

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
KEI

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vysokonapěťové zdroje a měřicí obvody pro potřeby nukleární
instrumentace

Autor práce: **Bc. Vratislav Címr**
Vedoucí práce: **Ing. Jan Zich, Ph.D., MBA**

2023

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Vratislav CIMR**
Osobní číslo: **E20N0003K**
Studijní program: **N0714A060017 Aplikovaná elektrotechnika**
Téma práce: **Vysokonapěťové zdroje a měřicí obvody pro potřeby nukleární instrumentace**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky**

Zásady pro vypracování

Navrhněte, realizujte a otestujte vysokonapěťový zdroj včetně přesných měřicích obvodů napětí a proudu pro potřeby nukleární instrumentace.

1. Proveďte rešerši topologií vysokonapěťových zdrojů s nízkým výstupním výkonem a měřicích obvodů.
2. Navrhněte a realizujte funkční vzorek zahrnující VN zdroj a přesné měřicí obvody pro aplikace se zvýšenou radiací.
3. Ověřte požadované vlastnosti a parametry funkčního vzorku na základě měření. Zhodnotte dosažené výsledky.




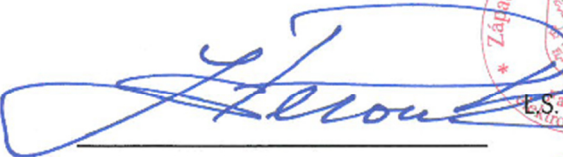

Rozsah diplomové práce: **40 – 60**
Rozsah grafických prací: **7**
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. BILLINGS, Keith a Taylor MOREY. SWITCHMODE POWER SUPPLY HANDBOOK. 3. vydání. Pensylvánie: The McGraw-Hill Companies, 2011. ISBN 978-0-07-163972-9.
2. Další zdroje dle doporučení vedoucího (workshopy, přednášky, vědecké články).

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Zich, Ph.D., MBA**
Katedra elektroniky a informačních technologií

Datum zadání diplomové práce: **7. října 2022**
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2023**




Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan
Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 7. října 2022

Abstrakt

Tato práce se zabývá vysokonapětovými zdroji a měřicími obvody pro použití v nukleární instrumentaci.

V první části je provedena analýza požadavků na vysokonapětové zdroje a měřicí obvody a popis vysokonapětových zdrojů a jejich měřících obvodů.

Druhá část staví na analýze a popisu provedené v první části. Jsou zde zohledněny požadavky na jednotlivé části vysokonapětových zdrojů a proveden výběr nejvhodnějších součástek, které byly využity pro realizaci funkčního vysokonapětového zdroje a jeho měřících obvodů.

Třetí část se věnuje návrhu a realizaci navrženého zařízení.

Poslední, čtvrtá část, je potom věnována testování navrženého zařízení.

V závěru je popsáno, že i přesto, že se samotný vysokonapětový zdroj nepodařilo zprovoznit, povedlo se úspěšně otestovat ostatní měřicí obvody, které jsou nedílnou součástí těchto vysokonapětových zdrojů.

Klíčová slova

Medipix/Timepix, měření proudu, měření napětí, regulace napětí, řízení polarity, Vysokonapětový zdroj

Abstract

This work deals with high voltage sources and measuring circuits for use in nuclear instrumentation.

In the first part, an analysis of the requirements for high-voltage sources and measuring circuits and a description of high-voltage sources and their measuring circuits is carried out.

The second part builds on the analysis and description carried out in the first part. The requirements for individual parts of high-voltage sources are taken into account here, and a selection of suitable components that were used for the realization of a functional high-voltage source and its measuring circuits is made.

The third part is dedicated to the design and implementation of the proposed device.

The last, fourth part, is then dedicated to testing the designed device.

In the conclusion, it is described that even though the high-voltage source failed to operate, the other measuring circuits, which are an integral part of these high-voltage sources, were successfully tested.

Key Words

Medipix/Timepix, current measurement, voltage measurement, voltage regulation, polarity control, High voltage source

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat zejména vedoucímu práce za jeho vstřícnost, ochotu a flexibilitu při konzultacích a při řešených problémech.

Obsah

Úvod.....	- 1 -
1 Analýza požadavků na VN zdroje v nukleární instrumentaci a jejich popis.....	- 2 -
1.1 Analýza požadavků na VN zdroje v nukleární instrumentaci.....	- 2 -
1.1.1 Napěťový rozsah a měření napětí	- 3 -
1.1.2 Proudový rozsah a měření proudu	- 3 -
1.1.3 Polarita	- 3 -
1.1.4 Bezpečnost	- 3 -
1.1.5 Zvlnění	- 4 -
1.1.6 Spotřeba energie	- 4 -
1.1.7 Velikost.....	- 4 -
1.2 Konstrukce a princip VN zdrojů v nukleární instrumentaci	- 4 -
1.3 Přehled topologií pro zvyšování napětí.....	- 5 -
1.3.1 Boost měnič (step-up měnič).....	- 5 -
1.3.2 SEPIC měnič.....	- 6 -
1.3.3 Buck–boost měnič.....	- 7 -
1.3.4 Čuk měnič	- 7 -
1.3.5 Flyback měnič.....	- 8 -
1.3.6 Forward měnič	- 9 -
1.4 Přehled možností pro galvanické oddělení zdrojů	- 10 -
1.4.1 Transformátorová vazba	- 10 -
1.4.2 Optická vazba	- 11 -
1.4.3 Mechanická vazba.....	- 11 -
1.4.4 Motorgenerátor	- 12 -
1.5 Přehled měřících obvodů vyšších napětí.....	- 12 -
1.6 Přehled měřících obvodů proudů nižších hodnot.....	- 13 -
1.6.1 Shunt rezistor	- 13 -
1.7 Možnost řízení polarity VN zdrojů	- 14 -
1.7.1 Elektromechanické relé.....	- 14 -
1.7.2 SSR relé	- 15 -
1.7.3 Používaná zapojení	- 15 -

1.8	Popis TPX/MPX detektorů.....	- 16 -
2	Výběr jednotlivých částí navrhovaného zařízení.....	- 19 -
2.1	Požadavky na zařízení.....	- 19 -
2.2	Blok pro zvyšování napětí.....	- 19 -
2.2.1	Zvyšovač napětí HV9150	- 19 -
2.2.2	Zvyšovač napětí LM3478	- 20 -
2.2.3	Zvyšovač napětí LT8304	- 21 -
2.2.4	Výběr zvyšovače v bloku pro zvyšování napětí	- 22 -
2.3	Blok regulace výstupního napětí.....	- 22 -
2.4	Blok měření napětí	- 23 -
2.5	Blok měření proudu.....	- 23 -
2.6	Blok řízení polaritý výstupního napětí	- 24 -
3	Stavba funkčního zařízení	- 26 -
3.1	Blok pro zvyšování napětí.....	- 26 -
3.2	Blok regulace výstupního napětí.....	- 29 -
3.3	Blok měření napětí	- 31 -
3.4	Blok měření proudu.....	- 33 -
3.5	Blok řízení polaritý výstupního napětí.....	- 34 -
3.6	Kompletace zařízení.....	- 34 -
4	Testování zařízení.....	- 39 -
4.1	Testování bloku pro zvyšování napětí.....	- 39 -
4.2	Testování bloku regulace výstupního napětí.....	- 39 -
4.3	Testování bloku měření napětí	- 40 -
4.4	Testování bloku měření proudu.....	- 41 -
4.5	Testování bloku řízení polaritý výstupního napětí.....	- 41 -
	Zhodnocení a závěr	- 43 -
	Literatura.....	- 44 -
	Přílohy.....	I

Seznam symbolů a zkratek

Značka	Popisek	Jednotka
<i>AC</i>	Alternating current	-
<i>AD</i>	Analog digital	-
<i>CT</i>	Computed tomography (počítačová tomografie)	-
<i>D</i>	Duty cycle	-
<i>D</i>	Drain	-
<i>DA</i>	Digital analog (digitálně analogový)	-
<i>DC</i>	Direct current	-
<i>DPDT</i>	Double pole double throw	-
<i>FEL</i>	Fakulta elektrotechnická	-
<i>FGPA</i>	Field programmable gate array (programovatelné hradlové pole)	-
<i>G</i>	Gate	-
<i>I</i>	Elektrický proud	[A]
<i>LED</i>	Light emitting diode (elektroluminiscenční dioda)	-
<i>MEMS</i>	Micro electro mechanical systems	-
<i>MOSFET</i>	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (tranzistor řízený elektrickým polem)	-
<i>MPX</i>	Medipix	-
<i>MRT</i>	Magnetic resonance tomography (magnetická rezonance)	-
<i>P</i>	Elektrický výkon	[W]
<i>PC</i>	Personal computer (osobní počítač)	-
<i>PCB</i>	Printed circuit board (deska plošných spojů)	-
<i>QFN</i>	Quad flat no leads	-
<i>RTG</i>	Rentgenové záření	-
<i>S</i>	Source	-
<i>SEPIC</i>	Single ended primary inductor converter	-
<i>SSR</i>	Solid state relay	-
<i>TPX</i>	Timepix	-
<i>U</i>	Elektrické napětí	[V]
<i>VN</i>	Vysokonapěťový	-
<i>ZČU</i>	Západočeská univerzita v Plzni	-

Úvod

Dané téma je řešeno proto, že v minulosti byl na Fakultě elektrotechnické (FEL) Západočeské univerzity v Plzni (ZČU) postaven vysokonapětový (VN) zdroj, který sice dosáhl velmi dobrých parametrů pro potřeby nukleární instrumentace, nicméně se jednalo se o velmi konzervativní dvoustupňové obvodové řešení sestavené ve velmi omezeném čase tak, aby bylo s vysokou pravděpodobností funkční hned v první revizi. Toto řešení je náročné na plochu desky plošných spojů (PCB), na počet součástek, na cenu i na spotřebu.

Cílem této práce je tedy navrhnout a sestavit takový funkční vzorek, který optimalizuje původní řešení z hlediska plochy PCB, počtu součástek, ceny a spotřeby.

Tato práce se v první, metodologické části, zabývá charakteristikou a analýzou požadavků VN zdrojů a měřících obvodů pro potřeby nukleární instrumentace. Jedná se o zdroje, které napájejí tzv. Timepix (TPX)/Medipix (MPX) pixelové detektory, které jsou využívány pro detekci částic ionizujícího záření. Dále jsou stručně popsány i tyto detektory samotné.

V další části je popsán návrh a stavba funkčního vzorku tohoto VN zdroje spolu s měřením jeho dosažených parametrů.

Závěrem této práce je pak zhodnocení a diskuze dosažených výsledků

1 Analýza požadavků na VN zdroje v nukleární instrumentaci a jejich popis

Nukleární instrumentace se zabývá mechanickými a elektronickými specifikacemi pro elektronické moduly, které se používají v oblasti experimentální částicové a jaderné fyziky, či pro přesné zobrazovací metody v oblasti lékařské diagnózy (nukleární medicína). [28]

Nukleární medicína je specializovaný zdravotnický obor, který zahrnuje vpravení radioaktivní substance do lidského těla a poté dle složení této substance do konkrétního orgánu. Využívá se pro určení diagnózy (zobrazovací metody), nebo léčení nemocí (léčba nádorových onemocnění). Intenzita ionizujícího záření je poté snímána speciálními zařízeními pro detekci a zobrazení částic ionizujícího záření ve formě obrazu (2D i 3D), tzv. gama kamerami či TPX/MPX detektory. Tento obor je rozdílný od RTG metod tím, že se nezaměřuje na zobrazení anatomie, ale na zobrazení její funkce, kterou lze ohodnotit právě na základě intenzity ionizujícího záření vyzařovaného z orgánu. Při RTG vyšetřeních je radioaktivní zdroj navíc mimo tělo. [23]

Gama kamery fungují dle principu scintigrafie (zachycená částice ionizujícího záření je na scintilačním materiálu převedena na záblesk, který je zachycen detektorem, zesílen a zobrazen). TPX/MPX detektory jsou z polovodičového materiálu, který je při vhodném zapojení (inverzní předpětí pro vytvoření vyprázdněné oblasti) schopen též detekovat částice ionizujícího záření, které lze poté vhodným způsobem po zpracování signálu zobrazit. [16, 24]

Dalším z podoborů je experimentální částicová a jaderná fyzika, kde se využívá podobných principů, avšak ne kvůli léčbě či diagnóze pacienta, ale kvůli výzkumu v oblasti částicové a jaderné fyziky (chování částic, objev nových částic). [28]

V této kapitole jsou analyzovány a popsány požadavky na VN zdroje v nukleární instrumentaci. Dále je v této kapitole popsána konstrukce a princip těchto VN zdrojů, a to včetně TPX/MPX detektorů.

1.1 Analýza požadavků na VN zdroje v nukleární instrumentaci

V této podkapitole jsou analyzovány požadavky na VN zdroje v nukleární instrumentaci. Mezi základní požadavky na tyto zdroje patří bezpečnost, zvlnění, spotřeba energie, měření proudu, napětí, polarita a velikost. [21]

1.1.1 Napět'ový rozsah a měření napětí

V případě použití Timepix3 detektoru se vyžaduje výstupní napětí alespoň 50 V. [21]

Velmi záleží na druhu detektoru a na počtu jeho vrstev. Rozsah se tedy může pohybovat v rozmezí 30–800 V. Pro potřeby této práce vycházíme z dimenzování na 100 V.

Měření napětí je vyžadováno pro ověření nastavení požadovaného předpětí, stanovení spotřeby detektoru v součinnosti s obvody pro měření proudu a také pro ochranu zařízení. Výhodou je též monitorování dynamických změn napětí v závislosti na měnících se podmínkách provozování detektoru. [21]

1.1.2 Proudový rozsah a měření proudu

Spotřeba detektoru je cca 2 W v nízkonapět'ové části (tj. digitální části). Odebíraný proud ze zdroje předpětí však dosahuje hodnot výrazně pod 1 μA , pokud je detektor provozován v režimu vyprázdňené oblasti (100 nA/cm^2). Timepix3 má aktivní plochu 2 cm^2 , což v případě 300 μm tenkého detektoru znamená odběr proudu zhruba 200 nA. [21]

Druh detektoru a jeho ovrstvení má určující vliv na velikost proudu dodávaného zdrojem předpětí. Pro potřeby této práce byl stanoven proudový rozsah cca 1 mA.

Měření proudu se vyžaduje pro stanovení odběru proudu detektorem a pro ochranu zařízení. Zároveň je výhodné monitorovat spotřebu proudu měnící se s podmínkami provozování detektoru. [21]

1.1.3 Polarita

Při navrhování může být požadavek na změnu polarit'y zdroje. Polarita je definována jako směr kladných nosičů náboje (konvenční směr). V elektricky vodivých materiálech ovšem převládají záporné nosiče náboje, což má v obvodu stejný efekt jako v případě kladných nosičů, akorát směr je opačný. Polovodiče mohou obsahovat záporné, nebo kladné nosiče a v elektrolytech se můžou vyskytovat kladné a záporné nosiče zároveň. [25]

Změnu polarit'y lze realizovat přepínáním svorek zdroje pomocí relé (elektromechanické či polovodičové).

1.1.4 Bezpečnost

Požadavky na bezpečnost můžou zahrnovat ochranu proti přepětí či nadproudu.

Pro ochranu proti přepětí lze například využít obvodů s komparátorem, který porovnává napětí zdroje s referenčním napětím (Zenerova dioda) a při překročení tohoto referenčního napětí výstup komparátoru sepne tranzistor řízený elektrickým polem (MOSFET), který odpojí zátěž od zdroje. [26]

Stejného principu (využití komparátoru) lze použít i v případě ochrany proti nadproudu. Díky měřením napětí na shunt rezistoru (a tím pádem velikosti proudu) a jeho porovnáním s referenční hodnotou napětí může při překročení tohoto referenčního napětí sepnout komparátor, na jehož výstupu je opět MOSFET, který odpojí zátěž od zdroje. [27]

1.1.5 Zvlnění

Kromě bezpečnostních aspektů zvlnění, což znamená, že střední kvadratická hodnota střídavého napětí (AC) nebude vyšší než 30 V, při maximálním jmenovitém proudu 2 mA, by tento přístup znamenal velmi špatné podmínky pro stejnosměrné předpětí (DC). Požadavky na předpětí lavinových diod vyžadují mnohem menší zvlnění.

Je vhodné dosáhnout maximálního zvlnění 5mV. [21]

1.1.6 Spotřeba energie

Vzhledem k tomu, že spotřeba energie Timepix3 detektoru při použití v nižších frekvencích by měla být do 2 W, předpětí samotné by mělo přispívat ke spotřebě co nejméně, pokud možno pod 0,2 W. Výstupní výkon zdroje bude nízký, protože se očekává že křemíkový senzor odebere méně než 1 μ A, což znamená maximální výkon 60 μ W při napětí 60 V. [21]

1.1.7 Velikost

V některých případech jsou požadavky na velikost zařízení v rozměrech kreditní karty, pro mobilní detektory. Existují i aplikace iPadPix, kdy je Timepix detektor připojen k zadní části Ipad mini.

Samostatný zdroj by měl tedy zabírat co nejméně místa. Pokud bychom využili například desku pro Timepix detektory navrženou J. Alozym (poskytnutá CERN/Medipix spoluprací), ke které zdroj připojíme, tak požadavky na velikost nemusí být tak přísné. [21]

1.2 Konstrukce a princip VN zdrojů v nukleární instrumentaci

Blokové schéma je znázorněno na Obr. 1. Nutnými částmi tohoto zdroje je zvyšovač napětí, měření proudu a měření napětí. Ostatní části jsou volitelné a záleží na aplikaci, pro kterou je zdroj určen.

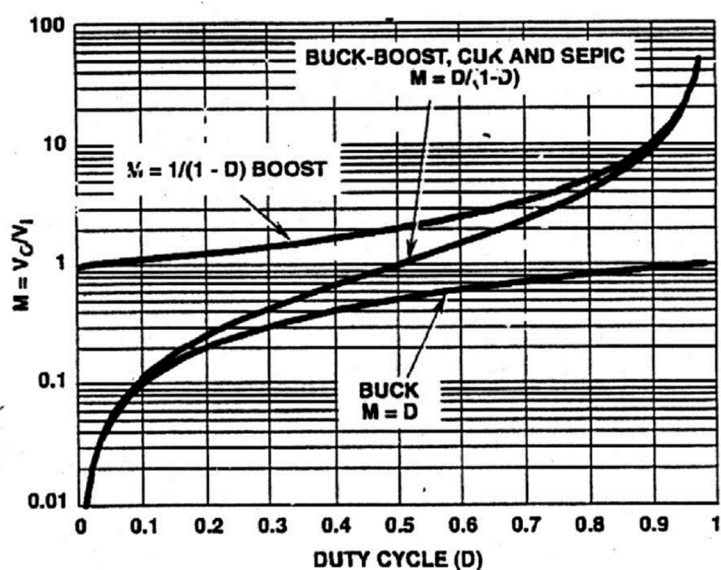
Principem těchto zdrojů je zajistit stabilní předpětí v řádu vyšších desítek až nižších stovek voltů (zdroj s rozsahem cca 30–500 V pokryje většinu aplikací) pro TPX/MPX detektory. Proudový odběr je typicky v řádu desítek μ A (proudové dimenzování na 200 μ A či výše).



Obr. 1: Blokové schéma VN zdrojů v nukleární instrumentaci

1.3 Přehled topologií pro zvyšování napětí

V dalších podkapitolách budou uvedeny nejdůležitější topologie. Principem je vždy volba D , tzn. Duty cycle (střída signálu), což je vlastně poměr doby, kdy je spínač měniče v sepnutém stavu, ku době trvání obou stavů (perioda, doba vypnutí a zapnutí). Na Obr. 2 je ukázka, jaký má volba D vliv na výstupní napětí pro vybrané typy měničů.



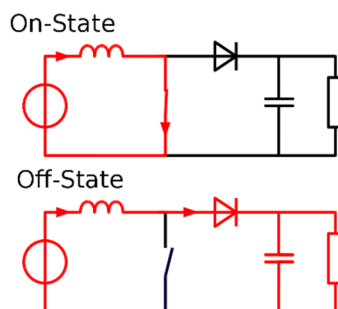
Obr. 2: Závislost poměru mezi výstupním a vstupním napětím (M) na D [22]

1.3.1 Boost měnič (step-up měnič)

Druh DC-DC měniče, který zvyšuje napětí (a snižuje proud) ze vstupu (zdroj) do výstupu (zátěž). Obsahuje alespoň dva polovodiče (diodu a tranzistor) a nejméně jednu součástku pro uložení energie (kondenzátor, cívka, či jejich kombinaci). Pro snížení zvlnění napětí se na vstup a výstup měniče přidávají filtrační kondenzátory (někdy i v kombinaci s cívkou).

Princip funkce je naznačen na Obr. 3. Při sepnutí spínače se obvod uzavře přes cívku a spínač, což způsobí nárůst proudu v cívce (nabíjení cívky). Při rozepnutí spínače se proud uzavře přes diodu, kondenzátor a zátěž. Díky tomu se na výstupní stranu přenesou energie naakumulovaná v cívce během sepnutého stavu. Pokud se bude spínat dostatečně rychle, na výstupu bude vždy napětí větší než napětí vstupního zdroje samotného (díky energii naakumulované v cívce). Když je spínač rozepnutý, kondenzátor, který je paralelně připojen

k zátěži, se také nabíjí na toto kombinované napětí (zdroje a cívky). Pokud je spínač sepnutý, kondenzátor se vybíjí do zátěže (dioda blokuje kondenzátor, aby se nevybil přes spínač). Spínač musí být rozepnut dostatečně rychle, aby se kondenzátor nevybil úplně. Podle velikosti indukčnosti cívky lze potom měnič provozovat ve stavu s přerušovaným proudem (malá indukčnost), v mezi přerušovaného proudu a ve stavu s nepřerušovaným proudem (velká indukčnost) na výstupu. [3]



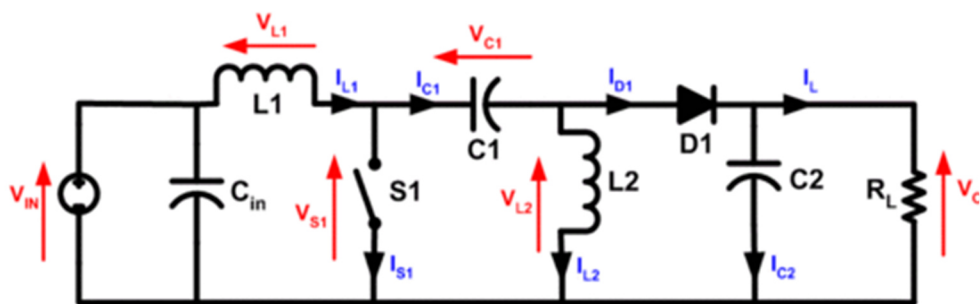
Obr. 3: Princip boost měniče [3]

1.3.2 SEPIC měnič

Jedná se o druh DC-DC měniče, který může mít na výstupu napětí menší, stejné, nebo větší než na vstupu. V podstatě se jedná o boost měnič následovaný invertovaným buck-boost měničem. Používají se v aplikacích, kde může být vstupní napětí z baterie pod nebo nad požadovaným napětím na výstupu (např. Li-ion baterie dává na výstup 3 – 4,2 V).

SEPIC měnič v podstatě vyměňuje energii mezi kondenzátory a cívkami za účelem měnit z jednoho napětí na druhé. Konverzní poměr je dán frekvencí spínání spínače (zpravidla MOSFET tranzistor).

Princip vychází ze schématu na Obr. 4. Při sepnutí spínače dochází ke zvyšování proudu v cívce L1 (díky vstupnímu napětí) a L2 (díky kondenzátoru C1). Na výstupu drží napětí kondenzátor C2. Při rozepnutí spínače se na výstup přenesou energie z L1 a L2, kondenzátor C1 je nabíjen z L1 (obdobně jako je C2 nabíjen z L1 a L2) a v dalším cyklu bude C1 nabíjen L2. Opět můžeme měnič provozovat ve stavu s přerušovaným a nepřerušovaným proudem na výstupu. [4]

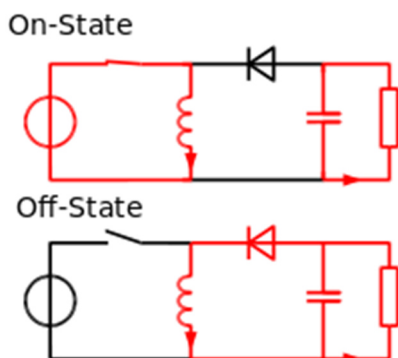


Obr. 4: Princip SEPIC měniče [4]

1.3.3 Buck–boost měnič

Jedná se o invertující měnič, který může mít na výstupu menší nebo větší napětí než na vstupu.

Princip je naznačen na Obr. 5. Při sepnutí spínače je cívka připojena přímo ke vstupnímu zdroji napětí a díky tomu se v ní akumuluje energie. Napětí na výstupu poskytuje kondenzátor. Při rozepnutí spínače tato naakumulovaná energie putuje z cívky do kondenzátoru a do zátěže. Měnič lze opět provozovat ve stavech s přerušovaným proudem, na mezi přerušovaného proudu nebo s nepřerušovaným proudem na výstupu. [5]



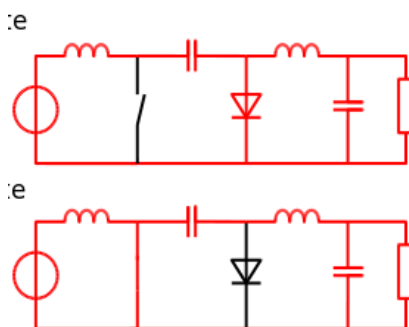
Obr. 5: Princip buck-boost měniče [5]

1.3.4 Čuk měnič

Jedná se o invertující měnič s nízkým proudovým zvlněním, který může na výstupu mít napětí menší či větší než napětí vstupní. Jeho výhodou je nepřerušovaný proud na vstupu a výstupu měniče, nevýhodou pak velké proudové namáhání spínače.

Princip je dle Obr. 6 následující. Při rozepnutém spínači je vstupní napětí v sérii s první cívkou a s prvním kondenzátorem, takže dochází k nabíjení kondenzátoru vstupním zdrojem přes první cívku. Napětí na druhé cívce se rovná výstupnímu napětí (druhá cívka je připojená k výstupu přes výstupní kondenzátor). Při sepnutí spínače dochází k přímému připojení první cívky na vstupní zdroj, druhá cívka je v sérii s prvním a výstupním kondenzátorem,

takže první kondenzátor přenáší energii na výstupní kondenzátor přes druhou cívku. Opět lze provozovat ve stavu s přerušovaným a nepřerušovaným proudem na výstupu. [6]

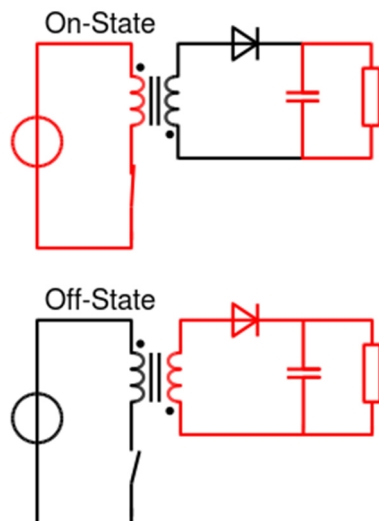


Obr. 6: Princip Čuk měniče [6]

1.3.5 Flyback měnič

Flyback měnič je druh flyback měniče s galvanickým oddělením vstupu a výstupu, který lze použít pro AC i DC aplikace. Pro jednoduchost si ho lze představit jako buck-boost měnič s cívkou rozdělenou jako transformátor (i princip je velmi podobný).

Princip vychází ze schématu na Obr. 7. Pokud je spínač sepnutý, primární vinutí transformátoru je přímo připojeno ke vstupnímu zdroji napětí. Proud a magnetický tok v primárním vinutí narůstá a ukládá energii v transformátoru. Sekundární vinutí má opačný smysl než primární vinutí, takže dioda je v nepropustném stavu a na výstupu zajišťuje napětí výstupní kondenzátor. Při rozepnutí spínače dochází k poklesu proudu a magnetického toku v primárním vinutí transformátoru. Napětí indukované v sekundárním vinutí má ale nyní opačný smysl, takže otevírá diodu a dochází tak k přenosu energie z transformátoru na výstup (nabíjení kondenzátoru a napájení výstupu). [7]

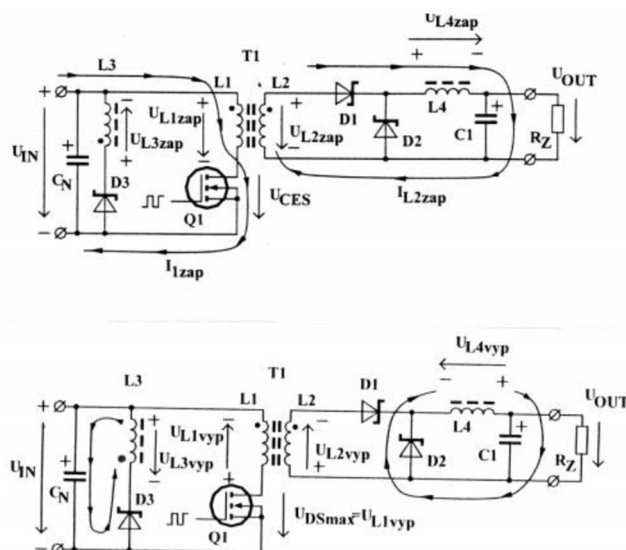


Obr. 7: Princip Flyback měnič [7]

1.3.6 Forward měnič

Je to druh DC-DC měniče s galvanickým oddělením vstupu a výstupu, jehož schéma připomíná Flyback měnič, ale operuje ve fundamentálně odlišném principu. Na výstupu může být napětí menší i větší než na vstupu.

Princip vychází ze schématu na Obr. 8. Při sepnutí dochází k nabíjení primárního vinutí transformátoru a současně k dotování zátěže díky sekundárnímu vinutí transformátoru (obě vinutí mají stejný smysl). Při rozepnutí spínače pak dochází k dotování zátěže přes diodu D2 cívkou L4. Cívka L3 slouží pro odmagnetizování jádra (při každém rozepnutém stavu by docházelo k hromadění energie v transformátoru a mohlo by dojít k saturaci jádra transformátoru). Nedochází k akumulaci energie jako u měničů typu flyback, nýbrž k transformování napětí přímo na výstup při sepnutí (forward měniče). [8]



Obr. 8: Princip Forward měnič [22]

1.4 Přehled možností pro galvanické oddělení zdrojů

Pod pojmem galvanické oddělení zdrojů si lze představit způsob, který odděluje dvě nebo více částí obvodu tak, aby nebyly spojeny vodičem, ale zároveň přitom docházelo k přenosu elektrické energie, impulzů, či informací. Lze ji realizovat různými způsoby, viz další podkapitoly.

Tato kapitola je velmi provázaná s kapitolou 1.3, protože galvanické oddělení zdrojů lze vnímat jako oddělenou problematiku (oddělovací blok ve schématu), či jako integrální součást vybrané topologie měniče (flyback či forward měnič).

1.4.1 Transformátorová vazba

V současnosti nejpoužívanější, využívá se elektromagnetické indukce. Výhodou jsou relativně malé rozměry, vysoká účinnost a jednoduchá konstrukce. Nevýhodami pak potřeba chlazení, možné kmitání transformátorových plechů, či úzký rozsah pracovních napětí a výkonů. Existují různé druhy pro různé použití.

Prvním jsou výkonové izolační transformátory. Používají se z důvodu zvýšené bezpečnosti v elektrolaboratořích (výstupní napětí není galvanicky spojeno se zemí), pro napájení spotřebičů ve vlhkém prostředí (např. holicí strojky v koupelnách), dále pro napájení spotřebičů na operačních sálech a při některých lékařských aplikacích jako rentgen (RTG), počítačová tomografie (CT) a magnetická rezonance (MRT).

Dalším jsou měřicí transformátory, které galvanicky oddělují měřidlo od měřené soustavy. Zde se nejčastěji využívá tzv. Rogowského cívky (toroidní cívka se vzduchovým jádrem).

Třetím příkladem jsou oddělovací nízko, středně a vysoko frekvenční transformátory pro použití v telekomunikační technice, kde galvanicky oddělují jednotlivé stanice zpracovávající signál (nízkonapětové a vysoko napětové stupně, modulační a demodulační stupně apod.). Široce se používají i v oblasti ozvučení (nejen pro galvanické oddělení, ale i pro odstranění zemních smyček a úrovněvé přizpůsobení zpracovávaného signálu). [9]

1.4.2 Optická vazba

Zde se využívá zdroje světla (elektroluminiscenční dioda (LED), laser) a součástky citlivé na světlo (fotodioda, fotorezistor, či fototranzistor). V současné době se toto zapojení začíná čím dál více používat, jelikož je zde využito polovodičových součástek. Zdroj světla a součástka citlivá na světlo jsou zapouzdřeny společně jako jedna součástka (optočlen). Výhodami jsou malé rozměry (integrováný obvod), vysoká účinnost, bezhlučný provoz, použití v AC i DC systémech a možnost použití optického přenosu na velkou vzdálenost. Používá se v elektronice, průmyslu, systémech měření, řízení a regulace, v telekomunikační a výpočetní technice. Příkladem použité optické vazby jsou např. dálkové ovladače, infračervené rozhraní, či všechny aplikace používající optická kabel. [9]

1.4.3 Mechanická vazba

Používá se pro zvýšení bezpečnosti před přenosem vysokého a velmi vysokého napětí v případech ovládacích, spínacích a regulačních prvků (potřeba vyvinout a přenést vyšší výkon pomocí různých mechanických převodů, pák, bowdenů apod.). Opět existují různé druhy.

Prvním jsou elektromagnetické, kdy zdrojem je obvykle elektromagnet, jehož kotva ovládá nějaké zařízení (relé, stykač, solenoid).

Dále můžeme mluvit o hydraulických, kde je zdrojem obvykle hydraulické čerpadlo, píst, membrána nebo vak. Používá se pro přenos velké energie na velkou vzdálenost v hornictví, hutnictví, leteckém průmyslu a lékařství. Příkladem je zubařská vrtačka.

Posledním druhem jsou pneumatické mechanické vazby, kdy se prakticky jedná o rozšíření hydraulické vazby možností skladování energie ve formě stlačeného plynu. Využívá se v energetice pro ovládání odpojovačů na linkách velmi vysokého napětí (pracovní médium SF₆), pro ovládání domácích spotřebičů (šicí stroje), ve zdravotnictví (polohovací zařízení), pohon zubařské vrtačky či ovládání kompenzačních pomůcek pro zdravotně postižené (pohyb vozíčku na základě dýchání postiženého na žhavící vlákna). [9]

1.4.4 Motorgenerátor

Jedná se o elektrický motor, který je na stejné hřídeli jako generátor (popř. dynamo). Výhodami je použití ve velkých výkonech (např. tramvaje), či možností měnit frekvenci, druh napětí či fáze. Nevýhodami pak velká hlučnost, potřeba chlazení, malá účinnost a velké rozměry. Galvanické oddělení tohoto druhu je spíše vedlejším produktem, protože v tomto případě byl cílem zdroj velkého proudu se snadnou regulovatelností. [9]

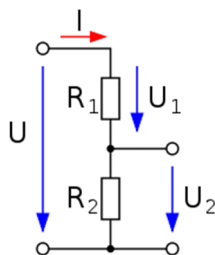
1.5 Přehled měřících obvodů vyšších napětí

Měření různě vysokých napětí se obecně provádí pomocí voltmetrů, multimetrů, potenciometrů, nebo osciloskopů. Analogový voltmetr funguje např. na základě pohyblivé cívky, která se vychyluje na základě velikosti naměřeného proudu a tento naměřený proud je úměrný velikosti měřeného napětí. Lze využít i Ohmova zákona, kdy měřením proudu procházejícího rezistorem o známé hodnotě lze vypočítat napětí. U potenciometru se využívá můstkového zapojení, kde je neznámé napětí vyvažováno vůči známému napětí. Nejčastěji se využívá multimetru, který lze využít na měření vícero elektrických veličin, nejen napětí. Společným znakem přístrojů pro měření napětí je nízký vnitřní odpor, aby přístroj odebíral z obvodu co nejmenší proud a tím co nejméně zkresloval měření. [17]

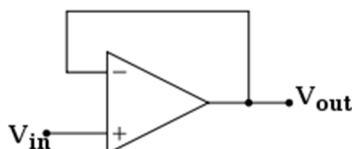
Tato kapitola pojednává o měření vyšších napětí. V tomto případě velmi záleží na tom, jaký měřicí rozsah má přístroj, kterým napětí měřím. Obecně lze říci, že pro měření velmi vysokých napětí se využívá snížení tohoto napětí v podobě použití transformátoru nebo napěťového děliče na úroveň, kterou je již schopen přístroj měřit.

Multimetry (pro měření do 1000 V DC) využívají napěťový dělič na Obr. 9, který sníží hodnotu měřeného napětí na takovou hodnotu, která je vhodná pro analogově digitální (AD) převodník (obvykle to bývá 0–3 V). Tuto hodnotu pak AD převodník převede do digitální podoby. Pomocí vhodné volby odporů v napěťovém děliči je na sledovaném odporu dosaženo napětí (respektive napěťového rozsahu) pohybujícího se v požadovaných mezích. [30]

Velmi často je potřeba provést oddělení vysokoimpedančního vstupu a nízkoimpedančního výstupu. Pro tento účel se využívá operačního zesilovače v zapojení zvaném napěťový sledovač na Obr. 10, který nezesiluje ani nezeslabuje (tj. přenos má hodnotu 1), jeho vstupní impedance se blíží nekonečnu a výstupní impedance je velmi malá (ideálně nulová). Napěťový sledovač se zapojí do výstupu napěťového děliče. [18, 19, 20]



Obr. 9: Napěťový dělič [18]



Obr. 10: Napěťový sledovač [20]

1.6 Přehled měřících obvodů proudů nižších hodnot

Pro měření proudu lze využít celou řadu metod. Vždy záleží na rozsahu měřených proudů. V praxi se bez bližšího určení proudového rozsahu používají pro měření následující řešení: shuntovací rezistory, proudové transformátory, Rogowského cívky, metody založené na magnetickém poli (Faradayův indukční zákon, Hallův jev), měření proudu pomocí optického vlákna (změna vlnové délky v závislosti na změně magnetického pole) a další. [14]

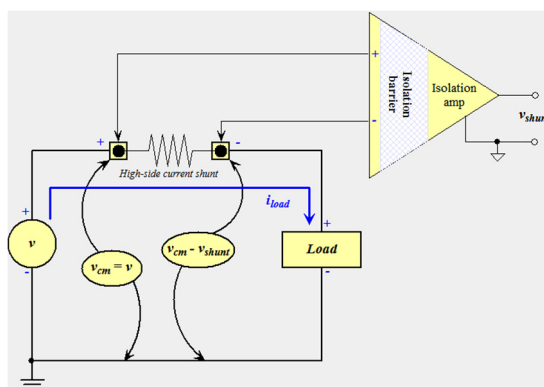
Tato kapitola ovšem pojednává o měřících obvodech proudů nižších hodnot a v této oblasti se nejvíce využívá tzv. shunt rezistorů.

1.6.1 Shunt rezistor

Shunt rezistory se velice často používají pro měření proudů. Princip je následující. Do místa obvodu, ve kterém má být proud měřen, je vložen shunt rezistor se známým (obvykle velmi malým odporem) a paralelně je k němu připojen voltmetr. Z Ohmova zákona lze potom, díky změřenému úbytku napětí na shunt rezistoru a jeho známé hodnotě odporu, vypočítat velikost procházejícího proudu. Tato metoda má taktéž svá omezení. Procházející proud produkuje teplo, takže shunt rezistory jsou dimenzovány na použití pro určité velikosti proudů a pro určitou dobu, po kterou jimi může tento proud procházet.

Jejich výhodou je, že jsou levné a přesnější, než např. Hallovy sondy, nebo proudové transformátory. Nevýhodou je, že pokud je shunt rezistor zapojen do větve s vysokým napětím, tak je zde riziko poškození vyhodnocovacích zařízení. Toto se buď řeší alternativním zapojením (viz další odstavec), nebo volbou jiných prostředků, které umožňují izolovat měřený a měřící obvod (výše zmíněné Hallovy sondy, či proudové transformátory).

Zapojení, které umožňuje měřit proudy ve větvi s vysokým napětím, je na Obr. 11. Pokud by byl shunt rezistor vložen do větve s vysokým napětím bez izolačního zesilovače, došlo by k ohrožení obvodu, který je zapojen za izolačním zesilovačem vysokým napětím. Pokud by byl shunt rezistor vložen do zemnicí větve, došlo by k eliminaci problému s vysokým napětím, nicméně v tomto případě může dojít ke zhoršení šumových vlastností obvodu pro měření proudu a také potenciálně k uzavírání proudové smyčky alternativní cestou. [15]



Obr. 11: Zapojení shunt rezistoru [15]

1.7 Možnost řízení polarity VN zdrojů

Tato kapitola je opět úzce spjatá s kapitolou 1.3. Řízení polarity zdrojů lze vnímat buď jako oddělenou problematiku (blok změny polarity ve schématu realizovaný pomocí klasického elektromechanického relé nebo polovodičovým relé), nebo jako integrální součást topologie měniče.

1.7.1 Elektromechanické relé

Jedná se v podstatě o elektronicky ovládaný přepínač. Sestává se ze série vstupních terminálů pro jeden nebo více ovládacích signálů a ze série pohyblivých kontaktů. Relé se používá pro spínání či odpínání kontaktů na základě řídicího signálu. Existuje velké množství druhů elektromechanických relé. Pro stručnost zde bude uveden pouze základní princip elektromechanického relé.

Principem funkce je přivedení elektrického proudu na cívku, díky čemuž okolo ní vznikne magnetické pole, které přitáhne kotvu z magnetického materiálu, na jejímž druhém konci je připevněna jedna část kontaktu, která se díky tomuto pohybu spojí s druhou částí kontaktu a relé je tímto sepnuto. Pokud přívod proudu přeruším, tak na opačné straně kotvy je

přípevněna pružina, která zajistí vrácení kotvy do původní polohy a tím dojde k rozepnutí relé. [10]

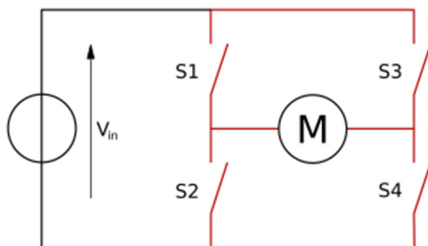
1.7.2 SSR relé

Principem funkce tohoto relé je opět přepínání kontaktů na základě řídicího signálu. Rozdíl oproti klasickému elektromechanickému relé je ale v tom, že toto relé funguje na základě polovodičových součástek (tyristory a MOSFET tranzistory) a vazbou se vstupem přes optočlen, takže neobsahuje žádné pohyblivé části. Dalšími výhodami jsou vysoké rychlosti spínání, menší míra opotřebení díky absenci pohyblivých kontaktů a tím pádem delší životnost. Nevýhodami je, že tento typ relé hůře snáší krátkodobé přetížení a má vyšší odpor při sepnutém stavu. [11]

1.7.3 Používaná zapojení

Zapojení se používá celá řada, proto budou uvedeny jen ty nezákladnější.

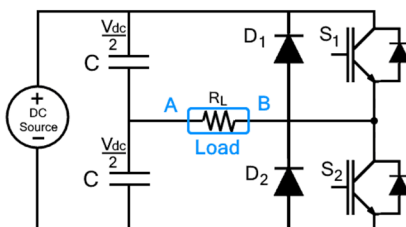
Nejčastěji se používá H můstek na Obr. 12, nebo poloviční H můstek na Obr. 14. Princip funkce H můstku je zřejmý z Obr. 13. Různou kombinací sepnutí spínačů měním polaritu na zátěži. Uvedená schémata jsou pouze ilustrativní, kdy v praxi by místo klasických spínačů byla relé (lze použít i bipolární tranzistory či tranzistory MOSFET) a místo motoru jakákoliv jiná zátěž. Princip funkce polovičního H můstku je obdobný, opět díky přepínání tentokrát dvou spínačů (ve schématu jsou tranzistory) dochází ke změně polarity na zátěži. [12]



Obr. 12: H můstek [12]

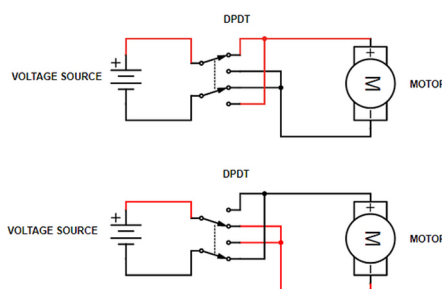


Obr. 13: Princip H můstku [12]



Obr. 14: Poloviční H můstek [12]

Další možností je použití double pole double throw (DPDT) relé. Jedná se o relé se dvěma přepínacími kontakty. Princip funkce tohoto typu relé je zřejmý ze zapojení na Obr. 15. Opět platí, že místo motoru může být jakákoliv zátěž. [13]



Obr. 15: DPDT relé [13]

1.8 Popis TPX/MPX detektorů

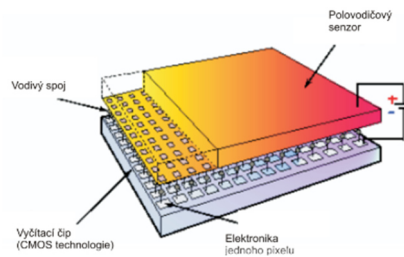
Polohově citlivý polovodičový detektor je unikátní detekční systém ionizujícího záření určený pro použití jak v základním výzkumu (atomová, jaderná a částicová fyzika), tak

v mezioborových aplikacích (zobrazovací metody jako rentgenová transmisní radiografie, rentgenová tomografie apod.).

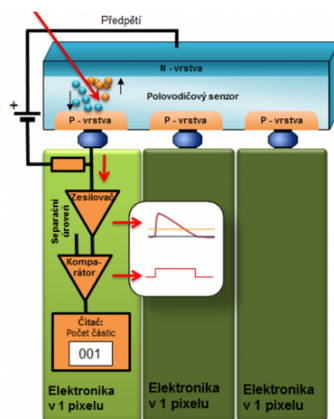
Tento detektor je sestaven ze dvou částí viz Obr. 16. První je křemíkový senzor (v současnosti použity i jiné materiály jako CdTe, GaAs) o tloušťce v řádu 100 μm , který je ze spodu rozdělen na matici 256 x 256 čtvercových buněk o hraně 55 μm , s celkovou citlivou plochou detektoru 14 x 14 mm (rozměry platí pro Medipix2, 3 a Timepix). Citlivá plocha je vlastně P-N přechod (dioda), na který je přivedeno inverzní vysoké předpětí. Díky tomu se v monokrystalu křemíku vytvoří oblast bez náboje a po dopadu kvanta ionizujícího záření se v této oblasti vytvoří náboj. Tento náboj je sebrán na rozpixelované elektrodě a vodivým spojem odveden do vyhodnocovací elektroniky příslušného pixelu dle Obr. 17.

Druhou část tvoří vyčítací čip (zesilovač, dva diskriminátory, rozhodovací logika a 13bitový čítač), který je spojen s první částí pomocí kulovitěho kontaktu. Zde na pracovním odporu vznikne napěťový impulz, jehož amplituda je úměrná počtu vytvořených elektron – děrových párů, což představuje energii dopadající částice. Elektronika dokáže počítat jednak počet těchto pulzů (Medipix 2), což odpovídá počtu dopadajících částic, tak vyhodnocovat amplitudu každého impulzu, což odpovídá energii detekované částice (verze Timepix).

Výsledkem je eliminace elektronického šumu, jediná nejistota je statistická a ta se dá vyřešit dostatečným počtem částic. Výhodou těchto detektorů je vizualizace ionizujícího záření s prostorovým (a v případě Timepix detektoru) i energetickým rozlišením, a to online a digitálně. [16]



Obr. 16: Struktura Medipix2 detektoru [16]



Obr. 17: Princip detekce Medipix2 [16]

2 Výběr jednotlivých částí navrhovaného zařízení

Tato kapitola se zabývá diskuzí nad různými možnostmi a požadavky na zařízení, které byly popsány v předchozí kapitole, jejich porovnání a následný výběr nejvhodnějšího zařízení

2.1 Požadavky na zařízení

V souvislosti s kapitolou 1.1 a s cíli práce jsou dány určité požadavky. Je potřeba, aby zařízení na výstupu poskytovalo proud až cca 1 mA při napětí 100 V.

Další požadavek je na plochu PCB. Tento požadavek není tak přísný, nicméně je vhodné, aby výsledné zařízení bylo co nejmenší.

Spolu s požadavkem na co nejmenší plochu PCB se nesou i požadavky na počet součástek, cenu i spotřebu. Opět je vhodné, aby byl počet součástek, cena i spotřeba co nejnižší.

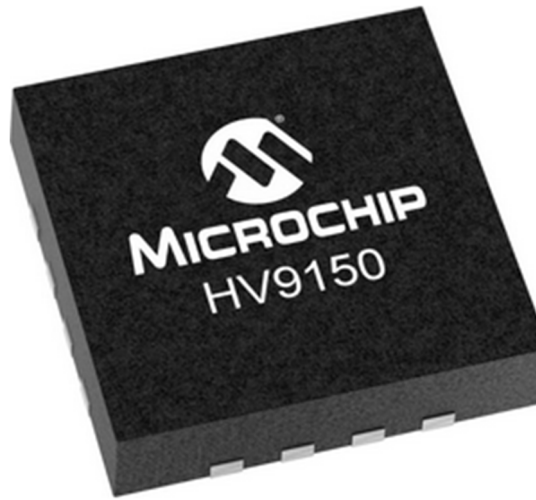
Při respektování těchto požadavků a požadavků uvedených v kapitolách 1.1 a 1.2, byly stanoveny následující požadavky. Funkční zařízení musí obsahovat blok pro zvyšování napětí, blok pro měření napětí, blok pro měření proudu, blok pro otáčení polaritu a blok pro regulaci výstupního napětí.

2.2 Blok pro zvyšování napětí

Jak už bylo uvedeno v kapitole 1.1 a v cílech práce, blok pro zvyšování napětí má tvořit zařízení, které nebude náročné na plochu PCB a které bude poskytovat 100 V na svém výstupu. Byla vybrána tři zařízení, která splňují tyto požadavky.

2.2.1 Zvyšovač napětí HV9150

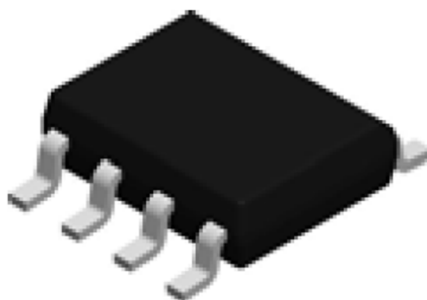
Jedná se o zvyšovač s možností hysteretického režimu, který na svém vstupu může mít dle datasheetu nízké napětí už od 2,7 V (při napájení bateriemi) a na výstupu dodávat napětí od 6 do 500 V. Díky možnosti napájení bateriemi se tento zvyšovač používá v oblasti přenosných elektronických zařízení či v micro electro mechanical systems (MEMS) systémech. Na výstupu poskytuje maximální výkon 5 W při použití externího MOSFET tranzistoru. Další podrobnosti jsou uvedeny v datasheetu. Ve své podstatě se jedná o klasický boost měnič, který lze buď napájet z pevného zdroje (5 – 12 V na vstupu), nebo z baterií (2,7 – 4,5 V na vstupu) pomocí integrované nábojové pumpy. Jeho výhoda spočívá v malém pouzdru (QFN 16), relativně jednoduchém zapojení a v hysteretickém režimu. [29]



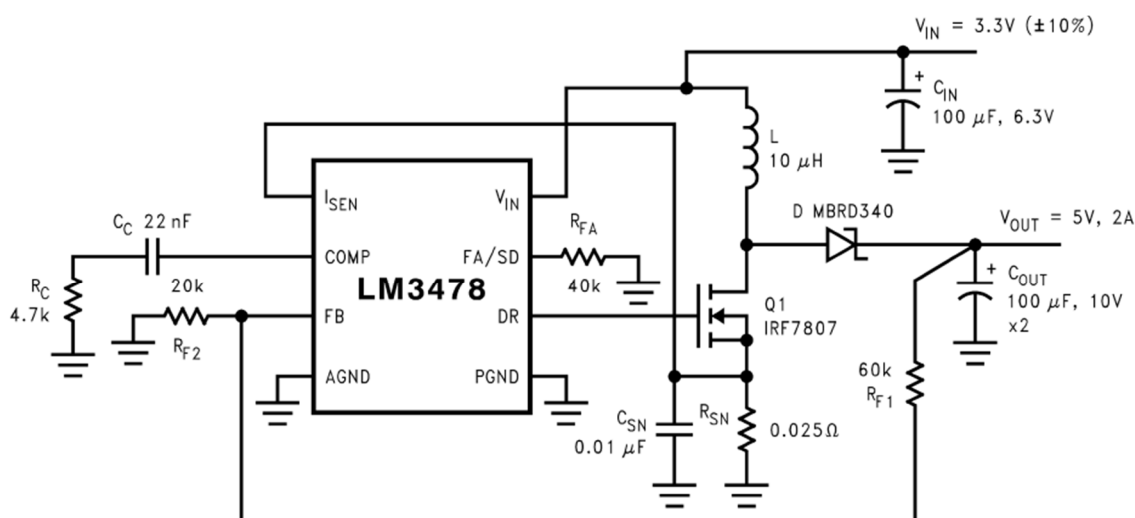
Obr. 18: Pouzdro HV9150 [35]

2.2.2 Zvyšovač napětí LM3478

LM6478 se všestranný N MOSFET kontrolér pro spínané zdroje vhodný pro topologie boost, flyback a SEPIC. Jeho výhodou je provoz za vysokých teplot a vysoká spínací frekvence za účelem snížení plochy na PCB. Vyráběn je v pouzdech VSSOP-8 a SOIC-8. Má vestavěné funkce jako termální vypnutí, ochrana proti zkratu, přepětí apod. Vstupní napětí v rozsahu 2,97 – 40 V a výstupní napětí 1,26 – 500 V. Na Obr. 19 a Obr. 20 je pouzdro a základní zapojení tohoto zvyšovače. [35]



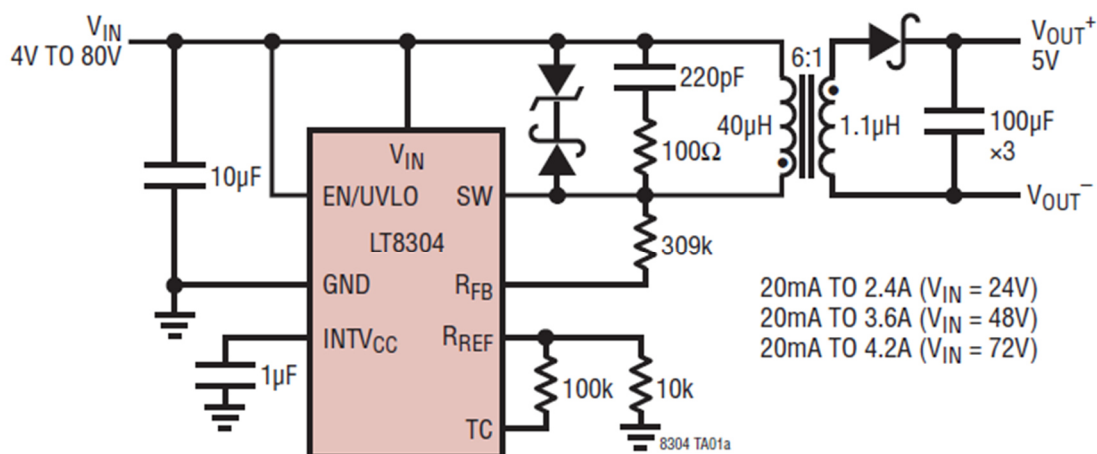
Obr. 19: Pouzdro LM3478 [35]



Obr. 20: Použití LM3478 v typické boost konfiguraci [35]

2.2.3 Zvyšovač napětí LT8304

Tento zvyšovač napětí má parametry vstupního napětí 3 – 100 V a výstupní napětí je v rozsahu 1 – 400 V. Pouzdro je stejné jako v předchozím případě u obvodu LM3478. Jedná se o flyback měnič. Jeho výhodou je galvanické oddělení, jednoduché ovládání, nízký počet součástek a vyšší poskytovaný výstupní výkon (až 24 W). Na Obr. 21 typické zapojení tohoto obvodu. [36]



Obr. 21: Typické zapojení LT8304

2.2.4 Výběr zvyšovače v bloku pro zvyšování napětí

Byly posuzovány tři předchozí varianty (2.2.1, 2.2.2, 2.2.3) a jako nejvhodnější byl zvolen zvyšovač napětí HV9150 z důvodu nejmenšího pouzdra, relativně jednoduchého zapojení a hysteretického režimu. Další předností je možnost použití tohoto obvodu při napájení z klasických bateriových článků.

2.3 Blok regulace výstupního napětí

Regulace výstupního napětí bude provedena pomocí techniky vstřikování proudu do uzlu zpětné vazby zvyšovače napětí. Pro tuto funkci je potřeba, aby se blok sestával z digitálně analogového (DA) převodníku, který převede hodnoty z digitální do analogové hodnoty do napěťového sledovače (impedanční oddělení) a z výstupu napěťového sledovače přes odpor do uzlu zpětné vazby bloku zvyšování napětí.

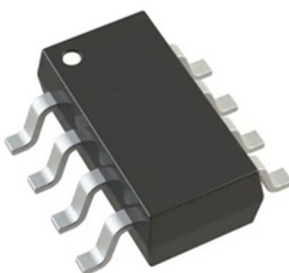
DA převodník byl zvolen LTC2631CTS8. Jedná se o přesný, jednokanálový DA převodník s integrovaným referenčním zdrojem napětí a nízkou spotřebou. [33]

V případě napěťového sledovače byl zvolen operační zesilovač TSV782 od firmy STMicroelectronics. S napájecím napětím v rozsahu 2 – 5,5 V, nízkým vstupním offsetovým napětím (50 µV typicky, 200 µV maximálně) a hodnotou common mode napětí větší než referenční napětí, se jeví jako nejvhodnější volba. Navíc s ohledem na minimalizaci plochy PCB obsahuje tento integrovaný obvod dva zesilovače v jednom pouzdře, takže další zesilovače je možno využít v blocích pro měření proudu a napětí. Tento operační zesilovač má mít následující parametry: rail-to-rail input/output, hodnota common mode napětí musí být větší než hodnota referenčního napětí a zesilovač musí mít nízké vstupní offsetové napětí

(≤ 1 mV). Tyto požadavky vyplývají především z požadavku následné vazby výstupu zesilovače na AD, DA převodník. [32]



Obr. 22: Pouzdro TSV782 [32]



Obr. 23: Pouzdro LTC2631CTS8 [33]

2.4 Blok měření napětí

Blok měření napětí sestává z napěťového děliče a z napěťového sledovače. Stejně jako v předchozím případě (2.3) byl použit operační zesilovač TSV782.

2.5 Blok měření proudu

Pro měření výstupního proudu je potřeba k výstupní svorce zvyšovače napětí připojit shunt rezistor. Na tomto rezistoru je měřen úbytek napětí pomocí izolovaného operačního zesilovače. Aplikace izolovaného operačního zesilovače je potřeba z důvodu vysokého napětí, na které je shunt připojen. Většina neizolovaných operačních zesilovačů má omezené vstupní napětí (zpravidla do 100 V). Na vstupní svorky iz. op. zesilovače můžeme přivést vysoké napětí, které je galvanicky odděleno od výstupních svorek tohoto zesilovače. Na výstupních svorkách poté měříme napětí, které je úměrné hodnotě úbytku napětí na shunt rezistoru a přenosové funkci (respektive zisku) zesilovače. Z velikosti tohoto napětí a známé hodnoty shunt rezistoru můžeme vypočítat proud procházející shunt rezistorem.

Jako izolovaný op. zes. byl vybrán integrovaný obvod HCPL 7510 od Avago technologies díky svým vhodným vlastnostem (pro nízké výkony, vysoká napětí) a rozměrům. Tento izolovaný operační zesilovač potřebuje referenční napětí, které přivedeme z důvodu

impedančního přizpůsobení přes napěťový sledovač stejného typu jako v kapitolách 2.3 a 2.4.



Obr. 24: Pouzdro HCPL 7510 [31]

2.6 Blok řízení polarity výstupního napětí

Řízení polarity na výstupu zařízení budeme provádět pomocí elektromagnetických relé a spínacích tranzistorů.

Jako relé byla zvolena jazýčková relé BE05-2A85-P od Standex Electronics uzpůsobená na spínání AC i DC napětí 1 kV s maximálním přepnutým výkonem 100 W, což je pro potřeby navrhovaného zařízení dostačující. Relé je napájeno 5 V. [37]

Dále byly zvoleny MOSFET tranzistory IRLML2030TRPbF s průrazným napětím 30 V mezi D a S, trvalým proudem D 2,7 A a odporem R_{ON} 100 m Ω . Tyto parametry jsou taktéž dostačující. [38]



Obr. 25: Pouzdro IRLML2030TRPbF [38]



Obr. 26: Pouzdro BE05-2A85-P [37]

3 Stavba funkčního zařízení

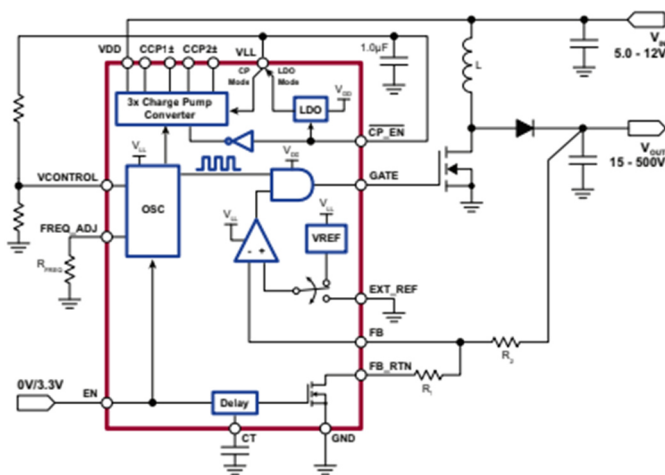
V první části této kapitoly, která řeší stavbu funkčního vzorku, je uveden popis jednotlivých bloků, přičemž pro jednotlivé bloky jsou vypočteny hodnoty součástek.

Druhá část se zabývá popisem kompletního schématu zapojení a návrhem desky plošných spojů.

3.1 Blok pro zvyšování napětí

Na základě porovnání (2.2) byl zvolen zvyšovač napětí HV9150 od Microchipu.

Schéma zapojení zvyšovače je uvedeno na Obr. 27. Pro potřeby této práce bylo zvoleno napájení z laboratorního zdroje + 12 V.



Obr. 27: Schéma zapojení zvyšovače HV9150 [29]

Pro správnou funkci zvyšovače je třeba provést výpočet hodnot součástek.

Základem je tato rovnice (3.1.1):

$$U_o = \frac{U_i}{2} \times \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4D^2}{K}} \right) \quad (3.1.1)$$

kde U_o je výstupní napětí, U_i je vstupní napětí, D je střída signálu a K je koeficient.

Z rovnice (3.1.1) si vyjádříme a vypočítáme koeficient K :

$$K = \frac{D^2 U_i^2}{U_o^2 - U_o U_i} = \frac{0,875^2 \cdot 12^2}{100^2 - 100 \cdot 12} = 1,25E - 02 \quad (3.1.2)$$

kde hodnotu D volíme 87,5 % (zvoleno přivedeným napětím ve velikosti U_{LL} na pin VCONTROL, podrobnosti viz Tab. 1).

Tab. 1: Volba D na základě přiloženého napětí

$V_{CONTROL}$	Duty Cycle
0 V_{LL} to 0.18 V_{LL}	0%
0.22 V_{LL} to 0.38 V_{LL}	50%
0.42 V_{LL} to 0.58 V_{LL}	62.5%
0.62 V_{LL} to 0.78 V_{LL}	75%
0.82 V_{LL} to 1 V_{LL}	87.5%

Z rovnice (3.1.3) si vyjádříme f_{GATE} a rovnice přejde do tvaru (3.1.4). Do rovnice (3.1.4) dosadíme rovnici (3.1.2) a vypočítám hodnotu f_{GATE} :

$$K = \frac{2Lf_{GATE}}{R} \quad (3.1.3)$$

$$f_{GATE} = \frac{KR}{2L} = \frac{0,0125 \cdot 100 \cdot 10^3}{2 \cdot 10 \cdot 10^{-3}} = 62,6 \text{ kHz} \quad (3.1.4)$$

$$R = \frac{U_o}{I_o} = \frac{100}{1 \cdot 10^{-3}} = 100 \text{ k}\Omega \quad (3.1.5)$$

kde L je indukčnost cívky, R je odpor zátěže a f_{GATE} je frekvence spínání tranzistoru. Hodnota L byla zvolena jako 10 mH, přičemž hodnotu R lze pak vypočítat z požadovaného výstupního napětí a proudu (3.1.5).

Z rovnice (3.1.6) si vyjádříme R_{FREQ} , z rovnice (3.1.7) f_{OSC} a rovnice přejde do tvaru (3.1.9). Do rovnice (3.1.9) dosadíme rovnici (3.1.4) a vypočítáme hodnotu odporu R_{FREQ} .

$$f_{OSC} = \frac{1}{4R_{FREQ}C} \quad (3.1.6)$$

$$f_{GATE} = \frac{1}{2}f_{OSC} \quad (3.1.7)$$

$$f_{OSC} = 2f_{GATE} = 2 \cdot 62,6 \cdot 10^3 = 125 \text{ kHz} \quad (3.1.8)$$

$$R_{FREQ} = \frac{1}{4f_{OSC}C} = \frac{1}{8f_{GATE}C} = \frac{1}{8 \cdot 62,6 \cdot 10^3 \cdot 4,75 \cdot 10^{-12}} = 420 \text{ k}\Omega \quad (3.1.9)$$

kde C je interní kapacita zvyšovače napětí (4,75 pF).

Dále je potřeba z rovnice (3.1.10) vypočítat maximální hodnotu D_{MAX} a porovnat ji s hodnotou zvolenou v rovnici (3.1.2):

$$D_{MAX} = 1 - \frac{U_i}{U_o} = 1 - \frac{12}{100} = 88 \% \quad (3.1.10)$$

Pro kontrolu je potřeba z rovnice (3.1.11) vypočítat hodnotu I_L a porovnat ji s hodnotou I_{PEAK} vypočítanou v rovnici (3.1.12):

$$I_L = \frac{U_i D}{L f_{GATE}} = 16,8 \text{ mA} \quad (3.1.11)$$

$$I_{PEAK} = \frac{U_i}{R_{ON}} \times \left[1 - \exp\left(-\frac{D}{f_{GATE}} \cdot \frac{R_{ON}}{L}\right) \right] = 16,8 \text{ mA} \quad (3.1.12)$$

kde I_{PEAK} je špičkový proud cívky a I_L je skutečný proud cívkou s vlivem R_{ON} , což je odpor MOSFET tranzistoru při sepnutém stavu.

Následně je potřeba provést kontrolu vypočítaných hodnot součástek a parametrů, zda jsou v rozsahu stanoveném datasheetem zvyšovače napětí. [29]

- Hodnota R_{FREQ} musí být v rozsahu 120 k Ω – 1,2 M Ω , což je hodnotou 420 k Ω splněno.
- Hodnota f_{OSC} musí být v rozsahu 40 Hz – 400 kHz, což je hodnotou 125 kHz splněno.
- Hodnota D musí být menší než hodnota D_{MAX} , což je splněno (87,5 % < 98 %).
- Hodnota I_L musí být větší nebo rovna 95 % hodnoty I_{PEAK} . Toto kritérium je splněno (16,8 mA = 16,8 mA).

Protože není uvažován vlastní zdroj referenčního napětí, je na pin EN přivedeno napětí +3,3 V pomocí napěťového děliče (rovnice 3.1.13) s horním odporem R_1 100 k Ω a dolním R_2 38 k Ω , na jehož vstup je zapojeno +12 V ze zdroje.

Na vstupu do zvyšovače je sada vstupních filtrovacích kondenzátorů ve velikosti 100 nF, 1 μ F a 10 μ F. Na výstupu je sada VN kondenzátorů ve velikosti 1 nF, 10 nF, 100 nF a 1 μ F.

Na MOSFET tranzistor jsou kladeny následující podmínky: odpor tranzistoru při sepnutém stavu (R_{ON}) musí být menší než 1 Ω , velikost vstupní kapacity musí být menší než 300 pF a průrazné napětí tranzistoru musí být vyšší než napětí na výstupu zvyšovače. Byl zvolen MOSFET tranzistor NVB072N65S3, který má R_{ON} 72 m Ω a průrazné napětí 650 V. Průrazné napětí bylo zvoleno konzervativně o 150 V vyšší, než je napětí na drain tranzistoru, protože vlivem nedokonalosti součástek i PCB (materiál i návrh) bude docházet k překmitům. Pokud bylo voleno průrazné napětí ještě vyšší, úměrně s ním by se zvyšovala cena tranzistoru i hodnota R_{ON} , potažmo ztráty tranzistoru.

Diody, která je připojena na drain tranzistoru, volíme s hodnotou závěrného napětí minimálně srovnatelnou s vybraným tranzistorem. Byla zvolena dioda S1M-E3_61T se závěrným napětím 1 kV a propustným proudem 1 A.

Indukčnost připojenou na drain tranzistoru volíme s hodnotou 10 mH, typ SRR1280-103KL.

Hodnota kondenzátoru C_T na pinu CT byla určena z grafu v datasheetu. Protože na výstupu zvyšovače očekáváme malé proudy, byl zvolen krátký čas, po který by bylo případné přepětí na pinu FB sváděno na zem přes pin FB_RTN, ve velikosti 300 ms, což odpovídá kapacitě 1 μF .

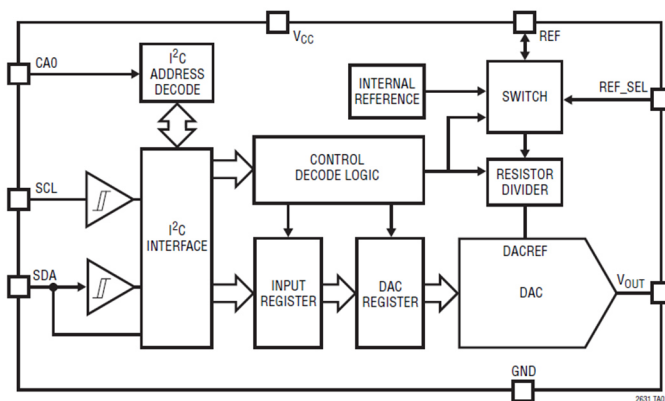
Co se velikostí odporů ve zpětnovazební smyčce týče, z datasheetu bylo určeno referenční napětí 1,25 V. Požadované výstupní napětí je 100 V, s tím že pomocí klasického děliče napětí (3.1.13) byly vypočteny dále hodnoty. Z důvodu napěťového namáhání odporů v děliči bylo místo dvou odporů v sérii použito odporů pět, přičemž čtyři tvoří horní odpor a pátý tvoří dolní odpor děliče. První čtyři horní odpory mají všechny hodnotu 5 M Ω a musí být vysokonapěťové a taktéž mít vhodný napěťový rating (minimálně 125 V). Poslední (dolní) odpor děliče má hodnotu 253 k Ω .

$$U_2 = R_2 \frac{U_1}{(R_1 + R_2)} \quad (3.1.13)$$

3.2 Blok regulace výstupního napětí

Vstřikování proudu je realizováno pomocí DA převodníku, který slouží pro převod z digitální hodnoty, kterou zvolíme pomocí mikropočítače, na analogovou hodnotu. Takto vytvořené analogové napětí je přes filtrační RC článek přivedeno na operační zesilovač, který funguje jako napěťový sledovač. Výstup tohoto sledovače je s uzlem zpětné vazby vysokonapěťového zdroje propojen odporem.

Piny DA převodníku jsou dle Obr. 28 zapojeny následovně: piny V_{CC} a REF_SEL na doporučené napájecí napětí 5 V, na piny SDA a SCL může být připojen vhodný mikropočítač a zároveň musí být spojeny s napájecím napětím přes pull-up rezistory (oba s hodnotou 1,7k Ω danou datasheetem). Pin GND je spojen se zemí systému a pin CA01 je ponechán nezapojený. Pin V_{OUT} jako výstupní pin je spojen přes RC článek se vstupem operačního zesilovače použitého jako sledovač. Pin REF je spojen se zemí systému přes kondenzátor o kapacitě 10 μF . [33]



Obr. 28: DA převodník LTC2631 [33]

Operační zesilovač TSV782 byl zvolen z důvodu unifikace součástkové základny, protože je tento typ použit jak v bloku měření napětí, tak v bloku měření proudu (3.3 a 3.4) a má výhodné vlastnosti (2.3). Zesilovač je zapojen jako napěťový sledovač. Schéma zapojení je v kapitole 3.3.

Odpor propojující výstup sledovače s uzlem zpětné vazby byl vypočítán následujícím způsobem. Ze zjednodušeného schématu na Obr. 29 byla určena rovnice dle prvního Kirchoffova zákona:

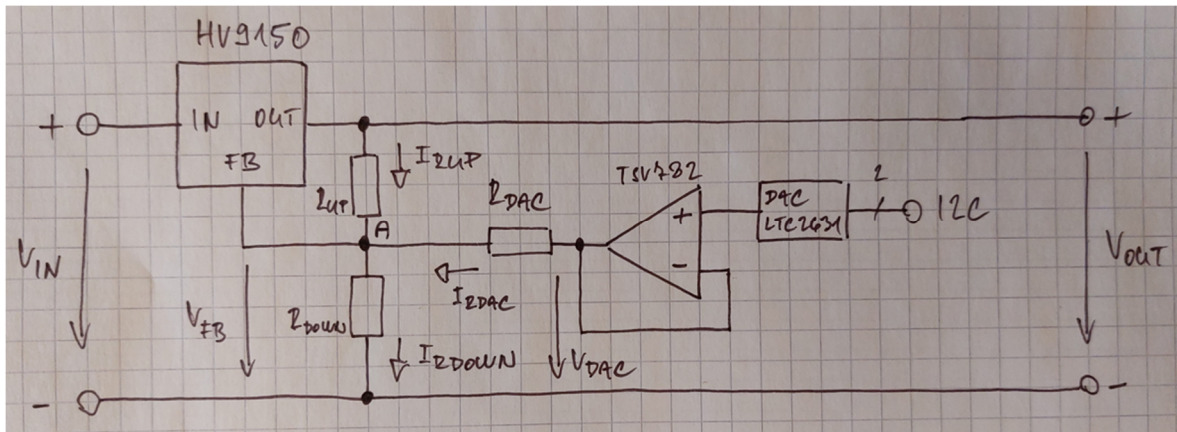
$$I_{RUP} + I_{RDAC} = I_{RDOWN} \quad (3.2.1)$$

Proudy vyjádříme jako poměry napětí a odporů a rovnice (3.2.1) přejde do stavu (3.2.2), z které vyjádříme výstupní napětí V_{OUT} , jak ukazuje rovnice (3.2.3):

$$\frac{V_{OUT} - V_{FB}}{R_{UP}} + \frac{V_{DAC} - V_{FB}}{R_{DAC}} = \frac{V_{FB}}{R_{DOWN}} \quad (3.2.2)$$

$$V_{OUT} = V_{FB} \left(1 + \frac{R_{UP}}{R_{DOWN}} + \frac{R_{UP}}{R_{DAC}} \right) - \frac{V_{DAC} R_{UP}}{R_{DAC}} \quad (3.2.3)$$

kde R_{UP} a R_{DOWN} jsou odpory ve zpětnovazební smyčce (20 M Ω a 253 k Ω), V_{FB} je požadované napětí na pinu zpětné vazby zvyšovače napětí (1,25 V), V_{DAC} je napětí na výstupu DA převodníku (1,25 – 2,5 V), V_{OUT} je výstupní napětí (0 – 100 V) a R_{DAC} je odpor na výstupu DA převodníku (250 k Ω).



Obr. 29: Zjednodušené schéma proudové injektáže

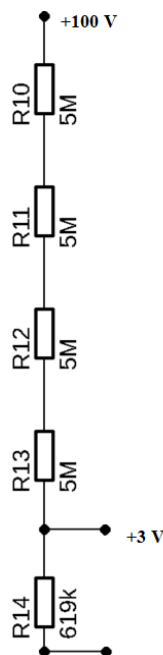
Z rovnice (3.2.3) poté vypočítáme požadované výstupní napětí při vhodně zvoleném napětí V_{DAC} vystupujícím z DA převodníku a odporu R_{DAC} . Byl zvolen DA převodník s referenčním napětím 2,5 V (maximální výstupní napětí, které je DA převodník schopen poskytnout), přičemž na výstupu DA převodníku je v okamžiku, kdy je jeho vstup je bez signálu, poloviční hodnota referenčního napětí. V tomto okamžiku chceme, aby při spuštění zařízení (tedy v době, kdy na vstupu DA převodník není žádný signál) bylo na jeho výstupu požadovaných 100 V. Odpor R_{DAC} byl tedy zvolen tak, aby při výstupním napětí $V_{OUT} = 100$ V bylo V_{DAC} rovno 1,25 V a naopak aby při výstupním napětí $V_{OUT} = 0$ V bylo V_{DAC} rovno 2,5 V. Hodnotou V_{DAC} tedy regulujeme výstupní napětí pomocí injektáže proudu do obvodu zpětné vazby.

3.3 Blok měření napětí

Měření napětí na výstupu zvyšovače by mohlo být realizováno použitím voltmetru přiloženého na výstupní svorky zvyšovače. Protože ale bude signál dále zpracováván (ukládání a sledování naměřených hodnot), je potřeba výstupní napětí upravit tak, aby mohly být naměřené hodnoty převedeny z analogové do digitální podoby. K tomu slouží AD převodník, na jehož vstup je třeba přivést napětí 0–3 V. Navíc musí být výstupní napětí impedančně přizpůsobeno, což lze realizovat s využitím operačního zesilovače (1.5). [30]

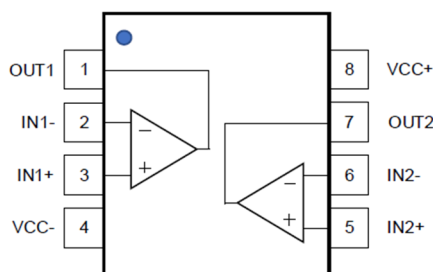
Vstupní napětí děliče je 100 V, přičemž požadované výstupní napětí má dosahovat hodnoty 3 V. Místo dvou odporů v sérii je odporů pět, přičemž čtyři představují horní odpor děliče a pátý představuje odpor dolní. První čtyři odpory mají každý hodnotu 5 M Ω a musí být dostatečně napětěově dimenzovány (minimálně 125 V). Poslední (tzn. dolní) odpor má hodnotu 619 k Ω . Schéma je uvedeno na Obr. 30. Tímto lze docílit rozložení vstupního vysokého napětí lineárně na odpovídající části, přičemž při jmenovitém vstupním napětí je

pak na výstupu děliče dosaženo požadovaných 3 V, což je vhodné pro vstup do AD převodníku.



Obr. 30: Dělič napětí pro blok měření napětí

Operační zesilovač je připojen na výstupní svorky děliče napětí. Schéma zesilovače je na Obr. 31. [32]

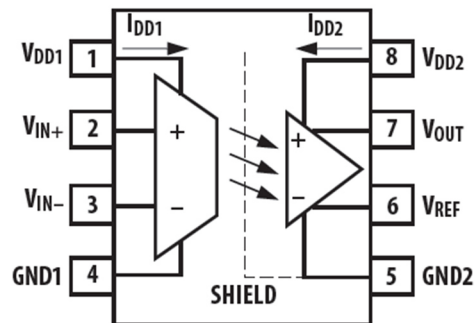


Obr. 31: Schéma operačního zesilovače TSV782 [32]

Zapojení do obvodu je následující. Na pin VCC+ je přivedeno napájecí napětí 5 V z napájecí větve 5 V, která je vytvořena z napájecí větve 12 V pomocí lineárního regulátoru napětí L7805. Na pin VCC- je připojena zem. Na piny IN1+ a IN2+ je připojeno vstupní napětí (pro každý zesilovač jiné) a piny IN1- a IN2- jsou spojeny s piny OUT1 a OUT2 (zesilovače je použit jako napěťový sledovač, tzn. bez zesílení). Výstupní piny jsou označeny OUT1 a OUT2.

3.4 Blok měření proudu

Funkční diagram izolovaného operačního zesilovače HCPL 7510 je na Obr. 32. Napájecí napětí +5 V (doporučené napětí z datasheetu) je přivedeno na piny V_{DD1} a V_{DD2} z napájecí větve 5 V. Na pin V_{DD1} , který je galvanicky oddělený od V_{DD2} , je dále přivedeno napětí o stejné hodnotě, ale galvanicky oddělené. Pro tento případ je použit DC/DC galvanicky izolovaný konvertor 12 V vstup/5 V výstup (NTE1205), který je vstupem připojen na napěťovou větev +12 V a galvanicky oddělený výstupem napájí pin V_{DD1} . Piny V_{IN+} a V_{IN-} jsou připojeny na shunt rezistor, pin $GND1$ na pin -VOUT konvertoru NTE1205 (galvanické oddělení). Pin $GND2$ je pak spojen se zemí systému, na pinu V_{OUT} je měřeno výstupní napětí a na pin V_{REF} je přivedeno referenční napětí. [31]



Obr. 32: Funkční diagram HCPL 7510 [31]

Volba referenčního napětí určuje zesílení zesilovače dle rovnice (3.4.1).

$$G = \frac{U_{REF}}{0,512} = \frac{4}{0,512} = 7,8125 \quad (3.4.1)$$

kde G je gain (zesílení) zesilovače a U_{REF} je hodnota napětí přivedena na pin V_{REF} .

Minimální hodnota U_{REF} je od 4 V do V_{DD1} , tedy maximálně 5 V. Nejmenší možné zesílení udané volbou $U_{REF} = 4$ V nabývá hodnoty $G = 7,8125$. U_{REF} je vytvořeno pomocí děliče napětí z napájecí větve 5 V obvodu L7805, což znamená hodnotu horního odporu 1 k Ω a dolního odporu 4 k Ω . Následně je takto vytvořené referenční napětí z děliče zopakováno operačním zesilovačem z důvodu impedančního přizpůsobení. Tento zesilovač je stejného typu jako zesilovač použitý v bloku pro regulaci výstupního napětí a měření napětí (3.2 a 3.3) a i důvod jeho použití je stejný stejně jako zapojení (3.3). Takto zopakované napětí je poté přivedeno na pin V_{REF} .

Dále je z datasheetu patrné, že pokud je na shuntu nulový úbytek napětí, na výstupu zesilovače budou proti zemi 2 V. Z rovnice (3.4.2) potom vyjde napětí, které lze naměřit na

výstupu proti zemi. Pro názornost uveden příklad, kdy je měřen úbytek napětí na shunt rezistoru ve velikosti 0,12 V při $G = 7,8125$. [31]

$$U_{OUT} = 2 + (U_S G) = 2,9375 V \quad (3.4.2)$$

kde U_{OUT} je napětí na pinu V_{OUT} , U_S je úbytek napětí na shunt rezistoru a G je gain (zesílení) zesilovače.

Hodnota shunt rezistoru je vypočítána z předpokládaného rozsahu procházejícího proudu (1 mA) a maximálního úbytku napětí na shunt rezistoru (0,12 V), což ve výsledku dává hodnotu 120 Ω . Maximální úbytek 0,12 V je určen proto, že při tomto měření úbytku je na výstupu zesilovače naměřeno 2,9375 V, což je horní hranice napětíového rozsahu AD převodníku, který slouží pro další případné zpracování signálu.

Z rovnice (3.4.2) pak lze vyjádřit proud I_S a rovnice přejde do stavu (3.4.3), ze kterého lze vypočítat proud procházející shunt rezistorem:

$$I_S = \frac{U_{OUT} - 2}{GR_S} \quad (3.4.3)$$

kde I_S je proud procházející shunt rezistorem, G je zesílení (gain) zesilovače, U_{OUT} je naměřené výstupní napětí na pinu V_{OUT} a R_S je odpor shunt rezistoru.

3.5 Blok řízení polarity výstupního napětí

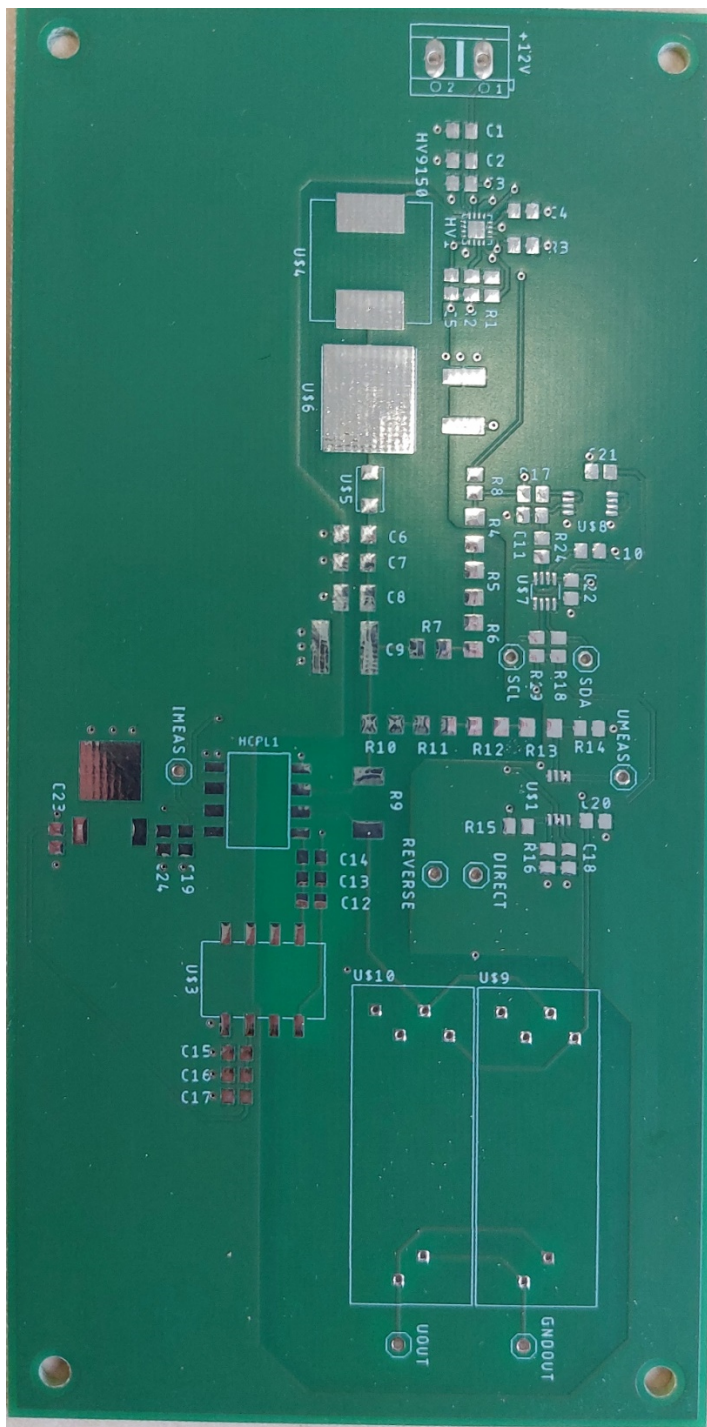
Pro blok řízení polarity je zvoleno řešení za pomoci dvou elektromechanických relé, která jsou řízena dvěma obvody s MOSFET tranzistory, jejichž sepnutí je iniciováno pomocí mikropočítače.

Obvody pro spínání relé jsou tvořeny MOSFET tranzistory. Tyto tranzistory mají na G přiveden vstup z mikropočítače, který provádí jejich řízení. D těchto tranzistorů jsou spojeny přes ochranné diody (stejný typ jako na výstupu zvyšovače napětí, viz 3.1) s napětím 5 V. Ke G obou tranzistorů jsou potom připojeny odpory.

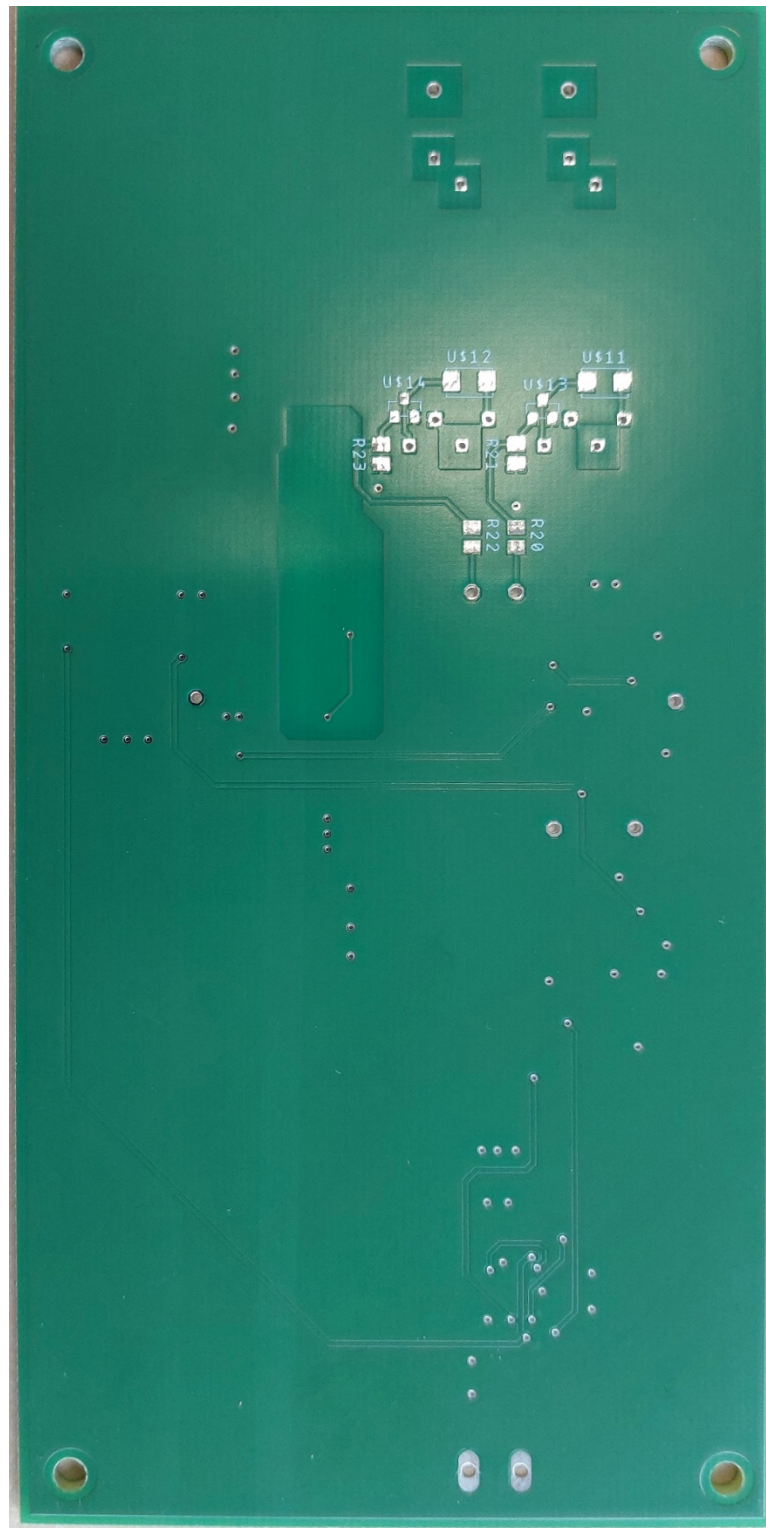
3.6 Kompletace zařízení

Kompletní schéma, PCB a seznam součástek jsou v Příloze (Obr. 41, Obr. 42, Obr. 43, Tab. 3).

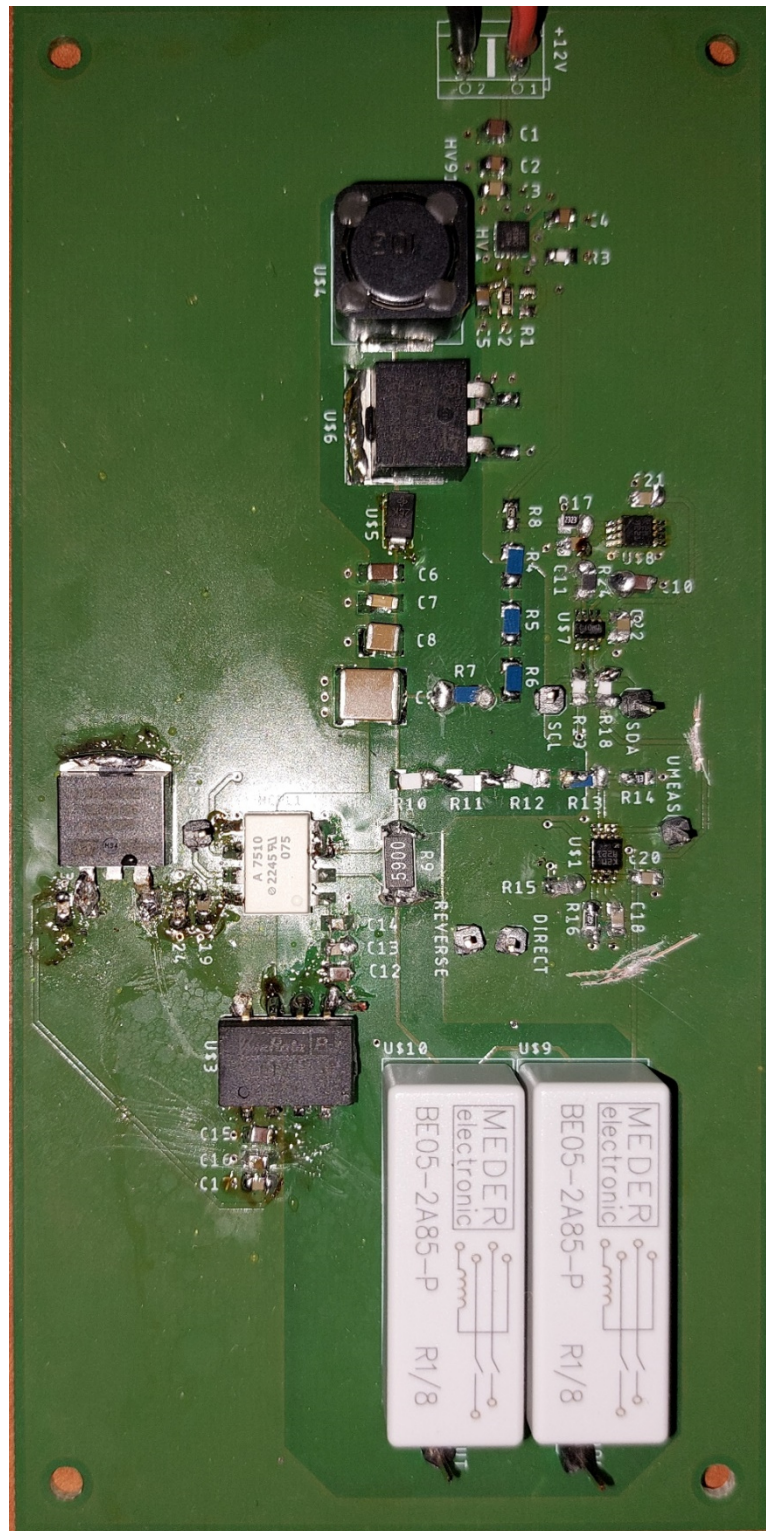
Na Obr. 33 a Obr. 34 jsou fotografie neosazené PCB, na Obr. 35 a Obr. 36 jsou fotografie osazené PCB.



Obr. 33: Neosazená PCB top strana



Obr. 34: Neosazená PCB bottom strana



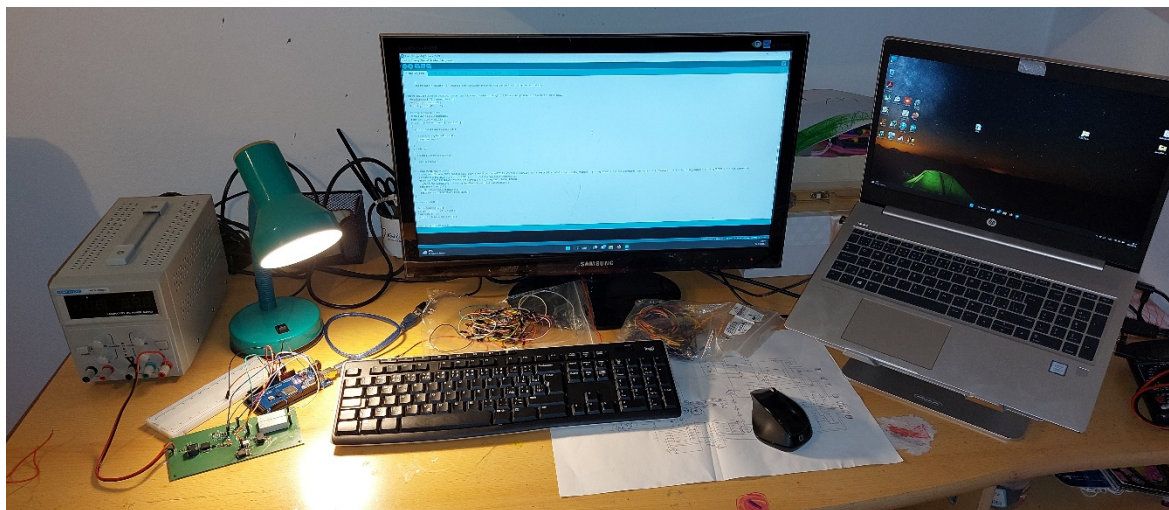
Obr. 35: Osazená PCB top strana



Obr. 36: Osazená PCB bottom strana

4 Testování zařízení

Tato kapitola je věnována testování zkompletovaného zařízení. Na Obr. 37 je fotografie testovacího pracoviště, jehož součástí je osobní počítač (PC), laboratorní zdroj, testované zařízení a mikropočítač Arduino Mega 2560.



Obr. 37: Testovací pracoviště

4.1 Testování bloku pro zvyšování napětí

Jako první byl otestován blok zvyšování napětí. Bohužel, během testování bylo zjištěno, že tento blok neplní svojí funkci, protože na výstupních svorkách filtrovacího kondenzátoru C9 bylo naměřeno místo požadovaných 100 V pouze 12 V, což je napětí zdroje. Bylo provedeno pátrání po zdroji této příčiny, který byl potvrzen v nevhodně navrženém footprintu PCB a s tím souvisejícím problémům při pájení 16 vývodového QFN pouzdra zvyšovače napětí HV9150.

Díky tomuto faktu bylo dále rozhodnuto o prověření funkčnosti dalších bloků tohoto zařízení. Při prověřování funkčnosti byly provedeny experimenty na jednotlivých blocích, díky čemuž došlo ke změně v kompletním schématu zařízení na Obr. 40. Jednotlivé změny ve schématu jsou prezentovány v určených kapitolách.

4.2 Testování bloku regulace výstupního napětí

Tento blok byl otestován tak, že pomocí připojeného mikropočítače (Arduino Mega 2560) byly přes piny SDA a SCL do DA převodníku poslány hodnoty 0-255 s krokem 25 a bylo měřeno napětí na výstupu DA převodníku, respektive na výstupu operačního zesilovače zapojeného jako napěťový sledovač. Naměřené hodnoty jsou v Tab. 2.

Tímto byla potvrzena funkčnost DA převodníku.

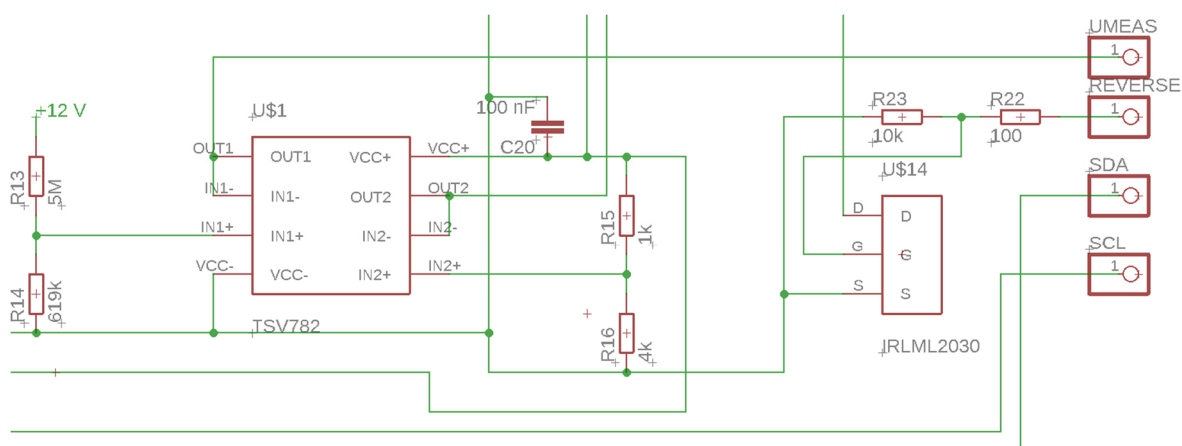
Tab. 2: Naměřené hodnoty na výstupu DA převodníku

digitální hodnota z Arduina	analogová hodnota napětí na výstupu DA převodníku [V]
0	0
25	0,25
50	0,49
75	0,74
100	0,98
125	1,23
150	1,47
175	1,72
200	1,96
225	2,21
250	2,45

4.3 Testování bloku měření napětí

Obvod byl zapojen dle schématu na Obr. 38. Pomocí děliče bylo ze vstupních 12 V, přes odpory R13 (5 M Ω) a R14 (619 k Ω), naměřeno na výstupu operačního zesilovače (pin UMEAS) napětí 1,3 V, což odpovídá vypočítanému napětí z děliče.

Tímto měřením byla potvrzena funkčnost bloku měření napětí.

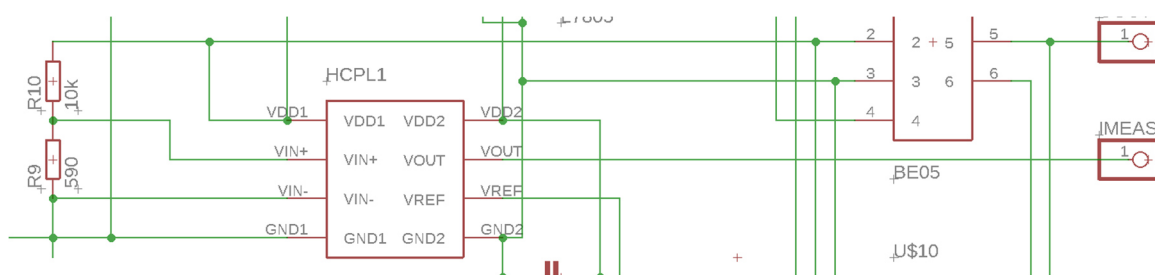


Obr. 38: Upravené schéma pro ověření funkce bloku měření napětí

4.4 Testování bloku měření proudu

Blok měření proudu byl upraven podle schématu na Obr. 39. Obdobně, jako u bloku měření napětí, i zde byl vytvořen dělič napětí, tvořený z horního odporu R10 (10kΩ) a dolního shuntovacího odporu R9 (590 Ω). Hodnota shuntovacího odporu byla volena s ohledem na dostupnost odporů této hodnoty v laboratoři a s ohledem na požadované výstupní napětí. Při této konfiguraci vytvoří napěťový dělič ze vstupních 5 V na výstupu 0,28 V. Výstupní napětí bylo takto voleno s ohledem na požadované parametry izolovaného operačního zesilovače. Na pinu IMEAS bylo naměřeno 4,1 V, což dle rovnice (3.4.2) vede k hodnotě úbytku napětí 0,269 na shuntovacím rezistoru. Proud procházející shuntovacím rezistorem je tedy dle rovnice (3.4.3) 0,456 mA.

Toto simulované měření potvrdilo funkčnost bloku měření proudu.



Obr. 39: Upravené schéma pro ověření funkce bloku měření proudu

4.5 Testování bloku řízení polarity výstupního napětí

Pomocí mikropočítače (Arduino Mega 2560) bylo na pin DIRECT přivedeno +5 V, přičemž mikropočítač byl svým zemním potenciálem propojen se zemním potenciálem testovaného zařízení a došlo k přepnutí relé. Toto samé bylo opakováno i pro druhé relé na pinu REVERSE. Funkčnost relé tedy byla vyzkoušena. Dále bylo vyzkoušeno měření napětí

pomocí voltmetru na pinech UOUT a GNDOUT. Při přepnutí jednotlivých relé byla zaznamenána změna polarity i na těchto pinech.

Tato simulace potvrdila funkčnost bloku řízení polarity.

Zhodnocení a závěr

Při testování navrženého zařízení bylo zjištěno, že samotný blok pro zvyšování napětí neplní svoji funkci z důvodu nevhodně navrženého PCB a s tím souvisejícími problémy při pájení. Tento fakt přispěl k rozhodnutí otestovat alespoň funkčnost měřících obvodů vysokonapětového zdroje, což bylo realizováno s úspěšným výsledkem.

Cílem této práce bylo navrhnout a sestavit takový funkční vzorek vysokonapětového zdroje a měřících obvodů, který optimalizuje původní řešení z hlediska plochy PCB, počtu součástek, ceny a spotřeby.

Cíl se tedy podařilo splnit pouze z části, protože i když byl navržen a sestaven vzorek vysokonapětového zdroje a měřících obvodů, který optimalizoval původní řešení z hlediska plochy PCB, počtu součástek, ceny a spotřeby, nebyl funkční v důsledku neprovoznosti bloku pro zvyšování napětí. Ostatní bloky měřících obvodů byly otestovány jako funkční a jsou připraveny pro nasazení do aplikací v oblasti nukleární instrumentace.

Z časových důvodů nebylo možné realizovat úpravu PCB a objednání dalších součástek (především řídicích obvodů) důležitých pro funkčnost bloku pro zvyšování napětí. Z tohoto důvodu je navržena patřičná úprava footprintu řídicího obvodu na layoutu PCB tak, aby byly odstraněny problémy při pájení. Další prostor v oblasti rozšíření funkcionalit vysokonapětového zdroje je v použití mikropočítače či programovatelného hradlového pole (FGPA).

Po této úpravě a ověření parametrů a funkcí vysokonapětového zdroje lze v kombinaci s přidruženými obvody (řízení výstupního napětí, měření napětí, měření proudu apod.) zdroj jako celek použít k napájení TPX/MPX detektorů.

Literatura

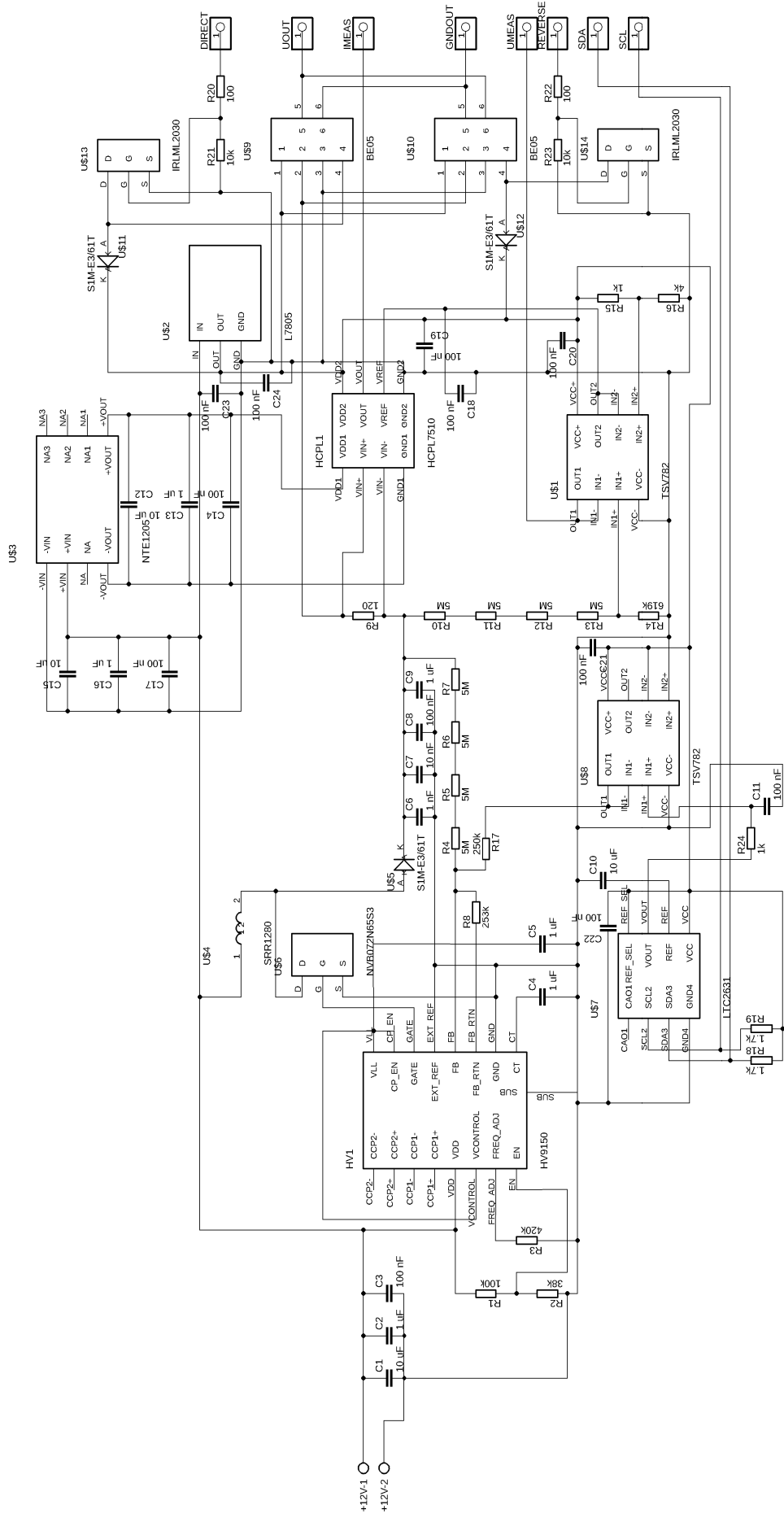
- [1] KREJČIŘÍK, Alexandr. *DC/DC měniče*. Praha: BEN, 2001. ISBN 80-7300-045-8.
- [2] KREJČIŘÍK, Alexandr. *Napájecí zdroje I: Základní zapojení analogových a spínaných napájecích zdrojů*. 2. vyd. Praha: BEN, 1997. ISBN 9788086056029.
- [3] Boost converter. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-10-21]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Boost_converter
- [4] Single-ended primary-inductor converter. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-10-21]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Single-ended_primary-inductor_converter
- [5] Buck-boost converter. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-11-04]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Buck%E2%80%93boost_converter
- [6] Čuk converter. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-11-04]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/%C4%86uk_converter
- [7] Flyback converter. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-11-04]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Flyback_converter
- [8] Forward converter. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-11-04]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Forward_converter
- [9] Galvanické oddělení. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-11-17]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Galvanick%C3%A9_odd%C4%9Blen%C3%AD
- [10] Relay. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-11-18]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Relay>
- [11] Solid state relay. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-11-18]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Solid-state_relay
- [12] H bridge. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-11-18]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/H-bridge>

- [13] DPDT. *Www.kondik.cz* [online]. [cit. 2022-11-18]. Dostupné z: <https://www.kondik.cz/slovník-pojmu/dpdt/>
- [14] Current sensing. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-11-22]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Current_sensing
- [15] Shunt. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-11-22]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Shunt_\(electrical\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Shunt_(electrical))
- [16] Medipix. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-11-22]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Medipix>
- [17] Voltmeter. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-11-23]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Voltmeter>
- [18] Voltage divider. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-11-23]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Voltage_divider
- [19] Analog to digital converter. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-11-23]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Analog-to-digital_converter
- [20] Operational amplifier. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-11-23]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Operational_amplifier
- [21] *Pixel detector bias supply and control using embedded multicore processors* [online]. London, 2017 [cit. 2022-11-24]. Dostupné z: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUK EwiTxfjksf7AhVD26QKHdx8CK4QFnoECBYQAQ&url=https%3A%2F%2Fcds.cern.ch%2Frecord%2F2316250%2Ffiles%2FCERN-THESIS-2017-370.pdf&usq=AOvVaw37LzhifhGoiPSWqtoWshgw>. Diplomová. Queen Mary University of London.
- [22] HAMMERBAUER, Jiří. *Elektronické napájecí zdroje a akumulátory*. Vyd. 2. Plzeň: Západočeská univerzita, 1998. ISBN 80-7082-411-5.

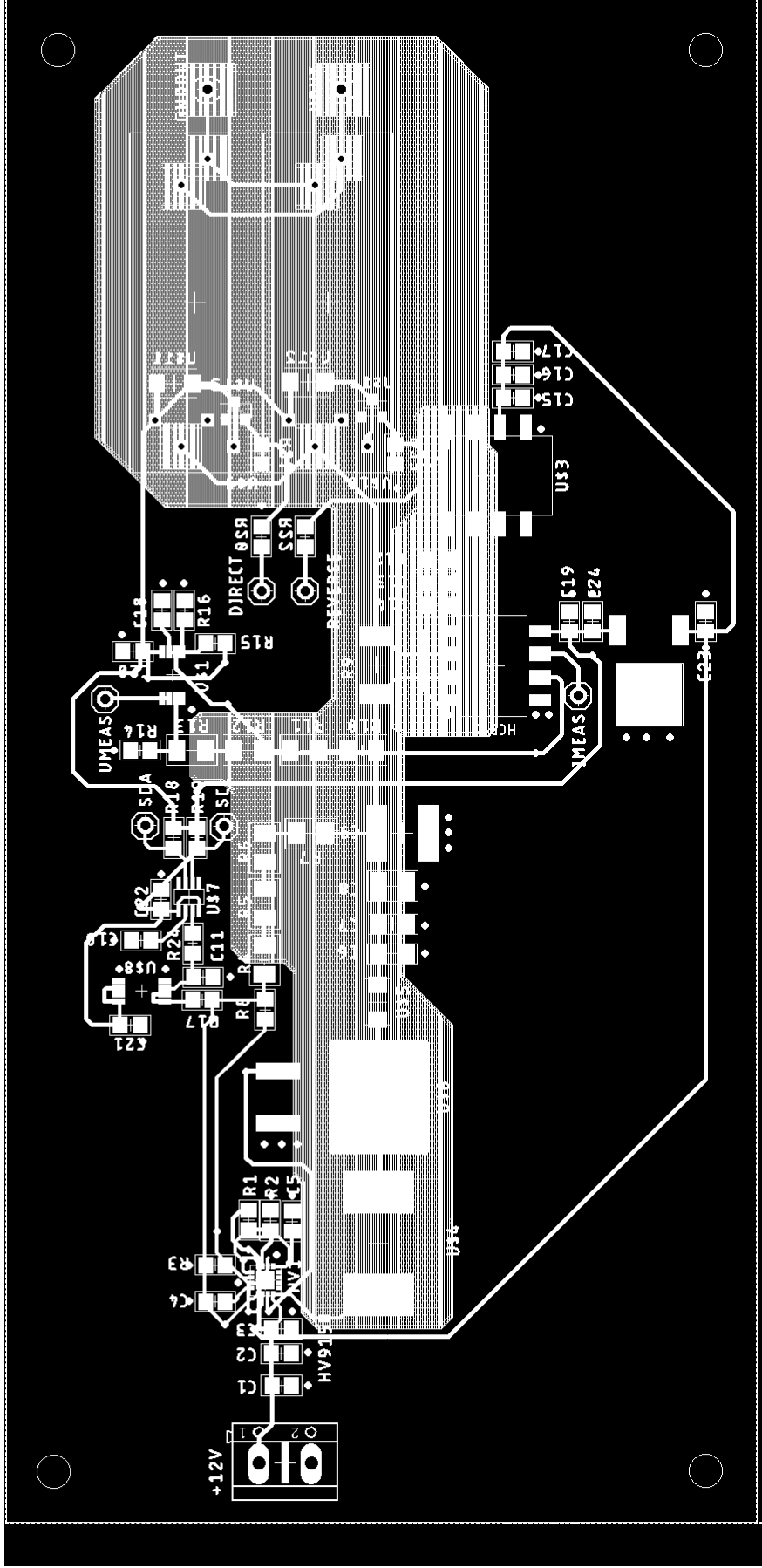
- [23] Nuclear medicine. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-12-03]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_medicine
- [24] Gamma camera. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-12-03]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Gamma_camera
- [25] Electric current. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-12-03]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_current
- [26] *Overvoltage protection with comparator circuit* [online]. [cit. 2022-12-03]. Dostupné z: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj_-IrHid77AhWJDewKHZR5BiUQFnoECBgQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.ti.com%2Flit%2Fpdf%2Fsnoaa20&usq=AOvVaw3sk4SQjGiMScXoWj5eGkal
- [27] *INA300 Overcurrent-Protection, Current-Sense Comparator* [online]. [cit. 2022-12-03]. Dostupné z: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiIwv7cjN77AhWK7aQKHd8XAAyQFnoECA8QAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.ti.com%2Flit%2Fgpn%2Fina300&usq=AOvVaw2rlMrRekvfPxP54B8jDPuc>
- [28] Nuclear instrumentation module. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-12-05]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_Instrumentation_Module
- [29] *High-Voltage Output Hysteretic-Mode Step-Up DC/DC Controller HV9150*. Microchip Technology, 2019.
- [30] Analog to digital converter. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-12-10]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Analog-to-digital_converter
- [31] *HCPL-7510 Isolated linear sensing IC*. Avago technologies, 2009.
- [32] *High bandwidth (30 MHz) low offset (200 μ V) rail-to-rail 5 V op amp TSV782*. STMicroelectronics., 2022.
- [33] *LTC2631 Single 12-/10-/8-Bit I2C VOUT DACs with 10ppm/ $^{\circ}$ C Reference*. Linear Technology, 2008.
- [34] *HV9150* [online]. [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.microchip.com/en-us/product/hv9150>

- [35] *LM3478 High-Efficiency Low-Side N-Channel Controller for Switching Regulator*. Texas Instruments, 2017.
- [36] *LT8304 Micropower no-opto isolated flyback converter with 150V/2A switch*. Linear Technology, 2016.
- [37] *BE05-2A85-P*. Meder electronic, 2009.
- [38] *IRLML2030TRPbF*. International rectifier.

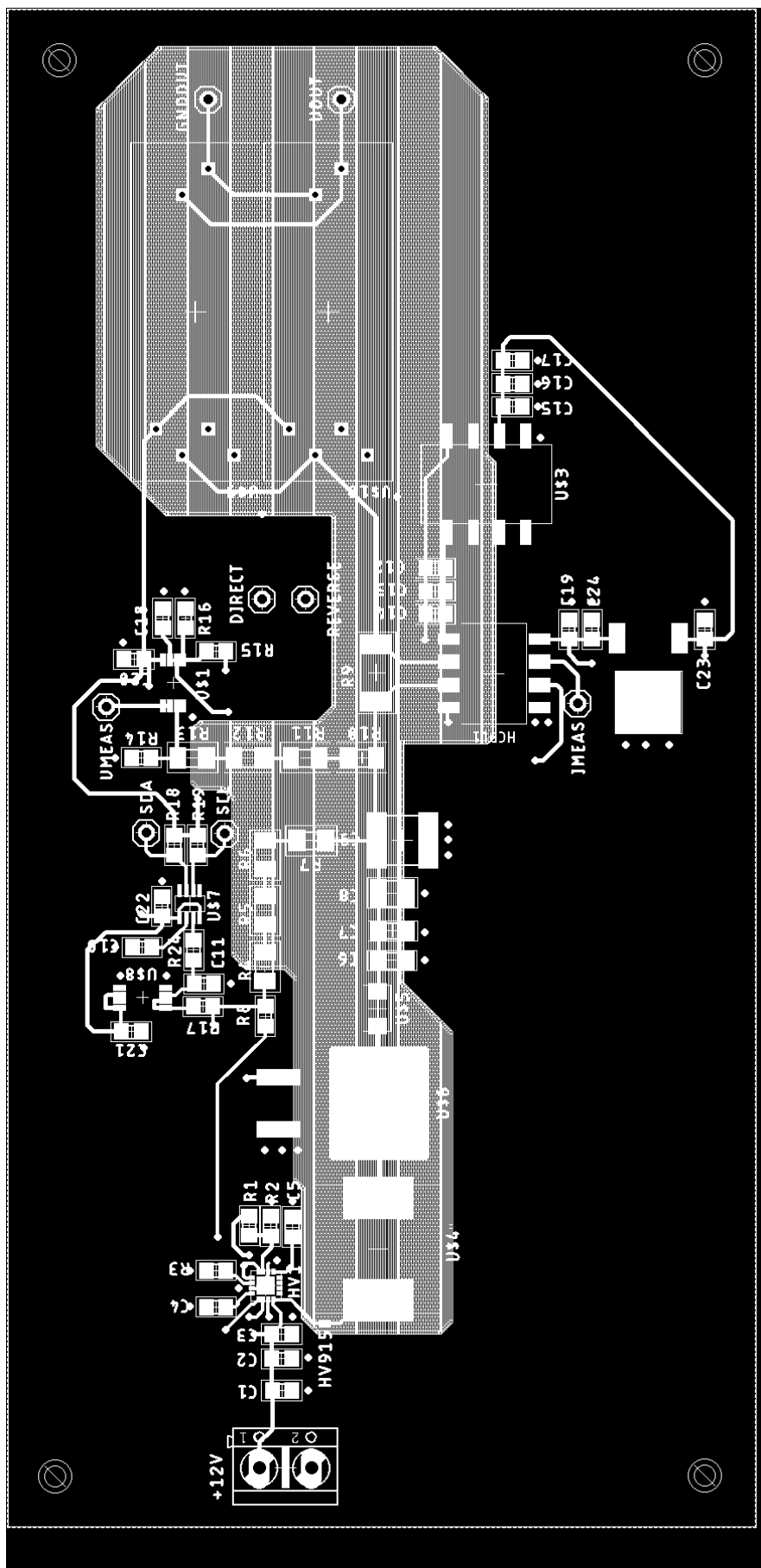
Přílohy



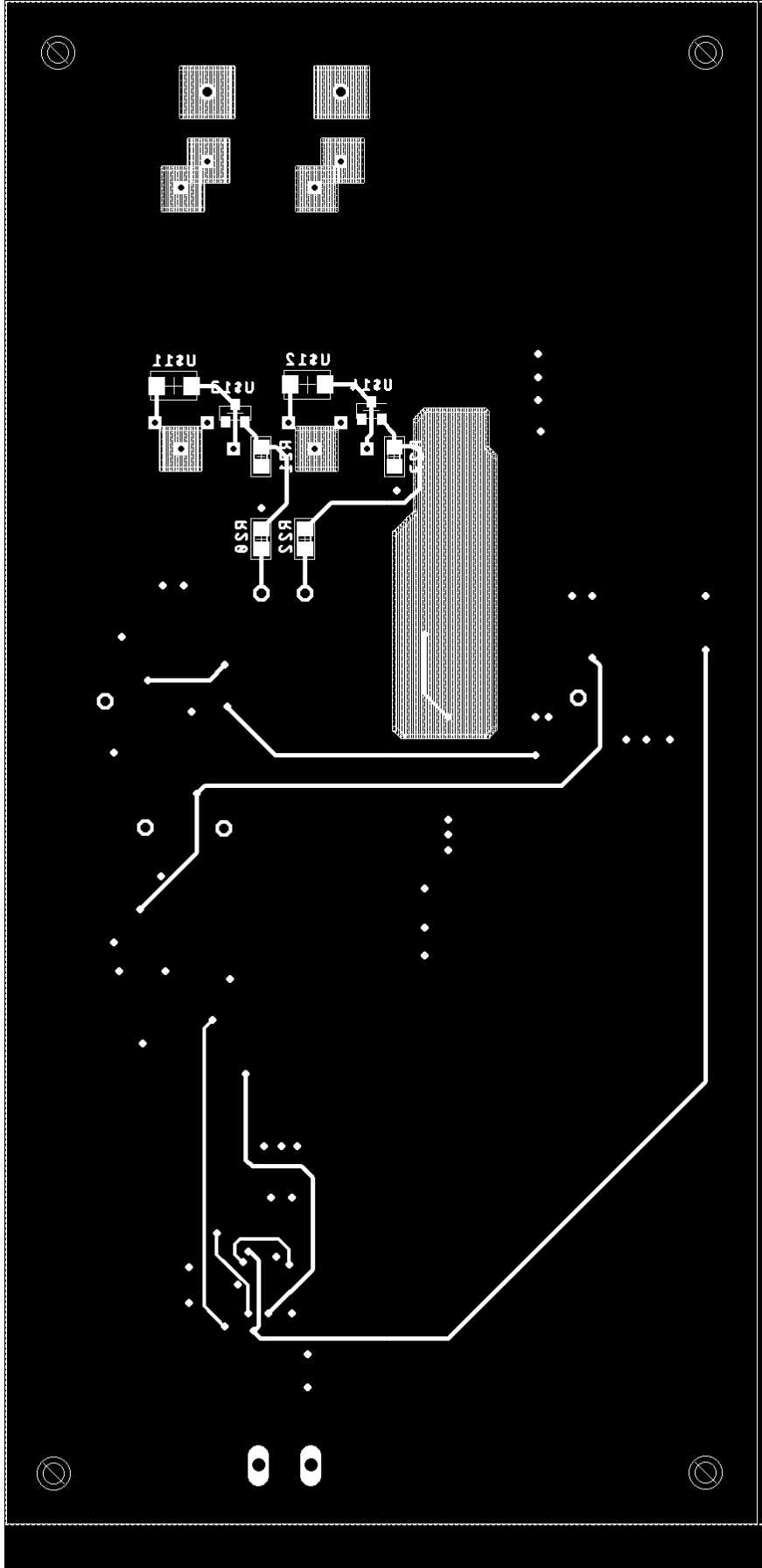
Obr. 40: Celkové schéma zařízení



Obr. 41: Footprint PCB s oběma vrstvami



Obr. 42: Footprint PCB s top vrstvou



Obr. 43: Footprint PCB s bottom vrstvou

Tab. 3: Seznam součástek

Označení součástky	hodnota [Ω , F, -]	pouzdro	počet ks	poznámka
R1	100k	805	1	odpor
R2	38k	805	1	odpor
R3	420k	805	1	odpor
R4	5M	1206	1	odpor
R5	5M	1206	1	odpor
R6	5M	1206	1	odpor
R7	5M	1206	1	odpor
R8	253k	805	1	odpor
R9	120	2512	1	odpor
R10	5M	1206	1	odpor
R11	5M	1206	1	odpor
R12	5M	1206	1	odpor
R13	5M	1206	1	odpor
R14	619k	805	1	odpor
R15	1k	805	1	odpor
R16	4k	805	1	odpor
R17	250k	805	1	odpor

PŘÍLOHY

R18	1,7k	805	1	odpor
R19	1,7k	805	1	odpor
R20	100	805	1	odpor
R21	10k	805	1	odpor
R22	100	805	1	odpor
R23	10k	805	1	odpor
C1	10u	805	1	kondenzátor
C2	1u	805	1	kondenzátor
C3	100n	805	1	kondenzátor
C4	1u	805	1	kondenzátor
C5	1u	805	1	kondenzátor
C6	1n	1206	1	kondenzátor
C7	10n	1206	1	kondenzátor
C8	100n	1210	1	kondenzátor
C9	1u	2220	1	kondenzátor
C10	10u	805	1	kondenzátor
C11	100n	805	1	kondenzátor
C12	10u	805	1	kondenzátor
C13	1u	805	1	kondenzátor
C14	100n	805	1	kondenzátor

PŘÍLOHY

C15	10u	805	1	kondenzátor
C16	1u	805	1	kondenzátor
C17	100n	805	1	kondenzátor
C18	100n	805	1	kondenzátor
C19	100n	805	1	kondenzátor
C20	100n	805	1	kondenzátor
C21	100n	805	1	kondenzátor
C22	100n	805	1	kondenzátor
C23	100n	805	1	kondenzátor
C24	100n	805	1	kondenzátor
NVB072N65S3	-	-	1	tranzistor zvyšovače napětí
IRLML2030TRP6F	-	-	2	tranzistor pro relé
SRR1280-103KL	-	-	1	cívka 10mH
S1M-E3/61T	-	-	3	diody
NTE1205	-	-	1	izolovaný konvertor z 12 na 5 V
L7805	-	-	1	regulator z 12 na 5 V
HCPL7510	-	-	1	izolovaný operační zesilovač
TSV782	-	-	2	operační zesilovač
LTC2631A-LM12	-	-	1	DA převodník
BE05	-	-	2	relé