_{off}) - T_{off} \\ &= 1,66 \cdot 10^{-5} - 5,48 \cdot 10^{-6} \\ &= 1,11 \cdot 10^{-5} \quad [s] \end{aligned} \quad (3.4)$$

Kde  $(T_{on} + T_{off})$  celkový čas jedné periody[s],  $T_{off}$  doba vypnutí spínače[s]. Z času  $T_{on}$  můžeme určit časovací kondenzátor  $C_3$

$$\begin{aligned} C_3 &= 4 \cdot 10^{-5} \cdot T_{on} \\ &= 4 \cdot 10^{-5} \cdot 1,11 \cdot 10^{-5} \\ &= 444 \cdot 10^{-12} \quad [F] \end{aligned} \quad (3.5)$$

Kde  $C_3$  kapacita časovacího kondenzátoru [F],  $T_{onn}$  doba sepnutí spínače[s]. Hodnota kondenzátoru vyšla 444 pF, což není standardní hodnota, nejbližší je kondenzátor o kapacitě 470 pF, který bude použit v konstrukci.

Musíme určit maximální proud spínacím prvkem, aby bylo možné určit hodnotu rezistoru pro omezení proudu. Hodnotu proudu zjistíme následovně.

$$\begin{aligned} I_{pk( switch )} &= 2I_{out(max)} \left( \frac{T_{on}}{T_{off}} + 1 \right) \\ &= 2 \cdot 0,2(2,027 + 1) \\ &= 1,2972A \quad [A] \end{aligned} \quad (3.6)$$

Kde  $I_{pk( switch )}$  maximální proud spínacím prvkem [A],  $C_{out(max)}$  maximální požadovaný výstupní proud [A],  $\frac{T_{on}}{T_{off}}$  poměr sepnutí a vypnutí spínače [-].

Získali jsme hodnotu maximálního proudu spínacím prvkem, tato hodnota je menší než 1,5 A (maximální proud integrovaného tranzistoru), tudíž můžeme zdroj provozovat i bez externího tranzistoru. Když máme hodnotu maximálního proudu můžeme určit rezistor pro jeho omezení.

$$\begin{aligned} R_3 &= \frac{0,3}{I_{pk( switch )}} \\ &= \frac{0,3}{1,2972} \\ &= 0,23 \quad [\Omega] \end{aligned} \quad (3.7)$$

Kde  $R_3$  odpor rezistoru pro omezení proudu [ $\Omega$ ],  $I_{pk( switch )}$  maximální proud spínacím prvkem [A]. Hodnota 0,23 opět není standardní bude použit rezistoru o hodnotě 0,22  $\Omega$ . Nyní můžeme určit indukčnosti cívky.

$$\begin{aligned} L_{1(min)} &= \left( \frac{U_{in(min)} - U_{sat}}{I_{pk( switch )}} \right) T_{on} \\ &= \left( \frac{5 - 1,3}{1,2972} \right) 1,11 \cdot 10^{-5} \\ &= 31,66 \cdot 10^{-6} \quad [H] \end{aligned} \quad (3.8)$$

Kde  $L_{1(min)}$  minimální použitá indukčnost [H],  $U_{in(min)}$  minimální vstupní napětí [V],  $U_{sat}$  úbytek napětí na spínacím prvku při požadovaném proudu [V],  $I_{pk( switch )}$  ma-

ximální proud spínacím prvkem [A]. Minimální indukčnost byla určena na  $32 \mu H$ . V zapojení bude použita cívka s indukčností  $47 \mu H$ . Zbývá určit výstupní kapacitu kondenzátorů s ohledem na to, že zdroj bude vybaven možností změny kapacity pak bude výpočet realizován pro variantu s připojením všech kondenzátorů. Kapacita kondenzátorů bude počítána pro zvlnění  $10 \text{ mV}$  (špička-špička). Tím bude dosaženo viditelné změny ve zvlnění v případě použití nižší kapacity (všechny kondenzátory nebudou použity)

$$\begin{aligned} C_0 &= 9 \frac{I_{out(max)} T_{on}}{U_{ripple(pp)}} \\ &= 9 \frac{0,2 \cdot 1,11 \cdot 10^{-5}}{0,01} \\ &= 1998 \cdot 10^{-6} \quad [F] \end{aligned} \quad (3.9)$$

Kde  $C_0$  minimální výstupní kapacita pro zvlnění  $0,01 \text{ mV(pp)}$  [F],  $I_{out(max)}$  maximální výstupní proud [A],  $T_{onn}$  doba sepnutí spínače [s],  $U_{ripple(pp)}$  maximální zvlnění napětí špička-špička na výstupu zdroje [V]

Hodnota kapacity vyšla  $1998 \mu F$ , na výstup zdroje bude zapojená přepínatelná kapacita realizována LOW ESR kondenzátory  $2x 470 \mu F$  a  $1500 \mu F$  pro účely měření při změně kapacity. Při připojení všech kondenzátorů dostaneme kapacitu  $2440 \mu F$ , tudíž předpokládáme ještě menší zvlnění než  $0,01 \text{ V}$ . Zbývá nastavit výstupní napětí na požadované, toho bude docíleno nastavením děliče tak, aby na jeho výstupu bylo napětí  $1,25$  (interní reference).

$$U_{(out)} = 1,25 \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad [V] \quad (3.10)$$

Kde  $U_{(out)}$  požadované výstupní napětí [V],  $R_2$  a  $R_1$  odpory rezistorů v napěťovém děliči [ $\Omega$ ]. Zvolíme odpor rezistoru  $R_1$  na  $2,2 \text{ k}\Omega$  a z rovnice 3.10 vyjádříme  $R_2$ .

$$\begin{aligned} R_2 &= \frac{R_1(U_{(out)} - 1,25)}{1,25} \\ &= \frac{2200(12 - 1,25)}{1,25} \\ &= 18920 \quad [\Omega] \end{aligned} \quad (3.11)$$

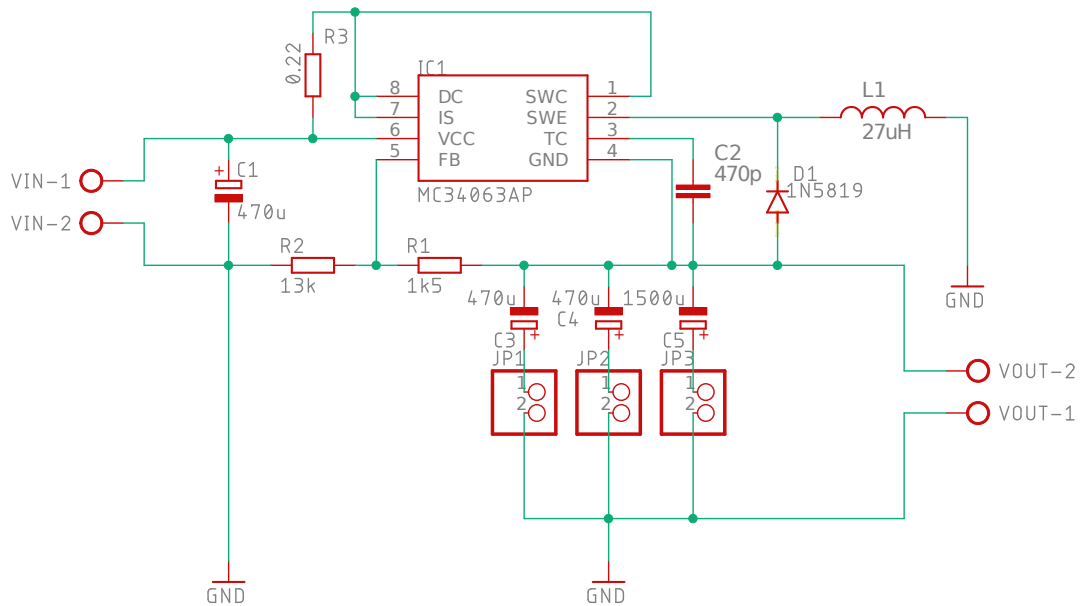
Kde  $U_{(out)}$  požadované výstupní napětí [V],  $R_2$  odpor rezistoru připojeného na výstupní napětí [ $\Omega$ ],  $R_1$  odpor rezistoru připojeného na GND [ $\Omega$ ]. Hodnota rezistoru  $R_2$  pro požadované napětí  $12 \text{ V}$  vyjde  $18,920 \text{ k}\Omega$ . Tato hodnota není v řadě rezistorů dostupná ,bylo by možné najít dvojici rezistorů z odpovídající řady pro správný dělicí poměr, jelikož je zdroj určen pro výukové účely bude rezistor  $R_2$  realizován odporovým trimrem  $50 \text{ k}\Omega$  zapojený jako proměnný rezistor.

Zbývá určit vhodná dioda pro použití spínaného měniče, dioda by měla být vysoko rychlostní, pro použití okolo  $100 \text{ kHz}$ , vzhledem k výstupnímu proudu  $0,2 \text{ A}$  lze pou-

žit diodu do 1A, tomu odpovídá Schottkyho dioda 1N5819 [14], která je i doporučena v katalogovém listu pro obvod MC34063AP.

### 3.1.2 Určení hodnot součástek pro zvyšující invertující měnič s MC34063AP

Schéma zapojení měniče invertujícího na obrázku 3.2



**Obr. 3.2:** Zapojení zvyšujícího invertujícího měniče

Návrh měniče zvyšujícího invertujícího je ve mnoha bodech stejný jako u měniče zvyšujícího. Jako první se určí poměr sepnutí a vypnutí spínacího prvku.

$$\begin{aligned} \frac{T_{on}}{T_{off}} &= \frac{|U_{out}| + U_F}{U_{in(min)} - U_{sat}} \\ &= \frac{|-12| + 0,5}{5 - 1,3} \\ &= 3,378 \quad [-] \end{aligned} \quad (3.12)$$

Kde  $\frac{T_{on}}{T_{off}}$ , [-] představuje poměr sepnutí spínacího prvku,  $U_{out}$  výstupní napětí zdroje [V],  $U_F$  úbytek napětí na diodě [V],  $U_{sat}$  úbytek napětí na spínacím prvku při požadovaném proudu [V],  $U_{in(min)}$  minimální vstupní napětí [V]. Určení hodnot  $\frac{T_{on}}{T_{off}}$ ,  $T_{on}$ ,  $T_{off}$ ,  $C_T$ ,  $I_{pk( switch)}$ ,  $R_{SC}$ ,  $L_{(min)}$ ,  $C_0$  jsou stejné jako pro zvyšující měnič dle rovnic 3.2-3.9. Výstupní napětí je opět realizováno pomocí děliče, musíme však brát v úvahu zápornou hodnotu napětí. Výstupní napětí je dáno

$$U_{(out)} = -1,25 \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad [V] \quad (3.13)$$

Kde  $U_{(out)}$  požadované výstupní napětí [V],  $R_2$  a  $R_1$  odpory rezistorů v napěťovém děliči [ $\Omega$ ]. Z rovnice 3.13 vyjádříme  $R_2$  a  $R_1$  zvolíme na 1,5 k $\Omega$ .

$$\begin{aligned} R_2 &= \frac{-R_1(U_{(out)} + 1,25)}{1,25} \\ &= \frac{-1500(-12 + 1,25)}{1,25} \\ &= 12900 \quad [\Omega] \end{aligned} \quad (3.14)$$

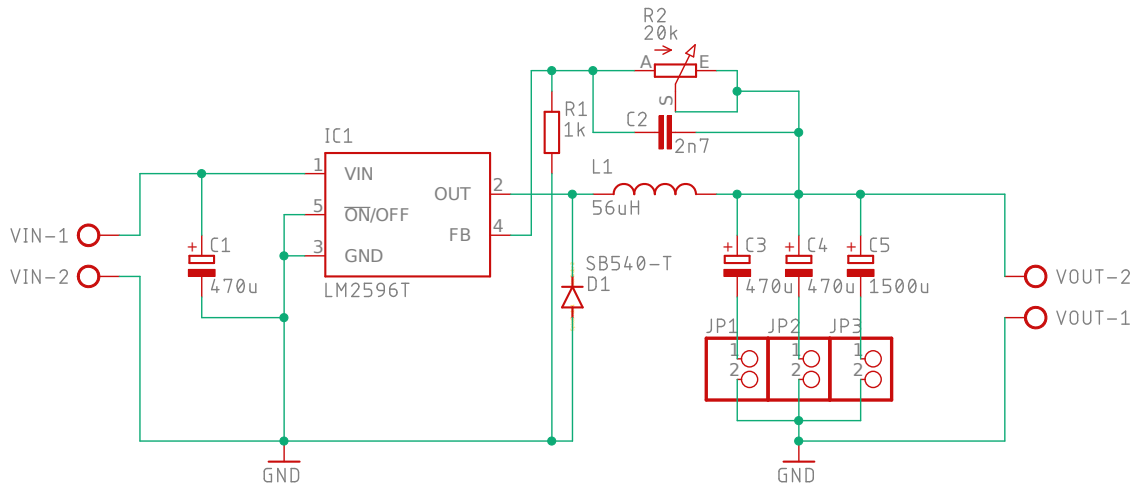
Kde  $U_{(out)}$  požadované výstupní napětí [V],  $R_1$  odpor rezistoru připojeného na výstupní napětí [ $\Omega$ ],  $R_2$  odpor rezistoru připojeného na GND [ $\Omega$ ]. Získali jsme hodnotu 12900  $\Omega$ , zvolíme pevnou hodnotu rezistoru na 13 k $\Omega$ , tím dosáhneme výstupního napětí -12,0833 V, což se velmi blíží požadovanému napětí -12 V.

Po provedení ostatních výpočtů dle rovnic 3.2-3.9. dostáváme hodnotu pro časovací kondenzátor  $C_2$  470 pF, minimální hodnota indukčnosti použité cívky vyjde na 26  $\mu\text{H}$ , zvolíme cívku s hodnotou indukčnosti 27  $\mu\text{H}$  a maximálním proudem 0,9 A, která bude pro použití dostatečná, rezistor pro omezení proudu bude stejný vzhledem ke stejnému maximálnímu proudu obou měničů a to 0,22  $\Omega$ . Vzhledem k stejné frekvenci a proudu obou měničů bude použita stejná dioda a to 1N5819.

Nyní máme vypočteny všechny hodnoty potřebných součástí pro měniče s obvodem MC34063AP. Pro zapojení zvyšujícího měniče se doporučuje zařadit rezistor o hodnotě 180  $\Omega$  do collectoru budícího tranzistoru v darlingtonovém zapojení uvnitř obvodu, oba měniče budou také vybaveny vstupním kondenzátorem 470  $\mu\text{F}$  na vstupní straně zdroje pro snížení rušení do ostatních obvodů, tato kapacita není nezbytná, jelikož se předpokládá napájení zdrojů z již stabilního zdroje napájení (laboratorní zdroj).

## 3.2 Návrh snižujícího měniče s LM2596T-ADJ/NOPB

Snižující měnič bude realizován pomocí obvodu LM2596T-ADJ/NOPB [8] ve variantě s možností do zpětné vazby přidat dělič napětí, kterým lze nastavit výstupní napětí. Obvod je primárně určen pro jednoduché měniče s minimem externích komponent. Jednoduchost realizace má i svá úskalí a to hlavně nemožnost změnit pracovní frekvenci, pracovní frekvence obvodu je pevně nastavena na 150 kHz. K měniči nelze připojit externí tranzistor, ale díky realizaci zdroje do pouzdra TO-220 bylo možné interní tranzistor realizovat na výstupní výkon v řádu desítek wattů. Pro realizaci snižujícího měniče bylo zadáno výstupní napětí 15 V při maximálním proudu do 2,5 A. Vstupní napětí bude v rozsahu 20-28 V, pro návrh měniče bude použité vstupní napětí 24 V, což nám umožní optimálně určit součástky měniče. Schéma zapojení na obrázku 3.3



Obr. 3.3: Zapojení snižujícího měniče

### 3.2.1 Určení hodnot součástek pro snižující měnič s LM2596T-ADJ/NOPB

Postup návrhu je proveden dle doporučení v katalogovém listu k obvodu LM2596T-ADJ/NOPB [8]. Návrh začneme určením dělicího poměru děliče pro dosažení požadovaného výstupního napětí 15 V. Hodnota rezistoru  $R_1$  je v katalogu omezena na hodnoty mezi  $240 \Omega$  až  $1,5 k\Omega$ . Zvolíme  $R_1$  na hodnotu  $1 k\Omega$ . Referenční napětí obvodu je 1,23 V.

$$U_{(out)} = U_{(ref)} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad [V] \quad (3.15)$$

Kde  $U_{(out)}$  požadované výstupní napětí [V],  $R_2$  a  $R_1$  odpory rezistorů v napěťovém děliči [ $\Omega$ ],  $U_{(ref)}$  referenční napětí [V]. Z rovnice 3.15 vyjádříme  $R_2$ .

$$\begin{aligned} R_2 &= R_1 \left( \frac{U_{(out)}}{U_{(ref)}} - 1 \right) \\ &= 1000 \left( \frac{15}{1,23} - 1 \right) \\ &= 11195 \quad [\Omega] \end{aligned} \quad (3.16)$$

Kde  $U_{(out)}$  požadované výstupní napětí [V],  $R_2$  a  $R_1$  odpory rezistorů v napěťovém děliči [ $\Omega$ ],  $U_{(ref)}$  referenční napětí [V]. Hodnota odporu rezistoru  $R_2$  vyšla 11,195 k $\Omega$ . Opět lze najít správnou dvojici rezistorů pro požadované napětí, pro naše použití zdroje bude na místě  $R_2$  zařazen více otáčkový trimr 50 k $\Omega$ , který bude nastaven na vypočtenou hodnotu  $R_2$ .

Při použití výstupního napětí nad 10 V se doporučuje použít kondenzátor  $C_{FF}$  Feed-forward Capacitor, pro zvýšení stability, který se zařadí paralelně k rezistoru  $R_2$  ve zpětné vazbě.



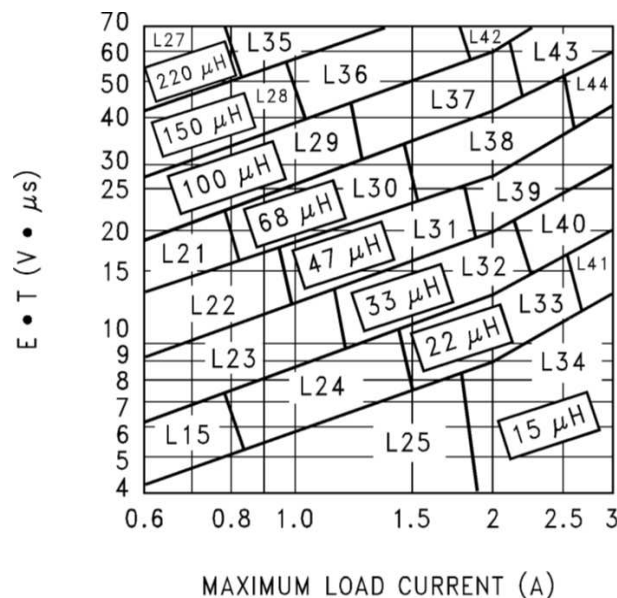
$$\begin{aligned}
 C_2 &= \frac{1}{31 \cdot 10^3 \cdot R_2} \\
 &= \frac{1}{31 \cdot 10^3 \cdot 11195} \\
 &= 288 \cdot 10^{-11} \text{ [F]}
 \end{aligned}
 \tag{3.17}$$

Kde  $C_2$  kapacita kondenzátoru ve zpětné vazbě [F],  $R_2$  odpor rezistoru ve zpětné vazbě [ $\Omega$ ]. Kapacita kondenzátoru vyšla na 2,88 nF do obvodu bude zařazen keramický kondenzátor vzhledem k jeho malému ESR o kapacitě 2,7 nF.

Nyní je potřeba určit konstantu  $E \cdot T$ , která nám poslouží k určení zbytku součástek za pomoci grafu, který dodává výrobce v katalogu. Saturační napětí spínacího prvku je 1,16 V a standardní úbytek na Schottkyho diodě bude okolo 0,5 V.

$$\begin{aligned}
 E \cdot T &= (U_{in} - U_{out} - U_{sat}) \left( \frac{U_{out} + U_D}{U_{in} - U_{sat} + U_D} \right) \left( \frac{1000}{150} \right) \\
 &= (24 - 15 - 1,16) \left( \frac{15 + 0,5}{24 - 1,16 + 0,5} \right) \left( \frac{1000}{150} \right) \\
 &= 34,71 \text{ [V} \cdot \mu\text{s]}
 \end{aligned}
 \tag{3.18}$$

Kde  $U_{in}$  vstupní napětí zdroje [V],  $U_{out}$  výstupní napětí zdroje [V],  $U_{sat}$  saturační napětí spínacího prvku [V],  $U_D$  úbytek napětí na diodě v propustném směru [V],  $E \cdot T$  konstanta [V ·  $\mu$ s].



**Obr. 3.4:** Volba vhodné indukčnosti cívky vzhledem k maximálnímu výstupnímu proudu a konstanty  $E \cdot T$  |Převzato z [8]|

Z obrázku 3.4 určíme minimální indukčnost cívky. Konstanta  $E \cdot T$  je 34,71 V ·  $\mu$ s, při požadovaném proudu 2,5 A nám bod na grafu spadá do oblasti L39, což znamená že naše

cívka musí mít indukčnost minimálně  $47 \mu\text{H}$ , podle kodu L39 se z tabulky v katalogu dozvíme konkrétní typ cívky, který doporučuje výrobce. Nejdůležitější je její proud, který by měl být minimálně 3,5 A. Zvolíme cívku odpovídající těmto parametrům.

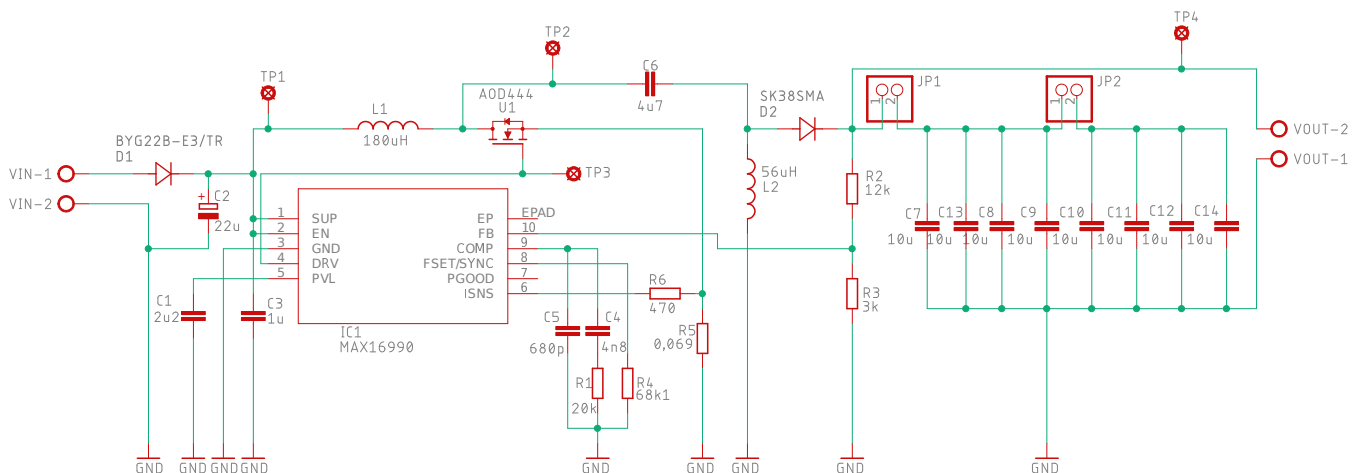
Pro výběr výstupních kondenzátorů opět zohledníme možnosti změny kapacity pro případné měření. K filtraci napětí jsou doporučeny tantalové nebo elektrolytické kondenzátory ve verzi LOW ESR pro použití na 100 kHz, doporučená výstupní kapacita je od  $82 \mu\text{F}$  do  $820 \mu\text{F}$ , s ohledem na použití zdroje tato podmínka nebude dodržena a bude možné dosáhnout i vyšší kapacity. Hlavní vliv na zvlnění má nejen samotná kapacita, ale i ESR tudíž je vhodné zapojení více kondenzátorů paralelně, to bude automaticky splněno jelikož budou opět instalovány kondenzátory o kapacitách  $2 \times 470 \mu\text{F}$  a  $1500 \mu\text{F}$ .

Pro výběr diody musíme dbát na její maximální proud, který by měl být 1,3 krát vyšší než je maximální výstupní proud a její závěrné napětí minimálně 1,25 krát vyšší než vstupní napětí. Tomuto vyhovuje dostatečně rychlá schottkyho dioda SB540-T [15], která bude použita v zapojení.

Je doporučen i vstupní kondenzátor pro eliminaci rušení do okolních obvodů. Na tomto místě bude zařazen kondenzátor o kapacitě  $470 \mu\text{F}$ .

### 3.3 Návrh měniče SEPIC s MAX16990

Měnič typu SEPIC bude realizován pomocí moderního PWM kontroléru MAX16990 [9], napěťový rozsah je od 3-36 V, pracovní frekvenci lze nastavit pomocí rezistoru od 100 kHz do 2,5 Mhz. Pro konstrukci byly určeny parametry, pracovní frekvence okolo 450 kHz, výstupní napětí 5 V při maximálním proudu 0,5 A, vstupní napětí se bude pohybovat v rozmezí od 4 V do 16 V. Maximálního výstupního proudu je dosaženo zvolenými indukčnostmi cívek a použitým tranzistorem, proto zde není pevně dán proudový limit obvodu. Schéma zapojení měniče 3.5.



Obr. 3.5: Zapojení měniče typu SEPIC

### 3.3.1 Určení hodnot součástek pro SEPIC měnič s MAX16990

Postup výpočtů dle manuálu od výrobce Maxim Integrated MAXREFDES1017 [10].

Nejdříve určíme minimální a maximální střední hodnoty proudů na vstupu měniče, které je možné reprezentovat jako proud primární cívky, aby bylo možné určit přibližnou hodnotu napětí a proudu na mosfetu a diodě. Pro výpočet použijeme požadovanou účinnost měniče a to 85 %.

$$\begin{aligned}
 I_{INavg-min} &= \frac{U_{out} \cdot I_{out-min}}{U_{in-max} \cdot \eta} \\
 &= \frac{5 \cdot 0,1}{16 \cdot 0,85} \\
 &= 0,0367 \quad [A]
 \end{aligned} \tag{3.19}$$

$$\begin{aligned}
 I_{INavg-max} &= \frac{U_{out} \cdot I_{out-max}}{U_{in-min} \cdot \eta} \\
 &= \frac{5 \cdot 0,5}{4 \cdot 0,85} \\
 &= 0,7352 \quad [A]
 \end{aligned} \tag{3.20}$$

Kde  $I_{INavg-min}$  minimální střední hodnota vstupního proudu [A],  $I_{INavg-max}$  maximální střední hodnota vstupního proudu [A],  $U_{out}$  výstupní napětí [V],  $I_{out-max}$  maximální výstupní proud [A],  $I_{out-min}$  minimální výstupní proud [A],  $U_{in-min}$  minimální vstupní napětí [V],  $U_{in-max}$  maximální vstupní napětí,  $\eta$  požadovaná účinnost měniče [-].

Nyní můžeme určit přibližnou hodnotu špičkového proudu mosfet tranzistorem, ten je dán součtem střední hodnoty proudu cívky a zvlnění proudu na cívce. Parametr LIR udává poměr špičkové hodnoty proudu ku střední hodnotě vstupního proudu. Pro výpočet budeme používat  $LIR=0,5$  při maximálních výstupních a vstupních proudech.

$$\begin{aligned}
 I_{mos-pk} &= (I_{INavg-max} + I_{out-max}) \cdot \left(1 + \frac{LIR}{2}\right) \\
 &= (0,7352 + 0,5) \cdot \left(1 + \frac{0,5}{2}\right) \\
 &= 1,3635 \quad [A]
 \end{aligned} \tag{3.21}$$

Kde  $I_{mos-pk}$  předpokládaná hodnota špičkového proudu mosfetem [A],  $I_{INavg-max}$  maximální střední hodnota vstupního proudu [A],  $I_{out-max}$  maximální výstupní proud [A],  $LIR$  maximální zvlnění proudu cívky [-]

Z rovnice 3.21 získáme maximální špičkový proud mosfetem, který je 1,3635 A, pro volbu tranzistoru ještě určíme maximální závěrné napětí dle rovnice 3.23, úbytek na schottkyho diodě volíme obvykle 0,5 V.

$$\begin{aligned}
U_{DSmax} &= U_{in-max} + U_{out-max} + U_D \\
&= 16 + 5 + 0,5 \\
&= 21,5 \quad [V]
\end{aligned} \tag{3.22}$$

Kde  $U_{DSmax}$  maximální napětí drain-source na mosfetu [V],  $U_{in-max}$  maximální vstupní napětí [V],  $U_{out-max}$  maximální výstupní napětí [V],  $U_D$  napětí na diodě v propustném směru [V].

Když máme základní parametry mosfetu musíme ještě uvážit spínací frekvenci, která je 450 kHz a napětí na GATE, které je maximálně 5 V, vybraný mosfet by měl mít při tomto napětí co nejmenší odpor mezi drainem a sourcem. Pro realizaci použijeme tranzistor AOD444 [13], který svými parametry dostatečně vyhovuje. Předpokládáme velmi malé zahřátí při provozu, proto nemusíme uvažovat změnu odporu sepnutého kanálu. Odpor sepnutého kanálu je 65 m $\Omega$  při napětí gate-source 5 V. Pro určení indukčnosti cívek musíme spočítat minimální a maximální střihu spínání dle rovnic 3.23 a 3.24. Pro výpočet zanedbáme snímací rezistor proudu tranzistoru a jeho hodnotu položíme rovno 0.

$$\begin{aligned}
D_{min} &= \frac{U_{out} + U_D}{U_{in-max} + U_{out} + U_D - [(R_{DS} + R_{sense}) \cdot (I_{INavg-min} + I_{out-min})]} \\
&= \frac{5 + 0,5}{16 + 5 + 0,5 - [0,065 + 0] \cdot (0,0367 + 0,1)} \\
&= 0,2559 \quad [-]
\end{aligned} \tag{3.23}$$

$$\begin{aligned}
D_{max} &= \frac{U_{out} + U_D}{U_{in-min} + U_{out} + U_D - [(R_{DS} + R_{sense}) \cdot (I_{INavg-max} + I_{out-max})]} \\
&= \frac{4 + 5 + 0,5}{4 + 5 + 0,5 - [(0,065 + 0) \cdot (0,7352 + 0,5)]} \\
&= 0,5838 \quad [-]
\end{aligned} \tag{3.24}$$

Kde  $D_{min}$  minimální střída PWM na vstupu mosfetu [-],  $D_{max}$  maximální střída PWM na vstupu mosfetu [-],  $U_{out}$  výstupní napětí [V],  $U_D$  napětí na diodě v propustném směru [V],  $U_{in-max}$  maximální vstupní napětí [V],  $U_{in-min}$  minimální vstupní napětí [V],  $R_{DS}$  odpor mosfetu v sepnutém stavu [ $\Omega$ ],  $R_{sense}$  odpor rezistoru snímajícího proud mosfetem [ $\Omega$ ],  $I_{INavg-max}$  maximální střední hodnota vstupního proudu [A],  $I_{out-max}$  maximální výstupní proud [A].

Když máme rozsah střídý řídicího signálu můžeme zkontrolovat, zda je v rozmezí, které zvládne obvod MAX16990. Hodnoty by měli být v rozmezí 4% až 94%, toto je splněno, proto můžeme pokračovat určením minimálních indukčností cívek.

$$\begin{aligned}
L_1 &= \frac{(U_{out} + U_D) \cdot (1 - D_{min})}{2 \cdot f_{sw} \cdot I_{INavg-min}} \\
&= \frac{(5 + 0,5) \cdot (1 - 0,2559)}{2 \cdot 450 \cdot 10^3 \cdot 0,0367} \\
&= 123 \cdot 10^{-6} \quad [H]
\end{aligned} \tag{3.25}$$

$$\begin{aligned}
L_2 &= \frac{(U_{out} + U_D) \cdot (1 - D_{min})}{2 \cdot f_{sw} \cdot I_{out-min}} \\
&= \frac{(5 + 0,5) \cdot (1 - 0,2559)}{2 \cdot 450 \cdot 10^3 \cdot 0,1} \\
&= 45 \cdot 10^{-6} \quad [H]
\end{aligned} \tag{3.26}$$

Kde  $L_1$  minimální indukčnost primární cívky  $[H]$ ,  $L_2$  minimální indukčnost sekundární cívky  $[H]$ ,  $D_{min}$  minimální střída PWM na vstupu mosfetu  $[-]$ ,  $D_{max}$  maximální střída PWM na vstupu mosfetu  $[-]$ ,  $U_{out}$  výstupní napětí  $[V]$ ,  $U_D$  napětí na diodě v propustném směru  $[V]$ ,  $f_{sw}$  spínací frekvence měniče  $[Hz]$ ,  $I_{INavg-min}$  minimální střední hodnota vstupního proudu  $[A]$ ,  $I_{out-min}$  minimální výstupní proud  $[A]$ .

Z rovnic 3.25 a 3.26 jsme zjistili minimální indukčnosti cívek. V konstrukci na místě  $L_1$  bude cívka o indukčnosti  $180 \mu H$  a na pozici  $L_2$  bude cívka o indukčnosti  $56 \mu H$ . Ještě zbývá určit maximální špičkový proud cívek. Nejdříve zjistíme skutečnou hodnotu parametru  $LIR$ .

$$\begin{aligned}
LIR_1 &= \frac{(U_{out} + U_D) \cdot (1 - D_{max})}{L_1 \cdot f_{sw} \cdot I_{INavg-max}} \\
&= \frac{(5 + 0,5) \cdot (1 - 0,5838)}{180 \cdot 10^{-6} \cdot 450 \cdot 10^3 \cdot 0,7352} \\
&= 0,03843 \quad [-]
\end{aligned} \tag{3.27}$$

$$\begin{aligned}
LIR_2 &= \frac{(U_{out} + U_D) \cdot (1 - D_{max})}{L_2 \cdot f_{sw} \cdot I_{out-max}} \\
&= \frac{(5 + 0,5) \cdot (1 - 0,5838)}{56 \cdot 10^{-6} \cdot 450 \cdot 10^3 \cdot 0,5} \\
&= 0,18167 \quad [-]
\end{aligned} \tag{3.28}$$

Kde  $LIR_1$  poměr zvlnění proudu na cívce  $L_1$   $[-]$ ,  $LIR_2$  poměr zvlnění proudu na cívce  $L_2$   $[-]$ ,  $U_{out}$  výstupní napětí zdroje  $[V]$ ,  $U_D$  úbytek napětí na usměrňovací diodě  $[V]$ ,  $f_{sw}$  spínací frekvence měniče  $[Hz]$ ,  $L_1$  použitá indukčnost primární cívky  $[H]$ ,  $L_2$  použitá indukčnost sekundární cívky  $[H]$ ,  $D_{max}$  maximální střída spínání  $[-]$ ,  $I_{INavg-max}$  maximální střední hodnota vstupního proudu měniče,  $I_{out-max}$  maximální výstupní proud měniče  $[A]$ .

Dle rovnice 3.29 a 3.30 určíme maximální proud cívkami a z rovnice 3.32 určíme skutečnou hodnotu špičkového proudu mosfetem.

$$\begin{aligned}
 I_{L1pk} &= I_{INavg-max} \cdot \left(1 + \frac{LIR_1}{2}\right) \\
 &= 0,7352 \cdot \left(1 + \frac{0,03843}{2}\right) \\
 &= 0,7493 \quad [A]
 \end{aligned} \tag{3.29}$$

$$\begin{aligned}
 I_{L2pk} &= I_{out-max} \cdot \left(1 + \frac{LIR_2}{2}\right) \\
 &= 0,5 \cdot \left(1 + \frac{0,18167}{2}\right) \\
 &= 0,5454 \quad [A]
 \end{aligned} \tag{3.30}$$

$$\begin{aligned}
 I_{mos-pk} &= I_{L1PK} + I_{L2PK} \\
 &= 0,7493 + 0,5454 \\
 &= 1,2947 \quad [A]
 \end{aligned} \tag{3.31}$$

Kde  $I_{L1pk}$  špičkový proud cívkou  $L_1$  [A],  $I_{L2pk}$  špičkový proud cívkou  $L_2$  [A],  $I_{INavg-max}$  maximální střední hodnota vstupního proudu měniče,  $LIR_1$  poměr zvlnění proudu na cívce  $L_1$  [-],  $LIR_2$  poměr zvlnění proudu na cívce  $L_2$ ,  $I_{out-max}$  maximální výstupní proud měniče [A],  $I_{mos-pk}$  skutečná špičková hodnota proudu mosfetem [A]. Obdrželi jsme hodnoty špičkových proudů, na které musíme dimenzovat zvolené cívky. Skutečná špičková hodnota proudu mosfetu je 1,2947 A, což náš zvolený tranzistor AOD444, zvládá bez problémů i při napětí mezi gate a source 5 V.

Zbývá ještě určit hodnotu vazebního kondenzátoru  $C_6$ , začneme určením efektivní hodnoty proudu, který přes něj poteče a následně určíme jeho maximální ESR a minimální vlastní kapacitu. Zvlnění na kondenzátoru je dáno příslušnou hodnotou kapacity a ESR kondenzátoru. Předpokládáme zvlnění 1 %.

$$\begin{aligned}
 I_{C6} &= I_{out-max} \sqrt{\frac{D_{max}}{1 - D_{max}}} \\
 &= 0,5 \sqrt{\frac{0,5833}{1 - 0,5833}} \\
 &= 0,591 \quad [A]
 \end{aligned} \tag{3.32}$$

$$\begin{aligned}
 ESR_{min} &= \min \left[ \frac{0,01 \cdot U_{in-min}}{I_{L1pk}}; \frac{0,01 \cdot U_{in-min}}{I_{L2pk}} \right] \\
 &= \min \left[ \frac{0,01 \cdot 4}{0,7493}; \frac{0,01 \cdot 4}{0,5454} \right] \\
 &= \min [0,053; 0,073] \\
 &= 0,053 \quad [\Omega]
 \end{aligned} \tag{3.33}$$

$$\begin{aligned}
C_{6-min} &= \frac{I_{out-max} \cdot D_{max}}{0,05 \cdot U_{in-min} \cdot f_{sw}} \\
&= \frac{0,5 \cdot 0,5833}{0,05 \cdot 4 \cdot 450 \cdot 10^3} \\
&= 3,24 \cdot 10^{-6} \quad [F]
\end{aligned} \tag{3.34}$$

Kde  $I_{C6}$  efektivní hodnota proudu kondenzátorem [A],  $I_{out-max}$  maximální výstupní proud [A],  $ESR_{min}$  minimální hodnota ESR vazebního kondenzátoru [ $\Omega$ ],  $C_{6min}$  minimální hodnota kapacity vazebního kondenzátoru [F].

Obdrželi jsme hodnoty potřebné pro určení vazebního kondenzátoru, minimální ESR 0,053 [ $\Omega$ ] nám poskytne keramický kondenzátor v pouzdře 1206, minimální kapacita je 3,24  $\mu F$  lepší je vždy zvolit o trochu větší kapacitu pro garanci co nejmenšího zvlnění napětí, proto volíme kapacitu 4,7  $\mu F$  a napětí určíme podle maximálního vstupního tedy 16 V.

Jelikož obvod poskytuje nadproudovou ochranu musíme dále určit rezistor, na kterém se snímá proud mosfetem. Obvod zareaguje při napětí na pinu ISNS 212 mV, toto napětí je definováno úbytkem na snímacím rezistoru a na rezistoru pro kompenzaci. Je vhodné nechat 100 mV pro kompenzaci a proto volíme napětí na snímacím rezistoru 112 mV. Proud mosfetem volíme o 20 % větší než je maximální špičkový proud, aby nedošlo k nevhodnému vypínání obvodu, když se jeho zátěž bude blížit k maximu.

$$\begin{aligned}
R_5 &= \frac{0,112}{1,2 \cdot I_{mos-pk}} \\
&= \frac{0,112}{1,2 \cdot 1,2947} \\
&= 0,072 \quad [\Omega]
\end{aligned} \tag{3.35}$$

Hodnota snímacího rezistoru  $R_5$  nám vyšla 72 m $\Omega$  této hodnoty přibližně dosáhneme paralelním zapojením rezistorů o odporech 0,22 a 0,10  $\Omega$  výsledná hodnota je pak 68,75 m $\Omega$ .

Výstupní kapacitu budeme opět volit vhodně i pro možnosti její změny. Určíme minimální ESR a kapacitu výstupních kondenzátorů pro maximální zvlnění 25 mV

$$\begin{aligned}
ESR &= \frac{0,5 \cdot U_{out-ripple}}{I_{L1pk} + I_{L2pk} - I_{out-max}} \\
&= \frac{0,5 \cdot 0,025}{0,7493 + 0,5454 - 0,5} \\
&= 0,016 \quad [\Omega]
\end{aligned} \tag{3.36}$$

$$\begin{aligned}
C_{out} &= \frac{I_{out-max} \cdot D_{max}}{0,5 \cdot U_{out-ripple} \cdot f_{sw}} \\
&= \frac{0,5 \cdot 0,5838}{0,5 \cdot 0,025 \cdot 450 \cdot 10^3} \\
&= 51,84 \cdot 10^{-6} \quad [F]
\end{aligned} \tag{3.37}$$

Kde  $ESR$  minimální sériový odpor kondenzátorů  $[\Omega]$ ,  $C_{out}$  minimální výstupní kapacita  $[F]$ ,  $U_{out-ripple}$  maximální požadované zvlnění napětí na výstupu  $[V]$ .

Hodnota kapacity nám vyšla  $52 \mu F$ , zvolíme kondenzátory o kapacitě  $80 \mu F$ , s možností snížení kapacity na polovinu, velmi nízké ESR nám zaručí paralelní spojení kondenzátorů, toto je realizováno pomocí paralelního spojení 8 kondenzátorů s kapacitami  $10 \mu F$ .

Výstupní napětí zdroje určíme odporovým děličem, interní reference je  $1 V$ . Hodnotu rezistoru  $R_3$  zvolíme na  $3K\Omega$ , pak hodnotu odporu  $R_2$  určíme dle rovnice 3.38.

$$\begin{aligned}
R_2 &= \frac{R_3 \cdot (U_{out} - U_{ref})}{U_{ref}} \\
&= \frac{3000 \cdot (5 - 1)}{1} \\
&= 12000 \quad [\Omega]
\end{aligned} \tag{3.38}$$

Kde  $R_2$  hledaný odpor rezistoru v děliči  $[\Omega]$ ,  $U_{out}$  požadované výstupní napětí zdroje  $[V]$ ,  $U_{ref}$  interní napěťová reference obvodu  $[V]$ .

Nastavení požadované frekvence okolo  $450 kHz$  provedeme pevným rezistorem  $R_4$  na hodnotu  $68,1 k\Omega$

Na závěr určíme hodnoty kompenzačního členu (slope compensation), v aplikačním manuálu [16] je doporučeno použít kalkulačku v excelu, kterou dodává výrobce, protože určení pro měniče SEPIC by bylo velmi komplikované. Pro nejhorší možné hodnoty  $U_{in} = 4 V$  a  $I_{out} = 0,1 A$  z kalkulačky dostáváme bezpečnost ve fázi  $78,4^\circ$  a zlomovou frekvenci  $5248 Hz$ , hodnoty součástí  $R_6 = 470 \Omega$ ,  $R_1 = 20 k\Omega$ ,  $C_5 = 680 pF$  a  $C_4 = 4,8 nF$ .

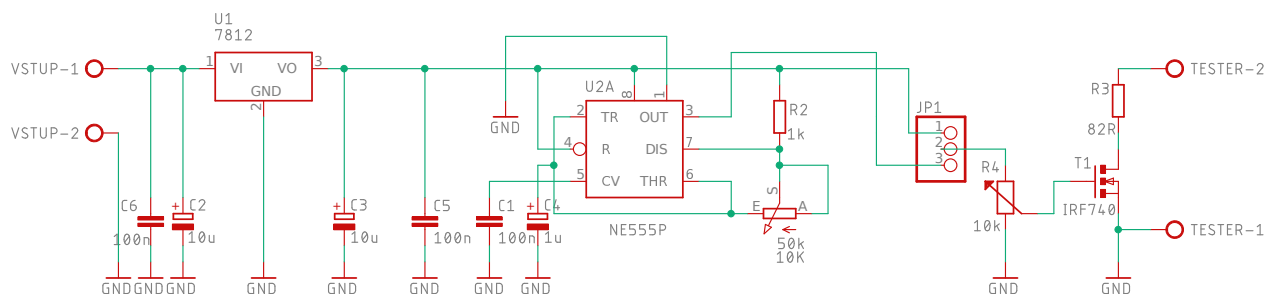


# 4

## Návrh přípravků pro měření

### 4.1 Návrh přípravku pro dynamické a statické testování zdrojů

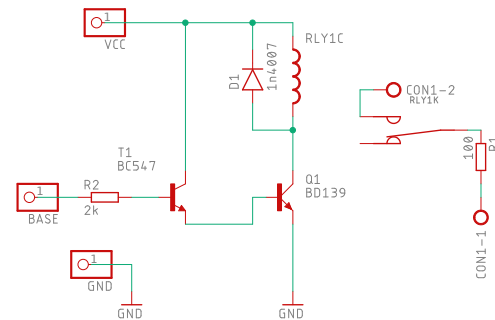
Pro testování zdrojů na skokovou odezvu je třeba vytvořit přípravek, který bude definovanou zátěž periodicky připojovat a odpojovat od zdroje, pro jednoduché odměření hodnot pomocí osciloskopu. Zapojení bude realizováno s interním zdrojem obdélníkového signálu o frekvenci 100 Hz s obvodem NE555P. Frekvence 100 Hz nemusí být vhodná pro měření všech typů zdrojů, proto bude zapojení vybaveno možností připojení externího funkčního generátoru. Zátěž bude realizována odporem o hodnotě 82  $\Omega$ , který bude připínán tranzistorem k zemi. Napětím na gatu tranzistoru bude možné tento odpor ještě zvětšit, proto je v konstrukci zařazen potenciometr, který toto řeší. Na potenciometr je možné připojit signál z interního nebo externího generátoru pro dynamické testování i stejnosměrné napětí 12 V pro statické testování. Tester je možné napájet napětím větším než 12 V, jelikož je použit regulátor 7812. Interní napětí je zvoleno právě na 12 V, aby bylo možné tranzistor IRF740 plně otevírat a to i pomocí napětí z časovače 555. Zapojení testeru viz obrázek 4.1.



Obr. 4.1: Zapojení přípravků pro testování zdrojů

## 4.2 Návrh přípravku pro dynamické testování zdroje záporného napětí

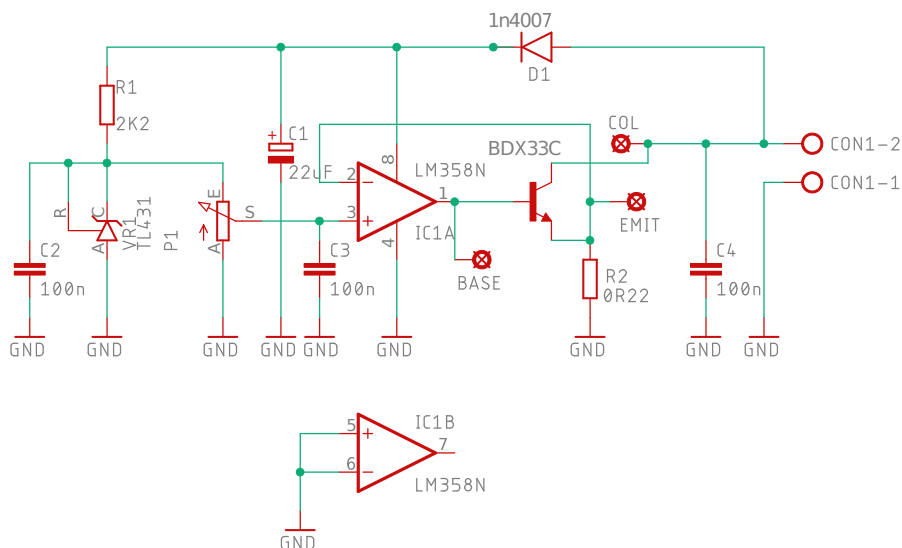
Pro dynamické testování na zdroji invertujícím, je problém se spojením zemí, aby bylo možné i na tomto zdroji provést dynamické měření je použito relátko, které připíná rezistor o odporu  $100\ \Omega$  na zem. Pro řízení je použit funkční generátor, hlavní nevýhoda je možnost testovat jen v jednotkách Hz. Schéma zapojení tohoto testeru na obrázku 4.2.



Obr. 4.2: Zapojení přípravků pro testování zdroje se záporným napětím

## 4.3 Návrh přípravku pro měření zatěžovacích charakteristik

Pro změření zatěžovacích charakteristik zdrojů je možné použít proměnný rezistor a odečítat hodnoty napětí a proudů. Je však jednodušší vytvořit elektronickou zátěž, kde bude možné hodnotu proudu pevně nastavit a odečítat napětí. Proto byla vytvořena jednoduchá elektronická zátěž viz obrázky 4.3.



Obr. 4.3: Zapojení elektronické zátěže

Pomocí obvodu napěťové reference TL431 s rezistorem  $R_1$  je vytvořena teplotně kompenzovaná stabilní reference 2,5 V. Pomocí trimru  $P_1$  je toto napětí regulováno od 0 - 2,5 V, které je pomocí operačního zesilovače LM358 porovnáváno s napětím na rezistoru  $R_2$ , který snímá proud. OZ se snaží napětí vyrovnat, proto pouští proud na bázi darlingtonového tranzistoru BDX33C, který je externě připojen ke chladiči. Operační zesilovač udržuje konstantní úbytek na snímacím rezistoru a tím udržuje konstantní proud zátěží i při změně napětí. Dioda  $D_1$  slouží pro ochranu při přepólování vstupních svorek. V konstrukci je použito několik keramických kondenzátorů o hodnotě 100 nF pro zvýšení stability regulace a hlavní filtrační kondenzátor o hodně 22  $\mu F$

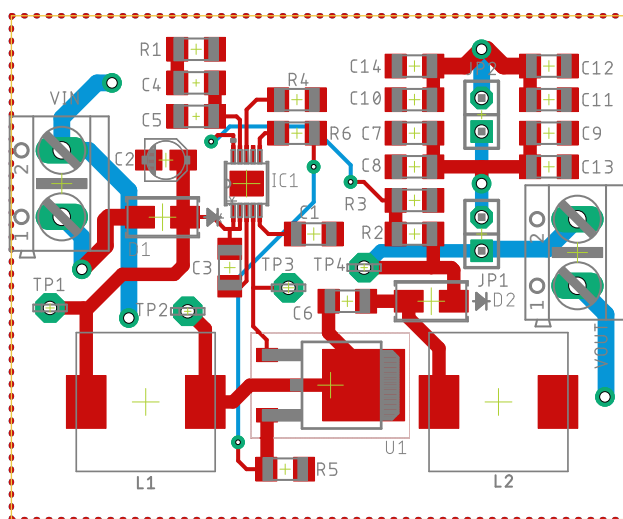
Hlavní výhoda této konstrukce spočívá v tom, že je napájena z testovaného zdroje, díky tomu není problém testovat i zdroj záporného napětí. Svorka GND na testovaném zdroji by se připojila na kladný vstup přípravku a záporná svorka zdroje na vstup GND přípravku.

Nevýhodou je nemožnost testovat při malém napětí, které již nestačí na práci OZ, toto napětí je ještě menší o úbytek na ochranné diodě. Pro testování našich zdrojů toto není problém. Nejnižší napětí je u měniče SEPIC a to 5 V, kde je stále obvod plně funkční.

# 5

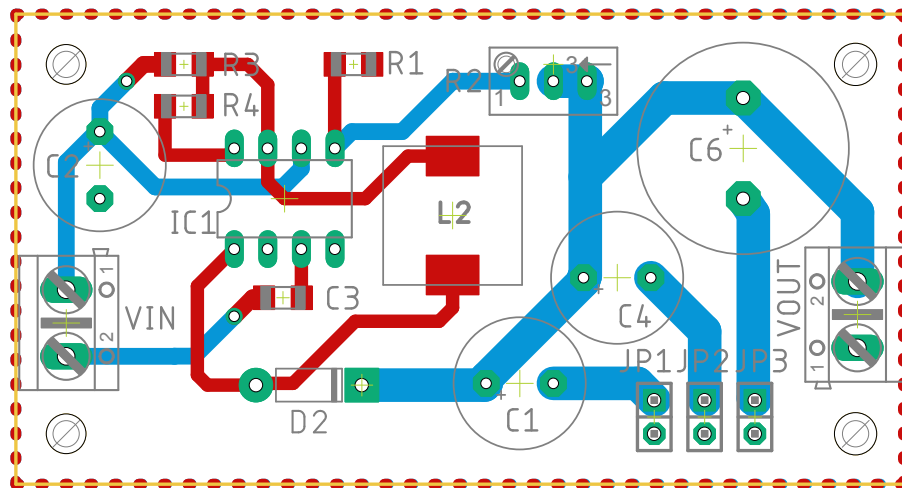
## Návrhy desek plošných spojů

Při návrhu plošných spojů byla snaha o dosažení co nejhustšího rozložení součástek. Vzhledem k tomu, že jsou použité THT i SMD součástky není využití místa optimální, nejvýhodnější by bylo umístit THT z vrchní strany a SMD ze spodní strany, tím by se významně snížila velikost desek. Jelikož jsou zařízení určeny pro studijní účely, tak jsou všechny součástky umístěny z vrchní strany pro snadnější měření (u desky zdroje SEPIC, která je z velké části osazena SMD součástkami, jsou k dispozici i měřící body na hlavních částech obvodu). Realizace desek je poměrně jednoduchá, proto byla doporučena výroba na CNC frézce (některé desky jsou udělány i fotocestou). Pro oba případy platí, že desky mají nepokovené otvory, tento fakt značně zkomplikoval návrhy desek. Bylo nutné vše dobře rozmyslet a případné prokovy realizovat pomocí drátků, které se připájely do otvorů. Všechny DPS by šli realizovat pouze jednovrstvé, toto však nebylo splněno vzhledem k tomu, že druhá vrstva mědi slouží jako stínění a snižuje rušení. Např. zpětná vazba pro regulaci napětí je vedena na opačné straně desky, než výkonová část. Desky pro měření byly realizovány pouze na jedné vrstvě. Ukázka DPS pro měnič zvyšující neinvertující a SEPIC viz obrázky 5.2 a 5.1, ostatní DPS viz přílohy.



Obr. 5.1: Realizace DPS pro měnič SEPIC (bez rozlité mědi)

Při rozmístění součástek u měničů bylo dbáno na vhodné umístění: časovací a filtrační kondenzátory co nejbližší k obvodu, obvody zpětné vazby co nejdále od cívek, aby se do nich neindukovalo rušivé napětí, velikosti cest pro vedení většího proudu byly realizovány tlustšími vodivými cestami, snaha byla i o použití co největších cest, tam kde nejsou nezbytné pro jednoduché modifikace a možnosti připojení vodičů. Nejtenčí cesty byly použity v měniči SEPIC, vzhledem k pouzdru použitého obvodu ( $\mu MAX$ ).



**Obr. 5.2:** Realizace DPS pro zvyšující měnič (bez rozlité mědi)

Neprokožené otvory byly problém i v případě použití integrovaného obvodu s patičí, jelikož jsou vodivé cesty přivedeny k obvodu jak z horní tak ze spodní strany. Toto by šlo jednoduše vyřešit pomocí úpravy návrhu DPS na jednu vrstvu. V realizaci nejsou patice použity a obvody jsou zapájeny z vrchní i spodní strany. Velkou nevýhodou, však je nemožnost výměny obvodu v případě jeho zničení.

Desky měničů byly původně koncipovány jenom na THT technologii včetně použitých cívek. Nakonec bylo doporučeno použít SMD cívky, vzhledem k jejich velikosti a velké dostupnosti. Následně byly vyměněny i rezistory za SMD, pro snížení velikosti desek. Většina kondenzátorů zůstala v THT provedení vzhledem k tomu, že dostupnost LOW ESR kondenzátorů v SMD byla značně horší. Naopak deska měniče SEPIC byla koncipována primárně na SMD technologii, jelikož pouzdro samotného obvodu je velmi malé a výstupní kapacita měniče vzhledem k pracovním frekvencím je malá v řádu desítek  $\mu F$ , to umožnilo použití keramických kondenzátorů na výstupu zdroje (toto bylo také doporučeno v katalogovém listu obvodu max16990).

# 6

## Měření na zdrojích

### 6.1 Cíle měření

Cílem je otestovat vypočítané parametry měničů tzn. schopnost dodávat proud při stabilním výstupním napětí v celém rozsahu výstupních proudů. Dále ověříme tuto závislost pro změnu kapacity a vstupního napětí.

Pro správnou funkci obvodů, které jsou napájené měničem, je důležité zvlnění napětí na výstupu, zaměříme se na jeho závislost na kapacitě při konstantní zátěži.

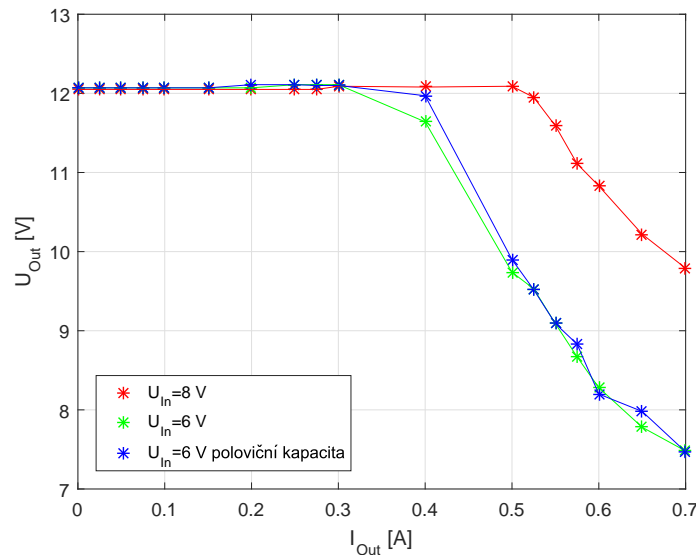
Pro použití zdroje tam, kde má výstupní proud pulzující charakter je dobré otestovat reakci zdroje na skokovou změnu zátěže, ta by měla být velmi závislá na výstupní kapacitě měniče.

Hlavní výhodou měničů je jejich vysoká účinnost, zaměříme se proto na její určení pro všechny měniče a různé zátěže.

### 6.2 Měření výstupních charakteristik zdrojů

Pro toto měření použijeme přípravek proudové zátěže, jednotlivé zdroje připojíme přes ampérmetr k přípravku (pro měření proudu) a paralelně k výstupu zdroje připojíme voltmetr pro měření napětí. Následně budeme odečítat hodnoty napětí a proudu v rozsahu určeném pro daný měnič. Hodnoty proudu budeme dále zvyšovat, aby zareagovala nadproudová ochrana případně než napětí bude značně menší, než je nominální hodnota. Toto provedeme pro různá vstupní napětí a výstupní kapacity měniče. Na obrázku 6.1 je zobrazena zatěžovací charakteristika pro zvyšující měnič s MC34063AP. Z grafu vidíme, že výstupní napětí měniče je stabilní i při dvojnásobném proudu, než pro který je měnič dimenzován, toto je pravděpodobně dáno vyšší použitou indukčností cívky. Závislost na vstupním napětí je značná, ale výstupní proud je stále v mezích. Při změně kapacity na polovinu nebyla téměř žádná viditelná změna, malé odchylky by se daly vysvětlit chybou měření. Velmi malá závislost na změnu kapacity byla prokázána i u ostatních měničů, proto tato závislost již není v dalších charakteristikách.

Podobný tvar charakteristiky je i u zvyšujícího invertujícího měniče realizovaný stejným obvodem. Naopak u snižujícího měniče je výstupní napětí velmi stabilní a to i při větší zátěži, než na kterou je měnič dimenzován. U Obvodu SEPIC s MAX16990 se při překonání maximálního proudu aktivuje nadproudová ochrana a obvod jen cykluje dokud není zátěž snížena. Charakteristiky ostatních měničů viz přílohy.



Obr. 6.1: Zatěžovací charakteristika pro zvyšující měnič

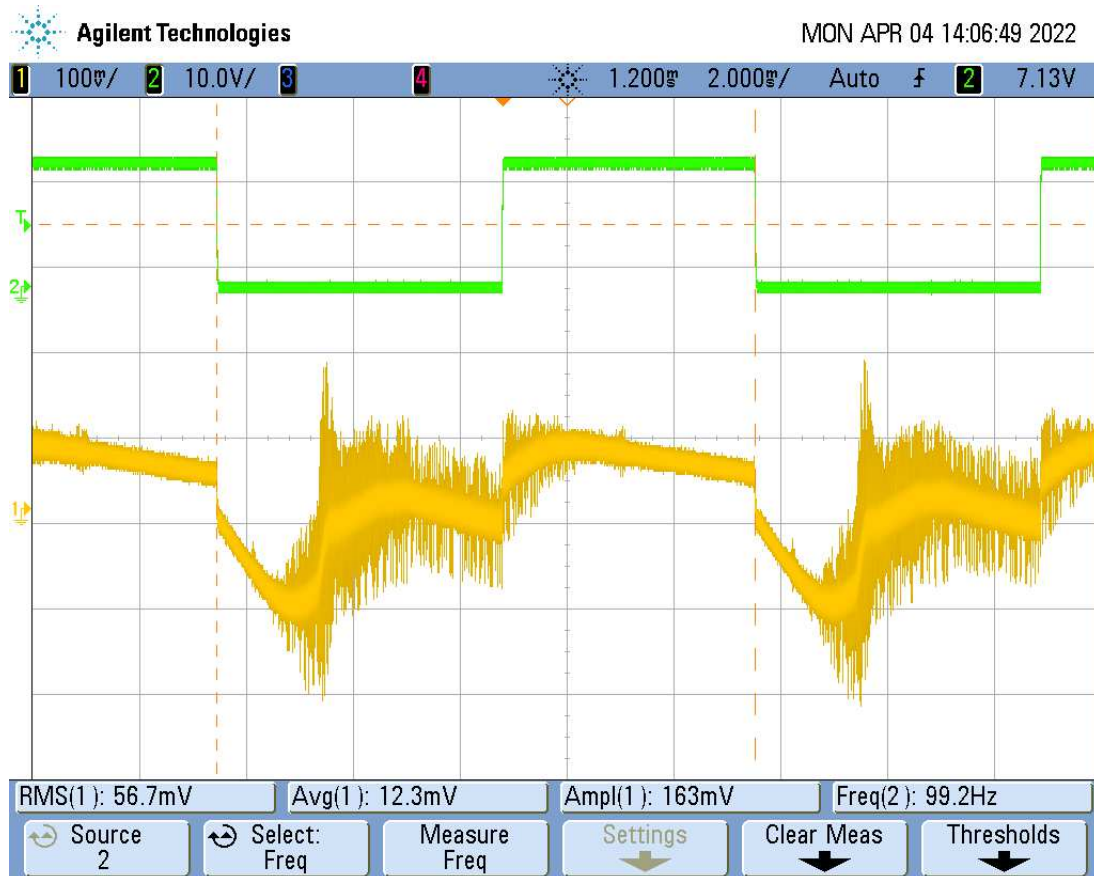
### 6.3 Měření reakce na skokovou změnu zátěže zdroje

Při měření odezvy na skokovou zátěž měniče použijeme přípravek pro dynamické měření. Tento přípravek se připojí na zdroj externího napájení v našem případě 15 V pro napájení interního zdroje spínacího signálu o frekvenci 100 Hz. Měřený spínaný zdroj se připojí k napájení, napětí bude v polovině dovolených hodnot pro daný měnič a jeho výstup se připojí k přípravku pro dynamické testování na svorky k tomu určené. Osciloskopem se bude snímat napětí na výstupu měniče a na spínacím tranzistoru v přípravku, aby bylo patrné, jaká je reakce na připojení zátěže a na její následné odpojení. Spínací zátěž je 82  $\Omega$ , což zajistí dostatečný proud k otestování reakce pro měniče s výstupním napětím 12 a 15 V.

U měniče SEPIC s výstupním napětím jen 5 V je k zatěžovacímu rezistoru připojen další rezistor pro zvýšení výstupního proudu, aby byly změny znatelné. Vzhledem k typu měniče je vhodné spínací frekvenci zátěže zmenšit na 10 Hz, při které bude provedeno měření. To je zajištěno přípravkem, místo interního zdroje spínací frekvence se připojí funkční generátor. U tohoto měření je na osciloskopu použit i 3 kanál pro zobrazení napětí přímo na generátoru.

U měniče se záporným napětím bude použit přípravek s relátkem. Spínací frekvence se opět nastaví externě funkčním generátorem v tomto případě na hodnotu 2 Hz.

Měření se provedou pro různé hodnoty výstupní kapacity. Na obrázku 6.2 jsou zobrazeny reakce na skokovou změnu zátěže u snižujícího měniče s LM2596 s maximální kapacitou tj.  $2440 \mu F$ . Při nižší kapacitě se reakce značně zvětšila, což je předpokládáno. Tento předpoklad se potvrdil i u ostatních měničů s výjimkou měniče SEPIC, kde při snížení kapacity byly zaznamenány větší špičky na výstupním napětí při rozepnutí zátěže. Průběhy napětí pro ostatní měniče a výstupní kapacity viz přílohy.



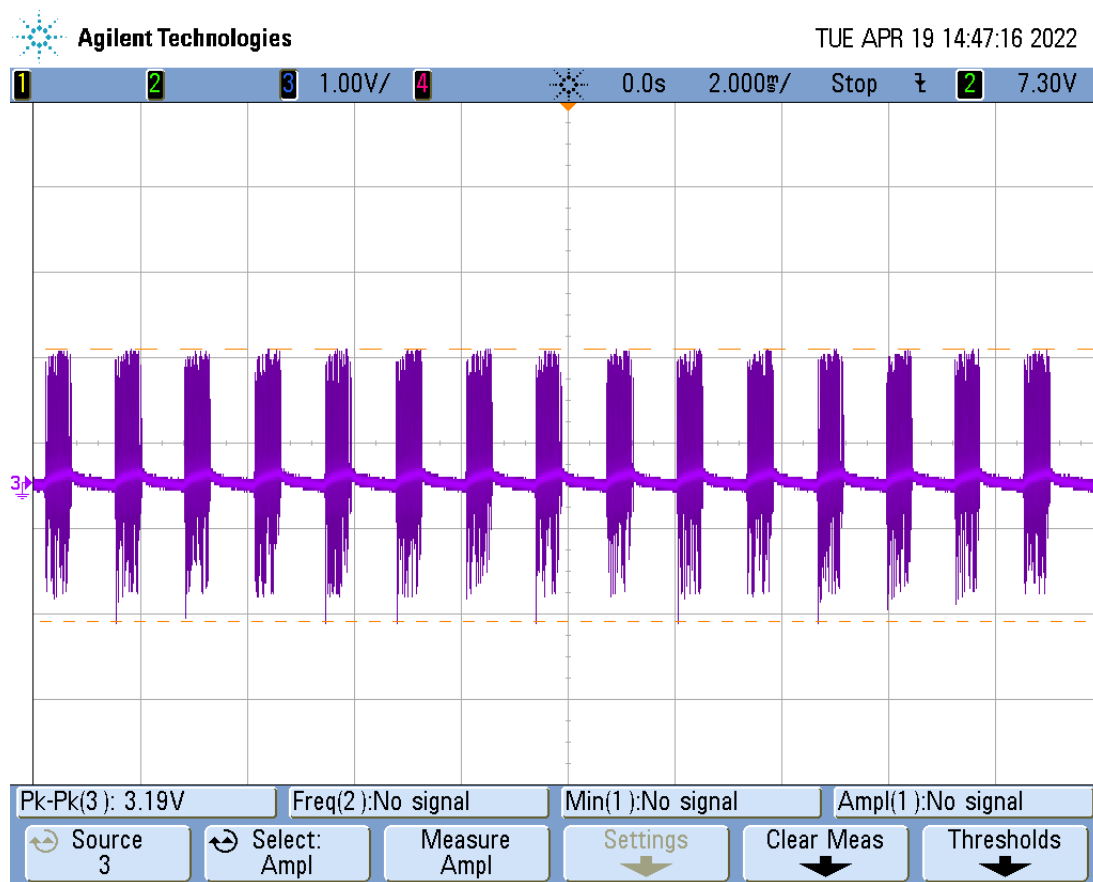
Obr. 6.2: Reakce na skokovou změnu zátěže u snižujícího měniče  $\mu F$

## 6.4 Měření zvlnění výstupního napětí při změně kapacity

V tomto úkonu se zaměříme na měření zvlnění výstupního napětí pro různé výstupní kapacity měničů. Měření bude realizováno při maximálním proudu pro který jsou měniče navrženy, aby bylo zvlnění co největší a dobře měřitelné, toho docílíme přípravkem elektronické zátěže, který byl použit i pro měření zatěžovacích charakteristik. Zapojení bude stejné s tím rozdílem, že na výstupní svorky zapojíme osciloskop. Předpokládáme větší zvlnění při snížení kapacity, toto se opět potvrdilo pro všechny měniče kromě SEPICu, kde při změně kapacity ze  $40 \mu F$  na  $80 \mu F$  nebyla patrná téměř žádná změna zvlnění výstupního napětí.



Na obrázku 6.3 je zobrazeno zvlnění výstupního napětí zvyšujícího měniče pro maximální kapacitu tj.  $2440 \mu F$ .



Obr. 6.3: Zvlnění výstupního napětí u zvyšujícího měniče s výstupní kapacitou  $2440 \mu F$

## 6.5 Měření účinnosti měničů

Měření účinnosti je provedeno za pomoci přípravku elektronické zátěže, jsou získány hodnoty napětí a proudu na vstupní a výstupní straně měniče. Z hodnot napětí a proudů jsou vypočteny výkony a následně je určena účinnost jako poměr výkonu výstupního ku vstupnímu. Příklady výpočtu dle rovnic 6.1-6.3.

$$P_1 = U_1 \cdot I_1 = 23 \cdot 0,37 = 8,51 \quad [W] \quad (6.1)$$

$$P_2 = U_2 \cdot I_2 = 14,97 \cdot 0,50 = 7,48 \quad [W] \quad (6.2)$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \frac{7,48}{8,51} \cdot 100 = 87,9 \quad [\%] \quad (6.3)$$

Hodnoty účinnosti pro ostatní zátěže a měniče viz níže.

$U_1$ [V]	$I_1$ [A]	$P_1$ [W]	$U_2$ [V]	$I_2$ [A]	$P_2$ [W]	$\eta$ [%]
23	0.37	8.51	14.97	0.5	7.48	87,9
23	0.72	16.56	14.97	1.0	14.97	90.3
23	1.08	24.84	14.94	1.5	22.41	90.3
22.8	1.47	33.52	14.91	2.0	29.82	88
22.7	1.86	42.22	14.88	2.5	37.2	88.1

**Tab. 6.1:** Měření účinnosti pro snižující měnič

$U_1$ [V]	$I_1$ [A]	$P_1$ [W]	$U_2$ [V]	$I_2$ [A]	$P_2$ [W]	$\eta$ [%]
7.9	0.10	0.79	12.05	0.05	0.63	79
7.9	0.19	1.50	12.05	0.10	1.25	83
7.9	0.29	2.29	12.05	0.16	1.90	83
7.9	0.36	2.84	12.05	0.20	2.41	85
7.9	0.44	3.48	12.05	0.25	3.00	86

**Tab. 6.2:** Měření účinnosti pro zvyšující měnič

$U_1$ [V]	$I_1$ [A]	$P_1$ [W]	$U_2$ [V]	$I_2$ [A]	$P_2$ [W]	$\eta$ [%]
7.9	0.15	1.19	-12.02	-0.05	0,637	53
7.9	0.26	2.05	-12.02	-0.10	1.20	58
7.9	0.37	2.92	-12.02	-0.15	1.81	58
7.9	0.49	3.87	-12.02	-0.20	2.44	63
7.9	0.50	3.95	-10.59	-0.24	2.53	64

**Tab. 6.3:** Měření účinnosti pro zvyšující invertující měnič

$U_1$ [V]	$I_1$ [A]	$P_1$ [W]	$U_2$ [V]	$I_2$ [A]	$P_2$ [W]	$\eta$ [%]
7.9	0.06	0.48	5.48	0.07	0.32	67.5
7.9	0.09	0.72	4.98	0.10	0.51	70.7
7.9	0.19	1.51	4.98	0.22	1.07	70.4
7.9	0.25	1.99	4.97	0.30	1.47	74.0
7.9	0.35	2.78	4.97	0.41	2.01	72.0
7.9	0.45	3.62	4.96	0.45	2.26	62.0

**Tab. 6.4:** Měření účinnosti pro SEPIC měnič

# 7

## Závěr

Analýza druhů měničů s jejich vlastnostmi byla provedena v kapitole č. 2. V kapitole č. 3 byly vypočteny hodnoty součástek pro jednotlivé druhy měničů, dle požadavků. Následně byla vytvořena schémata zapojení. Kapitola č. 4 byla zaměřena na návrhy přípravků, pro měření měničů, které umožnily jednoduché měření parametrů. Kapitola č. 5 se věnovala postupům při návrhu DPS jednotlivých realizací. Poslední kapitola č. 6 se věnovala postupům měření.

Cílem práce bylo navrhnout a zrealizovat DC-DC měniče dle zadaných parametrů s možností změny zátěže, kapacity a apod. Realizované měniče jsou všechny funkční a jejich parametry odpovídají zadaným hodnotám. Požadavek na změnu výstupní kapacity kondenzátorů je vyřešen na každé desce pomocí propojek. Elektronická změna zátěže je pak realizována na přípravcích pro měření. Vzhledem k použití měničů pro výukové účely, by bylo vhodné umístit na vstup ochrannou diodu, která by chránila měnič v případě přepólování vstupního napětí, tato dioda je zařazena pouze u měniče SEPIC. Výstupní kapacitu je možné změnit jen v malém rozsahu hodnot, vhodnější by bylo použít více menších kondenzátorů paralelně, což by umožnilo lépe proměřit reakce na její změnu.

Přípravky pro měření byly funkční a umožnily odměřit hodnoty, problém byl nevyvedení měřících bodů pro připojení osciloskopu, hlavně u přípravku pro dynamické měření. To by se dalo jednoduše vyřešit přidáním těchto bodů na DPS. Při testování byl problém nemožnost změnit zátěž při dynamickém testování, vhodnější by bylo přípravky vybavit sadou přepínatelných zátěží. Pro měření záporného napětí byl použit přípravek s relátkem, svou roli splnil, avšak by bylo vhodnější použít elektronickou spínanou zátěž, která by pracovala do záporného napětí.

Při návrhu desek se objevilo několik drobných chyb, jako například špatné pouzdro u kondenzátoru ve měniči SEPIC, větší problém byl s umístěním cívek. Všechny cívky měly trochu větší pájecí vývody, než byly plošky na desce, vzhledem k použití rozlité mědi by docházelo ke zkratu. Tato vada byla vyřešena pomocí kaptonové lepicí pásky na spodku cívek. Tento problém by se dal vyřešit i jinak a to změnou footprintu cívek, nebo zablokováním rozlité mědi v okolí cívek, popřípadě použitím nepájivé masky.

Výsledky měření zatěžovacích charakteristik odpovídají z velké většiny předpokladům,

avšak u měniče SEPIC, nebylo možné při nejmenším vstupním napětí dosáhnout maximálního výstupního proudu. Východiskem by mohlo být přepočítání hodnot součástek pro ještě menší vstupní napětí. Měření odezvy na skokové připojení zátěže opět prokázalo předpoklady, že se snižující výstupní kapacitou roste reakce na skokovou změnu. U měniče SEPIC nebyl tento předpoklad dokázán, bylo by vhodné upravit výstupní kapacitu měniče a provést měření znovu, nebylo by na škodu i změnit vstupní napětí. Měření změny zvlnění výstupního napětí při změně kapacity s konstantní zátěží prokázalo, že zvlnění silně závisí na výstupní kapacitě, případně na ESR, které se připojováním kondenzátorů paralelně mění. U SEPIC měniče byl s tímto měřením problém, pro obě výstupní kapacity bylo výstupní zvlnění téměř stejné. Měření by se dalo rozšířit o určení zvlnění i pro jiné zátěže a porovnat zda vliv kapacity je stejný. Účinnosti jednotlivých zapojení měničů byly velmi různorodé, nejlépe na tom byl měnič snižující, za ním hned následoval zvyšující neinvertující. Měnič SEPIC měl účinnost okolo 70 %, což nebylo úplně dobré vzhledem k tomu o jaký obvod se jedná, účinnost zůstala stejná i při změně vstupního napětí. Účinnost tohoto měniče by zajisté šla zvýšit lepším návrhem součástek. Nejmenší účinnost měl měnič zvyšující invertující.

U měniče SEPIC byl obvod nejdříve vyzkoušen bez frekvenční kompenzace to způsobilo, že zapojení fungovalo ve velmi malém rozsahu vstupních napětí a byl problém s rozběhem obvodu při připojení napájení. Pro další testování bylo zapojení vybaveno kompenzačním obvodem, který byl uveden v manuálu pro návrh měniče, který měl podobné parametry jako navrhované zapojení. S tímto kompenzačním obvodem byl měnič funkční a v tomto stavu byla provedena všechna měření. Až dodatečně byla určena kompenzace dle kalkulačky od výrobce. S těmito hodnotami nebyl měnič provozován, dalo by se předpokládat zlepšení vlastností a odstranění problémů uvedených výše. Kompenzační obvod hraje velkou roli ve funkci měniče, proto by bylo vhodné mu věnovat více pozornosti.

# Literatura

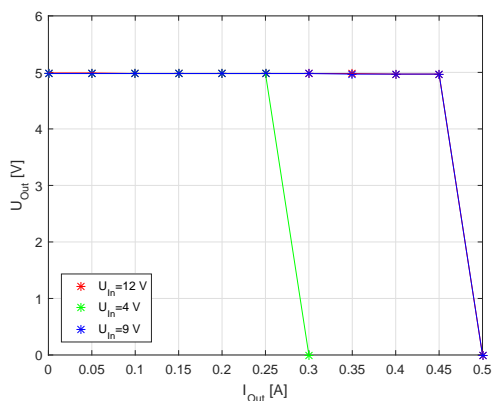
- [1] DANYK. *Impulzní zdroje a měniče I* [online]. [cit. 2.4.2022]. Dostupné z <https://danyk.cz/menice.html>
- [2] DANYK. *Impulzní zdroje a měniče II* [online]. [cit. 2.4.2022]. Dostupné z <https://danyk.cz/zdroje.html>
- [3] *DC/DC měniče* [online]. Vlastimil Slinták: © 2013 [cit. 5.4.2022]. Dostupné z <https://uart.cz/952/dc-dc-menice/>
- [4] *Single-ended primary-inductor converter* [online]. [cit. 5.4.2022]. Dostupné z [https://en.wikipedia.org/wiki/Single-ended\\_primary-inductor\\_converter](https://en.wikipedia.org/wiki/Single-ended_primary-inductor_converter)
- [5] ZEHENDNER, Markus. ULMANN, Matthias. *Power Topologies Handbook* [online]. Texas Instruments Incorporated, 2016 [cit. 3.4.2022]. Dostupné z <https://www.ti.com/seclit/ug/slyu036/slyu036.pdf>
- [6] KŮS, Václav. *Elektrické pohony a výkonová elektronika*. Druhé vydání. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2016. ISBN 978-80-261-0639-5.
- [7] ONSEM. *MC34063A - Inverting Regulator - Buck, Boost, Switching 1.5 A* [online]. [cit. 27.3.2022]. Dostupné z <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/mc34063ad.pdf>
- [8] TEXAS INSTRUMENTS. *LM2596 SIMPLE SWITCHER® Power Converter 150 kHz 3A Step-Down Voltage Regulator* [online]. [cit. 28.3.2022]. Dostupné z <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2596.pdf>
- [9] ANALOG DEVICES. *Automotive Boost/SEPIC Controllers* [online]. [cit. 28.4.2022]. Dostupné z <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX16990-MAX16992.pdf>
- [10] MAXIM INTEGRATED. *Selectable Single-Output SEPIC Converter Using MAX16990* [online]. [cit. 28.4.2022]. Dostupné z <https://www.stg-maximintegrated.com/content/dam/files/design/technical-documents/reference-designs/maxrefdes1017.pdf>

- [11] POWER INTEGRATIONS. *LYTSwitch-6 Family* [online]. [cit. 1.5.2022]. Dostupné z [https://eu.mouser.com/datasheet/2/328\\_lytswitch\\_6\\_family\\_datasheet-1286192.pdf](https://eu.mouser.com/datasheet/2/328_lytswitch_6_family_datasheet-1286192.pdf)
- [12] XLSEMI. *XL6009 Switching Current Boost/Buck-Boost/Inverting DC/DC Converter* [online]. [cit. 1.5.2022]. Dostupné z <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1132228/XLSEMI/XL6009.html>
- [13] ALPHA AND OMEGA. *AOD444/AOI444* [online]. [cit. 10.5.2022]. Dostupné z <https://www.tme.eu/Document/cd7e4601d6bd9e6dd5f6128cc23b6a25/AOD444-DTE.pdf>
- [14] ONSEMI. *1N5819 Datasheet* [online]. [cit. 11.5.2022]. Dostupné z <https://octopart.com/datasheet/1n5819-onsemi-832030>
- [15] VISHAY SILICONIX. *SB540 Datasheet* [online]. [cit. 11.5.2022]. Dostupné z <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/252750/VISHAY/SB540.html>
- [16] MAXIM INTEGRATED. *HOW TO SELECT THE EXTERNAL COMPONENTS FOR AN AUTOMOTIVE SEPIC DC-DC REGULATOR* [online]. [cit. 11.5.2022]. Dostupné z <https://pdfserv.maximintegrated.com/en/an/REFD5740.pdf>

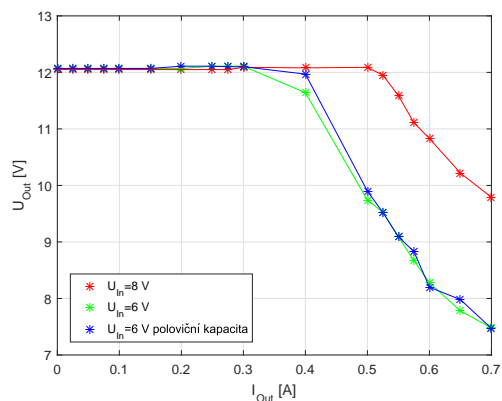
# Příloha A

## Měření měničů

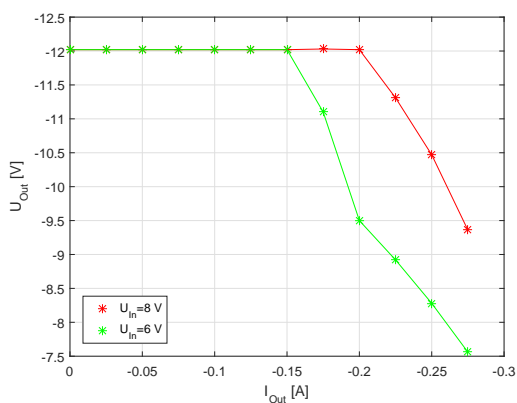
### A.1 Měření zatěžovacích charakteristik



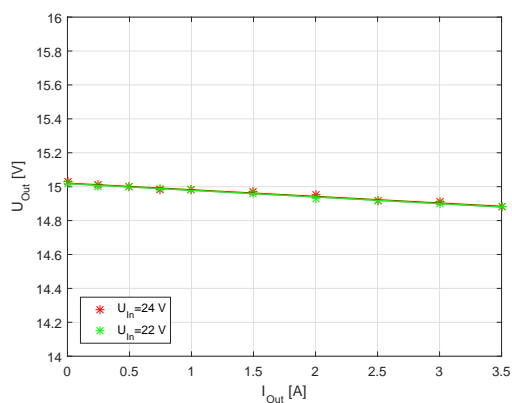
(a) Měnič SEPIC



(b) Měnič zvyšující



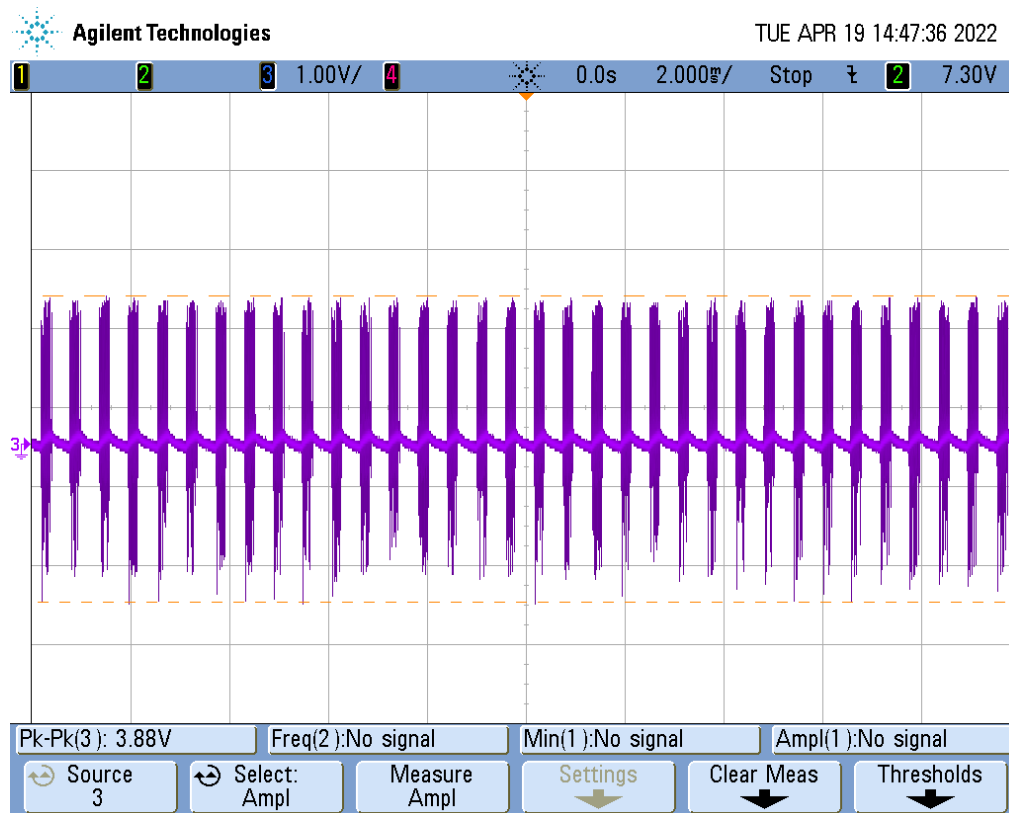
(c) Měnič zvyšující invertující



(d) Měniče snižující

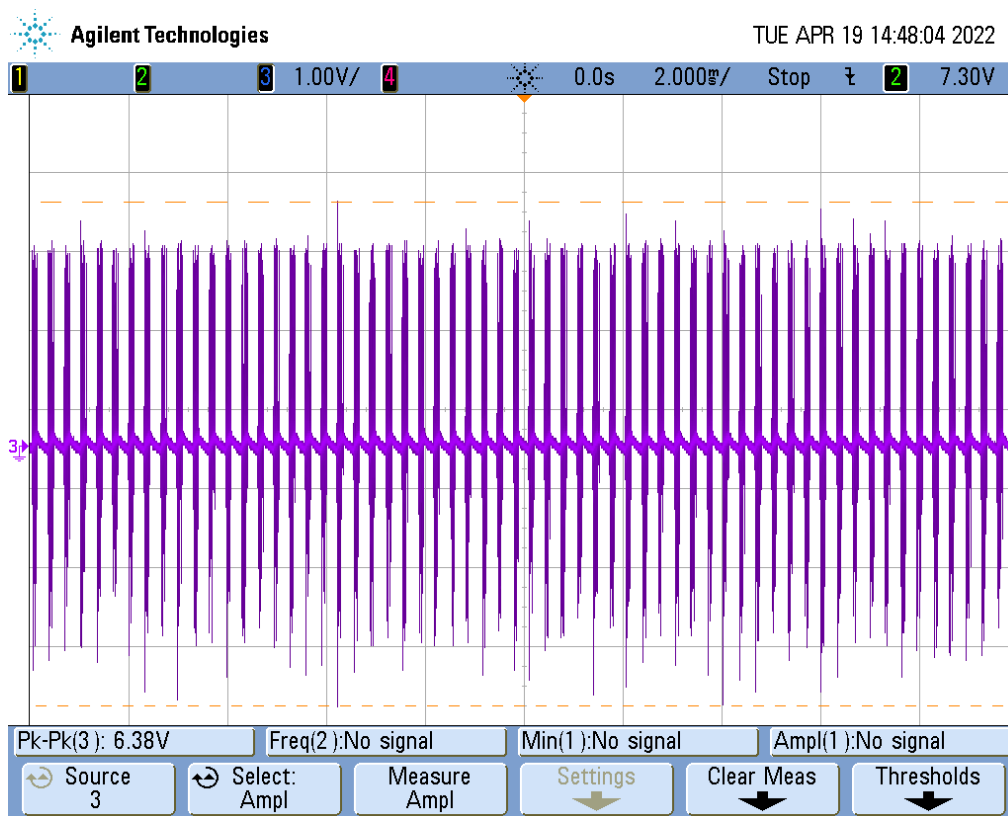
**Obr. A.1:** Zatěžovací charakteristiky měničů pro různá vstupní napětí

## A.2 Měření zvlnění výstupního napětí na zvyšujícím měniči



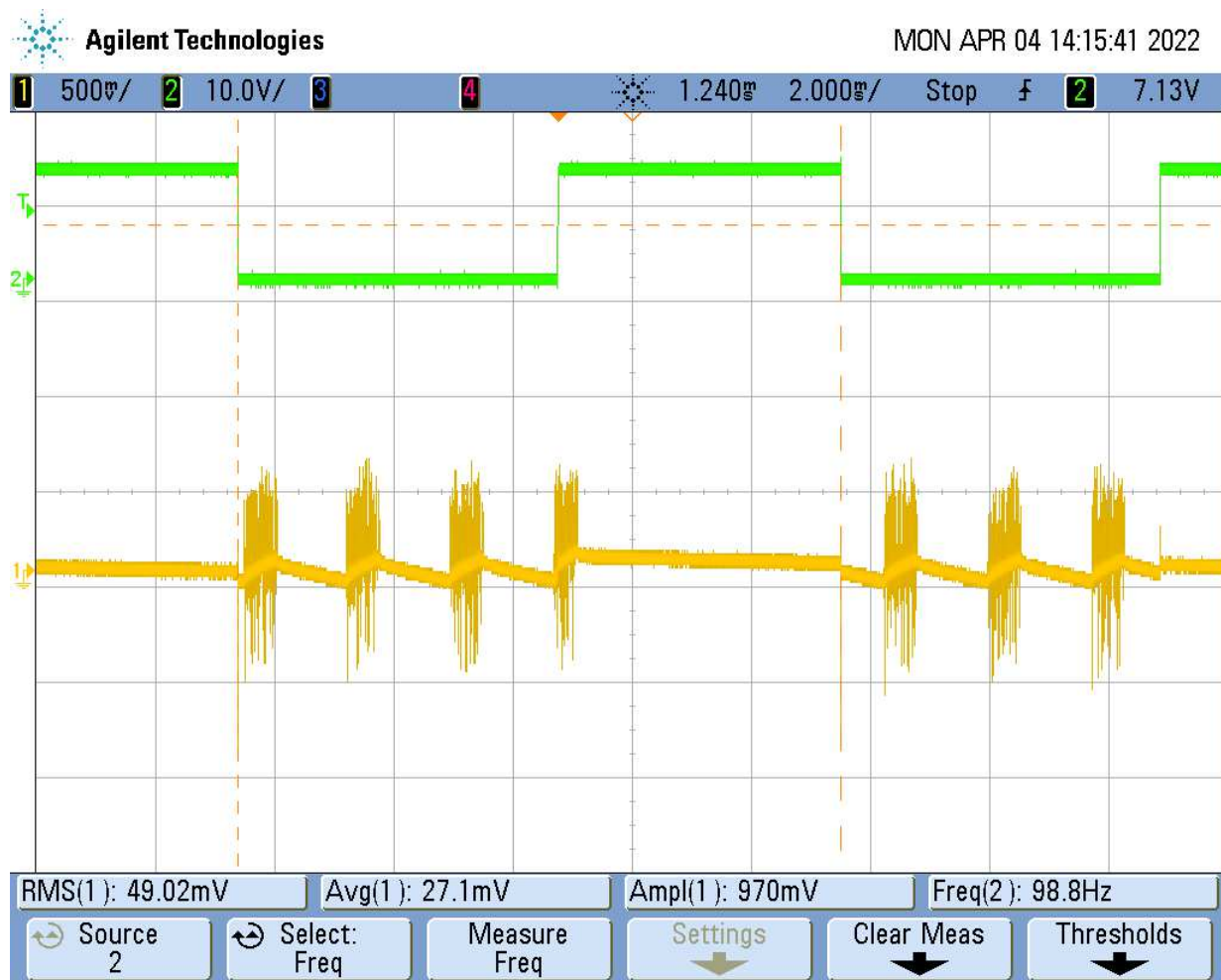
Obr. A.2: Zvlnění výstupního napětí u zvyšujícího měniče s výstupní kapacitou  $940 \mu F$



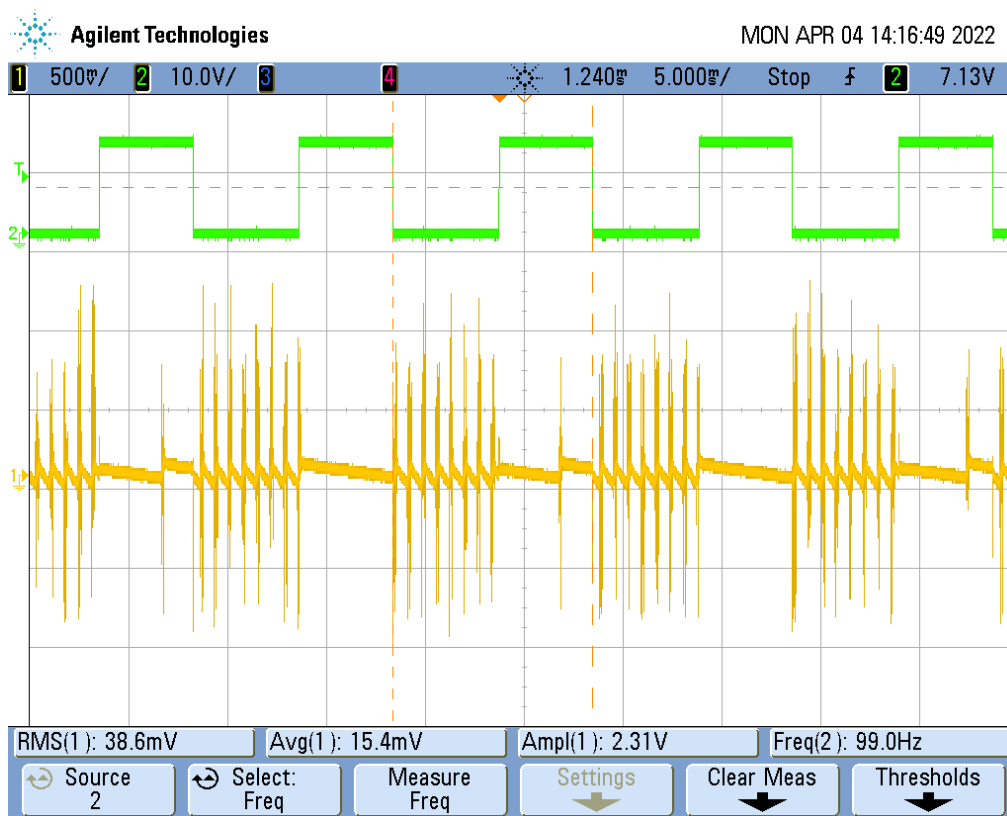


Obr. A.3: Zvlnění výstupního napětí u zvyšujícího měniče s výstupní kapacitou  $470 \mu F$

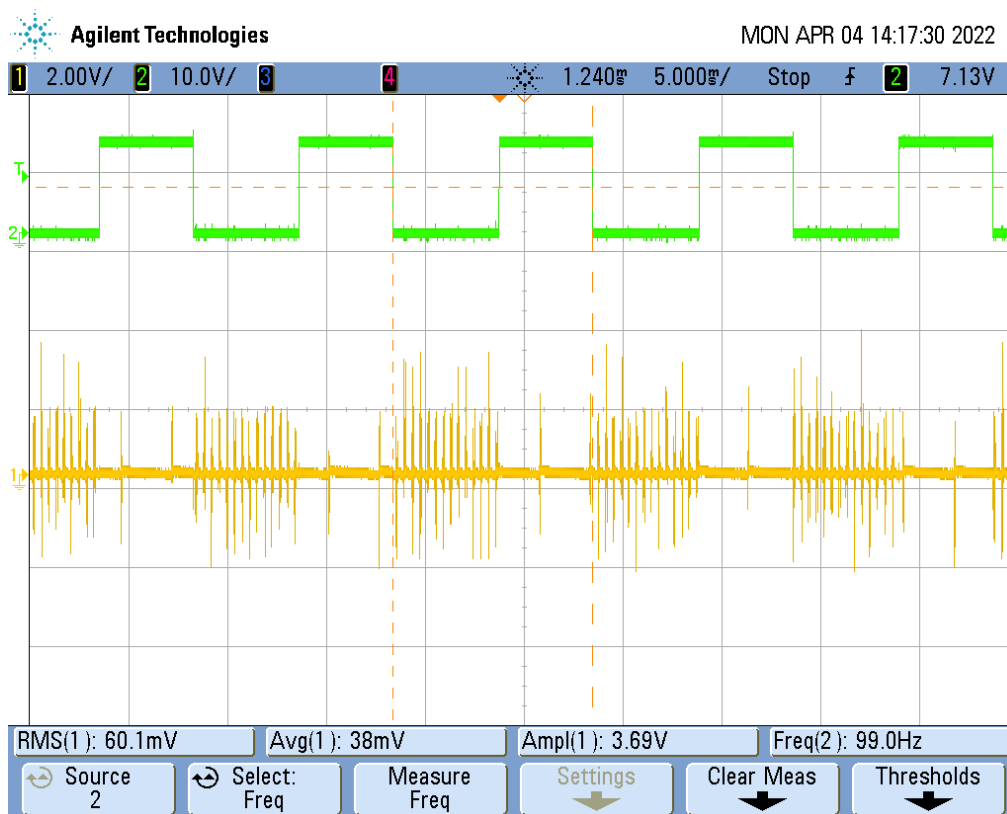
### A.3 Měření reakce na skokovou změnu zátěže na zvyšujícím měniči



Obr. A.4: Skoková změna zátěže u zvyšujícího měniče s výstupní kapacitou  $2440 \mu F$

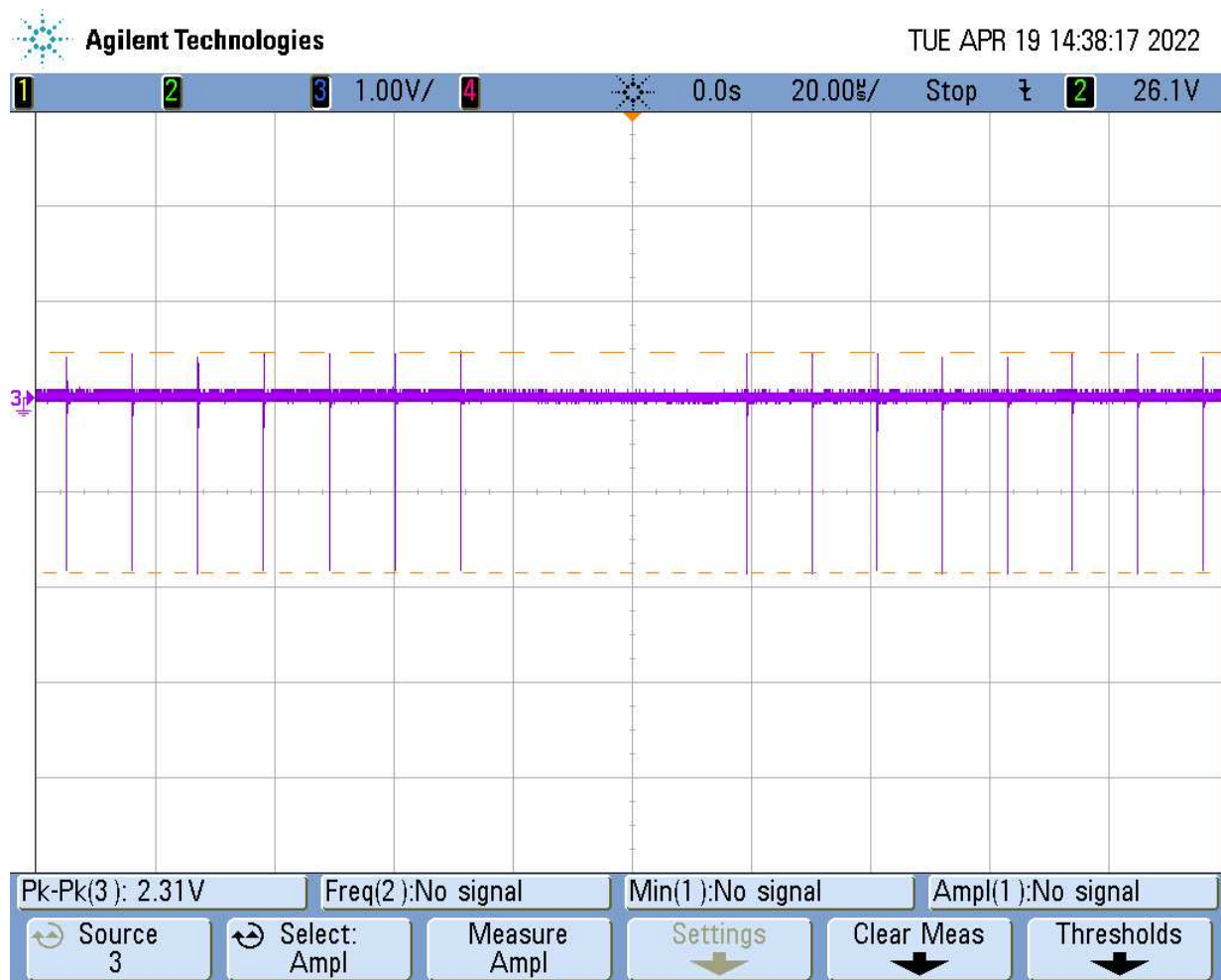


Obr. A.5: Skoková změna zátěže u zvyšujícího měniče s výstupní kapacitou  $940 \mu F$

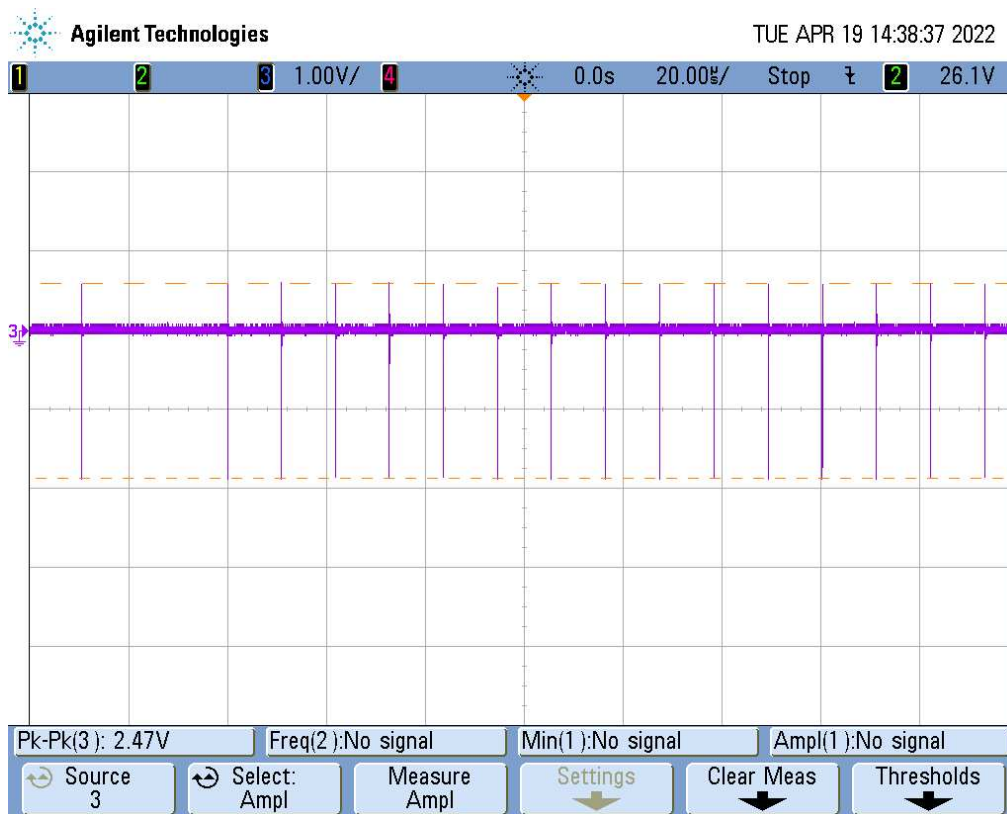


Obr. A.6: Skoková změna zátěže u zvyšujícího měniče s výstupní kapacitou  $470 \mu F$

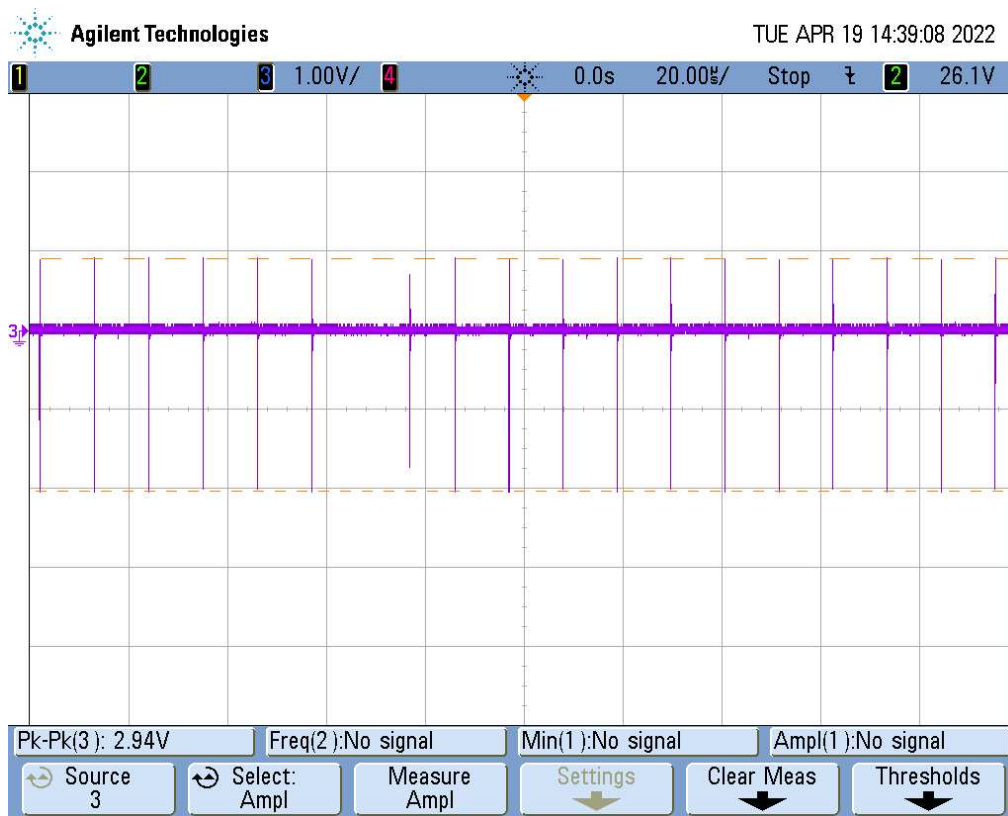
## A.4 Měření zvlnění výstupního napětí na zvyšujícím invertujícím měnič



Obr. A.7: Zvlnění výstupního napětí u zvyšujícího invertujícího měniče pro výstupní kapacitu  $2440 \mu F$

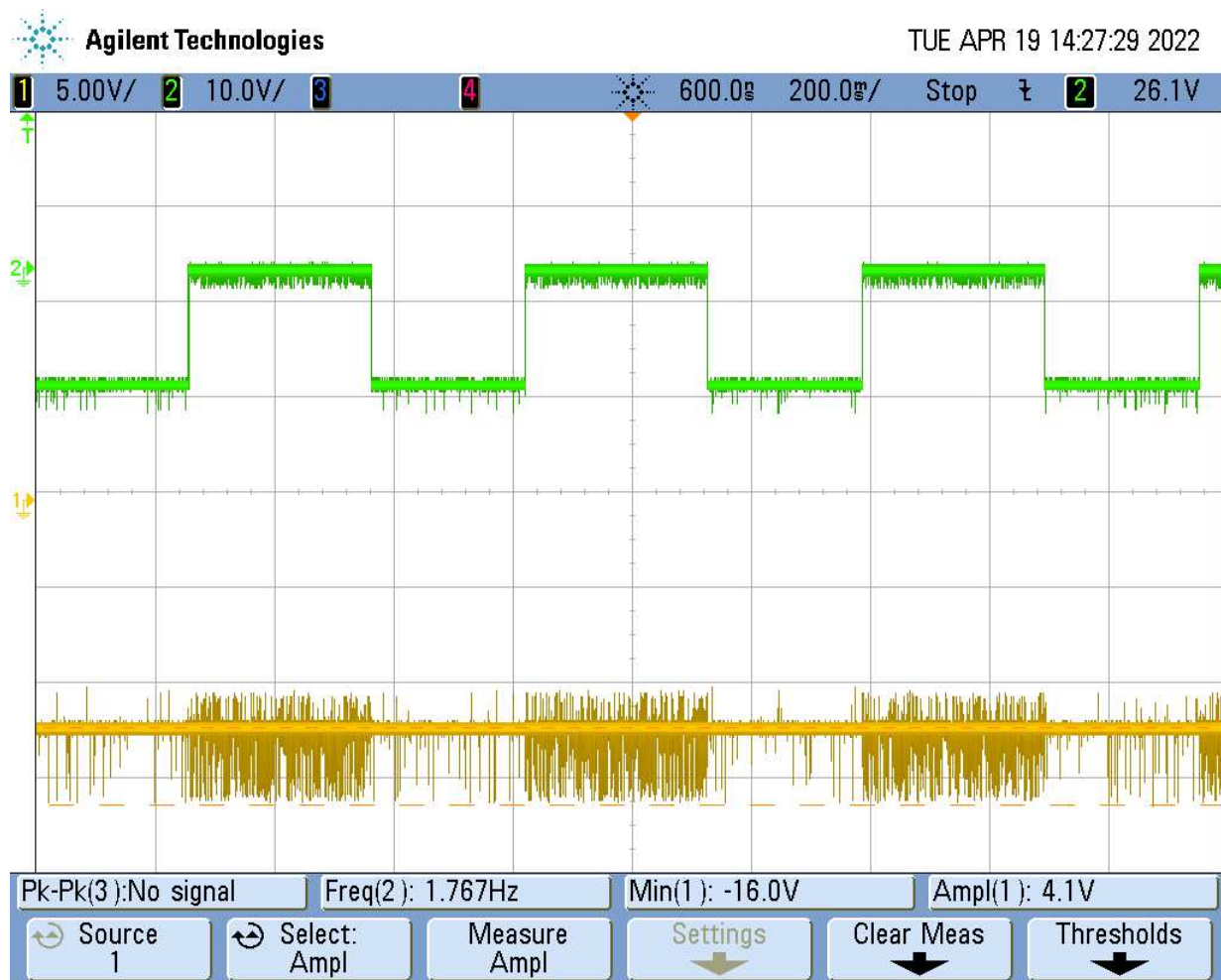


Obr. A.8: Zvlnění výstupního napětí u zvyšujícího invertujícího měniče pro výstupní kapacitu  $940 \mu F$

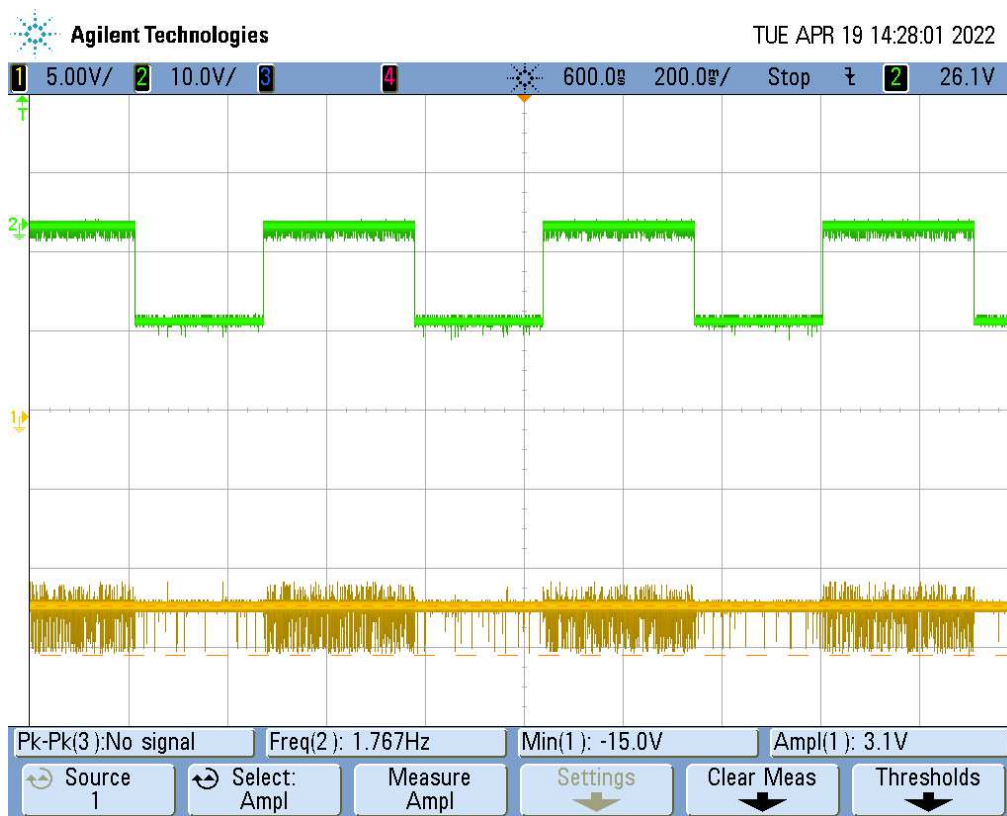


Obr. A.9: Zvlnění výstupního napětí u zvyšujícího invertujícího měniče pro výstupní kapacitu  $470 \mu F$

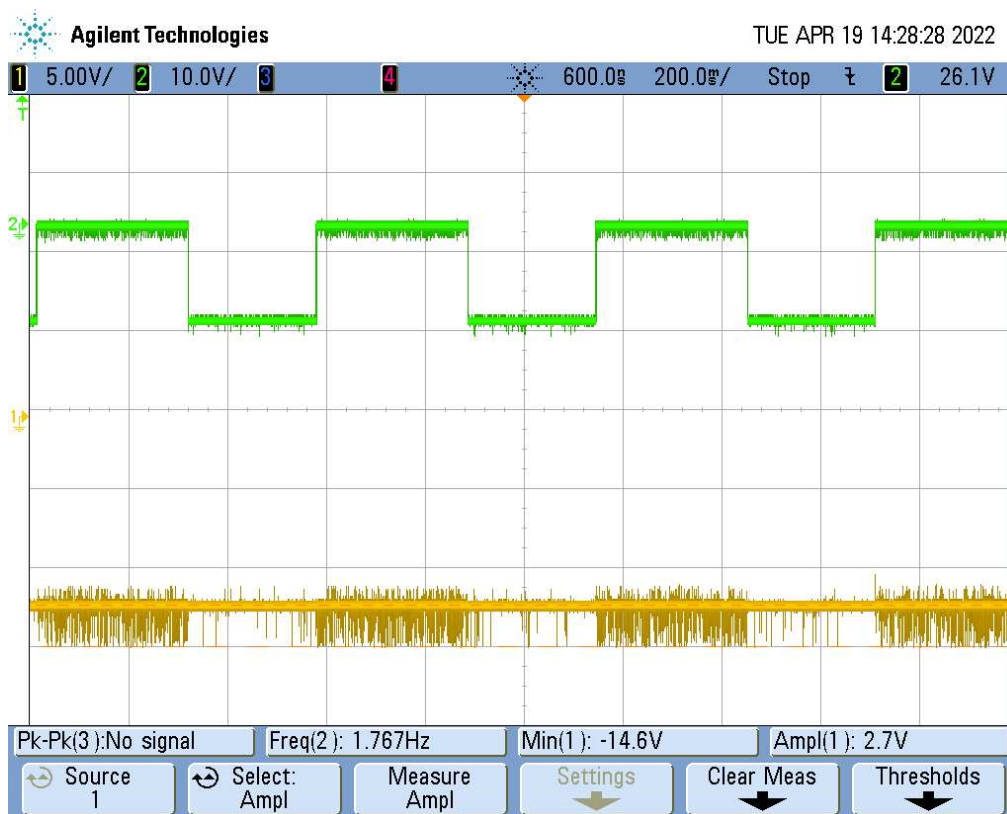
## A.5 Měření reakce na skokovou změnu zátěže na zvyšujícím invertujícím měniči



Obr. A.10: Skoková změna zátěže zvyšujícího invertujícího měniče zátěže s výstupní kapacitou  $2440 \mu F$



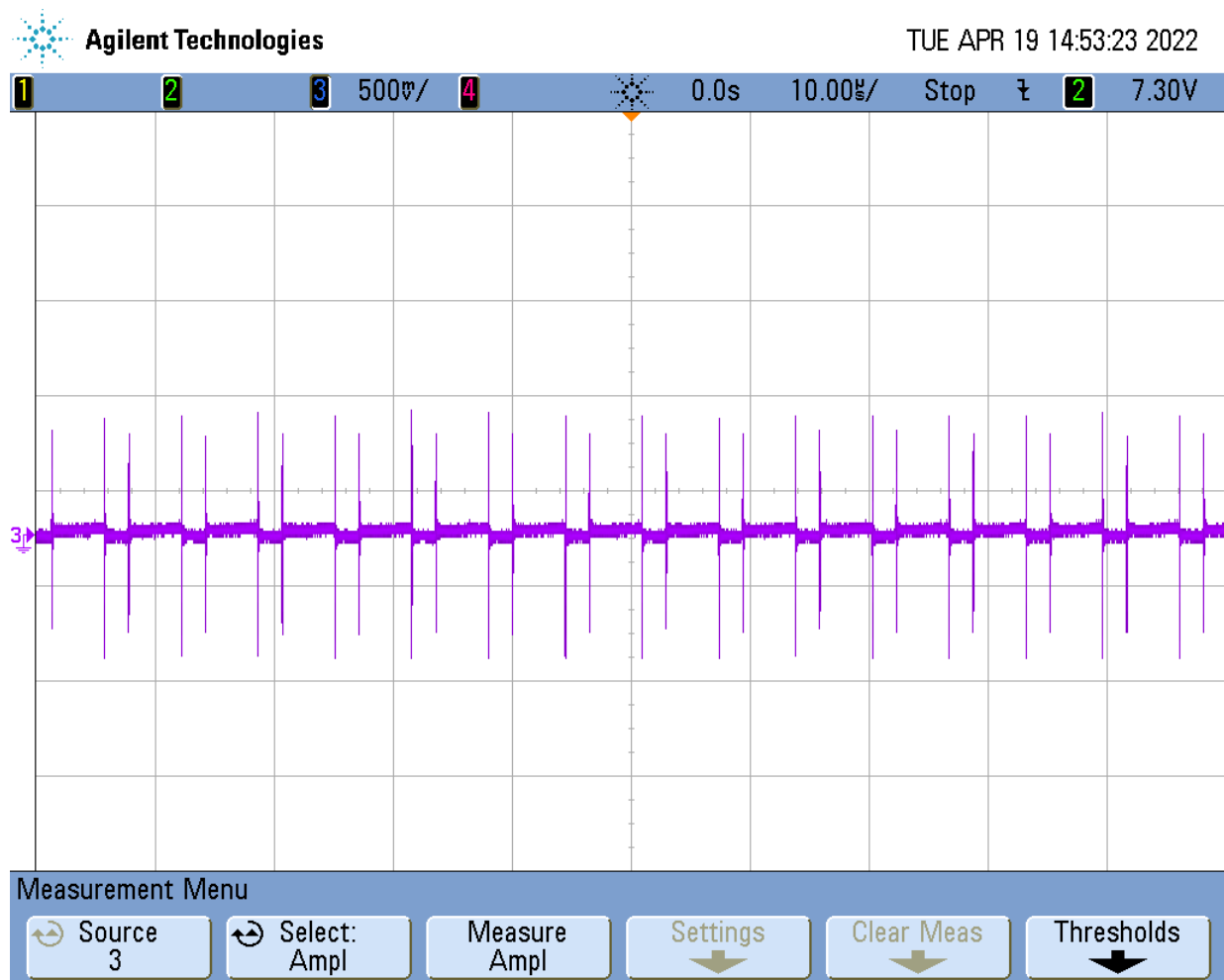
Obr. A.11: Skoková změna zátěže u zvyšujícího invertujícího s výstupní kapacitou  $940 \mu F$



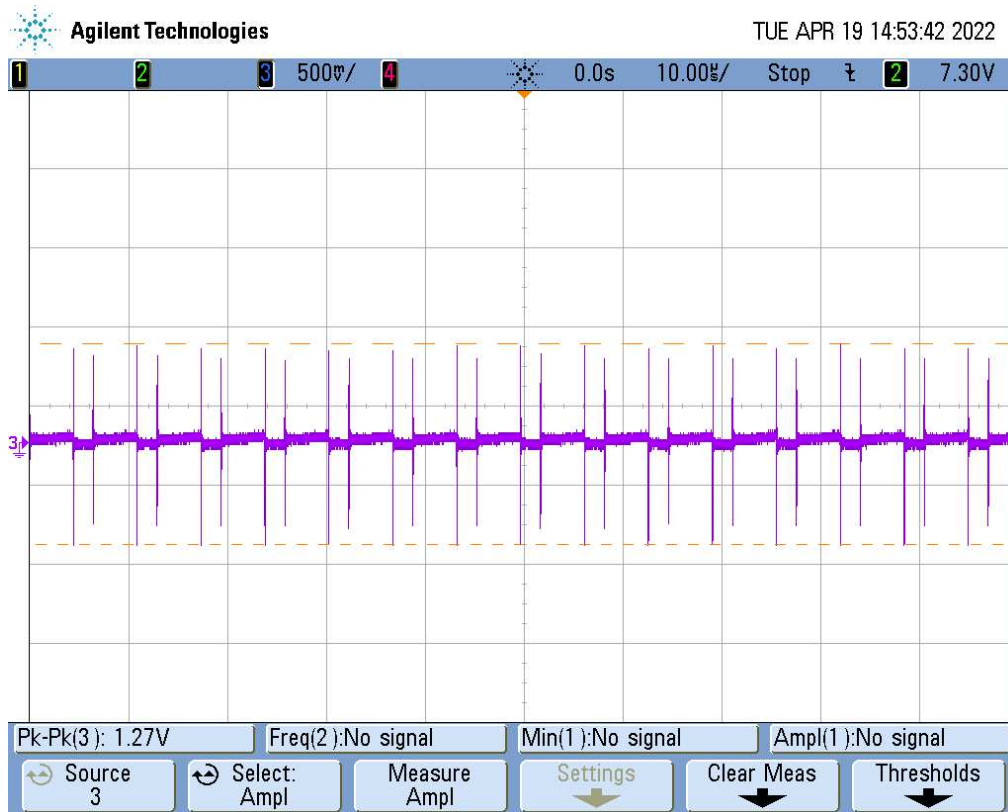
Obr. A.12: Skoková změna zátěže u zvyšujícího invertujícího s výstupní kapacitou  $470 \mu F$



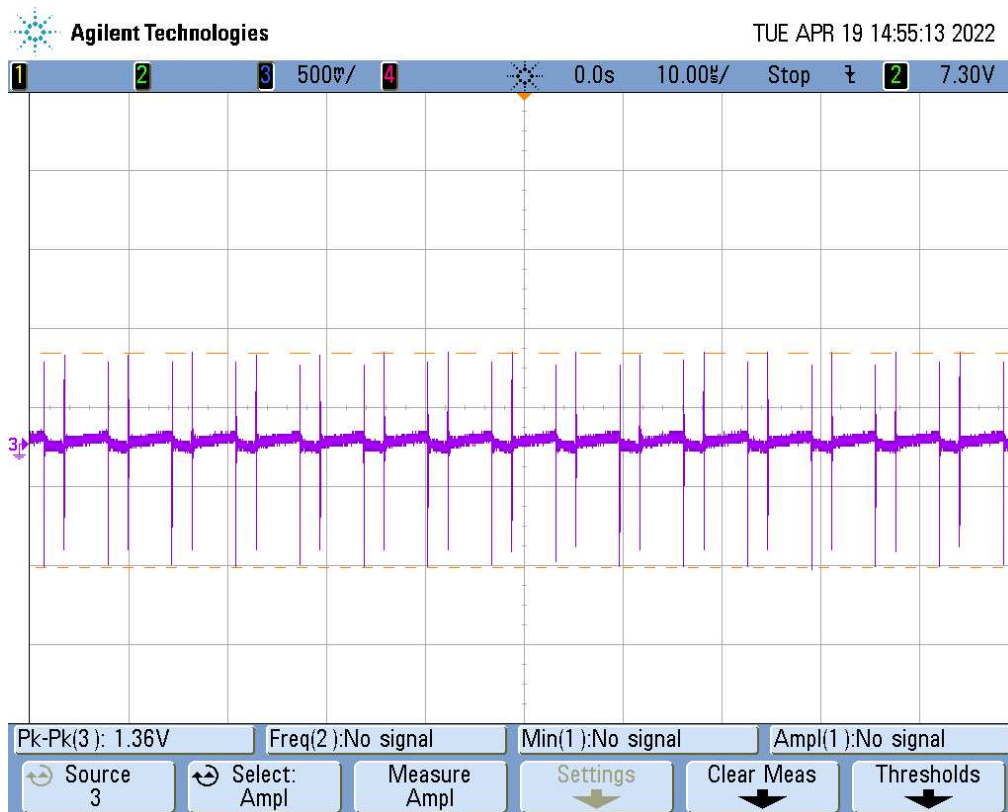
## A.6 Měření zvlnění výstupního napětí na snižujícím měniči



Obr. A.13: Zvlnění výstupního napětí u snižujícího měniče s výstupní kapacitou  $2440 \mu F$

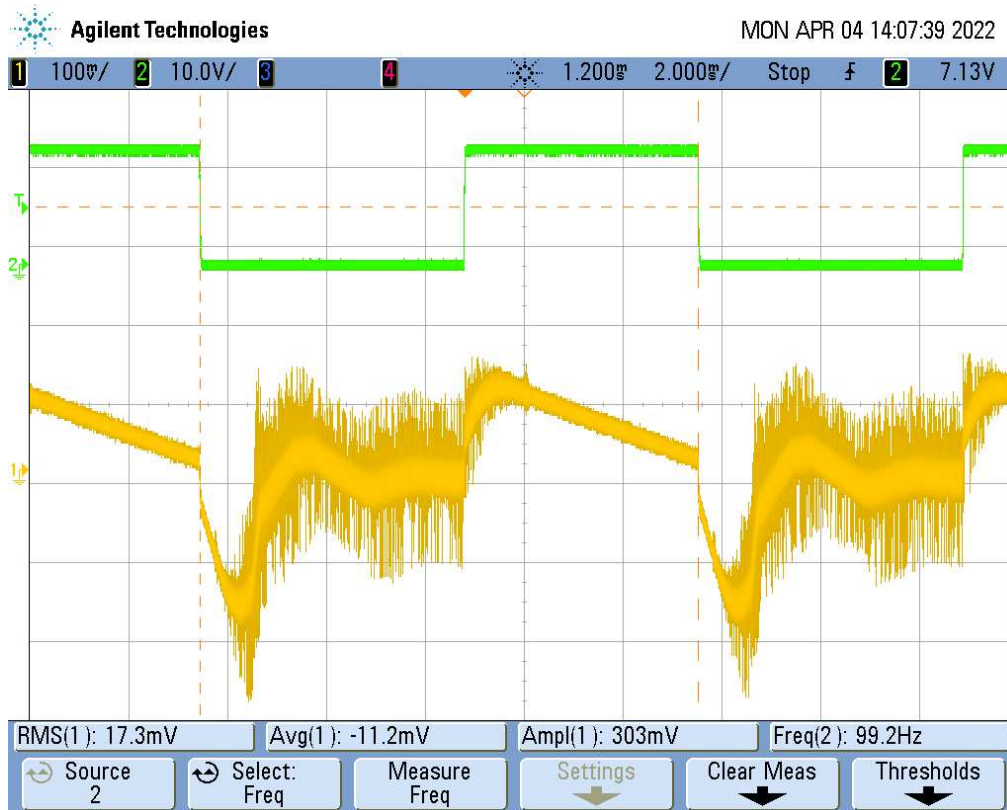


Obr. A.14: Zvlnění výstupního napětí u snižujícího měniče s výstupní kapacitou  $940 \mu F$

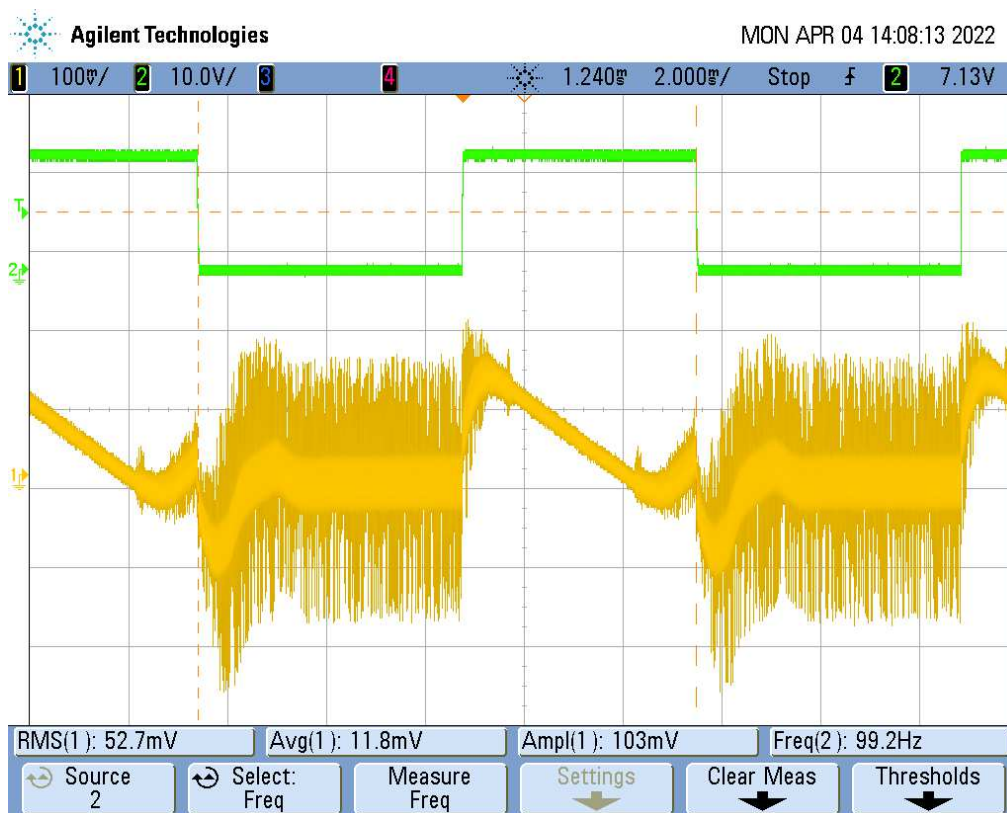


Obr. A.15: Zvlnění výstupního napětí u snižujícího měniče s výstupní kapacitou  $470 \mu F$

## A.7 Měření reakce na skokovou změnu zátěže na snižujícím měnič

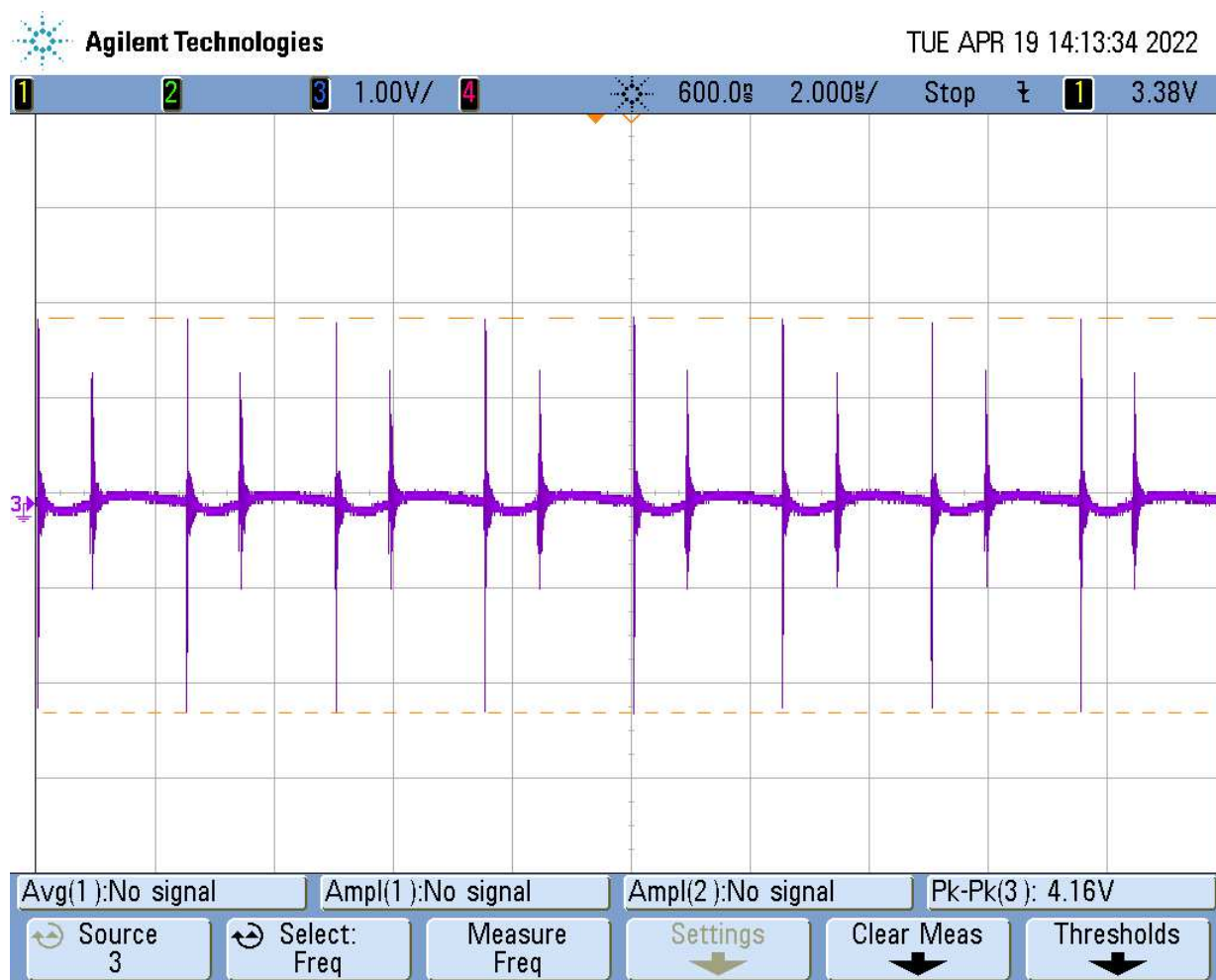


Obr. A.16: Skoková změna zátěže u snižujícího měniče s výstupní kapacitou  $940 \mu F$



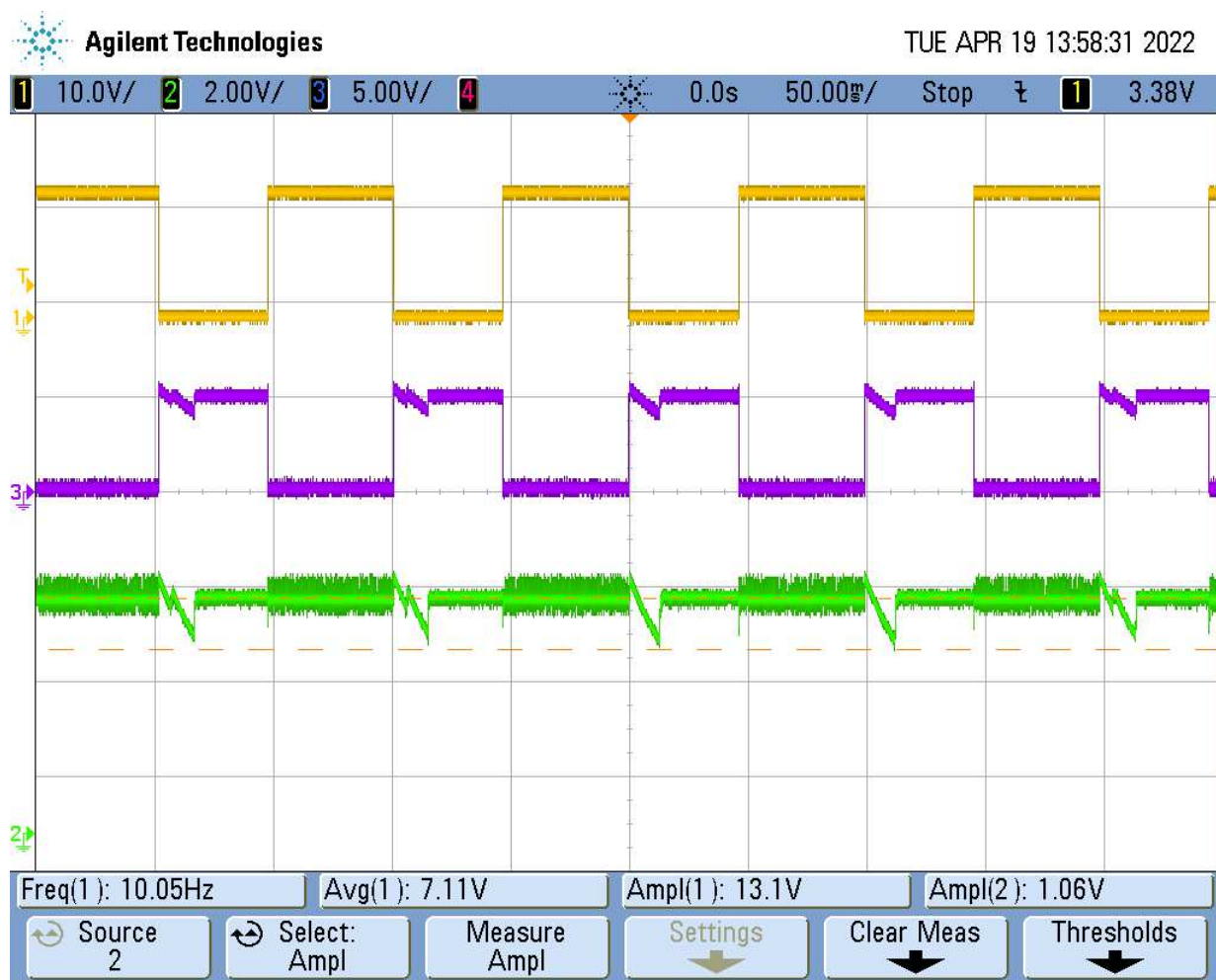
Obr. A.17: Skoková změna zátěže u snižujícího měniče s výstupní kapacitou  $470 \mu F$

## A.8 Měření zvlnění výstupního napětí měniče SEPIC



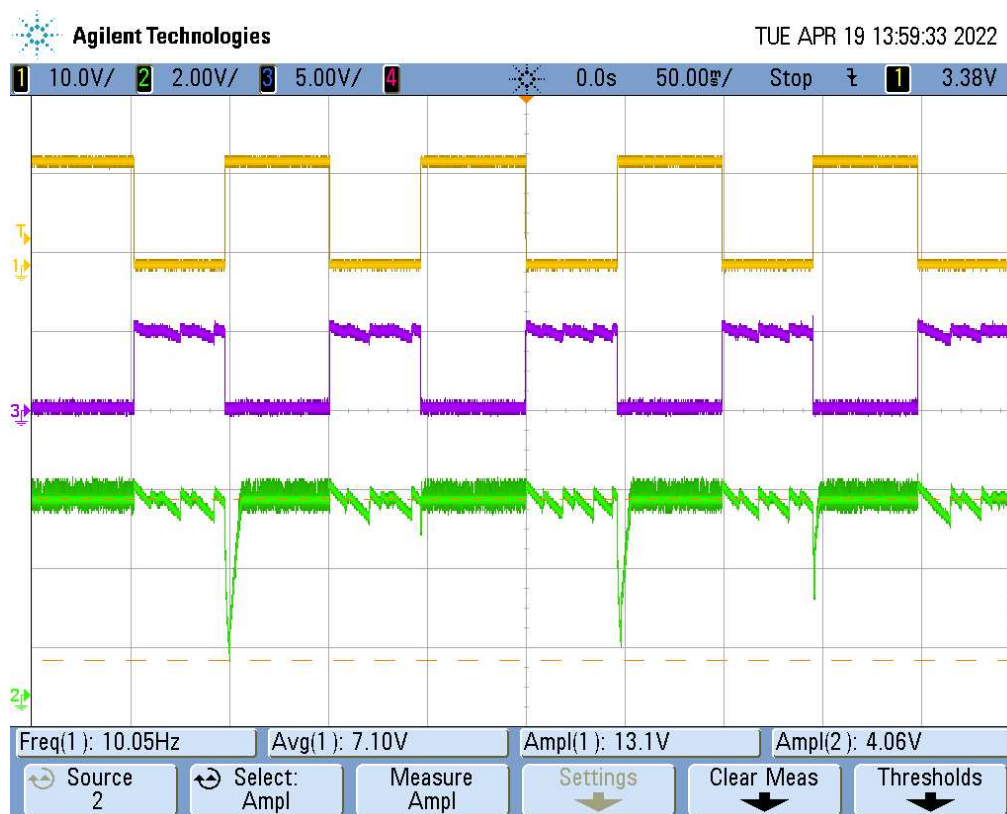
Obr. A.18: Zvlnění výstupního napětí pro u měniče SEPIC pro výstupní kapacitu  $40 \mu F$  a  $80 \mu F$

## A.9 Měření reakce na skokovou změnu zátěže měniče SEPIC

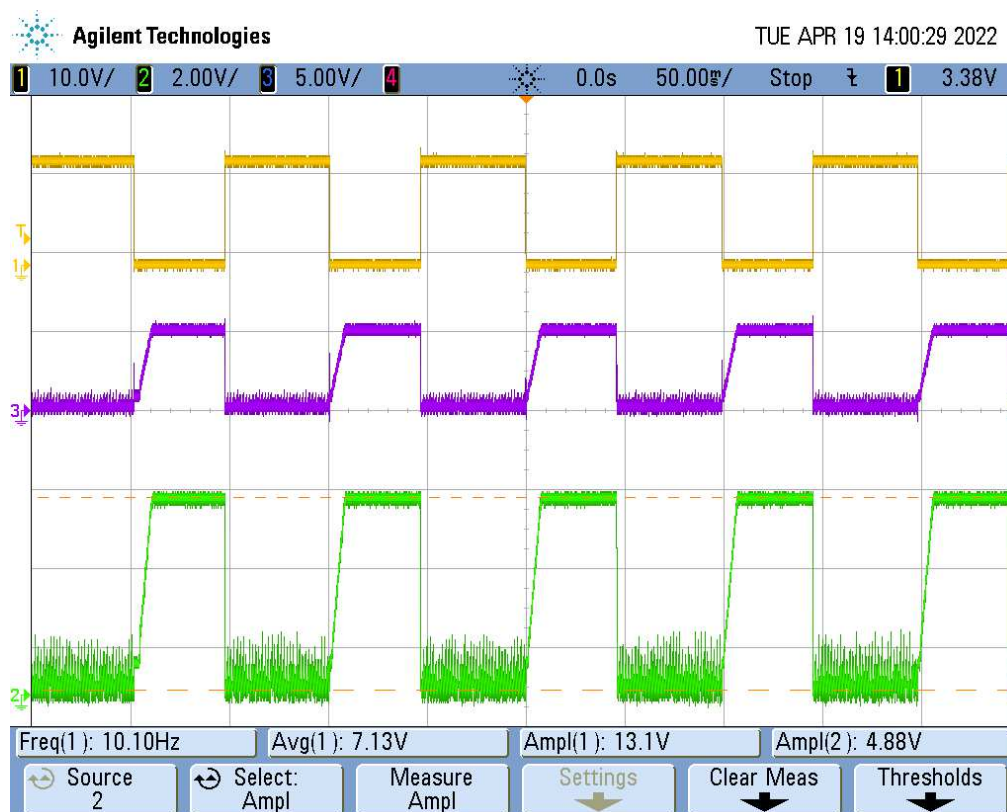


Obr. A.19: Reakce na skokovou změnu zátěže u měniče SEPIC pro výstupní kapacitu  $40 \mu F$





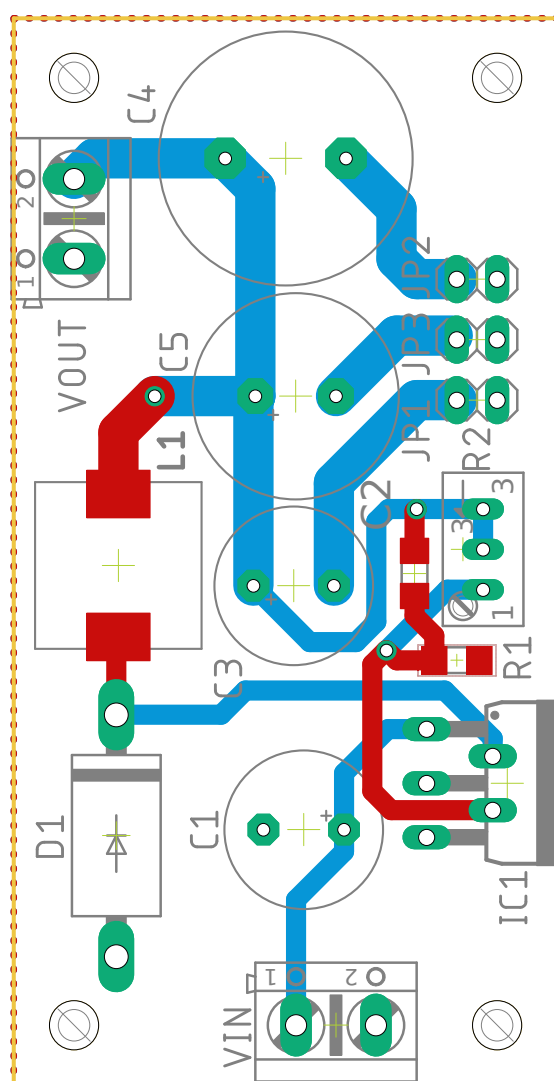
Obr. A.20: Reakce na skokovou změnu zátěže u měniče SEPIC pro výstupní kapacitu  $80 \mu F$



Obr. A.21: Reakce na skokovou změnu zátěže u měniče SEPIC pro výstupní kapacitu  $40 \mu F$  při použití větší zátěže, která přetíží měnič

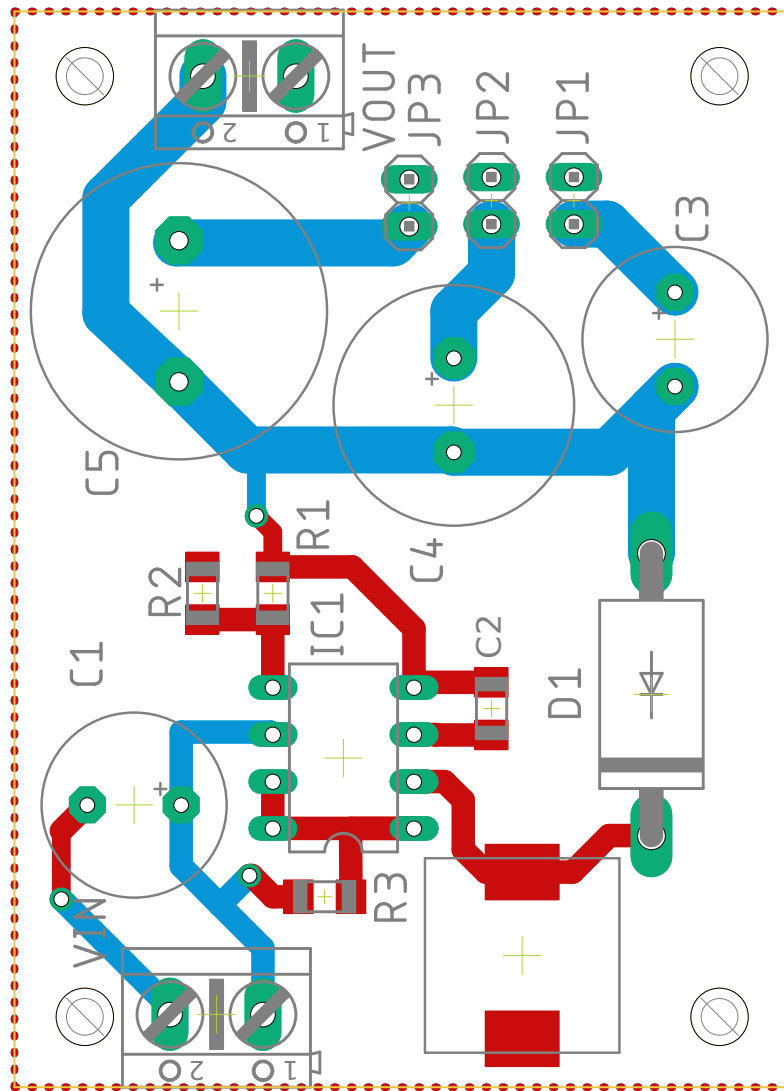
# Příloha B

## Desky plošných spojů

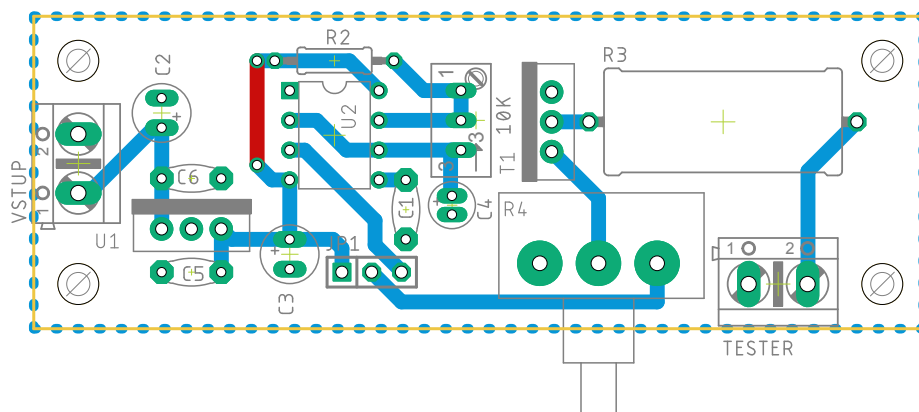


Obr. B.1: Deska plošného spoje pro snižující měnič (bez rozlité mědi)

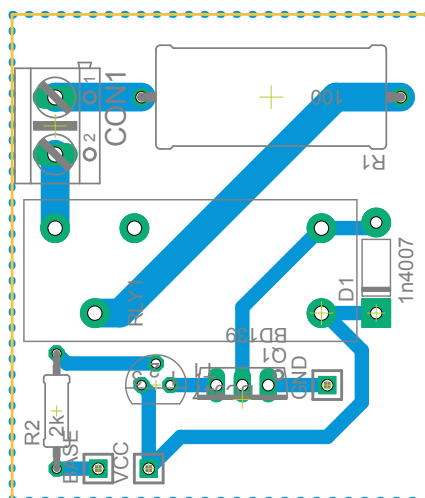




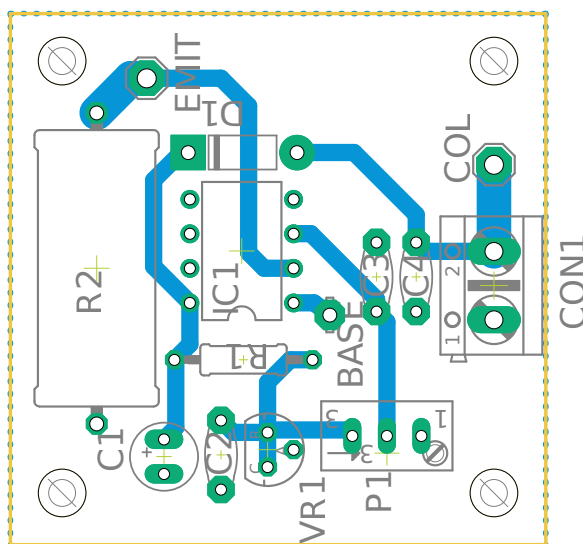
Obr. B.2: Deska plošného spoje pro zvyšující měnič invertující (bez rozlité mědi)



(a) Zkoušeč odezvy na skokovou změnu zátěže pro neinvertující měnič

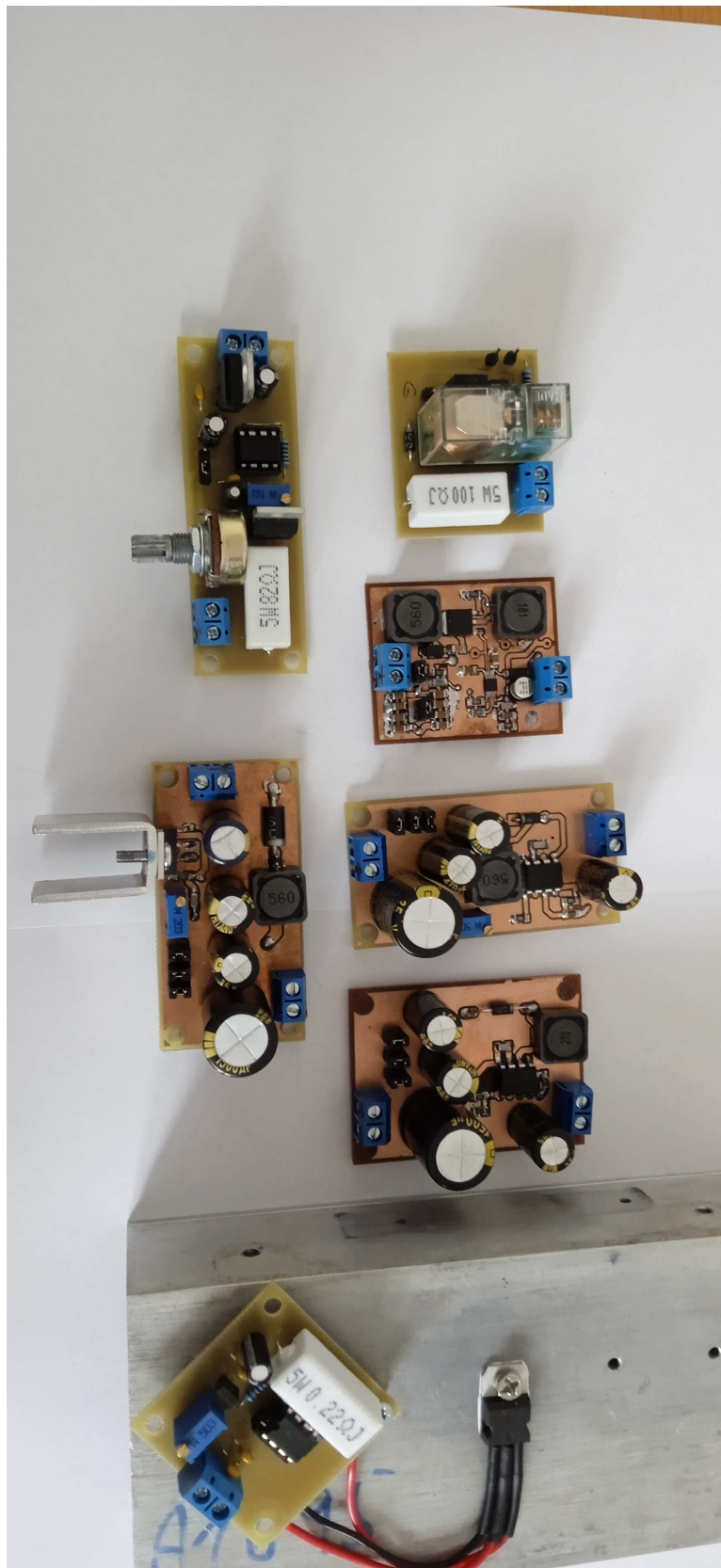


(b) Zkoušeč odezvy na skokovou změnu zátěže pro invertující měnič



(c) Elektronicky řízená zátěž

Obr. B.3: Desky plošných spojů pro měřící přípravky (bez rozlité mědi )



Obr. B.4: Fotka všech DPS měničů a přípravků pro měření