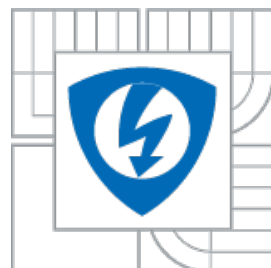




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

LABORATORNÍ PŘÍPRAVKY DO PŘEDMĚTU NAPÁJENÍ ELEKTRONICKÝCH ZAŘÍZENÍ

TUTORIAL KITS FOR COURSE POWERING ELECTRONIC DEVICES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAKUB POCHOBRADSKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MICHAL KUBÍČEK, Ph.D.

BRNO, 2011

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Laboratorní přípravky do předmětu Napájení elektronických zařízení jsem 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 bakalářské 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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 27. května 2011

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Michalu Kubíčkoví Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 27. května 2011

.....
podpis autora

ABSTRAKT

Cílem bakalářské práce je navrhnout přípravky s nábojovou pumpou, DC/DC měničem a referenčními zdroji napětí a proudu pro laboratorní výuku. První část práce popisuje základní principy fungování nábojových pump a DC/DC měničů. Druhá část práce popisuje některé typy integrovaných obvodů určených pro konstrukci nábojových pump a DC/DC měničů. Ve třetí části práce jsou popsány navržené přípravky.

KLÍČOVÁ SLOVA

DC/DC měnič, Nábojová pumpa, Proudová reference, Napěťová reference, Laboratorní přípravky

ABSTRACT

The goal of this bachelor thesis is to make a design of tutorial kits with a charge pump, DC/DC converter and a reference voltage and current sources that could be used in laboratory classes. In the first part basic principles of a charge pump and DC/DC converter are described. The second part is related to integrated circuits that are specific for construction of charge pumps and DC/DC convertors. The third part contains design of printed circuits.

KEY WORDS

DC/DC Converter, Charge Pump, Current Reference, Voltage Reference, Tutorial Kits

Obsah

Úvod.....	5
1 Nábojové pumpy.....	6
1.1 Základní typy nábojových pump.....	6
1.2 Spínače v nábojových pumpách.....	8
1.3 Kondenzátory v nábojových pumpách.....	8
1.3.1 Rozdělení náboje mezi kondenzátory	8
1.3.2 Rozběh měniče s nábojovou pumpou.....	9
1.3.3 Nábojová pumpa v ustáleném stavu.....	9
1.4 Ztráty v měničích s nábojovou pumpou.....	10
1.5 Regulované nábojové pumpy.....	10
1.6 Výrobci IO pro nábojové pumpy.....	10
1.6.1 Nábojové pumpy MAXIM.....	10
1.6.2 Nábojové pumpy Texas Instruments.....	11
2 DC/DC měniče s indukčnostmi.....	12
2.1 Základní druhy měničů s indukčnostmi.....	13
2.1.1 Měniče s cívkou.....	13
2.1.2 Jednočinné měniče s transformátory.....	14
2.1.3 Dvočinné měniče s transformátory.....	14
2.2 Integrované obvody pro konstrukci DC/DC měničů.....	16
2.3 Obvody pro DC/DC měniče s externími tranzistory společnosti TI.....	16
3 Přípravek s nábojovou pumpou.....	17
3.1 TPS6050X.....	17
3.1.1 Popis funkcí obvodu.....	18
3.1.2 Konverzní režimy.....	18
3.1.3 Volba kondenzátorů.....	19
3.2 Popis laboratorního přípravku.....	19
3.2.1 Napájecí část.....	19
3.2.2 Nábojová pumpa.....	20
3.2.3 Zátěž.....	20
4 Přípravek s DC/DC měničem.....	20
4.1 TPS40195.....	20
4.1.1 Popis.....	21
4.1.2 Popis funkcí obvodu.....	21
4.2 Popis přípravku.....	23
4.2.1 Ochranný obvod.....	23
4.2.2 DC/DC měnič.....	23
4.2.3 Výpočty pro DC/DC měnič.....	24
5 Přípravek s proudovou a napětovou referencí.....	25
5.1 Popis přípravku.....	25
6 Schémata zapojení a desky plošných spojů.....	26
6.1 Přípravek s nábojovou pumpou.....	26
6.2 Přípravek s DC/DC měničem.....	28
6.3 Přípravek s proudovou a napětovou referencí.....	30
7 Naměřené závislosti.....	32
7.1 Přípravek s nábojovou pumpou.....	32
7.2 Přípravek s DC/DC měničem.....	35

7.3 Přípravek s napětovou a proudovou referencí.....	38
7.3.1 Napětová reference.....	38
7.3.2 Proudová reference.....	40
8 Vzorové protokoly.....	42
8.1 Přípravek s nábojovou pumpou – Vzorový protokol.....	42
8.2 Přípravek s DC/DC měničem – Vzorový protokol.....	50
8.3 Přípravek s napětovou a proudovou referencí - Vzorový protokol.....	58
Závěr.....	67
Literatura.....	67
Seznam zkratek a symbolů.....	68

Úvod

V této práci jsou popsány základní metody konverze používané u DC/DC měničů s indukčnostmi a u nábojových pump. Cílem práce je navrhnout přípravky pro laboratorní výuku v předmětu Napájení elektronických zařízení. Pro konstrukci přípravku s nábojovou pumpou a DC/DC měničem byly zvoleny IO firmy Texas Instruments. Pro konstrukci přípravku s DC/DC měničem byl zvolen IO pro měnič s externími spínacími tranzistory, který je vybaven ochranou proti zkratu a přehřátí. Pro konstrukci přípravku s nábojovou pumpou byl vybrán IO řady TPS6050X, vybavený ochranou proti zkratu a proti přehřátí. IO byly vybrány na základě elektrotechnických parametrů, funkčního vybavení a provedení pouzdra. Moderní IO pro tyto účely jsou určeny pro sériově vyráběnou spotřební elektroniku a jsou značně malých rozměrů. Některé IO pro nábojové pumpy a pro konstrukci DC/DC měniče s indukčností jsou v této práci popsány.

Navržené přípravky obsahují ochranné obvody zamezující zničení důležitých IO vysokým vstupním napětím tak, aby bylo možno na vstupní svorky přípravků připojit napětí až 30 V.

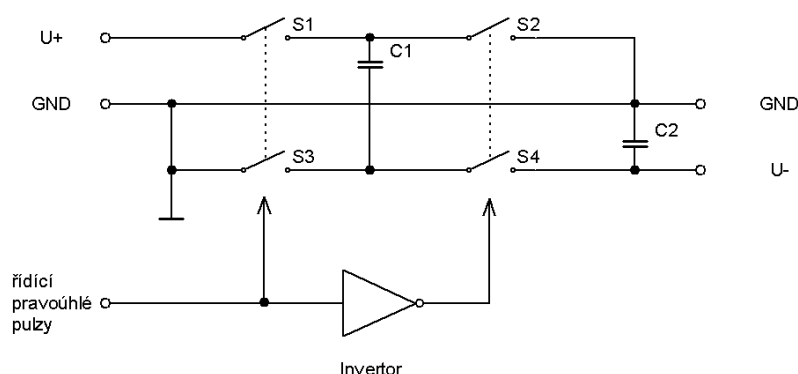
Součástí práce jsou i vzorové protokoly.

1 Nábojové pumpy

Nábojové pumpy se používají především k napájení zařízení s malým proudovým odběrem (přibližně do 300 mA) nebo k napájení dílčích částí většího zařízení, které vyžadují rozdílné napětí než je napětí hlavního napájecího zdroje. Nábojová pumpa je druh DC/DC měniče (měnič stejnosměrného napětí), který ke své činnosti nevyžaduje cívku. Někdy se jim proto říká bezindukční (inductor-less) nebo též kapacitní napěťové měniče. Obvod provádějící konverzi napětí obsahuje sadu keramických nebo elektrolytických střádacích kondenzátorů pro uchování a konverzi elektrické energie, které jsou střídavě nabíjeny ze vstupního zdroje a vybíjeny do zátěže a současně je též střídavě měněno jejich vzájemné propojení (sériově nebo paralelně). Nábojové pumpy mohou pracovat jako invertující, snižující nebo zvyšující napěťový měnič, přičemž poslední dva jmenované případy mohou být také invertující nebo neinvertující, pokud užijeme kaskádového zapojení nábojových pump. V dnešní době existuje celá řada integrovaných obvodů pro nábojové pumpy. Tyto obvody stačí doplnit o kondenzátory a několik dalších externích součástek. Výhodou nábojové pumpy oproti klasickému DC/DC měniči s cívku je jednodušší a levnější provedení, kondenzátory jsou mnohem běžnější a levnější součástky než cívky a navíc při použití moderních integrovaných obvodů i miniaturní rozměry výsledné konstrukce. Nevýhodou nábojové pumpy je hlavně omezený odběr, typicky kolem 100 mA a nemožnost skokové změny napětí, protože napětí při vybíjení střádacích kondenzátorů klesá exponenciálně.

1.1 Základní typy nábojových pump

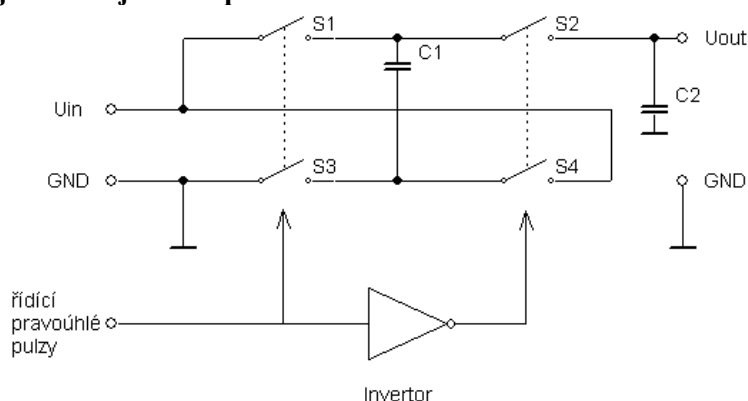
Nábojová pumpa jako invertor napětí



Obr. 1 Nábojová pumpa jako invertor napětí

Nábojová pumpa pracuje v cyklu o dvou stavech. V první polovině cyklu se sepnou spínače S_1 a S_3 a akumulční kondenzátor C_1 se nabije na hodnotu U_+ . Ve druhé polovině cyklu se S_1 a S_3 rozepnou a sepnou se S_2 a S_4 . Tato akce spojí pozitivně nabitý pin C_1 se zemí a negativní pin s U_- . C_1 je nyní zapojen paralelně s kondenzátorem C_2 . Pokud je napětí na C_2 menší než na C_1 , poteče náboj z C_1 do C_2 do doby, než napětí na C_2 dosáhne hladiny $-(U_+)$, tedy na výstupu bude napětí stejné velikosti jako na vstupu, ale s opačnou polaritou [1].

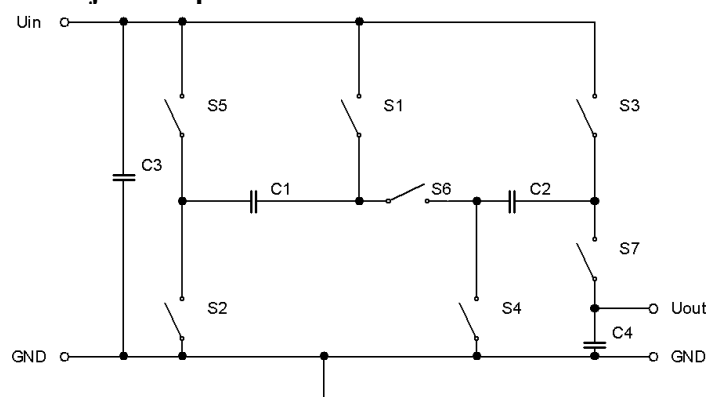
Nábojová pumpa jako zdvojovač napětí



Obr. 2 Nábojová pumpa jako zdvojovač napětí

Zapojení zdvojovače pracuje podobně jako invertor. V první části cyklu se sepnou spínače S_1 a S_3 a střádací kondenzátor C_1 se začne nabíjet na hodnotu U_{IN} . Ve druhé části cyklu se S_1 a S_3 rozpojí a spojí se spínače S_2 a S_4 . Tím dojde k sériovému spojení C_1 se vstupním napětím. Na výstupu je pak dvojnásobné napětí než na vstupu, které je dáno součtem vstupního napětí a napětí na kondenzátoru. Tento popis činnosti obvodu předpokládá, že již proběhlo několik pracovních cyklů a oba kondenzátory již na začátku prvního stavu cyklu obsahovaly nějaký náboj z předešlých cyklů [1].

Nábojová pumpa jako zdrojovač napětí

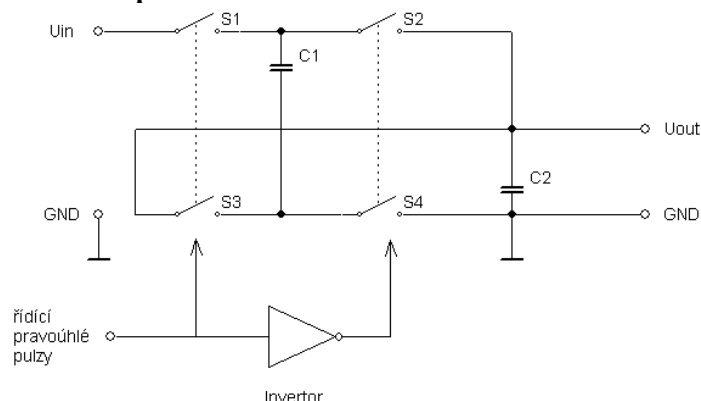


Obr. 3 Nábojová pumpa jako zdrojovač napětí

V tomto případě zapojení nábojové pumpy je na výstupu obvodu napětí třikrát vyšší než napětí na vstupních svorkách. V prvním stavu cyklu jsou sepnuty spínače S_1 až S_4 . Kondenzátory C_1 a C_2 se nabíjí na hodnotu U_{IN} . Ve druhém stavu cyklu se rozepnou spínače S_1 až S_4 a sepnou se spínače S_5 až S_7 . Tím dojde k sériovému spojení kondenzátorů C_1 , C_2 , C_4 a vstupního napájecího zdroje. Na kondenzátoru C_4 tedy vzniká napětí úměrné součtu napětí na C_1 , C_2 a vstupního napětí.

Takovéto zapojení používají i nábojové pumpy řady TPS6014x společnosti Texas Instruments. Stejného výsledku lze docílit kaskádovým zapojením zdvojovačů [1].

Nábojová pumpa jako dělič napětí



Obr. 4 Nábojová pumpa jako dělič napětí

V tomto případě pracuje nábojová pumpa jako dělič napětí. Na výstupu pumpy bude napětí poloviční velikosti než napětí na vstupu. Sběrací kondenzátory C_1 a C_2 mají schodnou kapacitu. Činnost obvodu je opět podobná jako u předchozích. V první části cyklu se sepnou spínače S_1 a S_3 a kondenzátory C_1 a C_2 se spojí do série a začnou se nabíjet napětím ze vstupního zdroje. Napětí na nich se rozdělí v obráceném poměru než je poměr kapacit. Vzhledem k tomu, že oba kondenzátory jsou shodné (+/- výrobní tolerance) bude na obou přibližně polovina napájecího napětí. Ve druhém cyklu jsou rozepnuty spínače S_1 a S_3 a sepnou se spínače S_2 a S_4 , tím dojde k paralelnímu spojení obou kondenzátorů tak, že kladné elektrody jsou připojeny na výstup a záporné elektrody jsou spojeny se společnou svorkou GND.

1.2 Spínače v nábojových pumpách

V uvedených principiálních schématech je spínání naznačeno pro ilustraci pomocí jednoduchých mechanických spínačů. Ve skutečnosti se ke spínání kondenzátorů v nábojových pumpách používají téměř výlučně polovodičové prvky. Použití mechanických spínačů by, vzhledem ke spínacím kmitočtům v řádu desítek kHz až stovek MHz, nebylo prakticky dost dobře možné. V dnešní době roli spínačů sehrávají hlavně unipolární tranzistory. Tranzistory jsou řízeny pomocí řídicího obvodu, který je v nejjednodušších případech složen jen z oscilátoru, který generuje obdélníkové pulzy a invertoru.

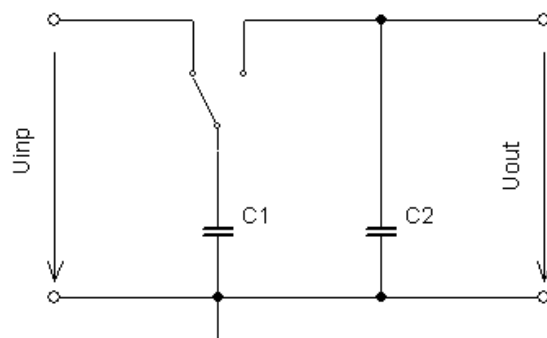
1.3 Kondenzátory v nábojových pumpách

V uvedených principiálních popisech funkčnosti jednotlivých nábojových pump byly uvažovány ideální kondenzátory. Ve skutečnosti kondenzátory kromě kapacity vykazují i parazitní vlastnosti. Těmi jsou ekvivalentní sériový odpor (ESR) a ekvivalentní sériová indukčnost (ESL). Parazitní paralelní odpor kondenzátoru, který způsobuje samovybíjení kondenzátoru, můžeme zanedbat. ESR a ESL nemají vliv na schopnost kondenzátoru uchovávat elektrický náboj, projevují se ale při časové změně napětí a proudu a ovlivňují tak účinnost nábojové pumpy. Typické hodnoty ESR jsou u kondenzátorů 100 nF až 10 μ F 0,05 Ω až 0,2 Ω a typická hodnota ESL mezi 1 nH a 5 nH. Na účinnost měniče má též vliv odpor spínacích tranzistorů v sepnutém stavu. Ten činí přibližně 1 Ω až 50 Ω [1].

1.3.1 Rozdělení náboje mezi kondenzátory

Náboj mezi kondenzátory v nábojových pumpách je přenášen pomocí nabíjení a vybíjení sběracích kondenzátorů při jejich vzájemném přepínání do sériového nebo paralelního propojení. Náboj kondenzátoru je dán součinem kapacity tohoto kondenzátoru a napětí mezi deskami kondenzátoru:

$$Q = C \cdot U \quad (1)$$



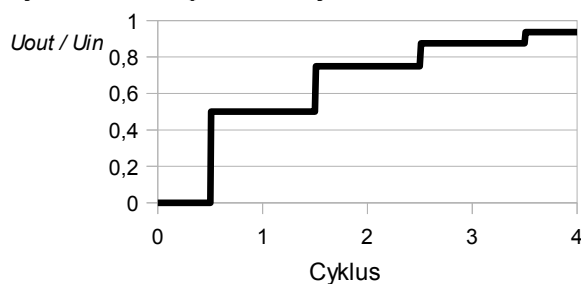
Obr. 5 Princip přenosu náboje v nábojové pumpě

Jsou-li dva kondenzátory o kapacitách C_1 a C_2 a na každém z nich je napětí U_1 respektive U_2 , pak jejich paralelním spojením dojde k přesunu části náboje a k vyrovnání napětí na této paralelní dvojici. Toto napětí je dáno vztahem

$$U = \frac{Q_{\text{celkový}}}{C_1 + C_2} = \frac{C_1 \cdot U_1 + C_2 \cdot U_2}{C_1 + C_2} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \cdot U_1 + \frac{C_2}{C_1 + C_2} \cdot U_2 \quad (2)$$

1.3.2 Rozběh měniče s nábojovou pumpou

Pokud jsou dva kondenzátory o stejné kapacitě zapojené do obvodu který pracuje v cyklu o dvou stavech, v prvním stavu je nabíjen kondenzátor C_1 ze zdroje napětí a ve druhém stavu je nabíjen C_2 z C_1 , předtím nabitého na napětí U_{INP} , pak napětí U_{OUT} na kondenzátoru C_2 v jednotlivých cyklech roste vždy o polovinu rozdílu napětí na jednotlivých kondenzátorech. Po prvním cyklu je tedy $U_{OUT} = 1/2 U_{INP}$, po druhém cyklu $3/4 U_{INP}$, po třetím cyklu $7/8 U_{INP}$ a tak dále [1].



Obr. 6 Nárůst napětí na výstupním kondenzátoru nábojové pumpy

1.3.3 Nábojová pumpa v ustáleném stavu

Po několika cyklech se napětí na výstupu pumpy ustálí a nábojová pumpa přejde do pracovního ustáleného stavu. Pro tento případ je opět uvažováno zapojení, kde se v prvním stavu cyklu nabíjí kondenzátor C_1 ze zdroje a ve druhém stavu se nabíjí C_2 z již nabitého C_1 . Na výstup obvodu, paralelně ke kondenzátoru C_2 je nyní připojena zátěž. Velikost náboje přeneseného v každém cyklu je dána vztahem

$$\Delta Q = C_1 \cdot (U_{INP} - U_{OUT}) \quad (3)$$

Střední hodnota proudu mezi napájecím zdrojem a zátěží je závislá na kapacitě kondenzátoru C_1 a rychlosti přepínání f_{SW} (počtu cyklů za jednu sekundu) a je dána vztahem

$$I = f_{SW} \cdot \Delta Q = f_{SW} \cdot C_1 (U_{INP} - U_{OUT}) \quad (4)$$

Tento vztah lze přepsat do tvaru připomínajícího Ohmův zákon

$$I = \frac{U_{INP} - U_{OUT}}{\frac{1}{f_{SW} \cdot C_1}}, \quad (5)$$

kde jmenovatel vyjadřuje tzv. ekvivalentní odpor R_{ekv} zapojený mezi zdrojem a zátěží

$$R_{ekv} = \frac{1}{f_{SW} \cdot C_1} \quad (6)$$

Tento myšlený odpor je jedním z parametrů ovlivňujících ztráty a lze ho měnit pouze změnou kapacity C_1 nebo změnou spínacího kmitočtu. Nemá nic společného se spínacím odporem tranzistorů v sepnutém stavu.

1.4 Ztráty v měničích s nábojovou pumpou

Moderní integrované obvody pro nábojové pumpy dosahují účinnosti přes 90%. Této vysoké účinnosti je dosaženo jen pokud obvod pracuje v optimálním režimu a i tak při činnosti nábojové pumpy vznikají ztráty. V obvodech nábojových pump se vyskytuje několik zdrojů ztrát. Mezi ty nejvýznamnější patří zmíněný ekvivalentní odpor R_{ekv} , odpory jednotlivých spínacích tranzistorů a ekvivalentní sériový odpor střádacích kondenzátorů ESR. Zároveň moderní nábojové pumpy obsahují řídicí obvody, které sledují činnost pumpy a podle vstupních a výstupních parametrů její činnost upravují. Tyto řídicí obvody se významnou měrou podílí na zvýšení účinnosti pumpy, zároveň však mají svoji vlastní spotřebu, která mírně přispívá ke ztrátám [1].

Celkové ztráty v pumpě jsou dány vztahem

$$P_{TOT} = I_{OUT} \cdot (U_{INP} - |U_{OUT}|) + I_Q \cdot U_{INP} = I_{OUT}^2 \cdot R_{OUT} + I_Q \cdot U_{INP} \quad (7)$$

kde	P_{TOT}	Celkové ztráty,
	$I_Q \cdot U_{INP}$	Spotřeba řídicích obvodů,
	$I_{OUT} \cdot (U_{INP} - U_{OUT})$	Ztráty způsobené mechanismem pumpy ($R_{DS(ON)}$, ESR , R_{ekv}),
	$R_{OUT} \approx 8 R_{SW} + 4 ESR_{C1} + \frac{1}{f_S \cdot C_1} + ESR_{C2}$	

Tato rovnice je odvozena v [1].

1.5 Regulované nábojové pumpy

Jde o druh nábojových pump, které jsou vybaveny zpětnovazebním obvodem hlídajícím úroveň výstupního napětí. Regulace umožňuje zvětšit účinnost nábojové pumpy. Provádí se změnou střídavosti spínacího signálu nebo úplným zastavením činnosti měniče. Když výstupní napětí vzroste, pak se základní spínací kmitočet zcela vypne, měnič přestane pracovat a výstup je napájen pouze z výstupního kondenzátoru. Při určitém poklesu výstupního napětí se měnič opět spustí. Tento typ regulace je vhodný u malých výstupních zátěží. Regulaci lze také provádět změnou spínacího kmitočtu, kdy se zvyšujícím se proudovým odběrem roste spínací kmitočet f_{SW} . Těmito úpravami je docíleno i vyšších výstupních proudů [2].

1.6 Výrobci IO pro nábojové pumpy

IO pro nábojové pumpy vyrábí většina výrobců polovodičových čipů. Mezi nejznámější patří Texas Instruments, Linear Technologies, National Semiconductor, MAXIM, Intersil Corporation. Jednotliví výrobci mají různou škálu výrobků tohoto typu, ale základní nabídka je podobná.

1.6.1 Nábojové pumpy MAXIM

Společnost MAXIM nabízí asi nejširší škálu nábojových pump, jak s regulací, tak bez ní.

Nejznámějším IO pro nábojovou pumpu je ICL7660, respektive MAX1044. Jde o dva podobné IO pracující buď jako zdvojovač nebo invertor napětí, vstupní napětí je až 10 V, výstupní proud 10 mA, resp. 20 mA. Kmitočet vnitřního oscilátoru je 10 kHz, resp. 20 kHz. Dalším zdvojovačem/invertorem jsou obvody MAX660 a MAX665, jejichž výstupní proud je až 100 mA.

Obvody MAX680, -681, -864, -865 pracují jako zdvojovač nebo invertovaný zdvojovač vstupního napětí. Vstupní rozsah IO je 2 V až 6 V. Výstupní proud dle typu IO 10 mA nebo 20 mA.

MAX1697 jsou invertory určené pro napájení vf zesilovačů v mobilních zařízeních nebo LCD

displayů. Existují v několika verzích s různým f_{SW} .

Mezi nábojové pumpy s regulací patří například MAX619 s 5 V výstupem, MAX622 s výstupním napětím o 11 V vyšším než napětí na vstupu, přičemž maximální vstupní napětí je až 16 V.

Podrobnější informace jsou na internetových stránkách výrobce nebo v [1].

1.6.2 Nábojové pumpy Texas Instruments

Společnost Texas Instruments vyrábí širokou škálu IO pro měniče s nábojovou pumpou. V nabídce jsou tyto měniče zvyšující i snižující a až na několik výjimek jde o pumpy s regulací.

Řada TPS6010X

Tato řada obsahuje čtyři typy zvyšujících nábojových pump s regulací.

TPS60100 má rozsah vstupních napětí 1,8 V až 3,6 V, výstupní napětí je 3,3 V a dokáže dodávat proud 200 mA. Kmitočet jeho vnitřního oscilátoru činí 300 kHz, ale lze ji řídit externím hodinovým signálem o kmitočtu až 400 kHz. V pouzdře IO jsou obsaženy dvě nábojové pumpy, které mohou pracovat dvojnásobně nebo paralelně s jedním dávkovacím kondenzátorem a s nižším zvlněním na výstupu. Režim činnosti se nastavuje logickou úrovní na vstupu COM. Regulace probíhá buď s konstantním kmitočtem nebo s vynecháváním cyklů. Vstup ENABLE umožňuje zapínat a vypínat činnost pumpy. Účinnost pumpy se pohybuje kolem 70 %.

TPS60101 je shodný obvod jako TPS60100, ale jeho maximální výstupní proud je poloviční.

Řada TPS6011X

TPS60110 je obdobný obvod jako oba výše popsané, jeho vstupní napětí musí být v rozsahu 2,7 V až 5,4 V, maximální výstupní proud je 300 mA.

TPS60111 je varianta TPS60110 s polovičním maximálním výstupním proudem.

Řada TPS6012X

Jde o nábojové pumpy s regulací a s adaptivním řízením použitého konverzního režimu v závislosti na vstupním napětí. Vstupní rozsah všech obvodů této řady je 1,8 V až 3,6 V. Regulace probíhá změnou kmitočtu oscilátoru, změnou střidy, vynecháním cyklů nebo změnou odporů spínacích tranzistorů $R_{DS(ON)}$, použitý druh regulace se volí automaticky. Obvody jsou vybaveny indikací nízkého napětí baterie, Low Battery, označovanou LBO, nebo funkcí indikace správného výstupního napětí, Power Good, označováno PG. Účinnost těchto nábojových pump je 85%.

Řada TPS6014X

Obsahuje dva obvody, které mají schodné vlastnosti, liší se jen tím, že TPS60140 má výstup LBO a TPS60141 má výstup PG. Rozsah vstupních napětí je 1,8 V až 3,6 V, výstupní napětí činí 5 V a výstupní proud maximálně 100 mA. Základem pumpy je ztrojovač napětí. Regulace probíhá odpojením vnitřního oscilátoru, pokud výstupní napětí překročí 5 V. Oba obvody jsou vybaveny ochranou proti zkratu a funkcí omezující rozběhový proud při startu.

Řada TPS6015X

Tato řada obsahuje dva obvody. Jde o regulované zvyšující nábojové pumpy. Rozsah U_{IN} je 2,7 V až 5,5 V, $U_{OUT} = 5$ V a $I_{MAX} = 140$ mA. Maximální pracovní kmitočet pumpy je 1500 kHz. Při výstupním proudu pod 8 mA přejde do režimu vynechávání cyklů. Obvody jsou vybaveny ochranou proti přehřátí a proti zkratu. Typická účinnost činí 70 %, nejvyšší účinnosti je dosaženo při malých zátěžích a s rostoucím výstupním proudem klesá až na 50 %.

Řada TPS6020X

Zvyšující nábojové pumpy s regulací, s výstupním napětím 3,3 V. Tyto nábojové pumpy jsou přímo určeny pro použití v MP3 přehrávačích. Maximální spínací kmitočet činí 400 kHz a je možné je řídit i externím zdrojem kmitočtu přiváděným na vstup EN. Podporují takzvanou Pulse-Skip regulaci, kdy při vynechávání cyklů lze ještě řídit odpor sepnutých tranzistorů.

Řada TPS6021X

Maximální pracovní kmitočet je 400 kHz a rozsah vstupních napětí 1,8 V až 3,6 V. Výstupní proud je podle typu obvodu 50 mA nebo 100 mA. Každý z obou typů existuje ve verzi s výstupem PG nebo LBO. Metody regulace jsou podobné jako výše popsané. Zvláštností těchto pump je režim SNOOZE. Ten lze aktivovat přivedením logické úrovně L na patřičný vstup. Při tomto režimu pumpa omezí maximální odebíratelný proud na 2 mA, zároveň klesne vlastní spotřeba pumpy na 2 μ A a její účinnost se zvýší.

Řada TPS6024X

Řada regulovaných zvyšujících nábojových pump s velmi malým zvlněním výstupního napětí. Tyto nábojové pumpy jsou speciálně určeny k napájení obvodů VCO a fázových závěsů. Maximální výstupní proud je 25 mA. Typická účinnost je 90 %. Jednotlivé obvody se liší velikostí výstupního napětí.

Řada TPS60300

Zvyšující nábojové pumpy. Rozsah vstupních napětí je 0,9 V až 1,8 V. Na čipu jsou integrovány dva obvody pro nábojovou pumpu, oba obvody pracují současně, jen jeden obvod je vybaven regulací a na jeho výstupu je 3,3 V. Jejich účinnost je až 90 %, dokáží dodávat 20 mA resp. 40 mA výstupního proudu. Pumpy jsou opatřeny funkcí ENABLE.

Řada TPS6031X

Jde o téměř schodnou řadu jako TPS6030X, její obvody ale nejsou vybaveny funkcí ENABLE, nýbrž funkcí SNOOZE.

Řada TPS6050X

Obvod této řady byl zvolen pro konstrukci laboratorního přípravku. Jde o snižující nábojové pumpy s regulací, vybavené ochranou proti zkratu a proti přehřátí.

Podrobnější informace o nábojových pumpách TI jsou na internetových stránkách výrobce nebo v [1].

2 DC/DC měniče s indukčnostmi

Jde o měniče, které obsahují ve své pracovní části alespoň jednu cívku nebo transformátor. Cívky bývají většinou vinuty na feritových jádrech toroidního tvaru nebo na lepených jádrech tvaru E. Tyto měniče dokáží dodávat výrazně vyšší proudy než nábojové pumpy, běžně desítky Ampérů, ale existují i měniče pro aplikace jako start-box nebo obloukové svařování, které dodávají výstupní proud v řádu stovek Ampérů.

DC/DC měniče můžeme dělit z hlediska galvanického oddělení na:

- Izolované – Obsahují transformátor s jedním primárním vinutím a jedním nebo více sekundárními vinutími. Jejich výhodou je galvanické oddělení vstupu a výstupu, nevýhodou pak rozměry a cena měniče.
- Neizolované – Typicky obsahují pouze cívky, nikoliv transformátory, jejich výhodou je nižší cena, malé rozměry. Nevýhodou je galvanické spojení vstupu a výstupu.

Z hlediska směru konverze napětí pak měniče dělíme na:

- Snižující,
- Zvyšující.

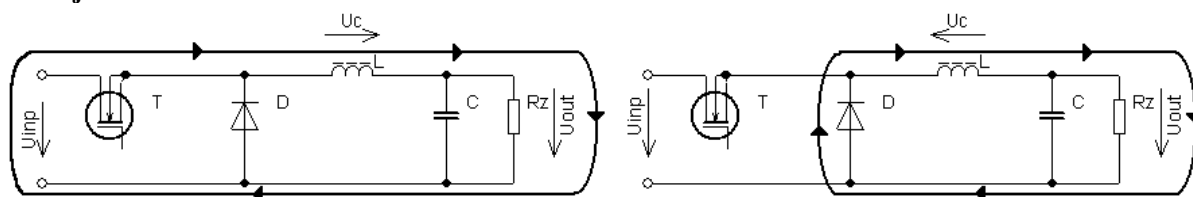
Z hlediska činnosti můžeme měniče DC/DC dělit na:

- Jednočinné – na primární straně je jen jedna cívka.
- Dvojčinné – na primární straně jsou dvě cívky které se během cyklu střídají v dodávání energie.

2.1 Základní druhy měničů s indukčnostmi

2.1.1 Měniče s cívkou

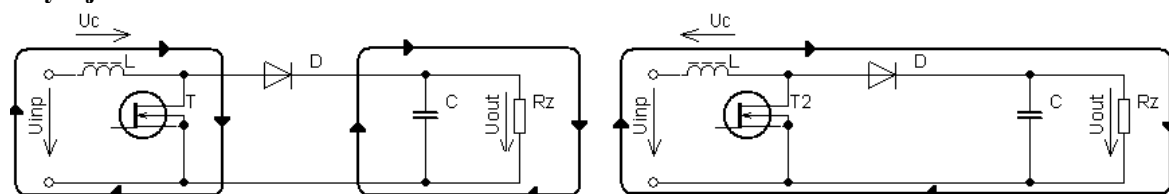
Snižující měnič



Obr. 7 Sníživý měnič, činnost

Anglicky označován jako Buck nebo Step-Down. Jeho výstupní napětí je menší než napětí vstupní. Měnič pracuje v cyklu o dvou stavech. V prvním stavu cyklu je tranzistor T sepnut a proud teče ze vstupní svorky U_{INP} přes sepnutý tranzistor T , cívku L a zátěž. Při tom se nabíjí výstupní kondenzátor C a zároveň je energie akumulována do magnetického pole kolem cívky L . Ve druhé části cyklu je tranzistor T rozepnut. Zdrojem energie se stává cívka, na níž se, v důsledku zániku jejího magnetického pole, obrátí polarita napětí, ale směr proudu zůstává stejný. Obvod se uzavírá přes zátěž a otevřenou diodu D . Kondenzátor C se vybíjí [2].

Zvyšující měnič

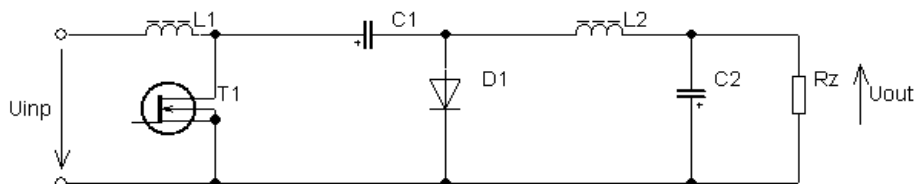


Obr. 8 Zvyšující měnič, činnost

Anglicky označován jako Boost nebo Step-Up. Jeho výstupní napětí je vyšší než napětí na vstupu.

V první fázi cyklu teče proud pouze cívku L a sepnutým tranzistorem T . Kolem cívky je vytvořeno magnetické pole. Ve druhé fázi cyklu je tranzistor T rozepnut, cívka se stává zdrojem energie zapojeným do série s napájecím zdrojem, proud teče ze vstupního zdroje přes cívku L na níž se obrátí polarita napětí a diodu D do zátěže [2].

Zvyšující i snižující měnič



Obr. 9 Zvyšující i snižující měnič

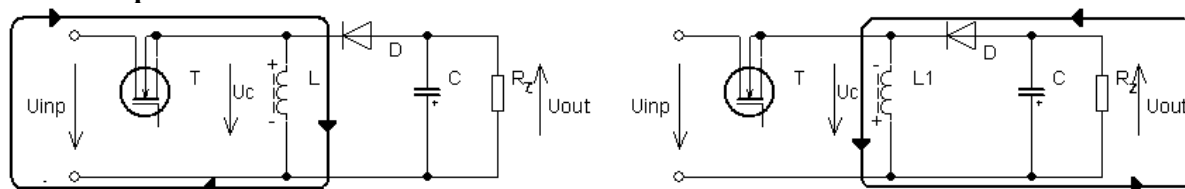
Anglicky označován jako Cuk nebo Buck-Boost. Jde o měnič který dokáže dodávat napětí vyšší nebo i nižší než je napětí na jeho vstupu.

V první části cyklu je tranzistor rozepnut a proud teče ze vstupu přes cívku L_1 , na které zaniká magnetické pole a stala se tak zdrojem energie, a kondenzátor C_1 . Kondenzátor se nabije na hodnotu napětí danou součtem napětí zdroje a napětí na cívce. Ve druhé části je tranzistor sepnut. Proud ze zdroje teče přes cívku a sepnutý tranzistor. Cívka L_1 se stala spotřebičem. Zároveň se začal vybíjet

kondenzátor C_1 přes sepnutý tranzistor, zátěž a cívku L_2 . Cívka L_2 je nyní spotřebičem. Pak se opět opakuje první cyklus, přičemž cívka L_2 se stává zdrojem energie pro zátěž (magnetické pole na ní zaniká, polarita napětí na ní se obrátila).

Velikost výstupního napětí a tedy i to zda je měnič snižující nebo zvyšující lze řídit dobou sepnutí tranzistoru [2]. (Napětím na cívce L_1 , při kterém tranzistor rozezne.)

Invertor napětí



Obr. 10 Invertující měnič

Jednoduchý invertor pracuje následovně. V první části cyklu je tranzistor sepnut a proud teče z napájecího zdroje přes otevřený tranzistor a cívku. Kolem cívky vzniká magnetické pole. V další části cyklu je tranzistor rozeznut. Pole kolem cívky zaniká, cívka se stává zdrojem napětí s opačnou polaritou. Otevře se dioda D a proud z cívky se uzavírá přes zátěž R_Z .

2.1.2 Jednočinné měniče s transformátory

Akumulující měnič – flyback

Jde o nejjednodušší zapojení jednočinného měniče s transformátorem. Teče-li proud primárním vinutím, je usměrňovací dioda na sekundární straně zavřena vlivem polarity na sekundárním vinutí. Energie se tedy akumuluje v magnetickém poli primární cívky. Když magnetické pole začne zanikat, na cívkách se změní polarita napětí a dioda na sekundární straně se otevře. Energie naakumulovaná předtím v magnetickém poli cívky se mění na proud tekoucí přes sekundární vinutí transformátoru otevřenou diodu k zátěži na výstupu. Spínací tranzistor na primární straně musí být dostatečně napětově dimenzován, aby jej nezničilo napětí, které vznikne na primární cívce při jeho rozeznutí. Tato špička je zvlášť nebezpečná, pokud není sekundární strana transformátoru zatížena.

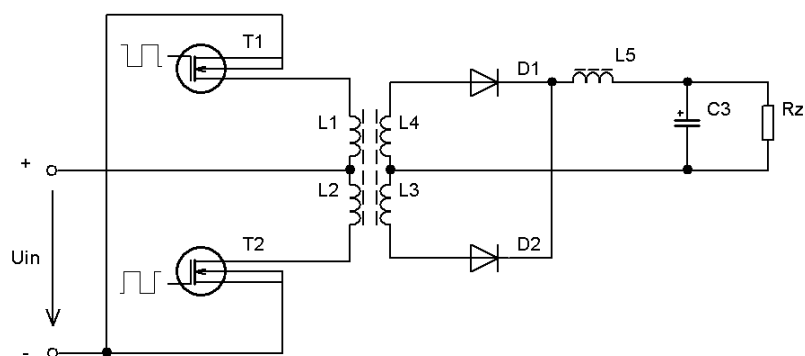
Propustný měnič – forward

Na rozdíl od akumulujícího měniče, u propustného měniče je energie přenášena na výstup v té části cyklu, kdy je na primární straně dodávána, tedy když je tranzistor na primární straně sepnut. Výhodou je, že transformátor může být menší, protože se v něm neakumuluje všechna energie, která má být dodána do zátěže. Nevýhodou je složitější konstrukce. Kromě transformátoru vyžaduje měnič ještě dvě cívky.

2.1.3 Dvojčinné měniče s transformátory

Jejich výhodou oproti jednočinným měničům je, že využívají celou plochu hysterezní smyčky jádra transformátoru. U jednočinných měničů docházelo pouze k jednostrannému sycení jádra, u dvojčinných měničů je jádro transformátoru syceno střídavě oběma směry. Tyto měniče se používají častěji pro vyšší výkony (nad 50 W).

Měnič Push-Pull

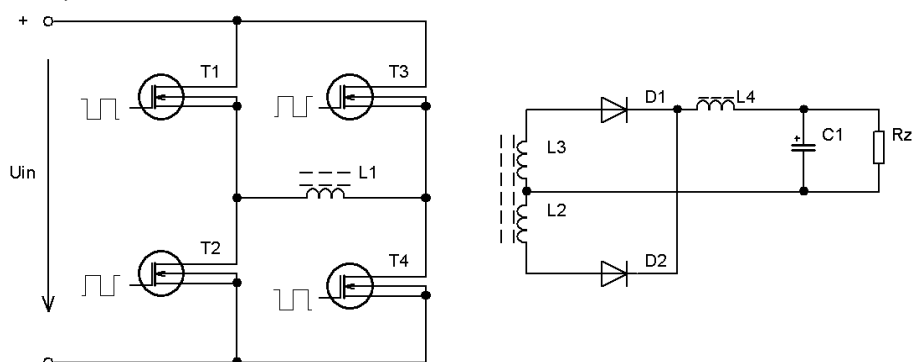


Obr. 11 Zapojení měniče Push-Pull

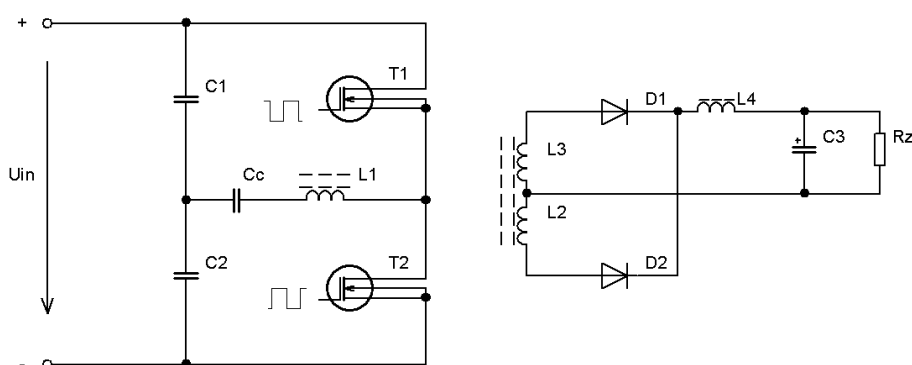
Měnič v můstkovém zapojení

Existují dva základní typy můstkových zapojení.

Jedním z nich je tzv. **úplný most**, který obsahuje čtyři tranzistory a mezi něž je zapojeno primární vinutí transformátoru. Na sekundární straně jsou dvě vinutí, zapojená tak, že vždy na jednom z nich je kladné a na jednom záporné napětí. Výstupní napětí odebírané ze sekundárních vinutí je usměrňováno dvěma diodami. Tranzistory jsou spínány po dvojicích protifázově tak, aby proud tekoucí cívkou v každé polovině cyklu měnil směr. V první části cyklu teče proud přes tranzistor T_1 , cívkou L_1 a tranzistor T_4 . Ve druhé části cyklu pak přes tranzistor T_3 , opět přes cívkou L_1 , tentokrát opačným směrem, a tranzistor T_2 .



Obr. 12 Měnič v zapojení úplný most



Obr. 13 Měnič v zapojení polomost

Druhým typem je tzv. **poloviční most**. V tomto zapojení jsou dva tranzistory nahrazeny kondenzátory a primární strana transformátoru má dvě vinutí. V první části cyklu je otevřen tranzistor T_1 , proud teče tranzistorem T_1 , vinutím L_1 , přes kondenzátor C_c a přes kondenzátor C_2 , který se nabíjí.

Zároveň je přes otevřený T_1 a vinutí L_1 vybíjen C_1 . Ve druhé části cyklu teče proud přes otevřený tranzistor T_2 vinutím L_2 přes kondenzátor C_c (v opačném směru než předtím) a kondenzátor C_1 , který se nabíjí. Princip přenosu energie přes transformátor je schodný jako v předchozích případech.

Popisy jednotlivých zapojení měničů byly částečně převzaty z [1] a [2]

2.2 Integrované obvody pro konstrukci DC/DC měničů

Pro konstrukci DC/DC měničů s indukčnostmi existuje celá řada integrovaných obvodů různých výrobců. Jednotlivé IO se liší směrem konverze a technologií konverze napětí a proudu, rozsahem vstupních a výstupních napětí a proudů. Dále se obvody liší možnostmi nastavení. Některé IO obsahují kompletní IO který se doplní o cívku a několik dalších součástek. Jejich parametry jsou předem dané, ale konstrukce měniče s těmito obvody je jednoduchá. Jiné IO mají širší možnosti nastavení jak vstupních a výstupních parametrů, tak účinnosti a chování obvodu v krizových situacích.

Do této kategorie patří i IO pro měniče s vnějšími spínacími tranzistory. Jde prakticky jen o řídicí obvody. Jejich výhodou je jak variabilita nastavení, tak to, že pracovní proud neprotéká IO, při zničení spínacího tranzistoru stačí nahradit poškozený tranzistor a nikoli celý drahý IO. Nevýhodou je složitější konstrukce.

2.3 Obvody pro DC/DC měniče s externími tranzistory společnosti TI

TPS40052

Jde o snižující měnič s rozsahem vstupních napětí 10 V až 40 V, rozsahem výstupních napětí 0,8 V až 35 V a výstupním proudem až 20 A. Kmitočet spínání může být až 1 MHz, spínání lze externě synchronizovat. Je vybaven ochranou proti přehřátí, funkcí postupného náběhu (Soft-Start) a funkcí postupného vybití výstupního kondenzátoru po vypnutí (Soft-Stop). Výrobce nedoporučuje tento obvod používat v nových aplikacích.

TPS40054 a TPS40055

Parametricky podobné obvody s předchozím.

TPS40100

Snižující měnič s rozsahem vstupních napětí od 4,8 V do 18 V a výstupním napětím od 0,8 V do 5,5 V, výstupní proud může být až 20 A. Spínací kmitočet je až 600 kHz. Obvod je vybaven ochranou proti přehřátí a proti zkratu a funkcí, která zastaví činnost měniče při poklesu vstupního napětí pod nastavenou mez. K dispozici je též vstup externí synchronizace kmitočtu.

TPS40190

Jde o IO pro konstrukci snižujícího měniče s výstupním proudem až 20 A, rozsah vstupních napětí je 4,5 V až 15 V, výstupních pak 0,6 V až 12 V. Neměnný spínací kmitočet je 300 kHz. Obvod je vybaven funkcí Power Good a Soft-Start, ale nemá ochranu proti přehřátí. Ochrana proti přetížení je řešena snímáním úbytku napětí na otevřeném tranzistoru a je nastavitelná ve třech úrovních napětí. Obvod je optimalizován pro jednoduchost zapojení, většina parametrů je neměnná.

TPS40192

Snižující měnič s výstupním proudem do 15 A, vstupní napětí musí být v rozsahu 4,5 V až 18 V, výstupní napětí je v rozsahu 0,6 V až 14,4 V. Spínací kmitočet je 600 kHz. IO je vybaven ochranou proti přehřátí, podpětí na vstupu, zkratu na výstupu, funkcí ENABLE. Většina těchto ochranných funkcí je pevně nastavená z výroby.

TPS40193

Jde o IO s podobnými parametry jako TPS40192, s nižším spínacím kmitočtem 300 kHz, a s maximálním výstupním proudem 20 A.

TPS40195

Tento IO byl vybrán pro konstrukci přípravku s DC/DC měničem. Rozsah vstupních napětí je 4,5 V až 20 V. Výstupní napětí musí být v rozsahu od 0,6 V do 17 V. Maximální výstupní proud 20 A. Nejvyšší spínací kmitočet 600 kHz.

TPS40200

Rozsah vstupních napětí je 4,5 V až 52 V, výstupních pak 0,7 V až 46 V. Výstupní proud činí nanejvýš 3A. Spínací kmitočet lze nastavit na 35 kHz až 500 kHz a lze jej externě synchronizovat, obvod je vybaven ochranou proti zkratu, funkcí odpojení při podpětí na vstupu, funkcí Soft-Start. Tyto ochrany a funkce lze široce uživatelsky konfigurovat. Na rozdíl od předchozích má měnič s tímto IO jen jeden spínací tranzistor. Účinnost měniče dosahuje až 94 %.

TPS51117

Jde o IO určený ke konstrukci měniče se vstupním rozsahem od 1,8 V do 28 V. Výstupní napětí musí být v rozsahu od 0,76V do 5,5 V. Maximální výstupní proud je 10 A. Maximální spínací kmitočet činí 550 kHz. Obvod je vybaven funkcí Power Good, funkcí postupného náběhu při startu, ochranou proti přehřátí a proti přetížení výstupu měniče. Pro svou činnost IO vyžaduje napájecí zdroj 5V.

TPS53114

Rozsah vstupních napětí tohoto IO je 4,5 V až 24 V, výstupních napětí pak od 0,7 V do 5,5 V. Účinnost měniče je 85 %. Spínací kmitočet lze nastavit na 350 kHz nebo 700 kHz. IO je vybaven funkcí Soft-Start, ale nemá ochranu proti přehřátí a není k němu dostupný návrhový software SWITCHERPRO.

3 Přípravek s nábojovou pumpou

Pro konstrukci přípravku byl zvolen IO společnosti Texas Instruments řady TPS6050X

3.1 TPS6050X

Základní parametry

- Vstupní napětí 1,8 V až 6,5 V
- Výstupní proud až 250 mA
- Výstupní napětí (podle typu) 1,8 V; 1,5 V; 3,3 V nebo nastavitelné v rozsahu 0,8 V až 3,3 V
- Účinnost až 90%
- Výstup Power Good

IO obsahuje prakticky veškeré řídicí obvody nutné k chodu nábojové pumpy, interní oscilátor, napěťovou referenci, obvody pro postupný náběh po spuštění, řídicí a spínací obvody. Zapojení stačí doplnit pouze o keramické střádací kondenzátory a vstupní a výstupní filtrační kondenzátory. Tyto pumpy pracují jako Step-Down Buck Converter, tedy výstupní napětí měniče je menší než napětí vstupní. Pro zajištění vyšší účinnosti disponuje IO několika konverzními režimy, které si sám přepíná podle velikosti vstupního napětí a podle proudového zatížení výstupu. Jednotlivé typy IO řady TPS6050X se liší prakticky jen výstupním napětím.

Tabulka 1 Rozdílné vlastnosti IO TPS6050X

Typ	U_{IN} [V]	U_{OUT} [V]
TPS60500	$(U_{OUT} + 1) \div 6,5$	$0,8 \div 3,3$
TPS60501	4,3	3,3
TPS60502	2,8	1,8
TPS60503	2,5	1,5

Při uvedených vstupních napětích dokáže obvod dodávat až 150 mA. Pokud je požadován výstupní proud vyšší, je zapotřebí zvýšit napětí na vstupu.

Tabulka 2 Popis jednotlivých vývodů TPS6050X

Vývod		I/O	Popis
Název	Číslo		
C1F+	6		Pin pro připojení střádacího kondenzátoru (kladná elektroda)
C1F-	8		Pin pro připojení střádacího kondenzátoru (záporná elektroda)
C2F+	4		Pin pro připojení střádacího kondenzátoru (kladná elektroda)
C2F-	3		Pin pro připojení střádacího kondenzátoru (záporná elektroda)
$\overline{\text{EN}}$	1	I	Vstup ENABLE. Je-li na něm úroveň L, je pumpa v činnosti Je-li na něm úroveň H, je pumpa v nečinnosti.
GND	9		Na tento pin je připojena společná zem.
FB	10	I	Pro TPS60500 – zpětná vazba, slouží k nastavení výstupního napětí, je připojena na výstup oporového děliče zapojeného mezi piny OUT a GND. Pro ostatní typy – je připojen k pinu OUT
OUT	7	O	Výstup pumpy, spojen s GND přes filtrační kondenzátor
PG	2	O	Výstup Power Good (otevřený kolektor), je v úrovni H, pokud výstupní napětí překročí 97% nominální hodnoty.
VIN	5	I	Na tento pin je přivedeno vstupní napětí v rozsahu 1,8 V až 6,5 V.

3.1.1 Popis funkcí obvodu

Ochrana před přehřátím a zkratem

Nábojová pumpa je vybavena obvodem, který zastaví její činnost v případě, kdy odebíraný proud překročí povolenou mez. Pokud teplota čipu překročí hranici 150 °C zareaguje ochrana proti přehřátí snížením výstupního proudu. Pokud teplota překročí 160 °C bude činnost obvodu zastavena.

Funkce ENABLE

Pomocí pinu EN je zapínána nebo vypínána činnost nábojové pumpy. Pokud je na pin přivedena úroveň L je obvod v činnosti. Pokud je na pin přivedena úroveň H je činnost pumpy zastavena a její spotřeba klesne na cca 0,05 μA . (Poznámka: Úroveň H > 0,7 U_{IN} a úroveň L < 0,3 U_{IN}).

Funkce Soft-Start

Tato funkce zajistí postupný rozběh integrovaného obvodu a omezí proud odebíraný ze zdroje. Napětí na výstupu dosáhne nominální hodnoty asi po 80-ti μs .

Nastavitelné výstupní napětí

Tato možnost je dostupná pouze u TPS60500. Výstupní napětí je dáno poměrem hodnot odporů rezistorů v děliči výstupního napětí. Dělič je zapojen mezi výstup nábojové pumpy a GND. Výstupní napětí se určí ze vztahu:

$$U_{\text{OUT}} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \cdot U_{\text{FB}} \quad (8)$$

kde U_{OUT} Velikost požadovaného výstupního napětí
 $R_1; R_2$ Odpor rezistorů v napěťovém děliči
 U_{FB} Napětí vnitřní reference, $U_{\text{FB}} = 0,8 \text{ V}$

3.1.2 Konverzní režimy

LDO režim

V tomto režimu je výstup připojován přímo ke vstupnímu napětí a používá se v případě, kdy pro poměr napětí na vstupu a výstupu neexistuje režim s vyšší účinností. Střádací kondenzátory nejsou v tomto režimu vůbec využity. Pokud je $I_{\text{OUT}} < 150 \text{ mA}$, pak je napětí na výstupu udržováno přerušovaným připojováním C_{OUT} k U_{INP} . Pokud proud přeroste přes 150 mA, tak je výstupní napětí řízeno změnou odporu $R_{\text{DS(ON)}}$ spínacího tranzistoru.

Režim 2/3

V tomto režimu jsou využity střádací kondenzátory. V prvním stavu jsou střádací kondenzátory spojeny paralelně a jedna elektroda této paralelní dvojice je připojena ke vstupnímu napětí, druhá je přes výstupní kondenzátor spojena s GND.

Ve druhé části cyklu jsou pak střádací kondenzátory spojeny sériově a tato sériová kombinace pak připojena k výstupu. Tento režim je použit pokud je napětí na vstupu 1,5 krát větší než požadované výstupní napětí.

Režim 1/2

Tento režim je zvolen, pokud je nominální napětí na výstupu nižší než polovina vstupního napětí. V obou částech cyklu jsou střádací kondenzátory spojeny paralelně. V první části cyklu se paralelní kombinace střádacích kondenzátorů nabíjí ze vstupu přes výstupní kondenzátor a ve druhé části cyklu jsou střádací kondenzátory připojeny paralelně k výstupu.

Režim 1/3

Tento režim je zvolen, pokud je vstupní napětí alespoň trojnásobně vyšší, než napětí na výstupu. V tomto režimu jsou v první části cyklu spojeny všechny tři kondenzátory (oba střádací kondenzátory a výstupní kondenzátor) do série a ve druhé části cyklu jsou všechny tři kondenzátory spojeny paralelně.

3.1.3 Volba kondenzátorů

Výrobce doporučuje, aby kapacita výstupního kondenzátoru činila minimálně 4,7 μF , pokud předpokládáme výstupní proud vyšší jak 150 mA, měl by být použit kondenzátor s kapacitou alespoň 22 μF . Střádací kondenzátory je nutno použít keramické. Doporučená kapacita 1 μF . Doporučený materiál dielektrika je X5R nebo X7R, vzhledem k teplotní závislosti kapacity je výhodnější kondenzátor s dielektrikem X5R. Pokud by vstupní nebo výstupní kondenzátor měl být jiný než keramický, pak je vhodné připojit k němu paralelně keramický kondenzátor s kapacitou kolem 100 nF.

3.2 Popis laboratorního přípravku

Laboratorní přípravek pro měření nábojové pumpy sestává ze tří částí. Napájecí část a obvod s nábojovou pumpou jsou umístěny na vlastní desce, která je k nosné desce přípravku připevněna pomocí distančních sloupků. Zátěž tvořená deseti LED s vypínači je umístěna na hlavní desce přípravku.

3.2.1 Napájecí část

První část je napájecí. Jejím úkolem je zajistit napájení nábojové pumpy v přípustném rozsahu napětí. Je tvořena integrovaným obvodem LM317, dvěma ochrannými diodami, filtračními kondenzátory a odporovým děličem složeným z pevného rezistoru o hodnotě 270 Ω , zapojeného mezi piny OUT a ADJ LM317 a potenciometru o hodnotě 1 k Ω (měřením byla zjištěna skutečná hodnota odporu 1056 Ω) zapojeného mezi pin ADJ a společnou svorku GND. Pro správnou funkci obvodu musí napětí na vstupu napájecí části být v rozmezí 9 V až 37 V. Výstupní napětí napájecí části lze regulovat v rozsahu přibližně 1,25 V až 6,5 V. Maximální velikost výstupního napětí se určí ze vztahu:

$$U_{OUT(max)} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot 1,25 \quad (9)$$

kde R_1 hodnota pevného rezistoru
 R_2 hodnota potenciometru

Dosazením do (9) vychází $U_{OUT(max)} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot 1,25 = \left(1 + \frac{1056}{270}\right) \cdot 1,25 = 6,15 \text{ V}$

3.2.2 Nábojová pumpa

Druhá část je samotný obvod s nábojovou pumpou. Hlavním prvkem bude IO řady TPS6050X. Deska plošného spoje je navržena tak, aby bylo možné použít kterýkoliv obvod z řady TPS 6050X, ale vzhledem k navržené zátěži by byl použit IO TPS60500. Dále je tato část vybavena přepínačem výstupních kondenzátorů. Při měření tak bude možné vyzkoušet vliv velikosti kapacity výstupního kondenzátoru na činnost nábojové pumpy. Navržené kondenzátory mají kapacitu 4,7 μF a 22 μF . Střádací kondenzátory mají kapacitu 1 μF a jejich kapacita je za chodu neměnná. Použití TPS 60500 umožňuje nastavit výstupní napětí pomocí odporového děliče napětí

3.2.3 Zátěž

Třetí částí navrženého přípravku je zátěž pro nábojovou pumpu. Tato zátěž je realizována pomocí deseti LED, každá LED má vlastní vypínač, předřadný rezistor a paralelní rezistor. Předřadným rezistorem je omezen proud tekoucí LED, paralelním rezistorem je možné zvýšit zátěž kterou představuje konkrétní LED. To znamená, že každá jednotlivá rozsvícená LED může představovat jinou hodnotu zátěže.

Pro diody s proudovým odběrem 2 mA a přibližným úbytkem napětí 2V vychází, podle Ohmova zákona, při napětí na výstupu pumpy 3,3V hodnota předřadného rezistoru

$$R_L = \frac{U}{I} = \frac{(3,3 - 2)}{0,002} = 650 \text{ } \Omega, \text{ této hodnotě je nejbližší hodnota z řady E12 } 680 \text{ } \Omega.$$

Všechny LED jsou nízkopříkonové a požadovaný odběr je dostaven paralelními rezistory. Hodnota žádného paralelního rezistoru nesmí být nižší než 43,6 Ω , jinak by se na rezistoru mařil výkon vyšší než maximální povolený ztrátový výkon 0,25 W. všechny paralelní rezistory mají hodnotu 150 Ω a každá rozsvícená LED tak představuje zátěž 25 mA.

Jednotlivé části budou propojeny pomocí ampérmetrů, kterými bude měřen proud na vstupu a výstupu nábojové pumpy. Paralelně ke vstupu a výstupu pumpy budou připojeny voltmetry pro měření velikosti vstupního a výstupního napětí.

Hlavním cílem měření bude zjištění účinnosti nábojové pumpy. Dále pak zjištění, při jakém napětí na vstupu začíná nábojová pumpa pracovat a jak se mění vlastnosti pumpy při změně kapacity výstupního kondenzátoru a velikosti napájecího napětí.

4 Přípravek s DC/DC měničem

Pro konstrukci přípravku byl zvolen IO společnosti Texas Instruments TPS40195

4.1 TPS40195

TPS 40195 je řídicí integrovaný obvod pro konstrukci snižujícího DC/DC měniče firmy Texas Instruments s externími spínacími tranzistory, s možností synchronizace a výstupem Power Good.

Základní vlastnosti:

- Vstupní napětí v rozsahu 4,5 V až 20 V,
- Pevné výstupní napětí v rozsahu 0,6 V až 17 V,
- Spínací kmitočet nastavitelný v rozsahu 100 kHz až 600 kHz,
- Vnitřní zdroj napětí 5V,
- UVLO - Odpojení při poklesu vstupního napětí pod nastavenou mez,
- Odpojení při přehřátí – Thermal Shutdown,
- Ochrana před proudovým přetížením.

4.1.1 Popis

Na čipu jsou integrovány obvody řídicí spínání dvou tranzistorů typu MOSFET s N kanálem. Dále pak obvody, které hlídají velikost vstupního a výstupního napětí a ochranný obvod hlídající proud výstupním tranzistorem, který zastavuje činnost měniče při překročení maximálního nastaveného proudu.

Tabulka 3 Popis jednotlivých vývodů TPS40195

Vývod		Popis
Název	Číslo	
BOOT	14	Řídící napětí pro High-Side MOSFET. Spojen přes kondenzátor 100 nF s pinem SW
BP	12	Bypass vnitřního regulátoru 5V. Spojen s GND přes kondenzátor 100 μ F.
COMP	3	Výstup zesilovače odchylky
EN	1	Vstup ENABLE. Měnič je spuštěn, je-li v úrovni H. Měnič je zastaven je-li v úrovni L. Přes vnitřní Pull-Up rezistor spojen s H, tedy měnič funguje, i když je pin nezapojen.
FB	2	Invertující vstup zesilovače odchylky, je připojen přes napěťový dělič k výstupnímu napětí.
GND	8	Pin připojen na společnou zem.
HDRW	16	Výstup spínacích pulzů pro High-Side MOSFET
ILIM	7	Nastavení proudového limitu pomocí rezistoru spojeného s GND
LDRW	13	Výstup spínacích pulzů pro Low-Side MOSFET
PGOOD	10	Výstup Power Good
RT	6	Nastavení spínacího kmitočtu. Pokud je spojen s GND je spínací kmitočet 250 kHz a pin SYNC je nastaven jako výstupní. Pokud je spojen s pinem BP je nastaven spínací kmitočet 500 kHz a pin SYNC je nastaven jako výstupní. Pokud je připojen ke GND přes rezistor, je spínací kmitočet určen hodnotou rezistoru a pin SYNC je nastaven jako vstup externí synchronizace, pokud externí synchronizaci není zapotřebí spojte pin SYNC se společnou zemí GND.
SS SEL	11	Nastavení funkce Soft-Start.
SW	15	
SYNC	9	Vstup / Výstup externí synchronizace. Nastaven jako výstup, pokud je pin RT připojen ke GND nebo k BP. Nastaven jako vstup pokud je k RT připojen nastavovací rezistor. Pokud není vstup externí synchronizace potřeba, připojte jej ke GND.
UVLO	5	Nastavení funkce odpojení při podpětí UVLO. Je připojen na napěťový dělič vstupního napětí.
VDD	4	Vstup napájecího napětí. Spojen přes kondenzátor 100 nF s GND.

4.1.2 Popis funkcí obvodu

Funkce ENABLE

TPS40195 je vybaven funkcí ENABLE, která umožňuje zastavení chodu měniče a odpojení pomocných obvodů. Pokud je pin EN (č. 1) nastaven na logickou úroveň L, tedy je spojen s GND, je měnič vypnut, pokud je na něm logická úroveň H, nebo pokud je odpojen, měnič je v činnosti.

Funkce Undervoltage Lockout (UVLO)

Tato funkce slouží k zastavení činnosti měniče pokud napětí na vstupu klesne pod nastavenou mez. Tato mez se nastavuje odporovým děličem napětí připojeným mezi piny VDD a GND. Výstup děliče je spojen s pinem UVLO (č. 5). Funkce je opatřena hysterezí, která zabezpečuje, že měnič se vypne při určitém napětí U_{OFF} a znovu se spustí pokud napájecí napětí na vstupu překročí napětí U_{ON} a platí, že $U_{ON} > U_{OFF}$. Hodnoty rezistorů pro nastavení funkce UVLO se určí podle rovnic:

$$R_1 = \frac{U_{ON} - U_{OFF}}{I_{UVLO}}, \quad (10)$$

$$R_2 = \frac{R_1 \cdot U_{UVLO}}{U_{ON} - U_{UVLO}}, \quad (11)$$

kde	U_{ON}	Napájecí napětí, nad kterým má být měnič spuštěn,
	U_{OFF}	Napájecí napětí, při kterém má být měnič vypnut, pod tímto napětím nepracuje,
	U_{UVLO}	Vnitřní referenční napětí komparátoru, typicky 1,26 V,
	I_{UVLO}	Vnitřní proud hystereze, typicky 5,2 μ A.

Funkce Soft Start

Tato funkce slouží k postupnému náběhu napětí na výstupu měniče po jeho spuštění. Obvod Soft Start obsahuje čítač a D/A převodník. Čítač čítá hodinové pulzy z interního oscilátoru a D/A převodník převádí binární hodnotu na výstupu čítače na rampový průběh rostoucí od 0V do 1 V. Tato rampová funkce je přivedena na zesilovač odchylky a supluje referenční napětí tohoto zesilovače do momentu, kdy překročí napětí 0,591 V. Potom je jako referenční napětí použita právě hodnota 0,591 V. Doba náběhu je závislá na kmitočtu interního oscilátoru a na počtu stupňů převodníku. Počet stupňů převodníku lze nastavit zapojením pinu SS_SEL (č. 11).

Zapojení pinu SS_SEL	Počet stupňů převodníku
GND	2048
Nezapojen (Floating)	1024
BP	512

Doba náběhu na nominální výstupní napětí se určí podle rovnice

$$t_{SS} = 0,591 \cdot \frac{N_{DAC}}{f_{SW}}, \quad (12)$$

kde	t_{SS}	Doba náběhu [s],
	N_{DAC}	Počet stupňů D/A převodníku,
	f_{SW}	Kmitočet vnitřního oscilátoru (Spínací kmitočet).

Ochrana proti proudovému přetížení

Tato funkce ochrání spínací tranzistory před zničením v případě zkratu na výstupu měniče. Je měřeno napětí mezi Drain a Source spínacího tranzistoru v sepnutém stavu. Pokud tento úbytek napětí překročí stanovenou mez je tranzistor vypnut a zároveň je inkrementován čítač těchto poruchových vypnutí. Pokud čítač přeteče (po sedmi zkratových cyklech) dojde k zastavení činnosti spínacích tranzistorů na dobu přibližně 40 ms.

Proudová mez se určí ze vztahů:

$$I_{SCP}(min) = \frac{I_{ILIM}(min) \cdot R_{ILIM}(min) + V_{ILIMOFST}(min)}{R_{DS(on)}(max)}, \quad (13)$$

$$I_{SCP}(max) = \frac{I_{ILIM}(max) \cdot R_{ILIM}(max) + V_{ILIMOFST}(max)}{R_{DS(on)}(min)}, \quad (14)$$

kde	I_{SCP}	Mezní výstupní proud,
	I_{ILIM}	Proudový šum (typicky 9 μ A),
	R_{ILIM}	Hodnota rezistoru připojeného mezi piny ILIM a GND,
	$V_{ILIMOFST}$	Napětíový offset komparátoru napětí UDS,
	$R_{DS(on)}$	Odpor spínacího tranzistoru v sepnutém stavu.

Maximální proud, který lze odebírat z výstupu měniče:

$$I_{OUT(max)} = \frac{V_{ILIMH}}{R_{DS(ON)}} \quad (15)$$

kde V_{ILIMH} Napětí na sepnutém tranzistoru (High-Side),
 $I_{OUT(max)}$ Maximální odebíratelný výstupní proud,
 $R_{DS(ON)}$ Odpor spínacího tranzistoru (High-Side) v sepnutém stavu.

Drivery

Drivery jsou obvody řídící spínání externích tranzistorů. TPS40195 má dva tyto obvody. Jeden řídí Hgh-Side MOSFET a druhý Low-Side MOSFET. Na výstupu obvodů je řídící napětí $U_{GS} = 5 \text{ V}$.

Funkce Power Good

Na výstupu PGOOD je úroveň L pokud je v činnosti funkce Soft Start nebo je indikováno proudové přetížení, nízké napětí na vstupu nebo pokud teplota na čipu přesáhne 150°C .

Funkce Thermal Shutdown

Tato funkce zastaví činnost měniče, pokud teplota na čipu TPS40195 překročí 150°C . Chrání tak integrovaný obvod před přehřátím. Činnost měniče je obnovena, pokud klesne teplota na čipu přibližně na 130°C .

4.2 Popis přípravku

Přípravek je sestaven ze dvou částí. Jednou částí je obvod ochraňující měnič před připojením vyššího vstupního napětí, než které povoluje výrobce IO, druhou částí je samotný DC/DC měnič s integrovaným obvodem Texas Instruments TPS40195. Plošný spoj s ochranným obvodem a plošný spoj s měničem jsou připevněny k vrchní desce pomocí distančních sloupků

4.2.1 Ochranný obvod

Ochranný obvod sestává ze stabilizátoru napětí, komparátoru a relé. Stabilizátor napětí 7805 vytváří napájecí napětí pro komparátor LM393 a relé. LM393 obsahuje ve svém pouzdře dva komparátory, v tomto zapojení je využit jen jeden z nich. Relé spíná vstupní napájecí napětí pro obvod DC/DC měniče. Na neinvertující vstup komparátoru je připojeno referenční napětí rovné $2,5 \text{ V}$ vytvořené na odporovém děliči ze stabilizovaného napětí 5V . Na invertující vstup komparátoru je připojen výstup odporového děliče napětí zapojeného mezi vstupní napájecí svorky přípravku UCC a GND. Tento dělič je složen z rezistorů o hodnotě $10 \text{ k}\Omega$ a $1,5 \text{ k}\Omega$. Napětí na výstupu děliče je tedy dáno vztahem $U_2 = U_1 \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = U_1 \cdot \frac{1,5}{10 + 1,5} = \frac{U_1}{7,66}$. Tedy napětí na invertujícím vstupu je $7,66$

krát nižší než je napětí na vstupu přípravku. Pokud napětí na invertujícím vstupu LM393 překročí hodnotu napětí na vstupu neinvertujícím, pak se překlápí komparátor a rozeptne relé, čímž přeruší napájení DC/DC měniče. K tomu dojde pokud bude vstupní napětí $U_{INP} = 7,66 \cdot 2,5 = 19,15 \text{ V}$, tedy hodnota napětí o $0,85 \text{ V}$ nižší než je maximální vstupní napětí pro obvod TPS40195.

4.2.2 DC/DC měnič

Druhou část přípravku tvoří obvod s DC/DC měničem. Ten je tvořen integrovaným obvodem TPS40195, dvěma spínacími tranzistory FET s N kanálem, cívkou, výstupním filtračním kondenzátorem a dalšími součástkami pro nastavení výstupního napětí, nastavení funkcí IO a zajištění stability obvodu měniče. DC/DC měnič je realizován na samostatné desce plošných spojů a jeho vstupy a výstupy jsou připojeny pomocí vodičů na desku přípravku.

Požadavky na DC/DC měnič:

- Vstupní napětí v rozsahu 10 V až 15 V,
- Výstupní napětí přibližně 5V,
- Výstupní proud v rozsahu 1 A až 3 A.

Navržený měnič je schopen pracovat v rozsahu vstupních napětí 10 V až 20 V, jeho jmenovité výstupní napětí je 5 V a jmenovitý výstupní proud činí 3 A, je vybaven ochranou proti zkratu a nadproudu a ochranou proti přehřátí, obojí součástí zvoleného IO.

Zátěž DC/DC měniče bude provedena pomocí speciální programovatelné zátěže.

Hlavním bodem měření v laboratoři bude závislost účinnosti na připojené zátěži.

4.2.3 Výpočty pro DC/DC měnič

Ke zvolenému obvodu TPS40195 poskytuje společnost Texas Instruments software s názvem SwitcherPro, který slouží k návrhu hodnot a typů součástek na základě zadaných požadovaných vstupních a výstupních parametrů měniče. Tento software je dostupný online po registraci na stránkách www.ti.com. Pro práci s tímto softwarem je nutno mít nainstalovaný OS MS Windows XP nebo vyšší, internetový prohlížeč Mozilla Firefox nebo Internet Explorer. Pro návrh měniče byl použit právě software SwitcherPro. Tento software byl použit pro výpočet hodnot součástek obvodů zajišťujících stabilitu, pro výpočet kapacity vstupních a výstupních kondenzátorů.

Nastavení spínacího kmitočtu se provádí pomocí rezistoru připojeného na vývod RT nebo propojením vývodu RT s vývodem GND nebo BP, viz Tabulka 3.

Pro hodnotu rezistoru platí vztah:

$$R_{RT} = \frac{2,5 \cdot 10^4}{f_{SW}}, \quad (16)$$

kde R_{RT} odpor rezistoru zapojeného mezi piny RT a GND v k Ω ,
 f_{SW} spínací kmitočet generovaný vnitřním oscilátorem v kHz.

Doporučený kmitočet f_{SW} je 300 kHz a pro rezistor R_{RT} podle výše uvedeného vzorce platí

$$R_{RT} = \frac{2,5 \cdot 10^4}{300} = 83,33 \text{ k}\Omega.$$

V navrženém obvodu je použit rezistor s hodnotou 82 k Ω a výsledný kmitočet bude podle výše uvedeného vztahu přibližně 305 kHz.

Indukčnost výstupní cívky se vypočítá podle vztahu

$$L_{OUT} = \frac{U_{OUT}}{U_{INP(max)}} \cdot \frac{U_{INP(max)} - U_{OUT}}{f_{SW} \cdot I_{ripple}}, \quad (17)$$

kde L_{OUT} indukčnost výstupní cívky,
 U_{OUT} výstupní napětí měniče,
 $U_{INP(max)}$ Nejvyšší předpokládané provozní napětí na vstupu měniče,
 f_{SW} spínací kmitočet měniče,
 I_{ripple} maximálně 20 % z jmenovitého výstupního proudu,

Podle doporučení z Datasheetu k TPS40195 byla zvolena hodnota $I_{ripple} = 15 \%$ z jmenovitého výstupního proudu.

Dosažením požadovaných hodnot do vztahu (17) dostáváme

$$L_{OUT} = \frac{5}{20} \cdot \frac{20 - 5}{300 \cdot 0,15 \cdot 3} = 2,77 \cdot 10^{-5} \text{ H}.$$

Ve výsledném návrhu je použita cívka s indukčností 27 μ H.

Skutečná hodnota zvlnění I_{ripple} pro navrženou cívku činí

$$I_{ripple} = \frac{U_{OUT}}{U_{INP(max)}} \cdot \frac{U_{INP(max)} - U_{OUT}}{f_{SW} \cdot L_{OUT}} = \frac{5}{20} \cdot \frac{20 - 5}{300\,000 \cdot 27 \cdot 10^{-6}} = 0,463 \text{ A.}$$

Proud cívku činí

$$I_{LRMS} = \sqrt{I_{OUT}^2 + \frac{I_{ripple}^2}{12}} = \sqrt{3^2 + \frac{0,463^2}{12}} = 3 \text{ A.}$$

Špičkový proud cívku činí

$$I_{Ls} = I_{OUT} + \frac{I_{ripple}}{2} = 3 + \frac{0,463}{2} = 3,23 \text{ A.}$$

Výpočet hodnot rezistorů pro funkci Undervoltage Lockout

Tato funkce znemožňuje činnost obvodu při nízkém napětí na vstupu měniče. Funkce je popsána v části Popis funkcí obvodu

Pro rezistory R_1 a R_2 platí

$$R_1 = \frac{U_{ON} - U_{OFF}}{I_{UVLO}} = \frac{10 - 9}{5,2 \cdot 10^{-6}} = 192\,310 \text{ } \Omega,$$

$$R_2 = \frac{R_1 \cdot U_{UVLO}}{U_{ON} - U_{UVLO}} = \frac{192\,310 \cdot 1,26}{10 - 1,26} = 27\,724 \text{ } \Omega.$$

Hodnoty rezistorů nejsou kritické a byly nahrazeny rezistory s nejbližšími dostupnými hodnotami 27 k Ω a 180 k Ω .

Nastavení funkce Soft-Start

Počet stupňů převodníku je 512, doba náběhu podle rovnice (12) činí přibližně 1 ms.

$$t_{SS} = 0,591 \cdot \frac{N_{DAC}}{f_{SW}} = 0,591 \cdot \frac{512}{300\,000} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ s.}$$

5 Přípravek s proudovou a napět'ovou referencí

Pro přípravek byla zvolena napět'ová reference LM336 s jmenovitým výstupním napětím 2,5 V.

Jako proudová reference slouží IO LM334 s rozsahem referenčních proudů od 1 μ A do 10 mA.

5.1 Popis přípravku

První částí přípravku je obvod omezující napětí, které bude přivedeno na reference. Tato část je tvořena IO LM317, jehož zpětnovazební obvod je tvořen rezistorem $R_1 = 240 \text{ } \Omega$ a potenciometrem P_1 s hodnotou 2,2 k Ω . Tím je zajištěno, že napětí na jeho výstupu bude nanejvýš 12,7 V.

Další částí je obvod napět'ové reference tvořený IO LM336 s rezistorem $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ v sérii a s paralelně připojeným potenciometrem $P_2 = 2 \text{ k}\Omega$, který bude tvořit regulovatelnou zátěž.

Jako proudová reference slouží IO LM334. V sérii s ním je připojen potenciometr s hodnotou 10 k Ω a omezovací rezistor 1,2 k Ω , potenciometr P_4 připojený ke vstupu R slouží k nastavení velikosti

$$\text{referenčního proudu } I_{SET} = \frac{U_R}{R_{SET}} \cdot 1,059, \quad (18)$$

kde I_{SET} velikost referenčního proudu,
 U_R velikost napětí na potenciometru P_4 ,
 R_{SET} hodnota odporu nastaveného na potenciometru P_4 .

Hodnota napětí U_R je 64 mV při 25 °C, je teplotně závislá a roste s rostoucí teplotou o 214 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$. Pro nastavení proudu bude použit potenciometr s hodnotou 2,2 k Ω , čímž lze nastavit proud nejméně 30 μA .

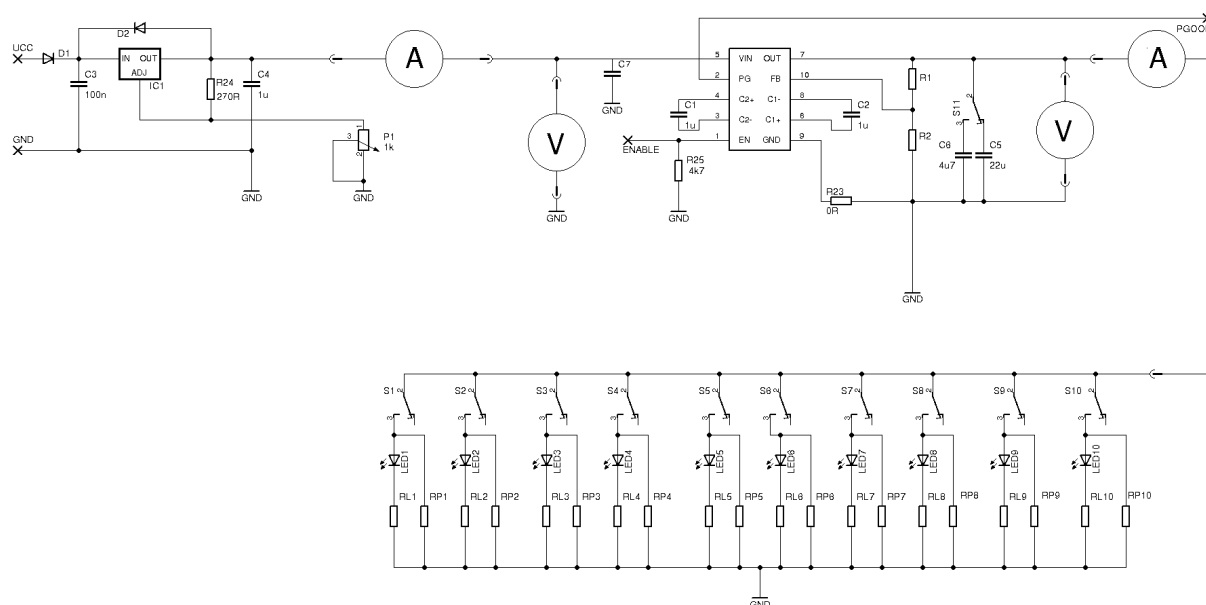
Součástí přípravku je Peltierův článek, který chladí nebo zahřívá reference a umožňuje tak měřit teplotní závislosti referenčních veličin. Peltierův článek je zapojen do můstku složeného ze čtyř tranzistorů BUZ 11. Tento mástek je řízen pomocí dvojitého komparátoru LM 393. Teplota je snímána pomocí převodníku teploty na napětí LM35. Teplotě 0 °C odpovídá 0 mV výstupního napětí, výstupní napětí roste s teplotou 10 mV/°C. Teplota je indikována pomocí digitálního voltmetru umístěného na přípravku. Obvod pro napájení voltmetru je umístěn na přípravku.

V laboratoři se budou měřit závislosti referenčních veličin na vstupním napětí, na teplotě a na velikosti zatěžovacího odporu. Teplotní závislosti lze očekávat výrazné, zvláště u LM334.

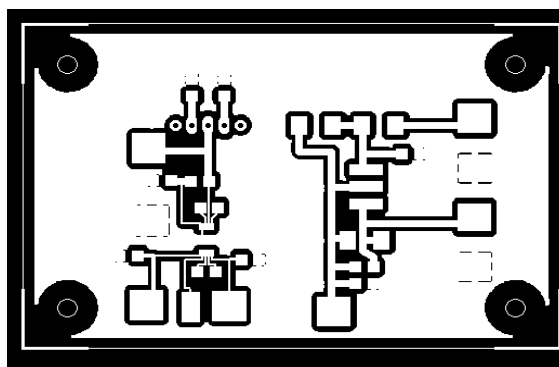
6 Schémata zapojení a desky plošných spojů

Typové označení součástek a jejich hodnoty jsou uvedeny ve schématech. Zdiřky pro připojení vodičů a potenciometry jsou na deskách naznačeny kroužkem. Pro zdiřky je použit kroužek s průměrem 15 mm. všechny potenciometry budou o průměru 22 mm s osou o průměru 5 mm nebo 6 mm. Všechny rezistory a kondenzátory jsou SMD velikosti 1206, přepínače jsou páčkové nebo posuvné do DPS s roztečí vývodů 2.54 mm, LED s průměrem 3 mm.

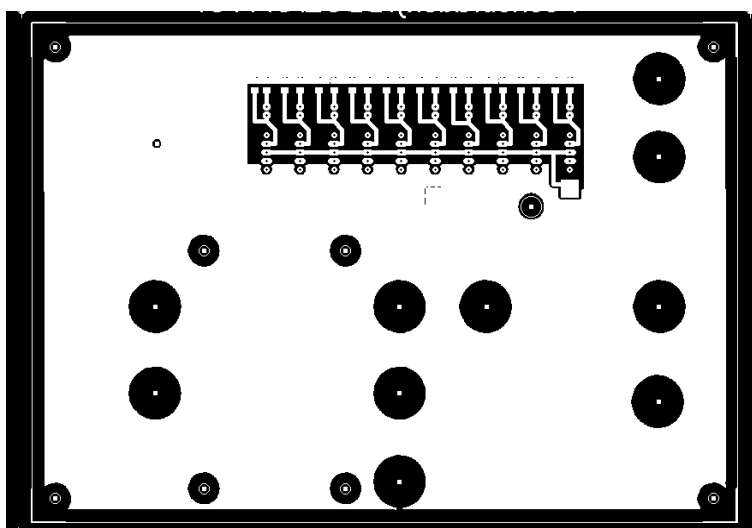
6.1 Přípravek s nábojovou pumpou



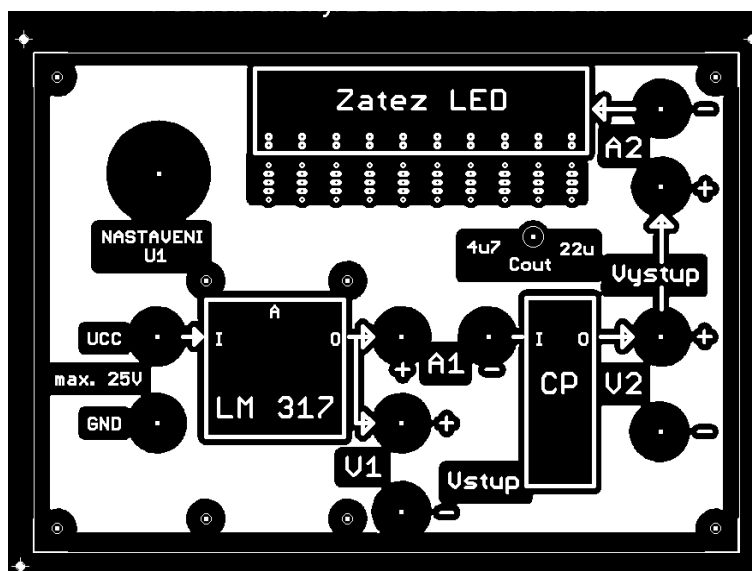
Obr.14 Schéma zapojení přípravku s nábojovou pumpou



Obr. 15 Plošný spoj přípravku s nábojovou pumpou (82 mm x 56 mm)

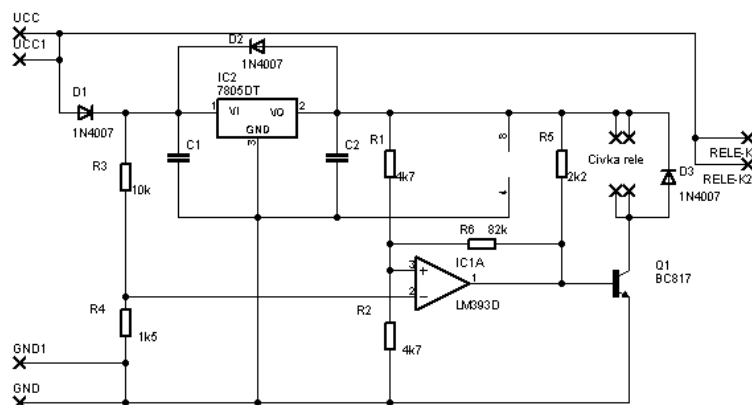


Obr. 16 Pohled na zdní část nosné desky přípravku s nábojovou pumpou (250 mm x 150 mm)

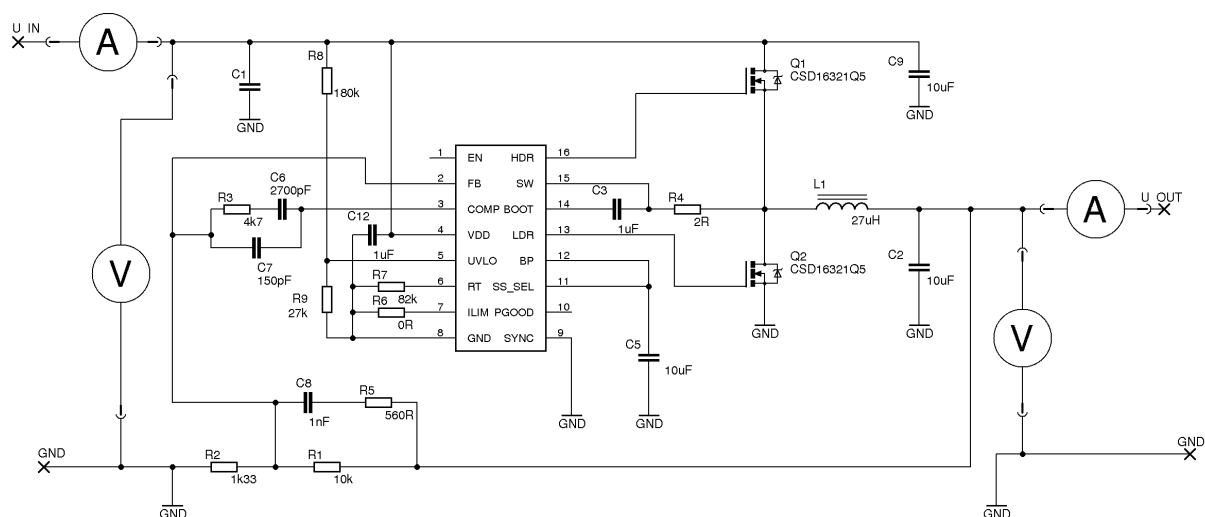


Obr. 17 Pohled na přední část nosné desky přípravku s nábojovou pumpou (250 mm x 150 mm)

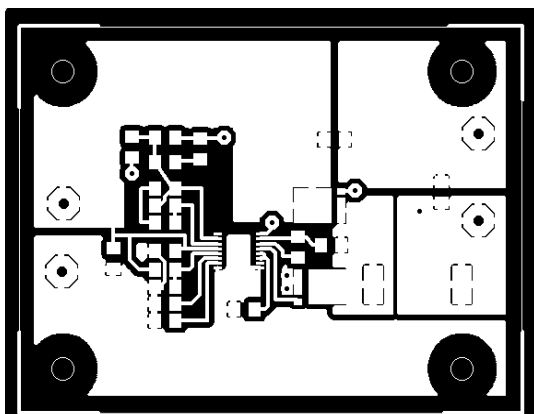
6.2 Přípravek s DC/DC měničem



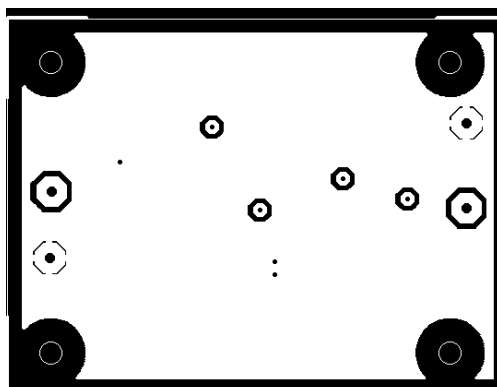
Obr. 18 Schéma zapojení ochranného obvodu



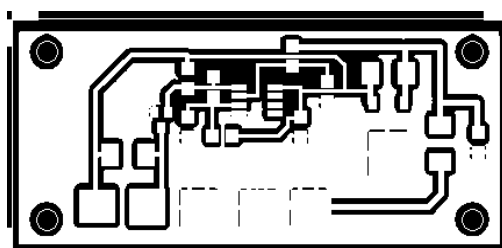
Obr. 19 Schéma zapojení DC/DC měniče



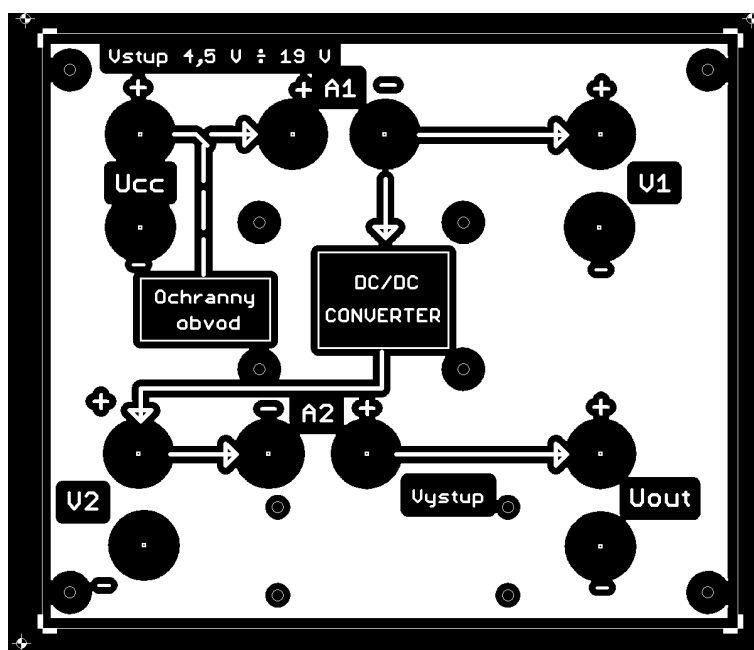
Obr. 20 Plošný spoj DC/DC měniče TOP (70 mm x 52 mm)



Obr. 21 Plošný spoj DC/DC měniče BOTTOM (70 mm x 52 mm)

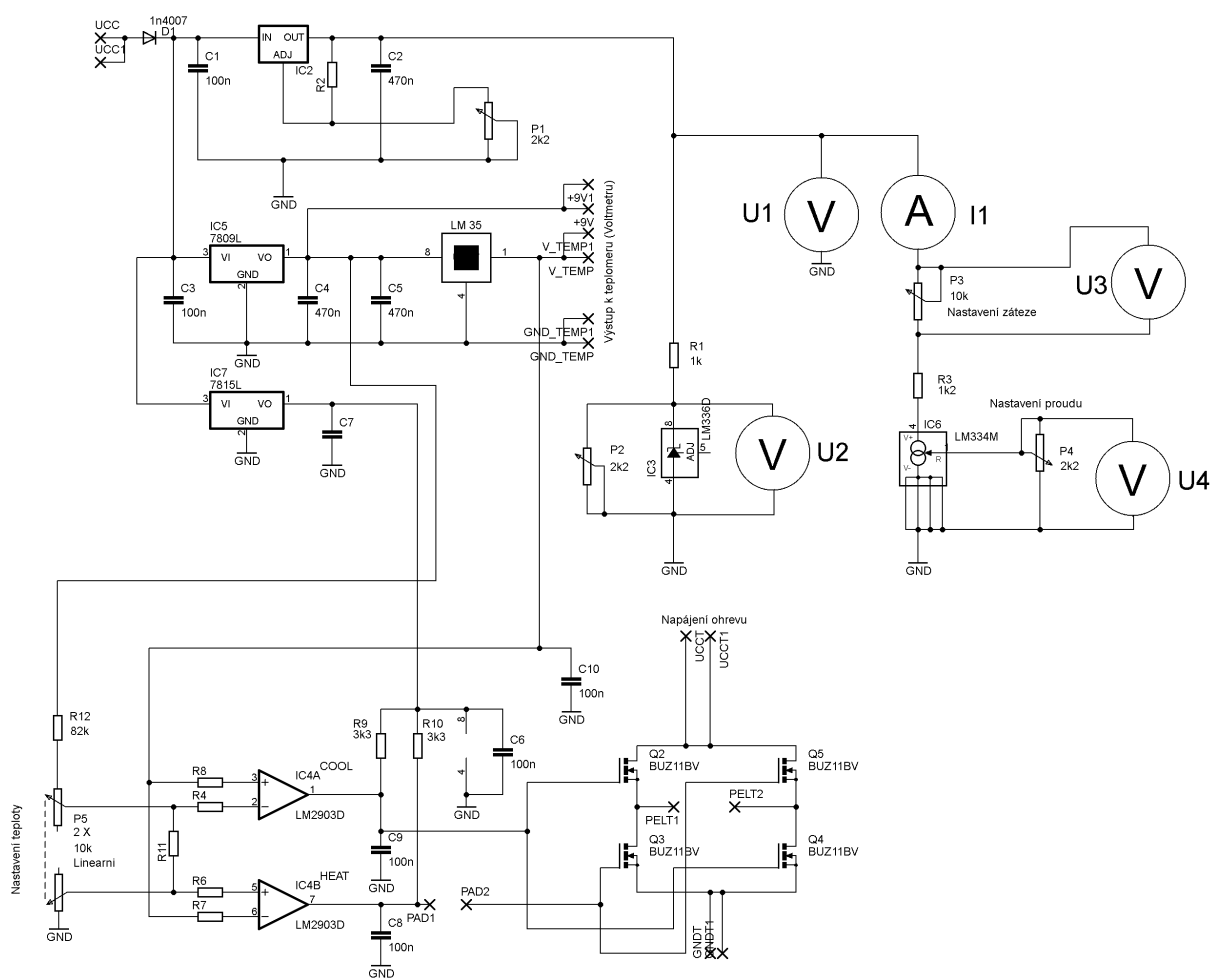


Obr. 22 Plošný spoj ochranného obvodu (72 mm x 33 mm)

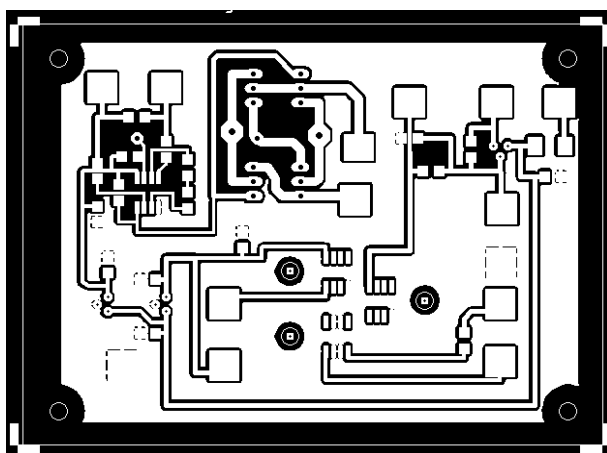


Obr. 23 Nosná deska přípravku s DC/DC měničem (192 mm x 163 mm)

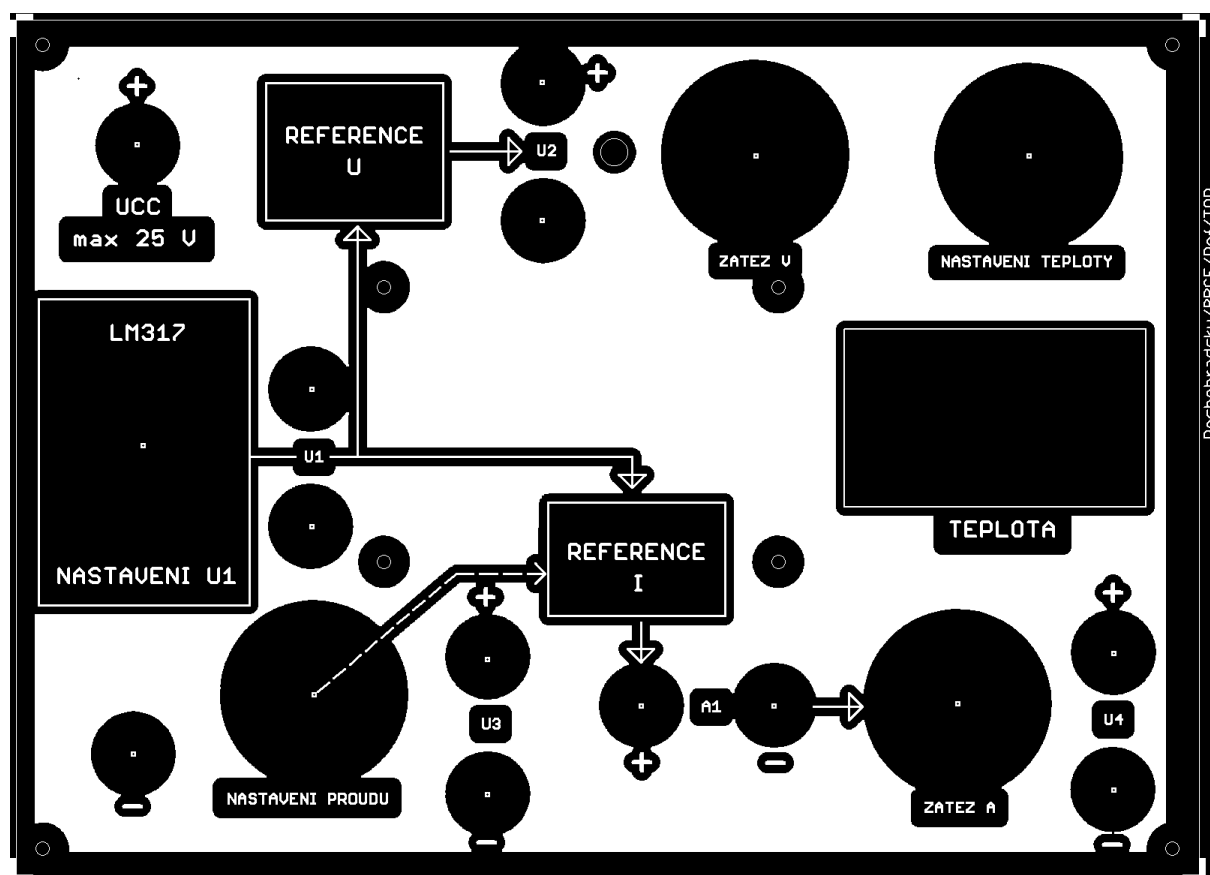
6.3 Přípravek s proudovou a napěťovou referencí



Obr. 24 Schéma zapojení přípravku s proudovou a napěťovou referencí



Obr. 25 Plošný spoj přípravku s napěťovou a proudovou referencí (100 mm x 74 mm)



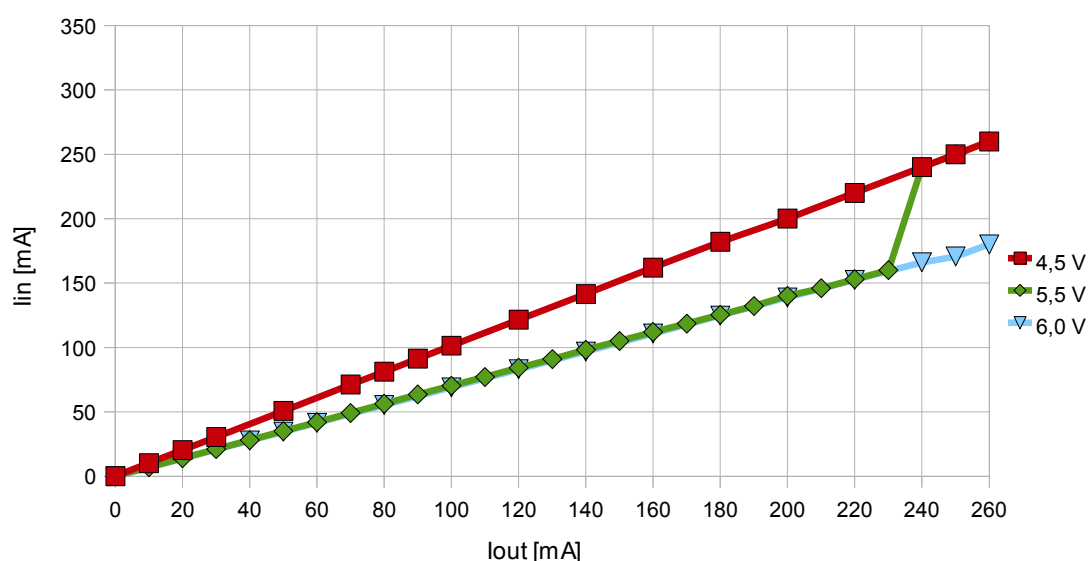
Obr. 26 Nosná deska přípravku s napěťovou a proudovou referencí (267 mm x 193 mm)

7 Naměřené závislosti

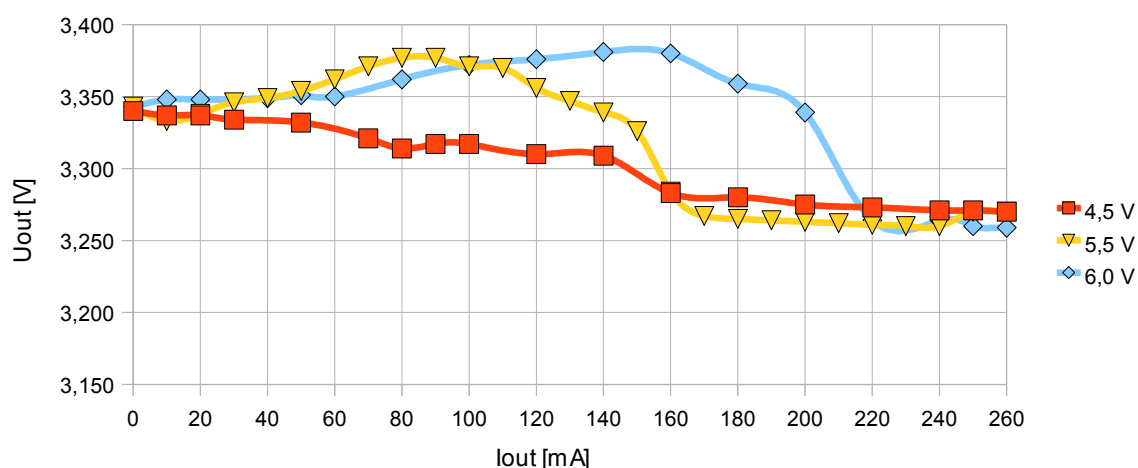
Do textu bakalářské práce byly vybrány jen závislosti znázorňující důležité nebo zajímavé vlastnosti navržených přípravků. Tabulky naměřených hodnot, jakož i další grafy jsou k práci přiloženy v elektronické podobě.

7.1 Přípravek s nábojovou pumpou

Na nábojové pumpě bylo provedeno měření závislosti vstupního proudu a výstupního napětí na výstupním proudu, při různých konstantních vstupních napětích. Z těchto hodnot byla vypočítána závislost účinnosti na výstupním proudu.



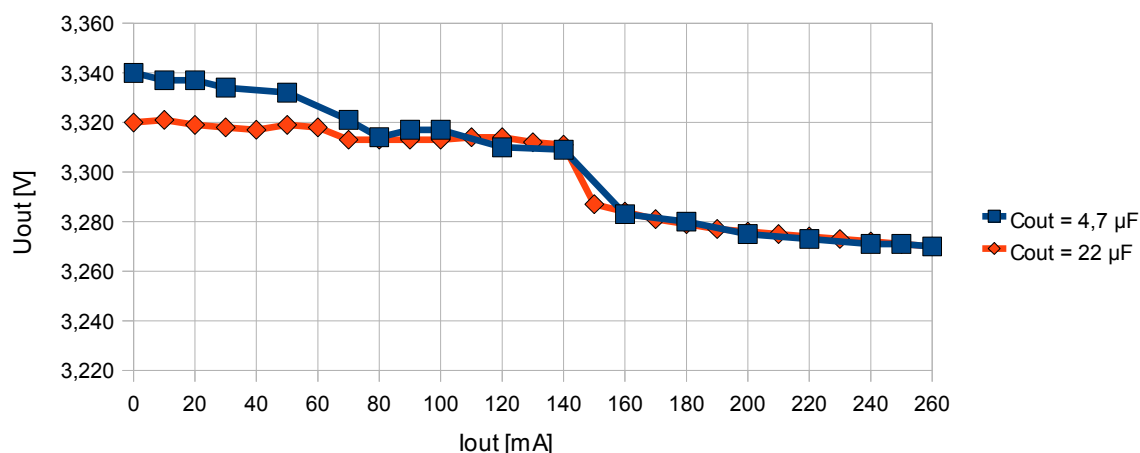
Obr. 27 Závislost hodnoty vstupního proudu nábojové pumpy (I_{in}) na hodnotě výstupního proudu (I_{out}), při výstupní kapacitě $C_{OUT} = 4,7 \mu F$ a různých vstupních napětích.



Obr. 28 Závislost velikosti výstupního napětí (U_{OUT}) na velikosti výstupního proudu (I_{OUT}) při různých vstupních napětích (U_{IN}), při výstupní kapacitě $C_{OUT} 4,7 \mu F$.

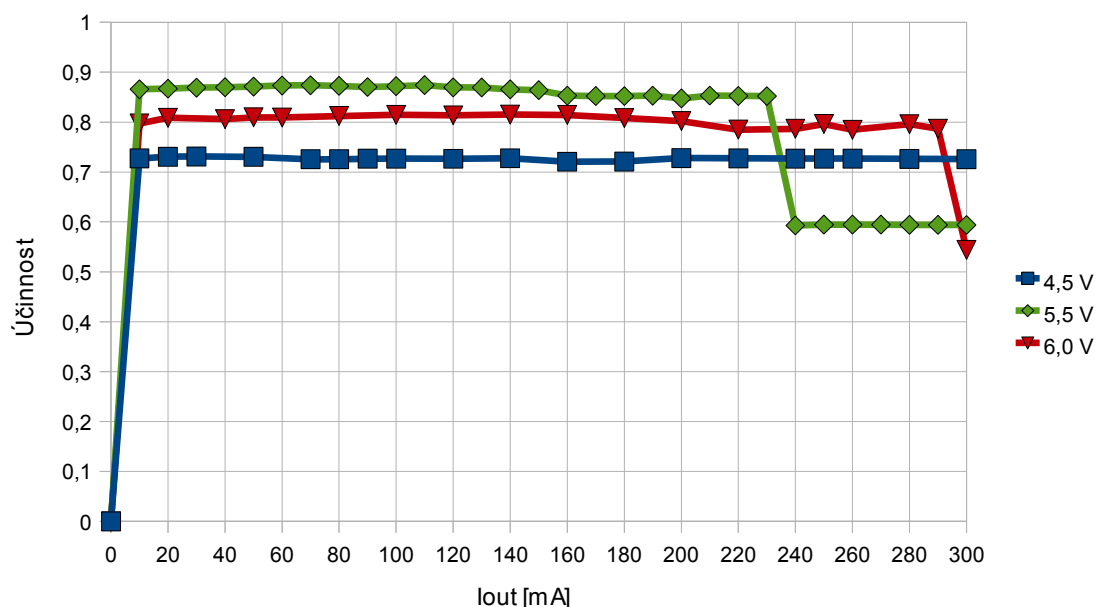
Na obrázku 27 je graf závislosti vstupního proudu na výstupním proudu. Z grafu je patrné, že při malém vstupním napětí $U_{in} = 4,5$ V používá pumpa konverzní režim LDO a hodnoty vstupních a výstupních proudů jsou prakticky stejné. Při vstupním napětí $U_{in} = 6$ V používá nábojová pumpa

konverzní režim 2/3. Při změně výstupního kondenzátoru C_{OUT} na hodnotu 22 μF jsou charakteristiky podobné, ale ke změně na konverzní režim s nižší účinností dochází zpravidla při mírně vyšším výstupním proudu.



Obr. 29 Závislost hodnoty výstupního napětí (U_{OUT}) na hodnotě výstupního proudu (I_{OUT}) při různých kapacitách výstupního kondenzátoru (C_{OUT}) při vstupním napětí 4,5 V.

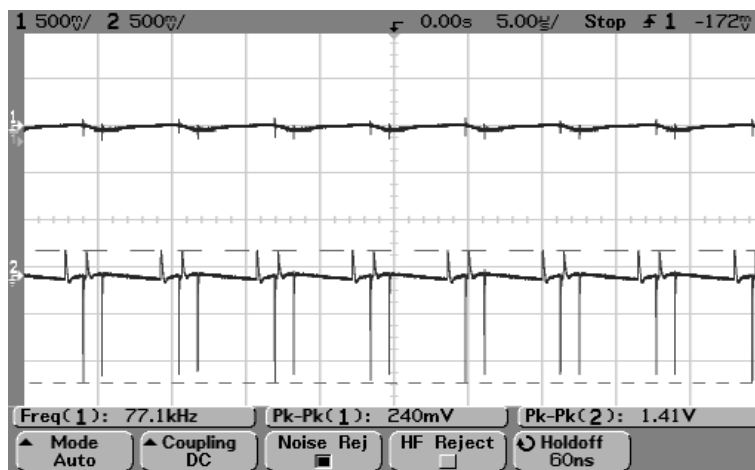
Z obrázku 29 je patrný vliv výstupní kapacity na průběh výstupního napětí. Při kapacitě $C_{OUT} = 4,7 \mu\text{F}$ je napětí na výstupu zpočátku vyšší o 20 mV než při $C_{OUT} = 22 \mu\text{F}$, ale pak postupně klesá. Od hodnoty výstupního proudu 150 mA jsou křivky prakticky totožné, při této hodnotě výstupního proudu je patrný pokles výstupního napětí o cca 25 mV, ten je způsoben změnou metody konverze LDO (zpočátku připojení vstupního napětí k výstupu, od $I_{OUT} = 150$ mA změnou odporu spínacích tranzistorů).



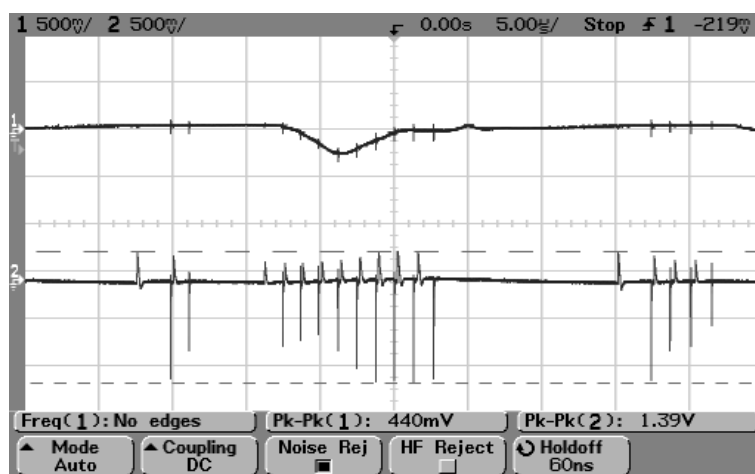
Obr. 30 Závislost účinnosti na výstupním proudu (I_{OUT}), při různých vstupních napětích, při výstupní kapacitě $C_{OUT} 4,7 \mu\text{F}$.

Z grafu na obrázku 30 je patrný vliv konverzního režimu a vstupního napětí na účinnost měniče s nábojovou pumpou. Vstupní napětí 4,5 V je dostatečné k rozběhu a provozu pumpy, nicméně

lze při něm použít pouze režim LDO s nízkou účinností asi 73 %. Při vstupním napětí 5,5 V je účinnost nejvyšší, činí 87 %, protože toto napětí je blízké 1,5 násobku napětí výstupního, při kterém má režim 2/3 nejlepší vlastnosti, ale při proudu nad 240 mA padá pumpa do režimu LDO, protože střádací kondenzátory neposkytují dostatečný náboj k nabíjení výstupního kondenzátoru. Grafy účinnosti jsou pro oba výstupní kondenzátory (4,7 μF a 22 μF) prakticky totožné.

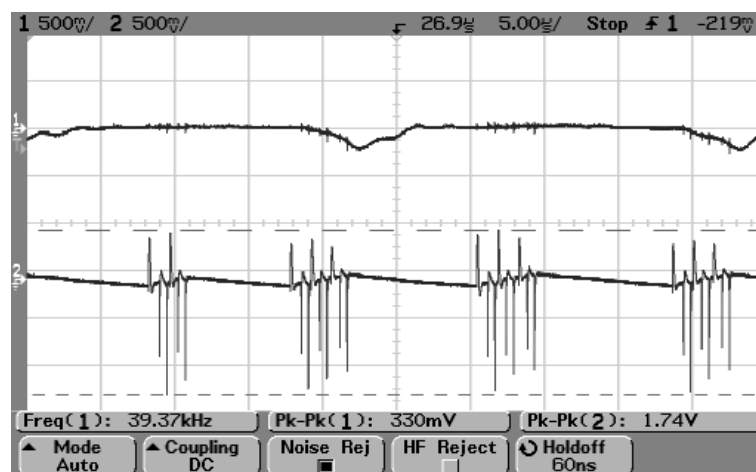


Obr. 31 Oscilogram: 1) Zvlnění vstupního napětí, 2) Zvlnění výstupního napětí, při $U_{IN} = 4,5 \text{ V}$, $I_{OUT} = 50 \text{ mA}$, $C_{OUT} = 4,7 \mu\text{F}$



Obr. 32 Oscilogram: 1) Zvlnění vstupního napětí, 2) Zvlnění výstupního napětí, při $U_{IN} = 4,5 \text{ V}$, $I_{OUT} = 50 \text{ mA}$, $C_{OUT} = 22 \mu\text{F}$

Z oscilogramů na obrázku 31 a 32 je patrný vliv velikosti výstupní kapacity pumpy. Při větší kapacitě C_{OUT} je doba nabíjení kondenzátoru delší, tomu odpovídá i větší počet nabíjecích pulzů, je také delší doba vybíjení, tedy doba kdy je řídicí obvod pumpy v klidu. Zvlnění na výstupu pumpy má kmitočet 800 kHz.

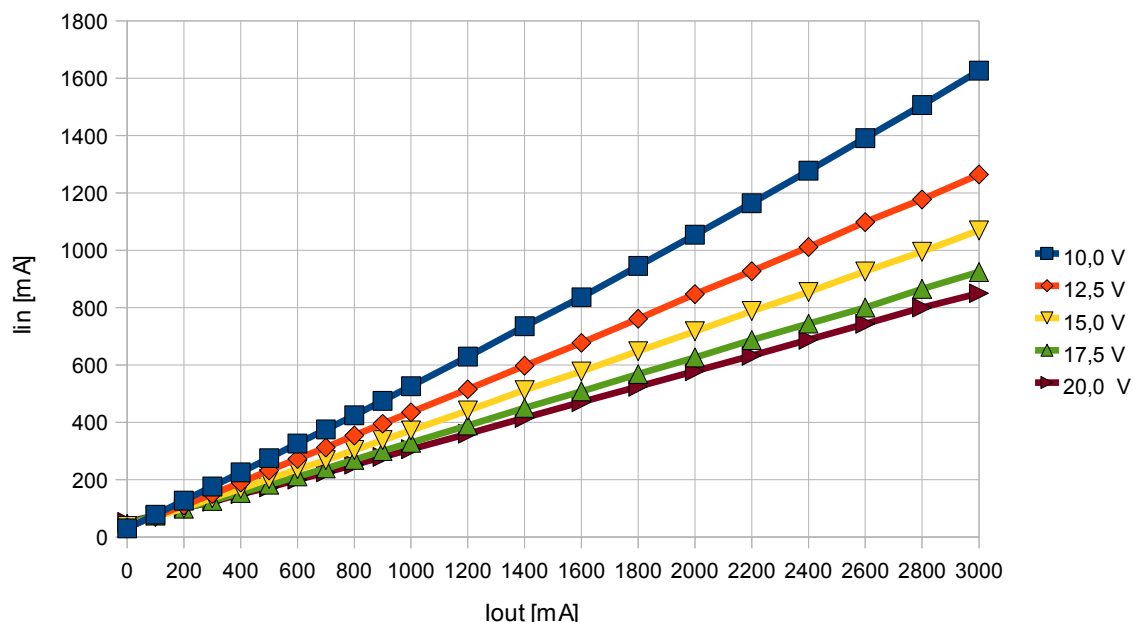


Obr. 33 Oscilogram: 1) Zvlnění vstupního napětí, 2) Zvlnění výstupního napětí, při $U_{IN} = 6\text{ V}$, $I_{OUT} = 50\text{ mA}$, $C_{OUT} = 4,7\text{ }\mu\text{F}$

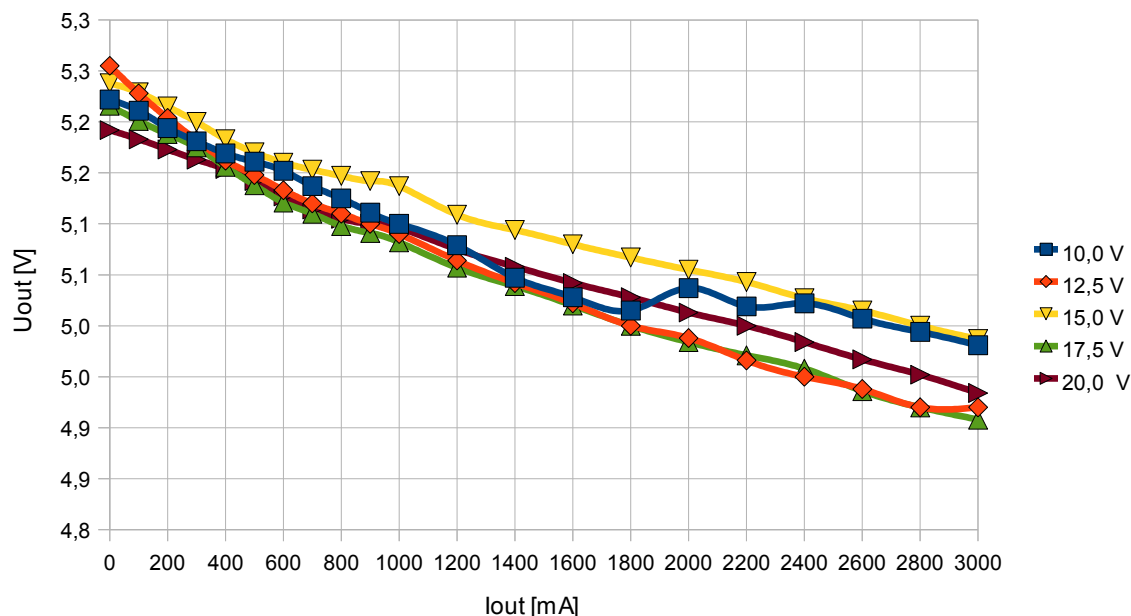
Na obrázku 33 je oscilogram zachycující průběh zvlnění vstupního a výstupního napětí při $U_{IN} = 6\text{ V}$. Pumpa pracuje v konverzním režimu 2/3. V porovnání s obrázkem y1 je počet nabíjecích cyklů C_{OUT} vyšší doba nabíjení a vybíjení C_{OUT} je delší při stejné zátěži. V oscilogramu na obrázku 33 jsou patrné zákmity s kmitočtem 1,6 MHz, toto je kmitočet interního oscilátoru pumpy. V každém druhém taktu je nabíjen výstupní kondenzátor C_{OUT}

7.2 Přípravek s DC/DC měničem

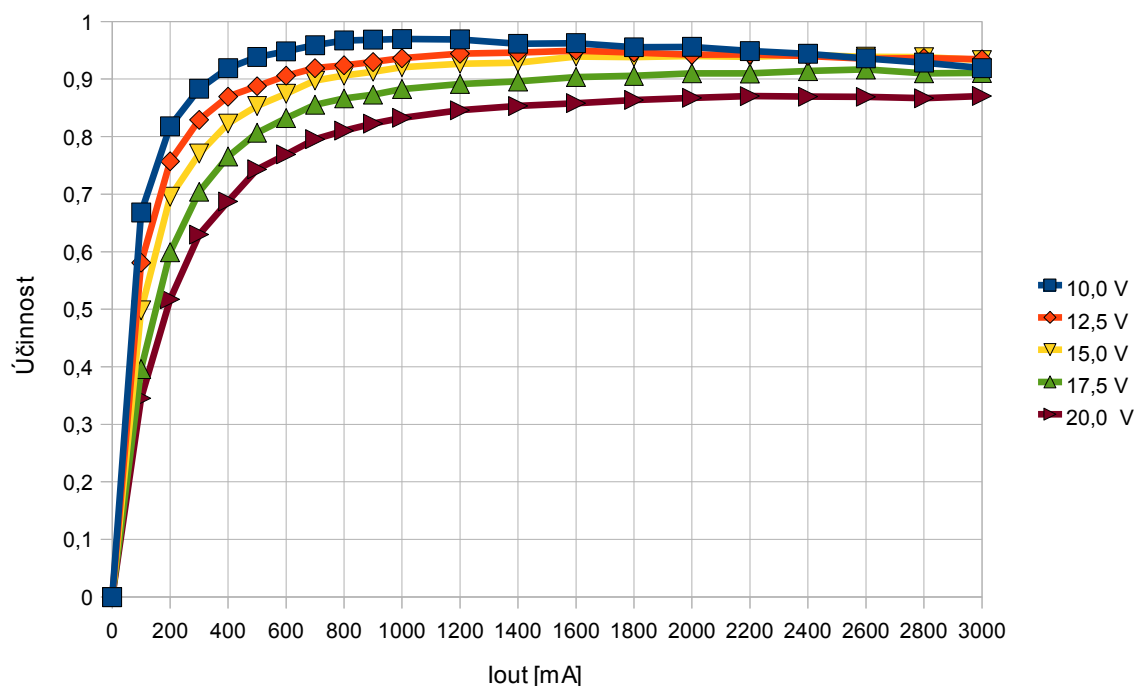
Na DC/DC měniči bylo provedeno měření závislosti vstupního proudu a výstupního napětí na výstupním proudu, při různých konstantních vstupních napětích. Z těchto hodnot byla vypočítána závislost účinnosti na výstupním proudu.



Obr. 34: Závislost hodnoty vstupního proudu (I_{in}) DC/DC měniče na hodnotě výstupního proudu (I_{out}), při různých vstupních napětích.



Obr. 35 Závislost velikosti výstupního napětí (U_{OUT}) DC/DC měniče na velikosti výstupního proudu (I_{OUT}), při různých vstupních napětích.



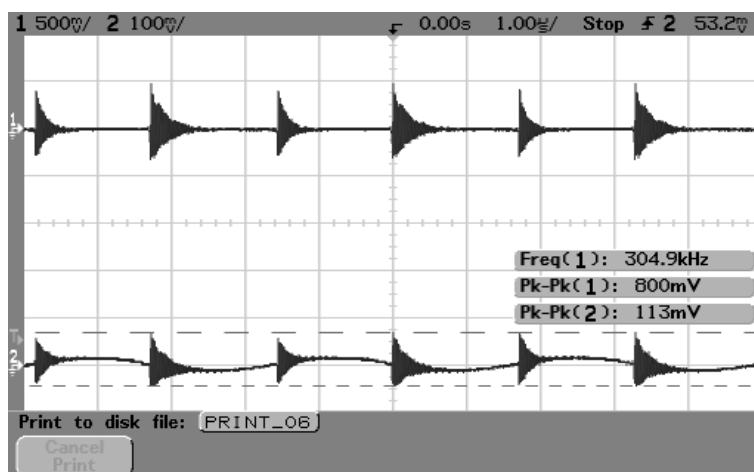
Obr. 36 Závislost účinnosti na výstupním proudu (I_{OUT}), při různých vstupních napětích

Na obrázku 34 je graf vyjadřující závislosti velikosti vstupního proudu na velikosti proudu výstupního při různých vstupních napětích. Závislosti jsou téměř lineární, bez výraznějších odchylek. Je také patrné, že s rostoucím vstupním napětím klesá vstupní proud, což ukazuje na relativně stabilní účinnost měniče.

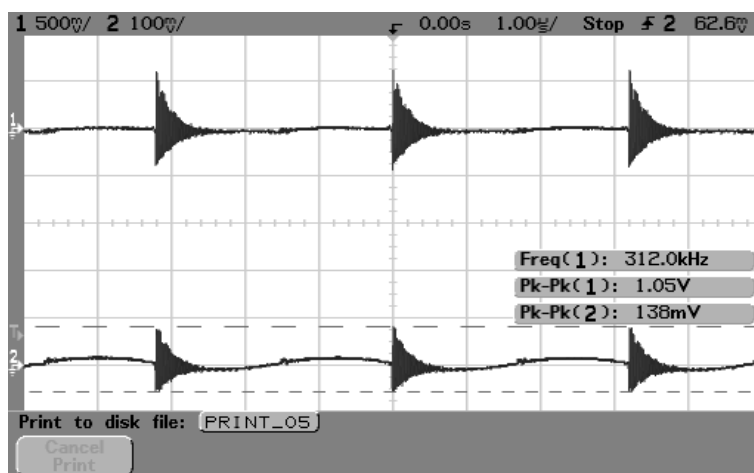
Na obrázku 35 je graf závislosti velikosti výstupního napětí na výstupním proudu. Křivky mají sestupnou tendenci, tedy výstupní napětí klesá se zvyšující se zátěží. Rozdíl napětí při nulové a maximální dovolené zátěži se pohybuje v rozsahu 0,24 V (pro $U_{IN} = 10$ V) až 0,35 V (pro

$U_{IN} = 12,5 \text{ V}$). V celém rozsahu měřených vstupních napětí kolísalo výstupní napětí se změnou zátěže o $+5 \% / -2 \%$, oproti nominálnímu výstupnímu napětí.

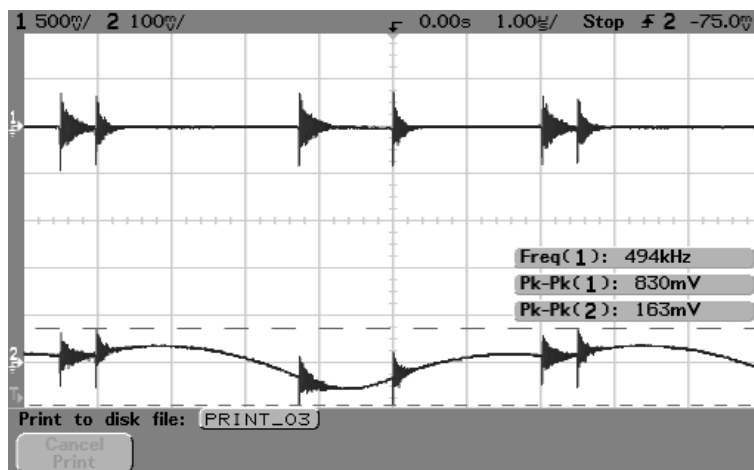
Na obrázku 36 je graf znázorňující účinnost DC/DC měniče v závislosti na výstupním proudu při různých hodnotách vstupních napětí. Maximální naměřená účinnost činí 97% a bylo jí dosaženo při vstupním napětí 10 V a v intervalu výstupních proudů 800 mA až 1200 mA . S rostoucím vstupním napětím účinnost měniče klesá, při vstupním napětí 20 V je nejvyšší naměřená účinnost 87% . Při proudu vyšším jak 800 mA vykazuje měnič účinnost alespoň 80% v celém rozsahu povolených vstupních napětí a výstupních proudů.



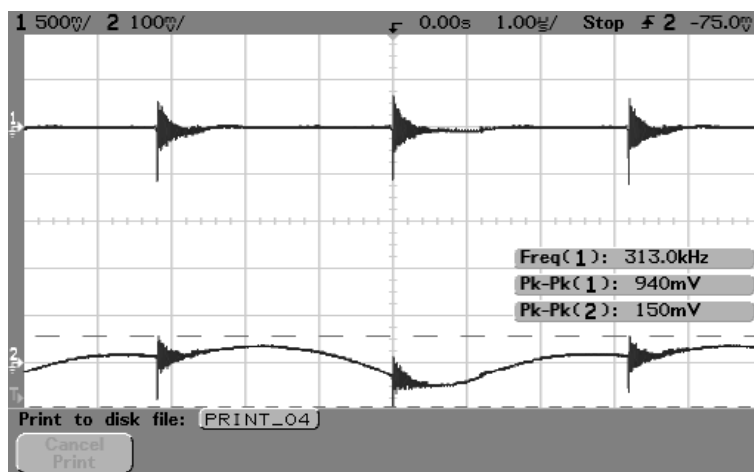
Obr. 37 Oscilogram: 1) Zvlnění vstupního napětí, 2) Zvlnění výstupního napětí, při $U_{IN} = 10 \text{ V}$, $I_{OUT} = 0 \text{ mA}$



Obr. 38 Oscilogram: 1) Zvlnění vstupního napětí, 2) Zvlnění výstupního napětí, při $U_{IN} = 10 \text{ V}$, $I_{OUT} = 1 \text{ A}$



Obr. 36 Oscilogram: 1) Zvlnění vstupního napětí, 2) Zvlnění výstupního napětí, při $U_{IN} = 20\text{ V}$, $I_{OUT} = 0\text{ A}$



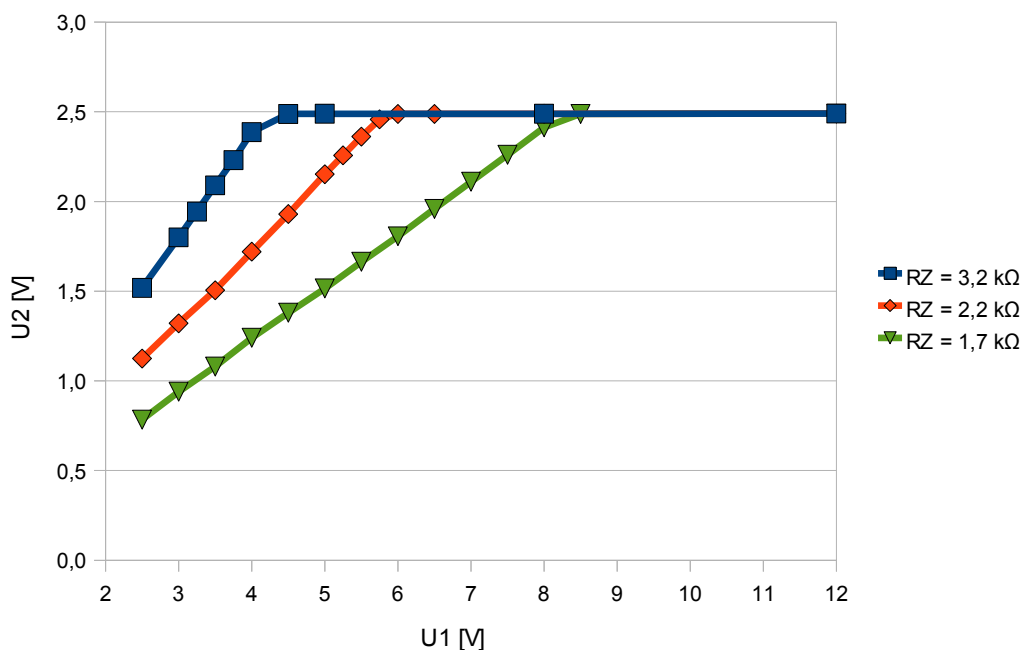
Obr. 40 Oscilogram: 1) Zvlnění vstupního napětí, 2) Zvlnění výstupního napětí, při $U_{IN} = 20\text{ V}$, $I_{OUT} = 1\text{ A}$

Z oscilogramů na obrázcích 37 až 40 je patrná velikost a průběh zvlnění při minimálním a maximálním vstupním napětí a při zátěži 0 A a 1 A. Při zvyšování zátěže a nebo snižování velikosti vstupního napětí velikost zvlnění výstupního napětí klesá. Zvlnění vstupního napětí měniče je evidentně způsobeno jeho činností a lze jej kompenzovat připojením elektrolytických kondenzátorů na vstup. Při kapacitě vstupního kondenzátoru dosahovalo zvlnění vstupního napětí asi $2\text{ V } U_{p-p}$. Připojením kondenzátorů s celkovou kapacitou 440 μF kleslo zvlnění přibližně na polovinu.

7.3 Přípravek s napětovou a proudovou referencí

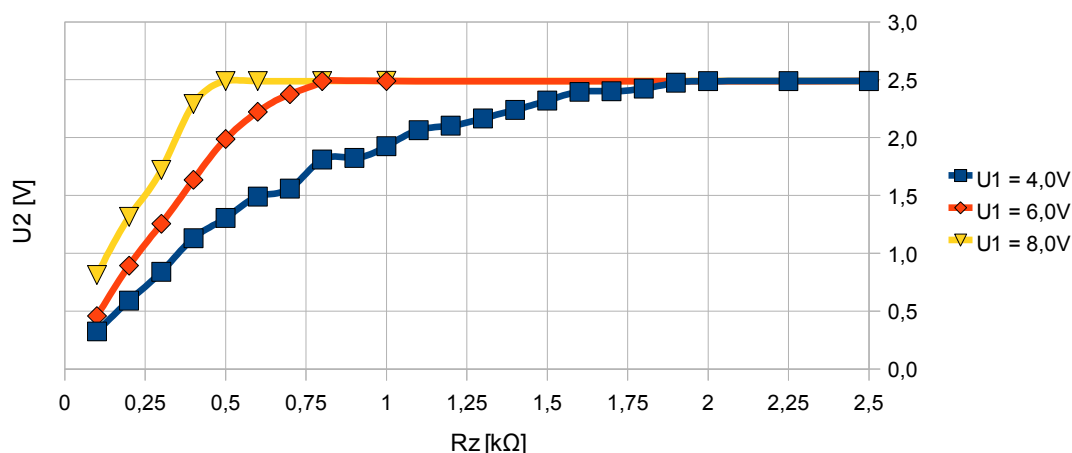
7.3.1 Napětová reference

Na napětové referenci bylo provedeno měření závislosti referenčního napětí na odporu zatěžovacího rezistoru při různých konstantních vstupních napětích a na vstupním napětí, při různých hodnotách odporu zatěžovacího rezistoru. Bylo též změřeno referenční napětí, které činí 2,490 V při 25 °C. Teplotní závislost referenčního napětí. Měření bylo provedeno měřicím přístrojem METEX MXD-6660A

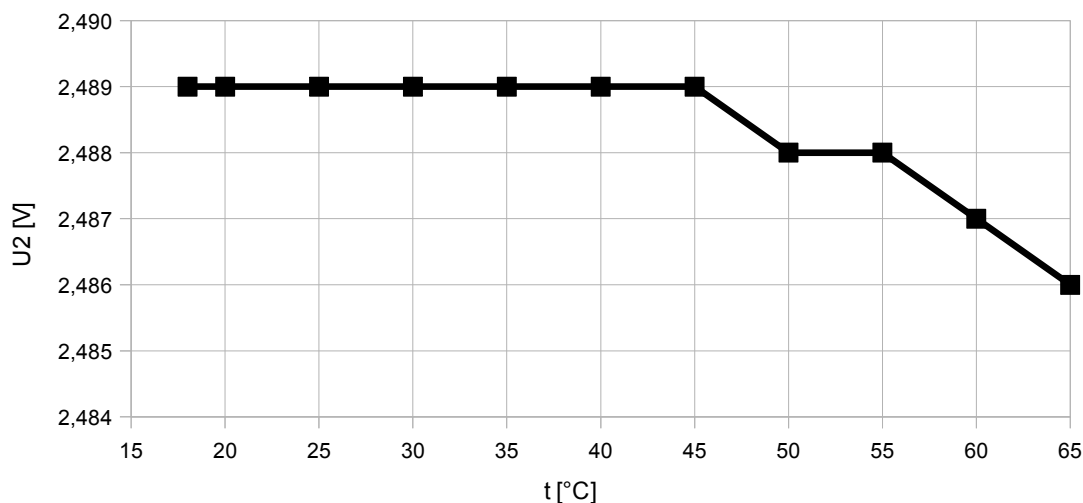


Obr. 41 Závislost referenčního napětí (U_2) na vstupním napětí (U_1) při různých hodnotách odporu zatěžovacího rezistoru R_Z

Z grafu na obrázku 41 je patrný pokles referenčního napětí s klesajícím vstupním napětím. Je z něj patrné i to, že čím menší je odpor zátěže, tím dříve začne, současně s poklesem napětí vstupního, klesat i napětí na referenci. Tento jev je způsoben rezistorem zapojeným do série s napěťovou referencí, připojením zatěžovacího rezistoru pak vzniká napěťový dělič. Hodnota napětí na výstupu je dána napěťovou referencí jen pokud pro příslušnou kombinaci odporů rezistorů a vstupního napětí vychází napětí na výstupu nezatíženého děliče vyšší než je napětí referenční. Stejný důvod má pokles napětí na výstupu reference při snižování hodnoty odporu zatěžovacího rezistoru při konstantním napětí. Viz obrázek 42.



Obr. 42 Závislost referenčního napětí (U_2) na hodnotě zatěžovacího rezistoru (R_Z) pro různá vstupní napětí (U_1)

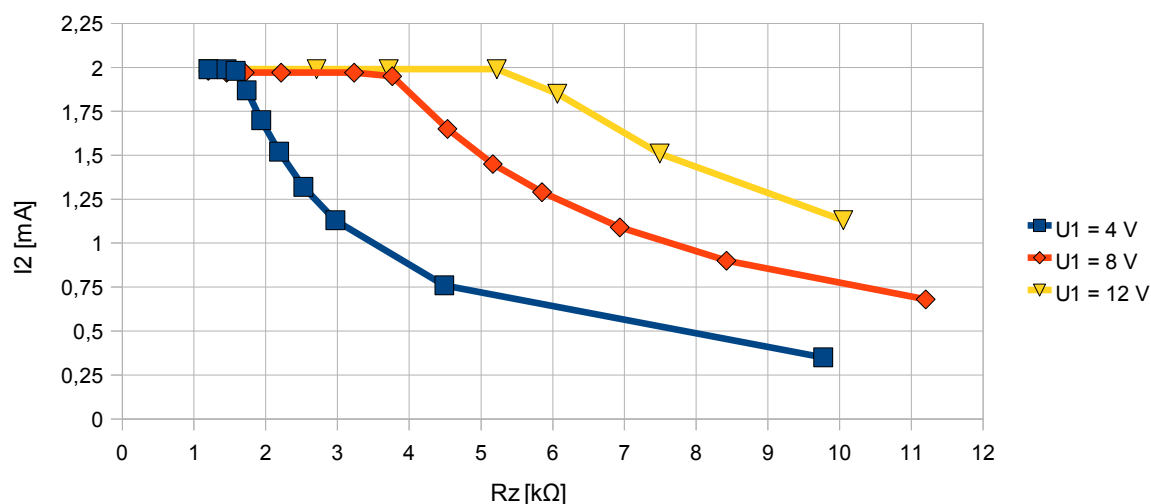


Obr. 43 Teplotní závislost referenčního napětí

Z grafu na obrázku 43 je patrné, že v měřeném intervalu je referenční napětí teplotně téměř nezávislé. První pokles byl zaznamenán při teplotě 45 °C a poté od 55 °C napětí klesalo o 1 mV / 5 °C.

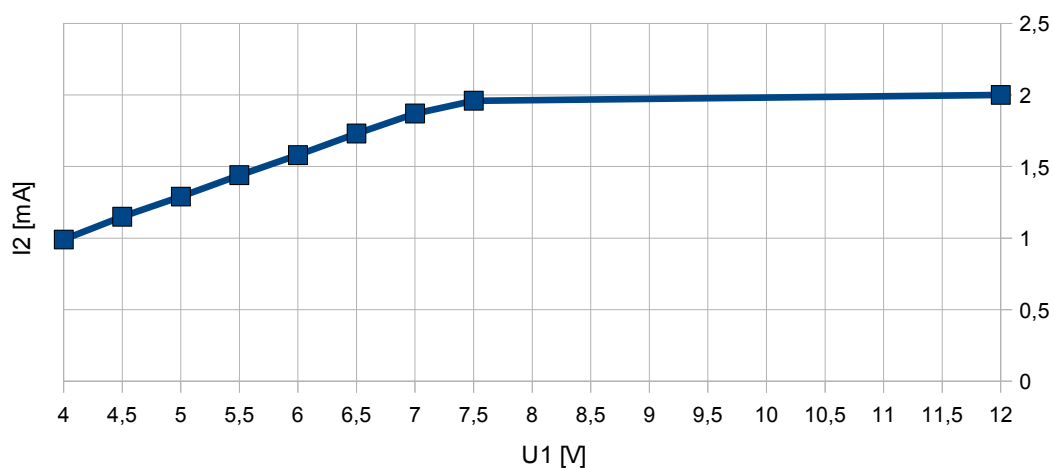
7.3.2 Proudová reference

Na proudové referenci bylo provedeno měření závislosti referenčního proudu na odporu rezistoru zapojeného do série s referencí při různých konstantních vstupních napětích a na vstupním napětí, při různých hodnotách odporu zatěžovacího rezistoru.

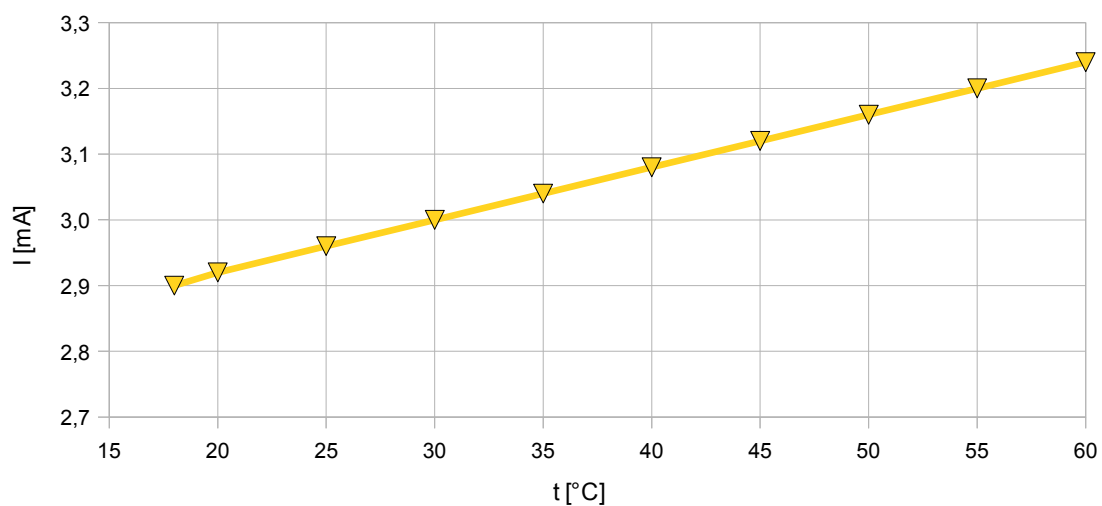


Obr. 44 Závislost referenčního proudu (I_2) na hodnotě zatěžovacího rezistoru (R_Z) pro tři různá vstupní napětí (U_1)

Z grafu na obrázku 44 je patrný pokles proudu tekoucího přes rezistor připojený sériově k proudové referenci. Při menším napětí začne proud klesat při menším odporu sériového zatěžovacího rezistoru. Toto je způsobeno platností Ohmova zákona. Pokud pro kombinaci R_Z a U_1 vychází proud I_2 menší než nastavený proud referenční, nedokáže obvod proudové reference referenční proud udržet. Totéž platí pro případ znázorněný v grafu x12



Obr. 45 Závislost referenčního proudu na hodnotě vstupního napětí



Obr. 46 Závislost referenčního proudu na teplotě

Z grafu je patrná lineární závislost referenčního proudu na teplotě. Při nastaveném referenčním proudu 3 mA roste referenční proud s rostoucí teplotou o 0,04 mA / 5 °C.

8 Vzorové protokoly

Vzorové protokoly obsahují některá data ze zkušebních měření. Protože budou použity při měření v laboratoři, je jejich úprava přizpůsobena ostatním protokolům předmětu BNEZ a liší se od zbytku práce. Každý protokol má vlastní číslování obrázků a tabulek. Naměřené hodnoty, které budou studenti měřit sami, jsou zapsány šedým písmem.

8.1 Přípravek s nábojovou pumpou – Vzorový protokol

Na nábojové pumpě se budou měřit závislosti vstupního proudu a výstupního napětí na výstupním proudu pro tři vstupní napětí, z naměřených hodnot se vypočítá účinnost nábojové pumpy. Dále se budou některé závislosti měřit pro dvě hodnoty výstupní kapacity. V závěru by měl student zmínit vliv kapacity výstupního kondenzátoru na výstupní napětí a účinnost pumpy a také skokové změny v grafech účinnosti.

Při měření bylo zjištěno, že výstupní proud neroste lineárně o 25 mA na jednu LED, je to způsobeno odporem ampérmetru připojeného do série se zátěží. Maximální možná zátěž byla asi 240 mA, ale tato hodnota je samozřejmě závislá na použitém ampérmetru.

BNEZ	Č.úlohy	Nábojová pumpa	
Jméno :		Spolupracoval :	
Datum měření :		Hodnocení :	

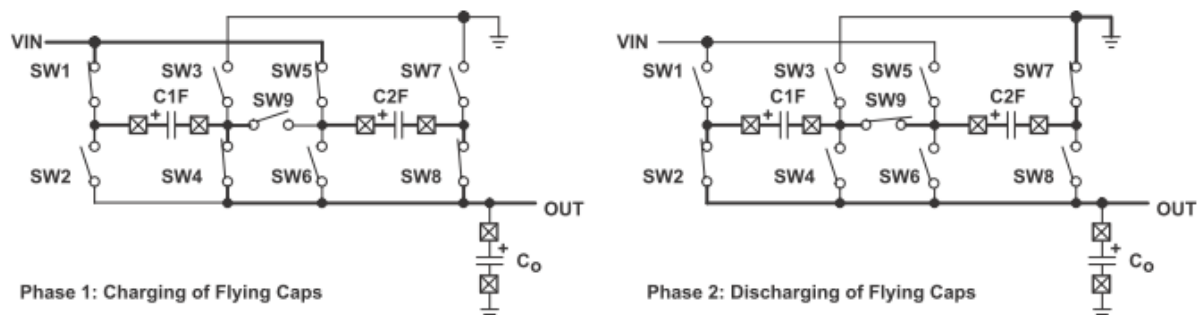
ÚVOD

Nábojové pumpy se používají především k napájení zařízení s malým proudovým odběrem (přibližně do 300 mA) nebo k napájení dílčích částí většího zařízení, které vyžadují rozdílné napětí než je napětí hlavního napájecího zdroje. Nábojová pumpa je druh DC/DC měniče (měnič stejnosměrného napětí), který ke své činnosti nevyžaduje cívku. Někdy se jim proto říká bezindukční (inductor-less) nebo též kapacitní napěťové měniče. Obvod provádějící konverzi napětí obsahuje sadu keramických nebo elektrolytických střádacích kondenzátorů pro uchování a konverzi elektrické energie, které jsou střídavě nabíjeny ze vstupního zdroje a vybíjeny do zátěže a současně je též střídavě měněno jejich vzájemné propojení (sériově nebo paralelně). Nábojové pumpy mohou pracovat jako invertující, snižující nebo zvyšující napěťový měnič, přičemž poslední dva jmenované případy mohou být také invertující nebo neinvertující, pokud užijeme kaskádového zapojení nábojových pump. V dnešní době existuje celá řada integrovaných obvodů pro nábojové pumpy. Tyto obvody stačí doplnit o kondenzátory a několik dalších externích součástek. Výhodou nábojové pumpy oproti klasickému DC/DC měnič s cívkou je jednodušší a levnější provedení, kondenzátory jsou mnohem běžnější a levnější součástky než cívky a navíc při použití moderních integrovaných obvodů i miniaturní rozměry výsledné konstrukce. Nevýhodou nábojové pumpy je hlavně omezený odběr, typicky kolem 100 mA a nemožnost skokové změny napětí, protože napětí při vybíjení střádacích kondenzátorů klesá exponenciálně.

V přípravku je použita nábojová pumpa TPS 60500 společnosti Texas Instruments. Jde o regulovanou nábojovou pumpu, to znamená že pumpa má pomocí zpětné vazby nastaveno výstupní napětí, které není násobkem napětí vstupního a je na něm do jisté míry nezávislé. Pumpa pracuje v rozsahu vstupních napětí 4,1 V až 6,5 V, a lze ji zatížit až 250 mA. Teoretická účinnost pumpy je až 90%.

Nábojová pumpa používá dva konverzní režimy. Prvním z nich je **režim 2/3**. Pumpa do něj automaticky přejde pokud vstupní napětí překročí 1,5 násobek napětí výstupního. Pumpa pracuje v cyklu o dvou stavech. V prvním stavu jsou střádací kondenzátory spojeny paralelně a jedna elektroda této paralelní dvojice je připojena ke vstupnímu napětí, druhá je přes výstupní kondenzátor spojena s GND.

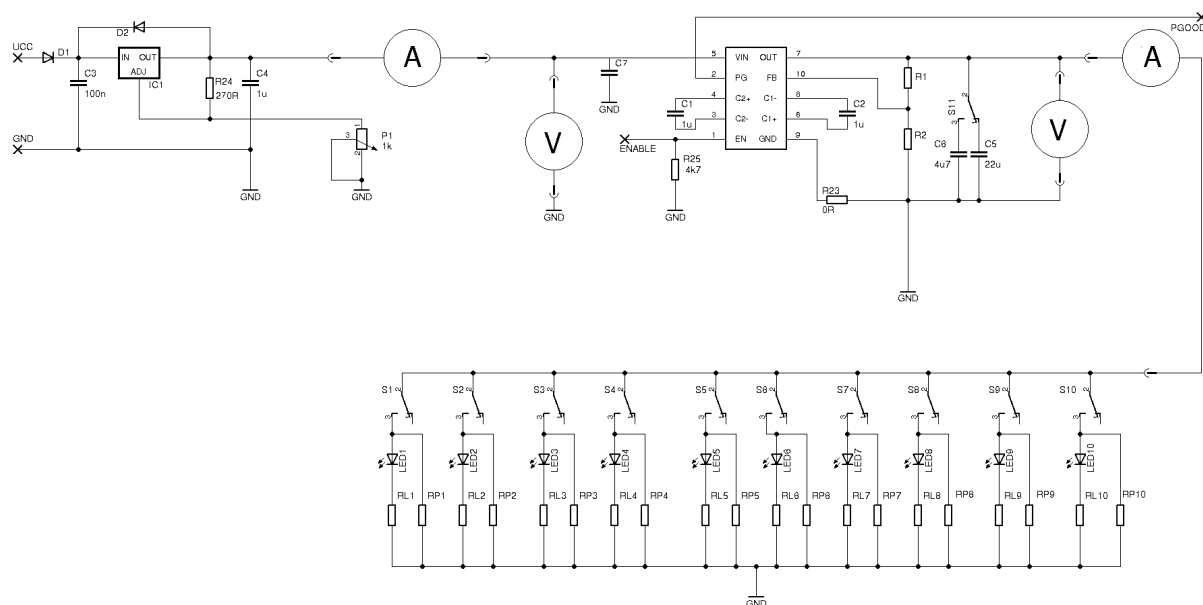
Ve druhé části cyklu jsou pak střádací kondenzátory spojeny sériově a tato sériová kombinace pak připojena k výstupu.



Obr. 1 Jednotlivé stavy cyklu při konverzním režimu 2/3

Druhým režimem je tzv **LDO režim**. V tomto režimu nejsou použity střádací kondenzátory, ale výstupní kondenzátor je přerušovaně připojován ke vstupnímu napětí. Při výstupních proudech nad cca 150 mA je výstupní napětí udržováno změnou odporu $R_{DS(ON)}$

spínacích tranzistorů. Tento režim se používá pokud je vstupní napětí pumpy nižší jak 1,5 násobek napětí vstupního.



Obr. 2 Schéma zapojení přípravku s nábojovou pumpou

Kromě nábojové pumpy obsahuje přípravek ještě regulaci vstupního napětí a zátěž tvořenou deseti LED, každá LED představuje zátěž 25 mA.

ZADÁNÍ

1. Změřte závislost vstupního proudu a výstupního napětí na výstupním proudu při obou kapacitách výstupního kondenzátoru.
2. Ze změřených závislostí vypočítejte účinnost měniče s nábojovou pumpou.

POKYNY K MĚŘENÍ A VYPRACOVÁNÍ PROTOKOLU

Ad 1. Závislosti měřte pro vstupní napětí 4,5 V, 5,5 V, 6V. Naměřené závislosti vynesete do grafů pro každý výstupní kondenzátor zvlášť.

Ad 2. Z naměřených závislostí vypočítejte účinnost nábojové pumpy a vynesete do grafů

POUŽITÉ MĚŘICÍ PŘÍSTROJE A POMŮCKY

Napájecí zdroj..... č.

Přípravek s nábojovou pumpou..... č.

Digitální multimetr (vstupní voltmetr)..... č.

Digitální multimetr (vstupní ampérmetr)..... č.

Digitální multimetr (výstupní voltmetr)..... č.

Digitální multimetr (vstupní ampérmetr)..... č.

VYPRACOVÁNÍ

Tab. 1 Naměřené závislosti výstupního napětí a vstupního proudu na výstupním proudu při $C_{OUT} = 4,7 \mu F$

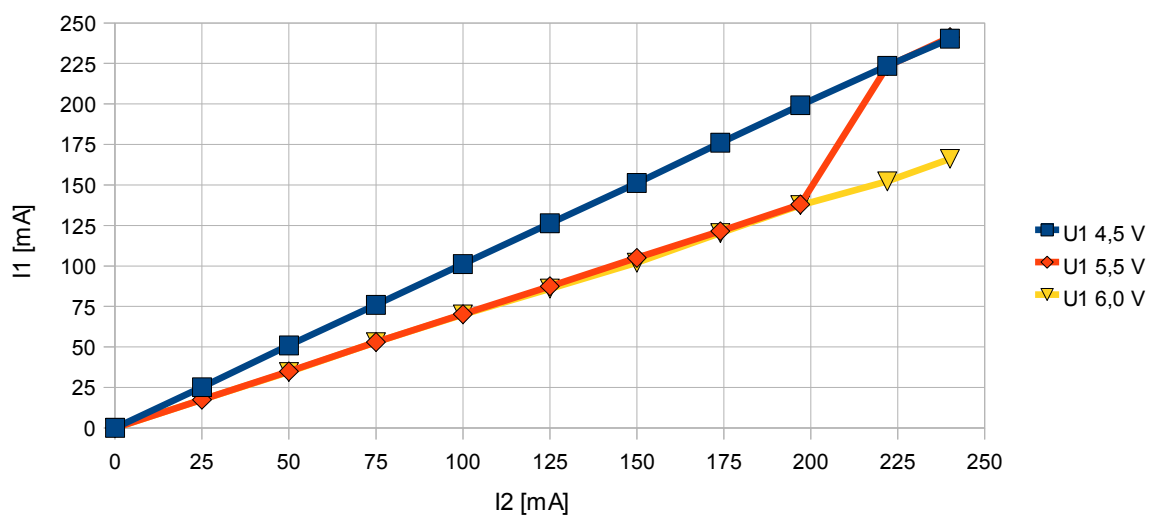
	U ₁ 4,5 V		U ₁ 5,5 V		U ₁ 6,0 V	
I ₂ [mA]	U ₂ [V]	I ₁ [mA]	U ₂ [V]	I ₁ [mA]	U ₂ [V]	I ₁ [mA]
0	3,340	0,05	3,343	0,05	3,342	0,05
25	3,337	25,2	3,340	10,5	3,348	17,5
50	3,331	51	3,354	35	3,350	34,5
75	3,318	76	3,375	53,1	3,360	53
100	3,317	101,2	3,372	70,2	3,372	70
125	3,311	126,3	3,360	87,5	3,380	86
150	3,300	151,2	3,325	105	3,380	102
174	3,282	176	3,266	121,5	3,380	120,3
197	3,275	199,2	3,263	138	3,339	137,5
222	3,273	223,5	3,260	223,3	3,264	152,2
240	3,270	240,2	3,265	241,2	3,260	166,1

Tab. 2 Naměřené závislosti výstupního napětí a vstupního proudu na výstupním proudu při $C_{OUT} = 22 \mu F$

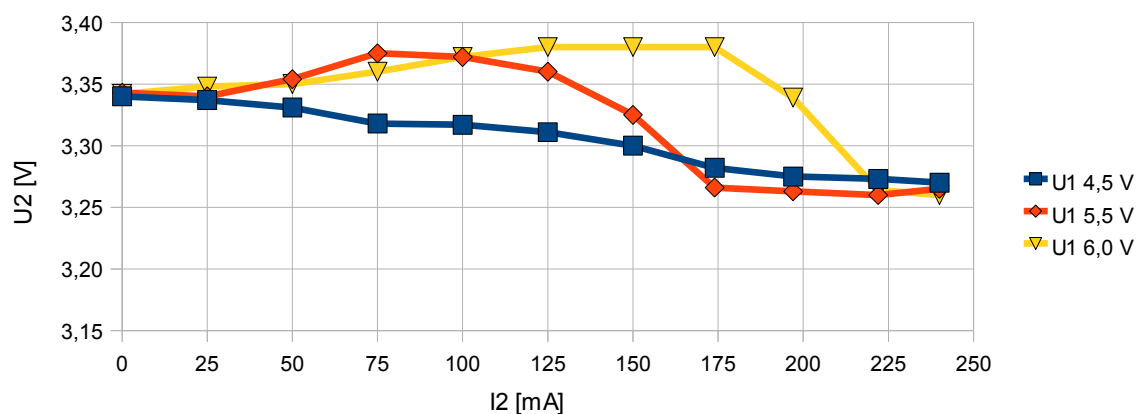
	U ₁ 4,5 V		U ₁ 5,5 V		U ₁ 6,0 V	
I ₂ [mA]	U ₂ [V]	I ₁ [mA]	U ₂ [V]	I ₁ [mA]	U ₂ [V]	I ₁ [mA]
0	3,320	0,05	3,354	0,05	3,351	0,05
25	3,320	26,3	3,352	10,5	3,354	10
50	3,320	51,3	3,352	35	3,358	35,1
75	3,315	76,2	3,356	53,1	3,359	52,8
100	3,313	101,2	3,371	70,2	3,356	70
125	3,312	126,3	3,345	87,5	3,354	86,5
150	3,288	151,3	3,343	105	3,352	104
175	3,280	175,6	3,278	121,5	3,357	121
197	3,276	200,6	3,261	138	3,350	137,5
222	3,274	222,9	3,270	155	3,313	154,5
240	3,272	240,8	3,270	241,2	3,319	240,5

Tab. 3 Závislost účinnosti na výstupním proudu

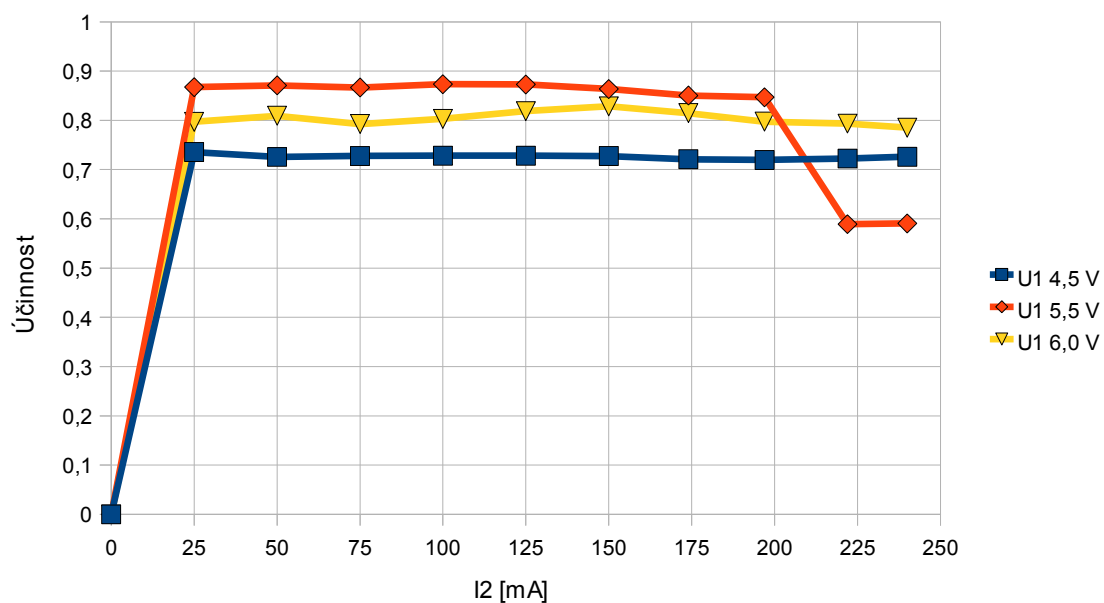
	U ₁ 4,5 V		U ₁ 5,5 V		U ₁ 6,0 V	
	C _{OUT}		C _{OUT}		C _{OUT}	
I ₂ [mA]	4,7 uF	22 uF	4,7 uF	22 uF	4,7 uF	22 uF
0	0	0	0	0	0	0
25	0,74	0,7	0,87	0,87	0,8	0,78
50	0,73	0,72	0,87	0,87	0,81	0,8
75	0,73	0,73	0,87	0,86	0,79	0,8
100	0,73	0,73	0,87	0,87	0,8	0,8
125	0,73	0,73	0,87	0,87	0,82	0,81
150	0,73	0,72	0,86	0,87	0,83	0,81
174	0,72	0,73	0,85	0,86	0,81	0,81
197	0,72	0,71	0,85	0,85	0,8	0,8
222	0,72	0,72	0,59	0,85	0,79	0,79
240	0,73	0,72	0,59	0,59	0,79	0,55



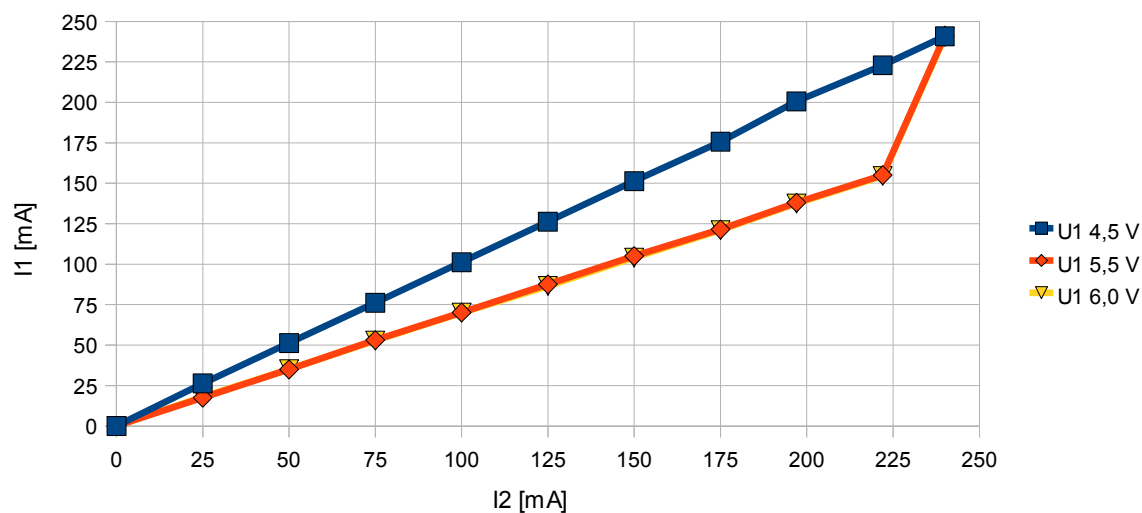
Graf 1 Závislost vstupního proudu na výstupním proudu pro hodnotu výstupního kondenzátoru 4,7 µF



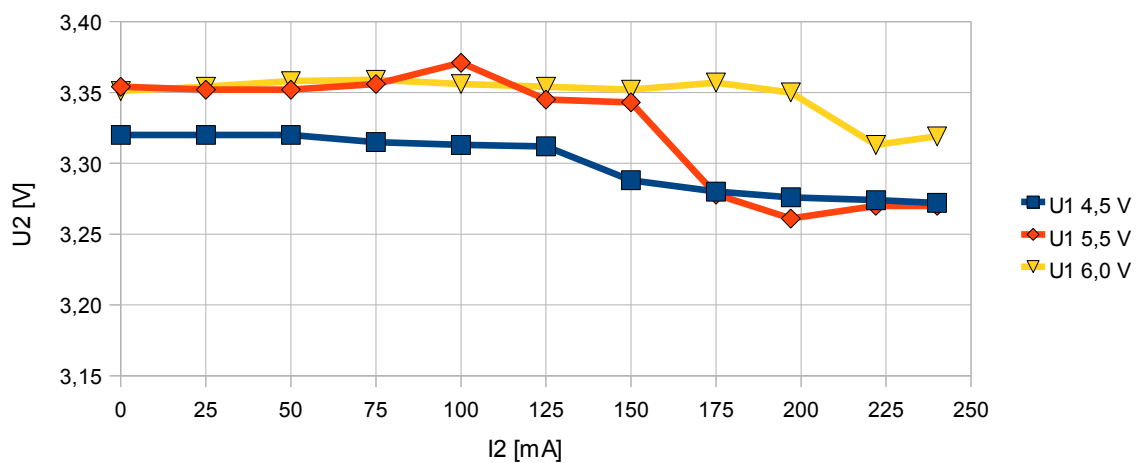
Graf 2 Závislost výstupního napětí na výstupním proudu pro hodnotu výstupního kondenzátoru 4,7 μ F



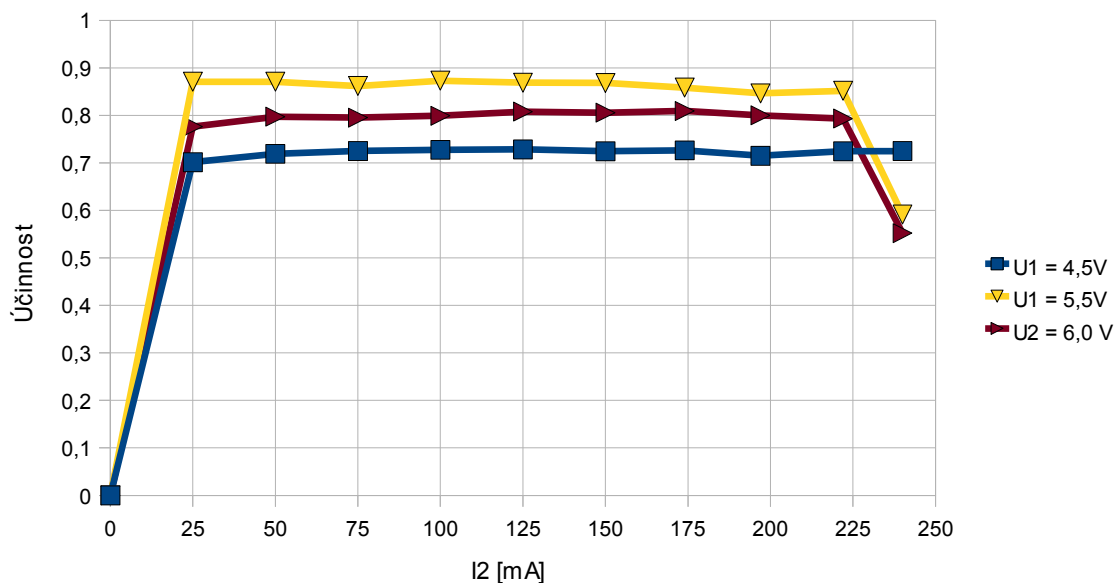
Graf 3 Závislost účinnosti na výstupním proudu pro hodnotu výstupního kondenzátoru 4,7 μ F



Graf 4 Závislost vstupního proudu na výstupním proudu pro hodnotu výstupního kondenzátoru 22 μ F



Graf 5 Závislost výstupního napětí na výstupním proudu pro hodnotu výstupního kondenzátoru 22 μ F



Graf 6 Závislost účinnosti na výstupním proudu pro hodnotu výstupního kondenzátoru 22 μF

ZÁVĚR

Z grafu 1 je patrné, že při napětí $U_1 = 4,5 V$ používá pumpa režim LDO, hodnoty vstupních a výstupních proudů jsou téměř totožné. Při napětí $U_1 5,5 V$ a $6 V$ používá pumpa konverzní režim 2/3. Při $5,5 V$ na vstupu a výstupním proudu 225 mA přechází pumpa do režimu LDO, protože střádací kondenzátory nestačí dobít výstupní kondenzátor.

Z grafů 2 a 5 je patrný vliv kapacity výstupního kondenzátoru na změnu výstupního napětí se změnou zátěže. Navíc při vyšší výstupní kapacitě padá pumpa později do režimu s nižší účinností. Z grafů 3 a 6 je patrné že režim LDO má nižší účinnost a nejvyšší účinnosti je dosahováno při napětí $U_1 = 5,5 V$, protože toto napětí je blízké hodnotě $1,5 \times U_2$.

Nejvyšší účinnosti bylo dosaženo při vstupním napětí $5,5 V$, činila 87 %.

8.2 Přípravek s DC/DC měničem – Vzorový protokol

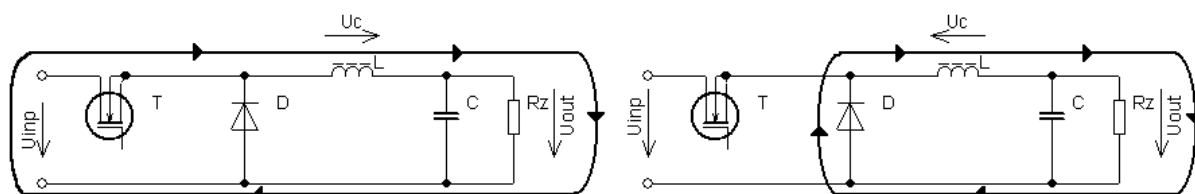
Na DC/DC měniči se budou měřit závislosti vstupního proudu a výstupního napětí na výstupním proudu pro pět vstupních napětí, z naměřených hodnot se vypočítá účinnost měniče. V závěru by měl student zmínit vliv vstupního napětí a výstupního proudu na účinnost.

Přípravek bude zatěžován programovatelnou elektronickou umělou zátěží.

BNEZ	Č.úlohy	DC/DC spínané měniče bez transformátoru	
Jméno :		Spolupracoval :	
Datum měření :		Hodnocení :	

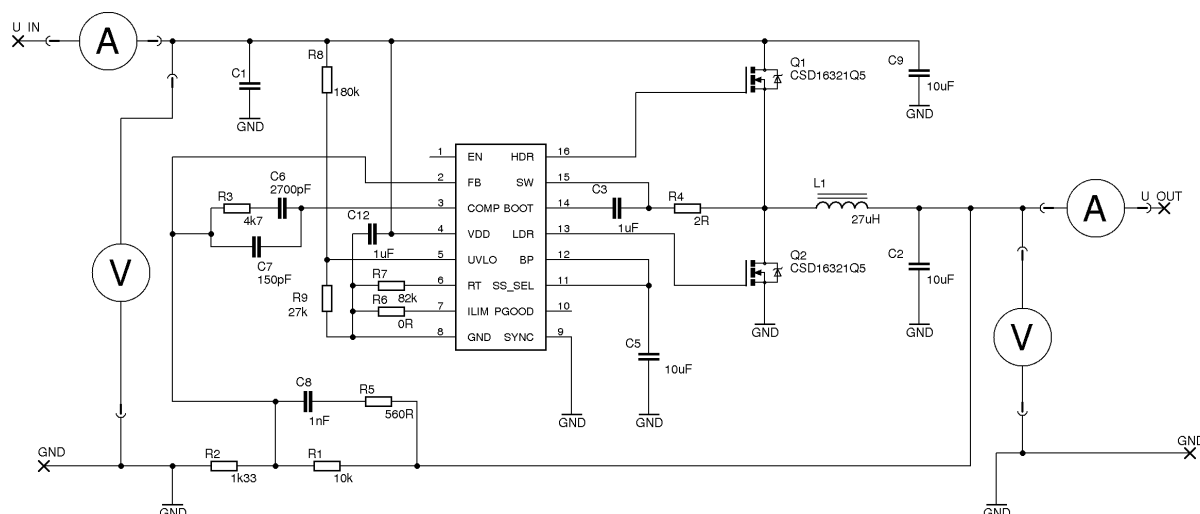
ÚVOD

Řada moderních elektronických zařízení obsahuje DC/DC měniče. Jejich úkolem je z malého stejnosměrného napětí získat jiné malé stejnosměrné napětí obvykle v situacích, kdy je ekonomicky nevýhodné doplňovat transformátor o další vinutí. Měniče můžeme dělit na izolované a neizolované, zvyšující nebo snižující. Izolované měniče obsahují transformátor (obvykle dvě nebo více vinutí na feritovém jádře). Neizolované měniče mají místo transformátoru pracovní cívku. Cílem úlohy bude změření vlastností neizolovaného snižujícího měniče.



Obr. 1 Snižující měnič, činnost

Základní princí funkce snižujícího měniče je následující: Měnič pracuje v cyklu o dvou stavech. V prvním stavu cyklu je tranzistor T sepnut a proud teče ze vstupní svorky U_{INP} přes sepnutý tranzistor T, cívku L a zátěž. Při tom se nabíjí výstupní kondenzátor C a zároveň je energie akumulována do magnetického pole kolem cívky L. Ve druhé části cyklu je tranzistor T rozepnut. Zdrojem energie se stává cívka, na níž se, v důsledku zániku jejího magnetického pole, obrátila polarita napětí, ale směr proudu zůstává stejný. Obvod se uzavírá přes zátěž a otevřenou diodu D. Kondenzátor C se vybíjí [2].



Obr. 2 Schéma zapojení DC/DC měniče

V laboratorním přípravku je obsažen snižující neizolovaný DC/DC měnič založený na integrovaném obvodu TPS40195 společnosti Texas Instruments. TPS40195 je řídicí

integrovaný obvod pro konstrukci snižujícího DC/DC měniče s externími spínacími tranzistory. Dalšími důležitými prvky jsou spínací tranzistory MOSFET a pracovní cívka s indukčností 27 μH .

Tento měnič také pracuje v cyklu o dvou stavech. V první části cyklu proud prochází přes otevřený tranzistor Q_1 , pracovní cívku L_1 do zátěže. V druhé části cyklu se tranzistor Q_1 uzavře, naopak se otevře tranzistor Q_2 . Cívka se stává zdrojem proudu, okruh se uzavírá přes cívku, otevřený Q_2 a zátěž. Výstupní kondenzátor C_2 slouží jako filtrační.

Laboratorní přípravek také obsahuje ochranný obvod, který znesnadňuje zničení řídicího IO přivedením příliš velkého vstupního napětí.

Základní vlastnosti měniče použitého v přípravku:

- Vstupní napětí v rozsahu 10 V až 20 V,
- Pevné výstupní napětí 5V,
- Výstupní proud až 3 A,
- Účinnost až 96 %,
- Vnitřní zdroj napětí 5V,
- UVLO - Odpojení při poklesu vstupního napětí pod nastavenou mez,
- Odpojení při přehřátí – Thermal Shutdown,
- Ochrana před proudovým přetížením.

Funkce Undervoltage Lockout (UVLO)

Tato funkce slouží k zastavení činnosti měniče pokud napětí na vstupu klesne pod nastavenou mez. Tato mez se nastavuje odporovým děličem napětí připojeným mezi piny VDD a GND. Výstup děliče je spojen s pinem UVLO (č. 5). Funkce je opatřena hysterezí, která zabezpečuje, že měnič se vypne při určitém napětí U_{OFF} a znovu se spustí pokud napájecí napětí na vstupu překročí napětí U_{ON} a platí, že $U_{ON} > U_{OFF}$. Hodnoty rezistorů pro nastavení funkce UVLO se určí podle následujících rovnic:

$$R_1 = \frac{U_{ON} - U_{OFF}}{I_{UVLO}}, \quad (10)$$

$$R_2 = \frac{R_1 \cdot U_{UVLO}}{U_{ON} - U_{UVLO}}, \quad (11)$$

kde U_{ON} Napájecí napětí, nad kterým má být měnič spuštěn,
 U_{OFF} Napájecí napětí, při kterém má být měnič vypnut, pod tímto napětím nepracuje,
 U_{UVLO} Vnitřní referenční napětí komparátoru, typicky 1,26 V,
 I_{UVLO} Vnitřní proud hystereze, typicky 5,2 μA .

Funkce Soft Start

Tato funkce slouží k postupnému náběhu napětí na výstupu měniče po jeho spuštění. Obvod Soft Start obsahuje čítač a D/A převodník. Čítač čítá hodinové pulzy z interního oscilátoru a D/A převodník převádí binární hodnotu na výstupu čítače na rampový průběh rostoucí od 0V do 1 V. Tato rampová funkce je přivedena na zesilovač odchylky a supluje referenční napětí tohoto zesilovače do momentu, kdy překročí napětí 0,591 V. Potom je jako referenční napětí použita právě hodnota 0,591 V. Doba náběhu je závislá na kmitočtu interního oscilátoru a na počtu stupňů převodníku. Počet stupňů převodníku lze nastavit zapojením pinu SS_SEL (č. 11).

Zapojení pinu SS_SEL	Počet stupňů převodníku
GND	2048
Nezapojen (Floating)	1024
BP	512

Doba náběhu na nominální výstupní napětí se určí podle rovnice

$$t_{SS} = 0,591 \cdot \frac{N_{DAC}}{f_{SW}}, \quad (12)$$

kde t_{SS} Doba náběhu [s],
 N_{DAC} Počet stupňů D/A převodníku,
 f_{SW} Kmitočet vnitřního oscilátoru (Spínací kmitočet).

Ochrana proti proudovému přetížení

Tato funkce ochrání spínací tranzistory před zničením v případě zkratu na výstupu měniče. Je měřeno napětí mezi Drain a Source spínacího tranzistoru v sepnutém stavu. Pokud tento úbytek napětí překročí stanovenou mez je tranzistor vypnut a zároveň je inkrementován čítač těchto poruchových vypnutí. Pokud čítač přeteče (po sedmi zkratových cyklech) dojde k zastavení činnosti spínacích tranzistorů na dobu přibližně 40 ms.

Drivery

Drivery jsou obvody řídící spínání externích tranzistorů. TPS40195 má dva tyto obvody. Jeden řídí Hgh-Side MOSFET a druhý Low-Side MOSFET. Na výstupu obvodů je řídící napětí $U_{GS} = 5 \text{ V}$.

Funkce Thermal Shutdown

Tato funkce zastaví činnost měniče, pokud teplota na čipu TPS40195 překročí 150°C . Chrání tak integrovaný obvod před přehřátím. Činnost měniče je obnovena, pokud klesne teplota na čipu přibližně na 130°C .

Nastavení spínacího kmitočtu se provádí pomocí rezistoru připojeného na vývod RT nebo propojením vývodu RT s vývodem GND nebo BP. Pokud je RT spojen s GND je spínací kmitočet 250 kHz. Pokud je spojen s pinem BP je nastaven spínací kmitočet 500 kHz. Pokud je připojen ke GND přes rezistor, je spínací kmitočet určen hodnotou rezistoru.

Pro hodnotu rezistoru platí vztah:

$$R_{RT} = \frac{2,5 \cdot 10^4}{f_{SW}}, \quad (16)$$

kde R_{RT} odpor rezistoru zapojeného mezi piny RT a GND v k Ω ,
 f_{SW} spínací kmitočet generovaný vnitřním oscilátorem v kHz

ZADÁNÍ

1. Na základě hodnot uvedených ve schématu určete spínací kmitočet měniče.
2. Změřte závislosti vstupního proudu a výstupního napětí na výstupním proudu.
3. Vypočítejte účinnost měniče

POKYNY K MĚŘENÍ A VYPRACOVÁNÍ PROTOKOLU

Ad 1. Podívejte se do schématu zapojení měniče na zapojení pinu RT a na základě informací uvedených výše určete spínací kmitočet měniče.

Ad 2. Změřte závislosti vstupního proudu a výstupního napětí na výstupním proudu pro tato vstupní napětí: 10 V, 12,5 V, 15 V, 17,5 V, 20 V. (Pokud se vám nepodaří nastavit vstupní napětí 20 V kvůli vypínání ochranného obvodu, měřte s nejvyšším možným vstupním napětím a uveďte to do tabulky naměřených hodnot.) Naměřené závislosti vynesete do grafu.

Ad 3. Z naměřených hodnot spočítejte účinnost měniče a závislosti účinnosti na výstupním proudu vynesete do grafu.

POUŽITÉ MĚŘICÍ PŘÍSTROJE A POMŮCKY

Napájecí zdroj.....	č.
Přípravek s DC/DC měničem.....	č.
Digitální multimetr (vstupní voltmetr).....	č.
Digitální multimetr (vstupní ampérmetr).....	č.
Digitální multimetr (výstupní voltmetr).....	č.
Digitální multimetr (vstupní ampérmetr).....	č.
Programovatelná zátěž.....	č.

VYPRACOVÁNÍ

Výpočet spínacího kmitočtu měniče

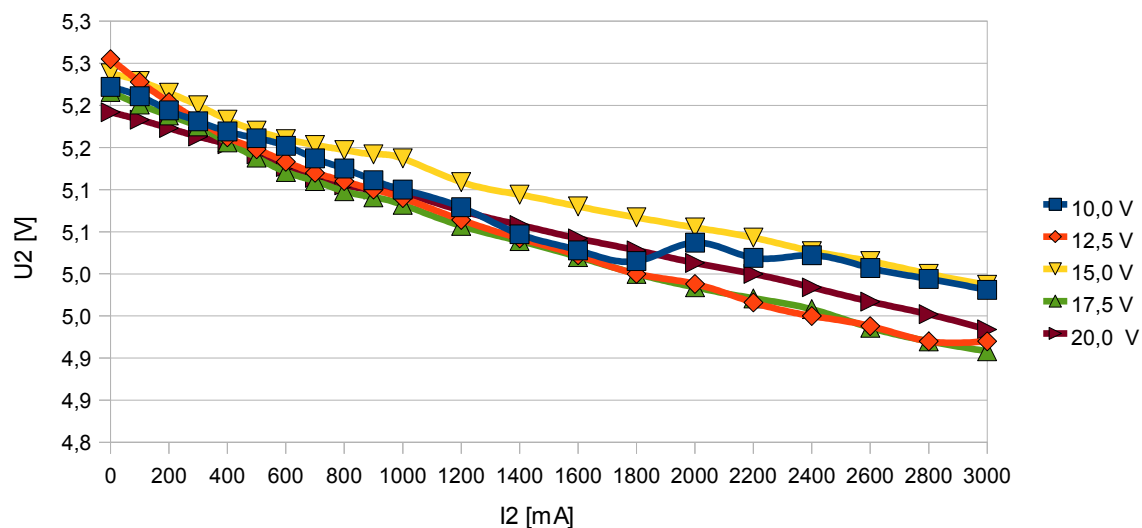
$$R_{RT} = \frac{2,5 \cdot 10^4}{f_{SW}} > f_{SW} = \frac{2,5 \cdot 10^4}{R_{RT}} = \frac{25000}{82} = 304,9 \text{ kHz}$$

Tab. 1 Naměřené závislosti výstupního napětí a vstupního proudu na výstupním proudu

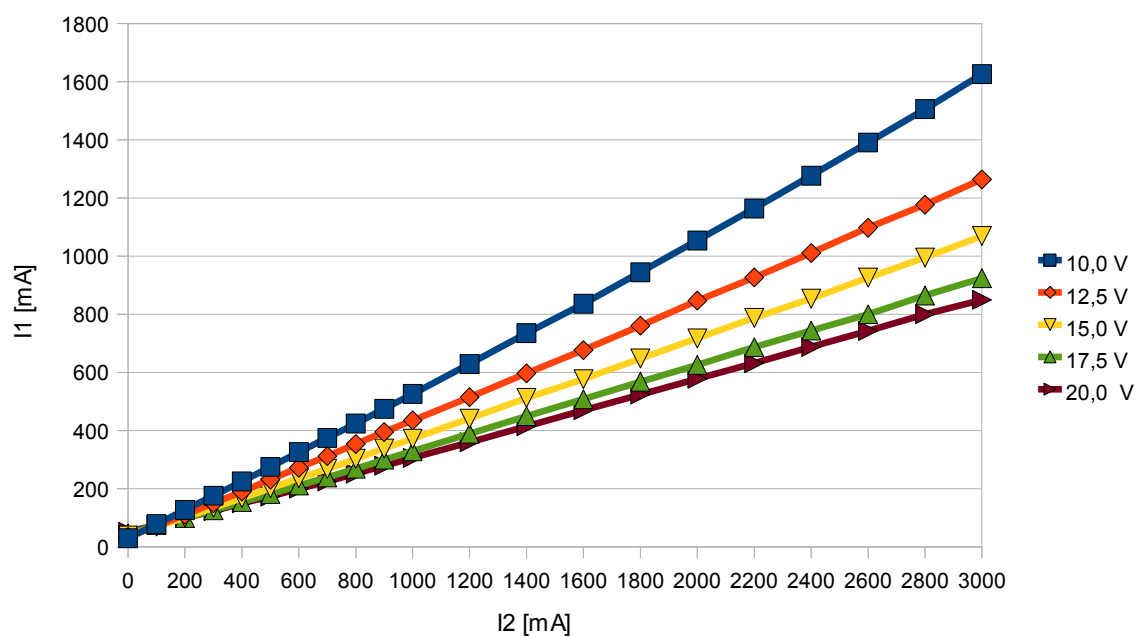
I ₂ [mA]	U ₁ 10,0 V		U ₁ 12,5 V		U ₁ 15,0 V		U ₁ 17,5 V		U ₁ 20,0 V	
	U ₂ [V]	I ₁ [mA]	U ₂ [V]	I ₁ [mA]	U ₂ [V]	I ₁ [mA]	U ₂ [V]	I ₁ [mA]	U ₂ [V]	I ₁ [mA]
0	5,222	30	5,255	34	5,238	39	5,216	46	5,192	52
100	5,211	78	5,228	72	5,229	70	5,201	75	5,183	75
200	5,194	127	5,204	110	5,215	100	5,188	99	5,173	100
300	5,181	176	5,182	150	5,200	135	5,175	126	5,163	123
400	5,169	225	5,162	190	5,183	168	5,156	154	5,154	150
500	5,161	275	5,148	232	5,170	202	5,138	182	5,142	173
600	5,152	326	5,133	272	5,160	236	5,121	211	5,127	200
700	5,137	375	5,120	312	5,153	268	5,110	239	5,114	225
800	5,125	424	5,110	354	5,147	303	5,098	269	5,105	252
900	5,111	475	5,100	395	5,142	338	5,091	300	5,100	279
1000	5,100	526	5,090	435	5,137	372	5,082	329	5,096	306
1200	5,079	629	5,064	515	5,109	441	5,057	389	5,075	360
1400	5,047	735	5,042	597	5,094	512	5,039	450	5,058	415
1600	5,028	836	5,022	677	5,080	577	5,020	508	5,042	470
1800	5,015	945	5,000	761	5,067	648	5,000	568	5,028	524
2000	5,037	1054	4,988	847	5,055	717	4,984	626	5,013	578
2200	5,019	1164	4,966	927	5,043	788	4,971	687	5,000	632
2400	5,022	1277	4,950	1011	5,027	854	4,958	744	4,984	688
2600	5,007	1391	4,938	1098	5,015	926	4,936	800	4,967	743
2800	4,994	1506	4,920	1177	5,000	995	4,920	865	4,952	800
3000	4,981	1626	4,920	1264	4,987	1069	4,908	924	4,934	850

Tab. 2 Závislost účinnosti na výstupním proudu

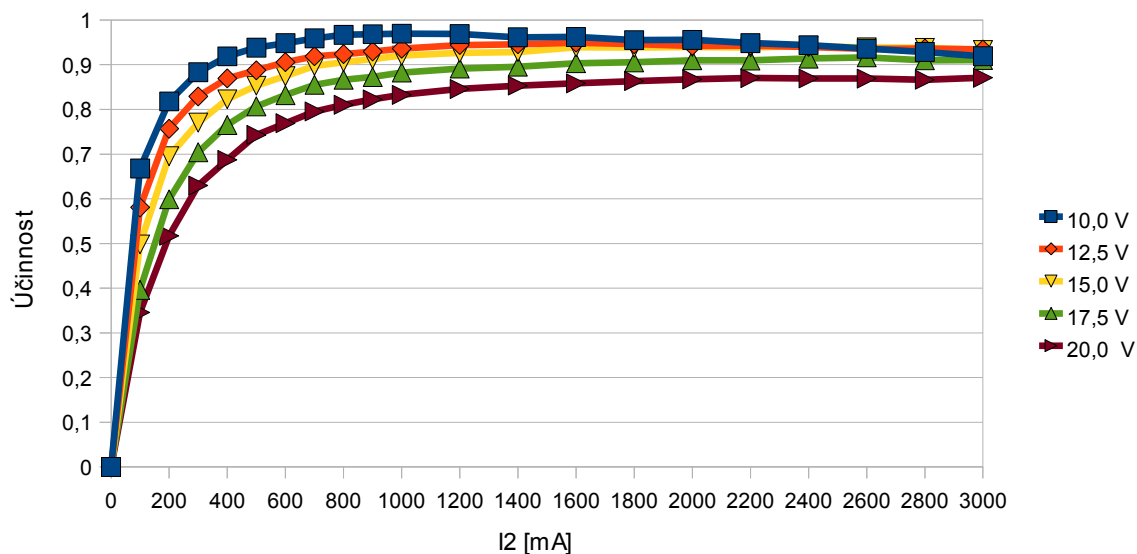
I ₂ [mA]	U ₁ 10,0 V	U ₁ 12,5 V	U ₁ 15,0 V	U ₁ 17,5 V	U ₁ 20,0 V
	Účinnost	Účinnost	Účinnost	Účinnost	Účinnost
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
100	0,668	0,581	0,498	0,396	0,346
200	0,818	0,757	0,695	0,599	0,517
300	0,883	0,829	0,770	0,704	0,630
400	0,919	0,869	0,823	0,765	0,687
500	0,938	0,888	0,853	0,807	0,743
600	0,948	0,906	0,875	0,832	0,769
700	0,959	0,919	0,897	0,855	0,796
800	0,967	0,924	0,906	0,866	0,810
900	0,968	0,930	0,913	0,873	0,823
1000	0,970	0,936	0,921	0,883	0,833
1200	0,969	0,944	0,927	0,891	0,846
1400	0,961	0,946	0,929	0,896	0,853
1600	0,962	0,950	0,939	0,903	0,858
1800	0,955	0,946	0,938	0,905	0,864
2000	0,956	0,942	0,940	0,910	0,867
2200	0,949	0,943	0,939	0,910	0,870
2400	0,944	0,940	0,942	0,914	0,869
2600	0,936	0,935	0,939	0,917	0,869
2800	0,928	0,936	0,938	0,910	0,867
3000	0,919	0,934	0,933	0,911	0,871



Graf1 Závislost výstupního napětí na výstupním proudu



Graf 2 Závislost vstupního proudu na výstupním proudu



Graf 3 Závislost účinnosti na výstupním proudu

ZÁVĚR

Měnič pracuje s kmitočtem asi 305 kHz. Závislosti vstupního proudu na výstupním proudu jsou téměř lineární (graf 2), je z nich patrné, že čím vyšší je vstupní napětí, tím nižší je vstupní proud. Závislosti výstupního napětí na výstupním proudu (graf1) klesají s rostoucím výstupním proudem. Navíc jsou mírně zvlněné, nejvíce je to patrné na závislosti změřené při vstupním napětí 10 V. Měnič dosahuje účinnosti až 97 % a to při vstupním napětí 10 V. Účinnost klesá s rostoucím vstupním napětím a roste s rostoucím výstupním proudem. Při vstupním napětí 20 V nedosahuje ani 90% Při výstupním proudu vyšším jak 800 mA je účinnost měniče vyšší jak 80% bez ohledu na vstupní napětí.

8.3 Přípravek s napět'ovou a proudovou referencí - Vzorový protokol

Přípravek je vybaven napět'ovou a proudovou referencí a převodníkem teploty na napětí. Tyto součástky jsou v provedení SMD a je na ně přiložen Peltiérův článek, který je takto může ochlazovat nebo zahřívat a umožňuje měřit teplotní závislosti. Z výsledků měření je patrné, že proudová reference má lineární teplotní závislost rostoucí s teplotou a napět'ová reference je proudově nezávislá. Dále se měří závislost výstupního proudu na velikosti zatěžovacího rezistoru připojeného do série s referencí při různých vstupních napětích, závislost výstupního proudu na velikosti zatěžovacího rezistoru připojeného do série s referencí při různých referenčních proudech a závislost referenčního proudu na vstupním napětí, při konstantní hodnotě zatěžovacího rezistoru.

Pro napět'ovou referenci je měřena závislost referenčního napětí na odporu zatěžovacího rezistoru a na vstupním napětí

BNEZ	Č.úlohy	Napětové a proudové reference	
Jméno :		Spolupracoval :	
Datum měření :		Hodnocení :	

ÚVOD

Napětové a proudové reference patří mezi běžné elektrotechnické součástky, vyrábějí se s různými hodnotami výstupních referenčních veličin, různou přesností referenční veličiny a rozsahem pracovních teplot. Jejich výhodou je nízká cena a vysoká přesnost referenčního napětí.

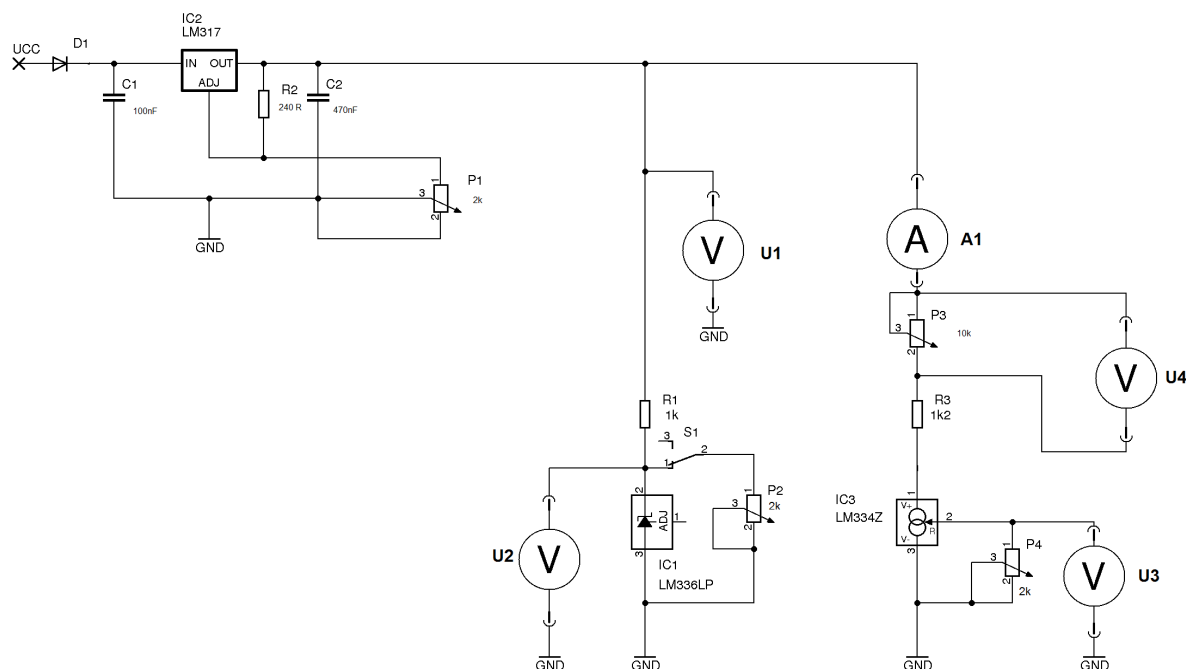
V přípravku je použita napětová reference LM336-2.5, její referenční napětí je 2,5 V. Mezi základní parametry patří vysoká přesnost výstupního napětí (možnost použití jako referenční zdroj napětí pro digitální voltmetry), teplotní rozsah od 0 °C do 75 °C, nízká závislost výstupního napětí na teplotě, stabilní výstupní napětí při poměrně vysokém rozsahu proudů (tekoucích referencí) od 0,4 mA do 10 mA, možnost korigovat teplotní závislost, výstupní napětí nebo rozsah vstupních napětí pomocí vhodného zapojení pinu ADJ (tato možnost není v přípravku použita). IO LM336 je zapojen do série rezistorem $R_1 = 1\text{ k}\Omega$ a s paralelně připojeným potenciometrem $P_2 = 2\text{ k}\Omega$, který tvoří regulovatelnou zátěž.

Další částí přípravku je proudová reference, je realizována pomocí integrovaného obvodu LM334 zapojeného do série s potenciometrem o hodnotě odporu 10 k Ω a rezistorem o hodnotě 1,2 k Ω . Tento integrovaný obvod může pracovat při napětích od 1 V do 40 V (v tomto přípravku je vstupní napětí omezeno na cca 12 V), jeho výstupní referenční proud je regulovatelný pomocí potenciometru připojeného na pin R od 1 μA do 10 mA (v tomto přípravku od 40 μA do 9 mA). Velikost výstupního referenčního proudu se určí ze vztahu:

$$I_{SET} = \frac{U_R}{R_{SET}} \cdot 1,059$$

kde I_{SET} velikost referenčního proudu,
 U_R velikost napětí na potenciometru,
 R_{SET} hodnota odporu nastaveného na potenciometru.

Přípravek je vybaven Peltierovým článkem, který je přiložen na obě reference a na převodník teploty na napětí, umožňuje chladit a zahřívát reference a měřit tak teplotní závislost referenčních veličin.



Obr. 1 Schéma zapojení přípravku s napěťovou a proudovou referencí

ZADÁNÍ

1. Změřte závislosti referenčního proudu proudové reference na hodnotě zatěžovacího rezistoru pro různá vstupní napětí.
2. Změřte závislosti referenčního proudu proudové reference na hodnotě zatěžovacího rezistoru pro různé referenční proudy a změřené závislosti vynesete do grafu.
3. Změřte závislost referenčního proudu proudové reference na vstupním napětí a vynesete ji do grafu.
4. Změřte teplotní charakteristiky napěťové a proudové reference a vynesete je do grafu.
5. Změřte závislosti referenčního napětí napěťové reference na hodnotě zatěžovacího rezistoru a vynesete je do grafu.
6. Změřte závislost referenčního napětí napěťové reference na vstupním napětí a vynesete ji do grafu.

POKYNY K MĚŘENÍ A VYPRACOVÁNÍ PROTOKOLU

Ad 1. Potenciometr Zátěž A vytočte zcela vlevo. Nastavte vstupní napětí na 4 V. Nastavte referenční proud 2 mA. Zapište hodnotu referenčního proudu a napětí U_4 . Potenciometrem Zátěž A začněte pomalu otáčet vpravo a sledujte hodnotu napětí U_4 na zatěžovacím potenciometru a hodnotu referenčního proudu. V momentě kdy začne referenční proud klesat zapište další hodnotu proudu a napětí, pokračujte v měření tak, aby se vám podařilo dostatečně zachytit závislost výstupního proudu na hodnotě zatěžovacího odporu. Postup opakujte pro vstupní napětí 8 V a 12 V. Z hodnot I_2 a U_4 vypočtete hodnoty odporu zatěžovacího rezistoru, nezapomeňte přičíst 1,2 k Ω .

Ad 2. Nastavte hodnotu vstupního napětí na 8V, potenciometr Zátěž A vytočte zcela vlevo a nastavte hodnotu referenčního proudu na 1 mA. Zapište hodnotu U_4 a I_2 . Pak začněte postupně otáčet potenciometrem Zátěž A a zapište hodnotu U_4 a I_2 až zaznamenáte pokles I_2 , pokračujte v měření tak, aby se vám podařilo dostatečně zachytit závislost výstupního proudu na hodnotě zatěžovacího odporu. Totéž opakujte pro referenční proud 2 mA a 3 mA.

Ad 3. Nastavte maximální vstupní napětí, hodnotu zatěžovacího rezistoru nastavte na 3,2 k Ω a referenční proud na 2 mA. Začněte snižovat hodnotu napětí U_1 a zapisujte změny referenčního proudu a napětí U_1 . Pokračujte v měření tak, aby se vám podařilo dostatečně zachytit závislost výstupního proudu na hodnotě vstupního napětí.

Ad 4. Nastavte U_1 na hodnotu 10 V, potenciometr Zátěž A vytočte zcela vlevo a nastavte hodnotu referenčního proudu na 3 mA. Odpojte od napěťové reference zátěž (červeným páčkovým vypínačem). Na napájecím zdroji vyhřívání/chlazení (větev A) nastavte napětí 0,7 V (použijte jemné nastavení vedle displaye voltmetru). Potenciometrem Nastavení teploty nastavte přibližně 18°C. Zapněte zdroj vyhřívání/chlazení (větev A), kontrolujte napětí a proud. Napětí by nemělo přesáhnout 2 V, proud by neměl přesahovat 2,5 A. Zpočátku udržujte malý proud (kolem 0,7 A). Teplota začne klesat, pokud je pokles pomalý, můžete zvětšit proud, ale nepřekračujte uvedenou maximální hodnotu, zapište nejnižší dosaženou hodnotu teploty a hodnoty referenčních veličin. Poté nastavujte hodnoty teploty podle tabulky. Během měření korigujte velikost proudu vyhřívání/chlazení, aby se teplota neměnila příliš prudce nebo naopak velmi pomalu.

Ad 5. Nastavujte vstupní napětí na 4V, připojte zátěž k napěťové referenci změřte závislost referenčního napětí na zatěžovacím odporu. Opakujte pro vstupní napětí 8 V a 12 V

Ad 6. Změřte závislost referenčního napětí napěťové reference na vstupním napětí pro libovolnou hodnotu zatěžovacího odporu a vynesete ji do grafu.

POUŽITÉ MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJE A POMŮCKY

Napájecí zdroj.....	č.
Přípravek s DC/DC měničem.....	č.
Digitální multimetr (vstupní voltmetr).....	č.
Digitální multimetr (ampérmetr).....	č.
Digitální multimetr (voltmetr U_2).....	č.
Digitální multimetr (voltmetr U_1).....	č.

VYPRACOVÁNÍ

Tab. 1 Závislosti referenčního proudu na hodnotě odporu zatěžovacího rezistoru pro různá vstupní napětí ($I_2 = 2 \text{ mA}$)

$U_1 = 4 \text{ V}$			$U_1 = 8 \text{ V}$			$U_1 = 12 \text{ V}$		
$U_R [\text{V}]$	$I_2 [\text{mA}]$	$R_Z [\text{k}\Omega]$	$U_R [\text{V}]$	$I_2 [\text{mA}]$	$R_Z [\text{k}\Omega]$	$U_R [\text{V}]$	$I_2 [\text{mA}]$	$R_Z [\text{k}\Omega]$
0	1,99	1,2	0	1,98	1,2	0	1,99	1,2
0,5	1,99	1,45	0,5	1,97	1,45	3	1,99	2,71
0,75	1,98	1,58	1	1,97	1,71	5	1,99	3,71
1	1,87	1,73	2	1,97	2,22	8	1,99	5,22
1,25	1,7	1,94	4	1,97	3,23	9	1,85	6,06
1,5	1,52	2,19	5	1,95	3,76	9,5	1,51	7,49
1,75	1,32	2,53	5,5	1,65	4,53	10	1,13	10,05
2	1,13	2,97	5,75	1,45	5,17			
2,5	0,76	4,49	6	1,29	5,85			
3	0,35	9,77	6,25	1,09	6,93			
			6,5	0,9	8,42			
			6,8	0,68	11,2			

Tab. 2 Závislosti výstupního proudu na hodnotě zatěžovacího rezistoru pro různé referenční proudy ($U_1 = 8 \text{ V}$)

$I_2 = 1 \text{ mA}$			$I_2 = 2 \text{ mA}$			$I_2 = 3 \text{ mA}$		
$U_R [\text{V}]$	$I_2 [\text{mA}]$	$R_Z [\text{k}\Omega]$	$U_R [\text{V}]$	$I_2 [\text{mA}]$	$R_Z [\text{k}\Omega]$	$U_R [\text{V}]$	$I_2 [\text{mA}]$	$R_Z [\text{k}\Omega]$
0	1,080	1,2	0	1,980	1,2	0	3,000	1,2
5	1,080	5,83	0,5	1,970	1,45	1	3,000	1,53
6	1,030	7,03	1	1,970	1,71	2	3,000	1,87
6,1	0,971	7,48	2	1,970	2,22	2,25	2,990	1,95
6,3	0,828	8,81	4	1,970	3,23	2,5	2,990	2,04
6,4	0,768	9,53	5	1,950	3,76	3	2,990	2,2
			5,5	1,650	4,53	3,75	2,960	2,47
			5,75	1,450	5,17	4	2,820	2,62
			6	1,290	5,85			
			6,25	1,090	6,93			
			6,5	0,900	8,42			
			6,8	0,680	11,2			

Tab. 3 Závislost referenčního proudu na vstupním napětí

$I_{\text{SET}} = 2 \text{ mA}$	
$U_1 [\text{V}]$	$I_2 [\text{mA}]$
12	2
7,5	1,96
7	1,87
6,5	1,73
6	1,58
5,5	1,44
5	1,29
4,5	1,15
4	0,99

Tab. 4 Teplotní závislosti referenčních veličin

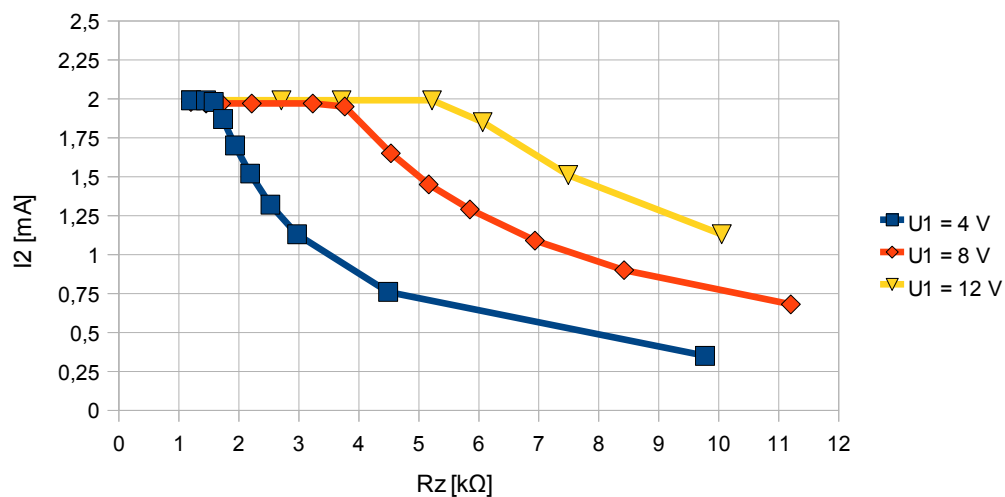
$U_1 = 10 \text{ V}$	$I_{\text{SET}} = 3 \text{ mA}$		$U_2 [\text{V}]$
$T [^\circ\text{C}]$	$I_2 [\text{mA}]$	$U_{4\text{Rset}} [\text{mV}]$	
18	2,90	65,33	2,489
20	2,92	65,63	2,489
25	2,96	66,43	2,489
30	3,00	67,50	2,489
35	3,04	68,70	2,489
40	3,08	69,30	2,489
45	3,12	70,22	2,488
50	3,16	71,05	2,488
55	3,20	72,00	2,487
60	3,24	73,24	2,486

Tab. 5 Závislost referenčního napětí na odporu zatěžovacího rezistoru

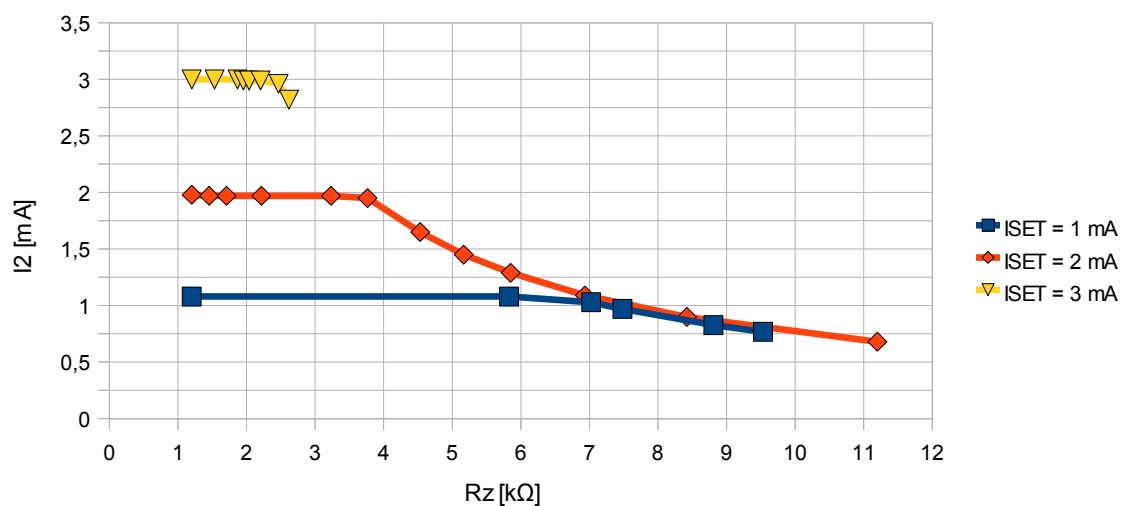
$U_1 = 4,0\text{V}$		$U_1 = 6,0\text{V}$		$U_1 = 8,0\text{V}$	
$R [\text{k}\Omega]$	$U_2 [\text{V}]$	$R [\text{k}\Omega]$	$U_2 [\text{V}]$	$R [\text{k}\Omega]$	$U_2 [\text{V}]$
2,5	2,489	2,5	2,489	2,5	2,490
2,25	2,489	1	2,489	1	2,490
2	2,488	0,8	2,489	0,8	2,489
1,8	2,424	0,7	2,375	0,6	2,489
1,6	2,395	0,6	2,222	0,5	2,489
1,4	2,239	0,5	1,988	0,4	2,290
1,2	2,103	0,4	1,635	0,3	1,720
1	1,925	0,3	1,256	0,2	1,315
0,8	1,810	0,2	0,894	0,1	0,812
0,6	1,490	0,1	0,459		
0,4	1,131				
0,2	0,592				

Tab. 6 Závislost referenčního napětí na vstupním napětí

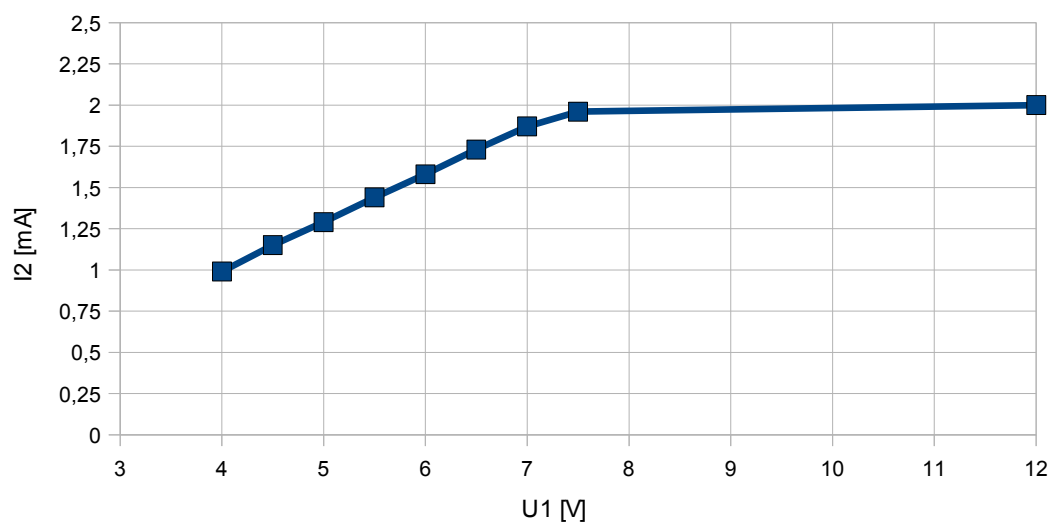
$R_z = 3,2 \text{ k}\Omega$	
$U_1 [\text{V}]$	$U_2 [\text{V}]$
12	2,490
8	2,489
5	2,489
4,5	2,488
4	2,387
3,75	2,231
3,5	2,090
3,25	1,944
3	1,800
2,5	1,519



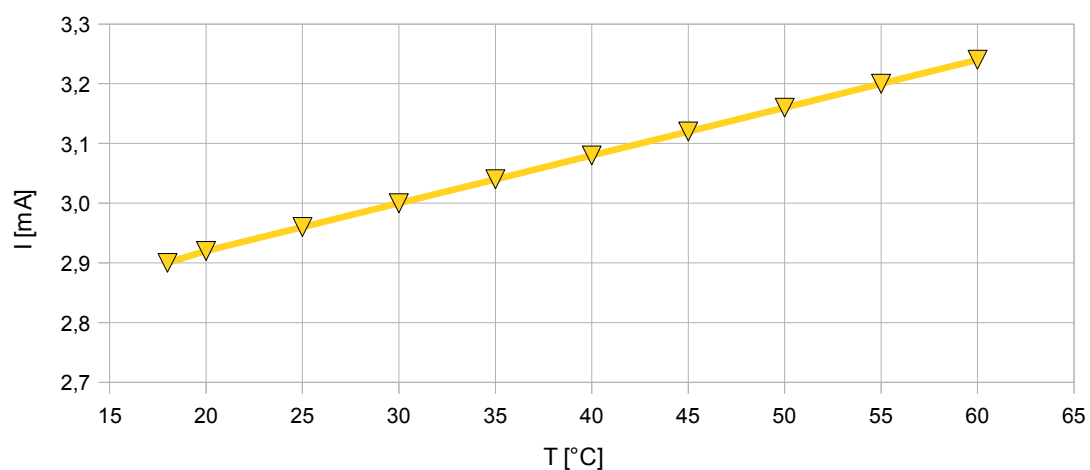
Graf 1 Závislost referenčního proudu na odporu zatěžovacího rezistoru pro různá U_1



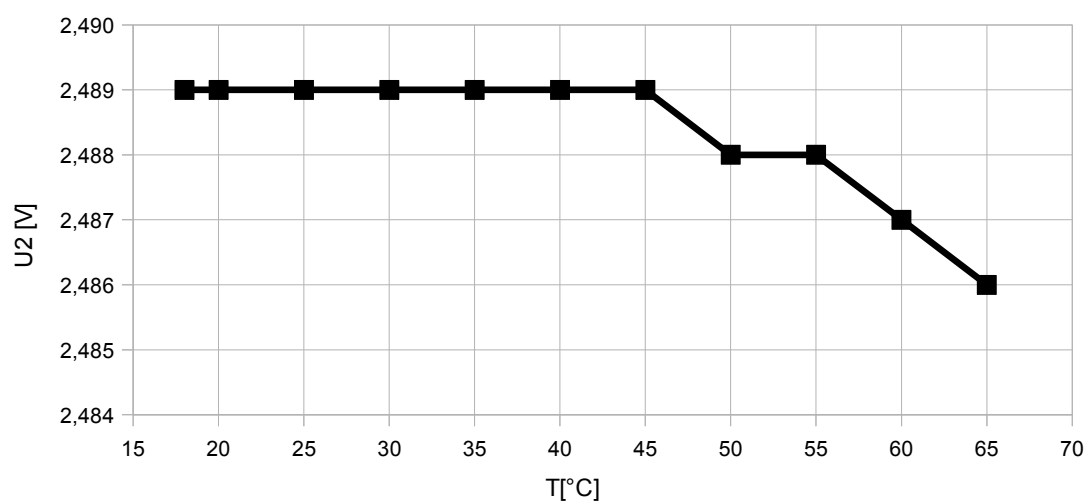
Graf 2 Závislost referenčního proudu na odporu zatěžovacího rezistoru pro různé I_2



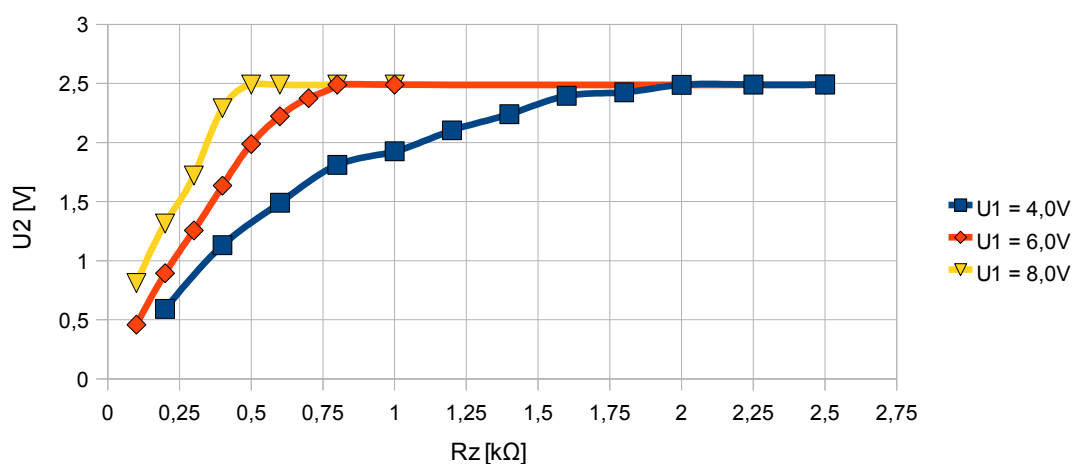
Graf 3 Závislost referenčního proudu na vstupním napětí



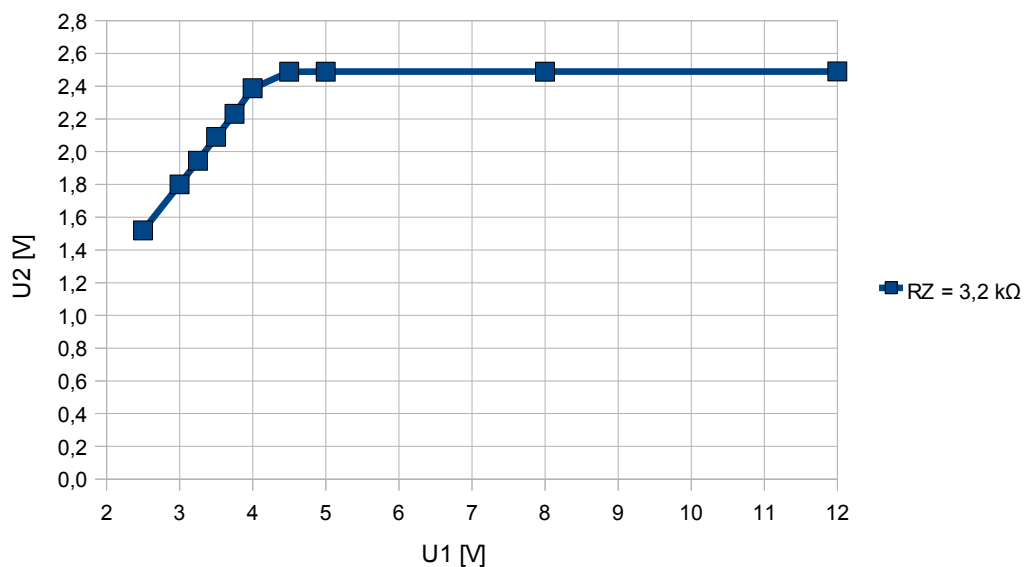
Graf 4 Závislost referenčního proudu na teplotě



Graf 5 Závislost referenčního napětí na teplotě



Graf 6 Závislost referenčního napětí na odporu zatěžovacího rezistoru



Graf 7 Závislost referenčního napětí na vstupním napětí

ZÁVĚR

Z naměřených hodnot pro proudovou referenci je patrné, že čím menší je vstupní napětí, tím menší stačí hodnota zatěžovacího rezistoru, aby referenční proud začal klesat. Je to logické a potvrzuje platnost Ohmova zákona. Reference nemůže udržet proud větší než U_1 / R_Z . Totéž platí pro druhý graf, čím vyšší je nastavený referenční proud, tím menší stačí hodnota R_Z , aby začal ref. proud padat. Stejně tak třetí graf potvrzuje platnost Ohmova zákona.

Z grafů teplotních závislostí je patrná pozitivní závislost referenčního proudu LM334. LM336 je prakticky teplotně nezávislá.

Ze závislostí změřených na LM336 je patrný pokles výstupního napětí s rostoucí zátěží a s klesajícím napětím.

Závěr

Do navržených přípravků bylo nutno vybrat vhodné moderní IO. Jedním z kritérií při výběru bylo použité pouzdro. Použité IO pro nábojovou pumpu a DC/DC měnič jsou v pouzdrech MSOP resp. TSSOP, která mají poměrně malé vzdálenosti mezi vývody. Nicméně z nabízených vhodných IO šlo o nejlepší variantu.

Navržené plošné spoje byly vyrobeny ve školní dílně, osazeny a hotové obvody byly oživeny. Nábojová pumpa a DC/DC měnič fungovali na první zapojení. U DPS přípravků s referencemi se vyskytly jisté problémy způsobené chybami v návrhu, všechny problémy znemožňující činnost přípravku byly odstraněny.

Po oživení byly změřeny parametry jednotlivých přípravků. Vlastnosti DC/DC měniče odpovídají výsledkům simulace v programu SwitcherPro. Měnič dosahuje účinnosti až 97 %. Z grafů naměřených na nábojové pumpě je možné určit druh konverzního režimu a sledovat vliv změny kapacity výstupního kondenzátoru. U přípravku s referencemi je zajímavá hlavně teplotní závislost referenčního proudu IO LM334, ostatní závislosti vesměs potvrzují platnost Ohmova zákona.

Pro jednotlivé přípravky byly vypracovány vzorové protokoly do kterých byly zaneseny některé hodnoty a grafy ze zkušebních měření.

Literatura

- [1] HUMLHANS, J. *Nábojové pumpy*. 1. vydání. Praha : BEN - technická literatura, 2002. 192 s. ISBN 80-7300-046-6.
- [2] KREJČÍŘÍK, A. *DC/DC měniče*. 1. vydání. Praha : BEN - technická literatura, 2001. 112 s. ISBN 80-7300-045-8
- [3] KREJČÍŘÍK, A. *Napájecí zdroje 1*. 1.vydání. Praha: BEN - technická literatura, 1996. 352s. ISBN 80-86056-02-3
- [4] KREJČÍŘÍK, A. *Napájecí zdroje 3*. 1.vydání. Praha: BEN - technická literatura, 1999. 341s. ISBN 80-86056-56-2
- [5] *TPS40195* [online]. Texas Instruments, 2008 [cit. 2011-05-27]. Dostupné z WWW: <<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/tps40195.pdf>>.
- [6] *TPS60500* [online]. Texas Instruments, 2002 [cit. 2011-05-27]. Dostupné z WWW: <<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/tps60500.pdf>>.
- [7] *LM336* [online]. National Semiconductor Corporation, 2005 [cit. 2011-05-27]. Dostupné z WWW: <<http://www.national.com/ds/LM/LM236-2.5.pdf>>.
- [8] *LM334* [online]. National Semiconductor Corporation, 2005 [cit. 2011-05-27]. Dostupné z WWW: <<http://www.national.com/ds/LM/LM334.pdf>>.
- [9] *LM35* [online]. National Semiconductor Corporation, 2000 [cit. 2011-05-27]. Dostupné z WWW: <<http://www.national.com/ds/LM/LM35.pdf>> .
- [10] *LM393* [online]. National Semiconductor Corporation, 2002 [cit. 2011-05-27]. Dostupné z WWW: <<http://www.national.com/ds/LM/LM193.pdf>>.

Seznam zkratek a symbolů

IO	Integrovaný obvod
DPS	Deska plošných spojů
UVLO	Undervoltage Lockout
GND	Společná svorka (0 V)
OUT	Výstup
IN, INP	Vstup
TI	Texas Instruments
U_{CC}	Napájecí napětí
U_{IN}, U_{INP}	Vstupní napětí
U_{OUT}	Výstupní napětí
U_{REF}	Referenční napětí
I_{OUT}	Výstupní proud
I_{ILIM}	Limitní proud
I_{ref}	Referenční proud
I_{SET}	Nastavený referenční proud
R_Z	Zatěžovací rezistor, zátěž
f_{SW}	Spínací kmitočet
f_{OSC}	Kmitočet vnitřního oscilátoru
R_{DS}	Odpor otevřeného tranzistoru mezi D a S
LDO	Konverzní režim nábojové pumpy, kdy se cyklicky připíná výstupní kondenzátor ke vstupnímu napětí.
U_{RSET}	Napětí na rezistoru nastavujícím referenční proud LM334