

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

2015

Jan Ševčík

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ  
KATEDRA ELEKTROTECHNOLOGIE

**MĚŘÍCÍ MODUL PRO PRACOVNÍŠTĚ AKTIVNÍHO  
HARMONICKÉHO FILTRU  
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Vedoucí práce:** Ing. Michal Brejcha, Ph.D.

**Autor:** Jan Ševčík

Praha 2015

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická

katedra elektrotechnologie

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Jan Ševčík**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management  
Obor: Aplikovaná elektrotechnika

Název tématu: **Měřicí modul pro pracoviště aktivního harmonického filtru**

### Pokyny pro vypracování:

- 1/ Navrhněte schéma zapojení měřícího modulu s čidly LEM, který bude možné použít na pracovišti výzkumu aktivního harmonického filtru.
- 2/ Navrhněte desku plošného spoje a připravte výrobní podklady daného měřícího modulu.

### Seznam odborné literatury:

- [1] HAASZ, Vladimír. Elektrická měření: přístroje a metody. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005, 337 s. ISBN 80-010-2731-7.
- [2] MARTINEK, Pravoslav, Ivan MATZNER a Petr BOREŠ. Elektrické filtry: přístroje a metody. Vyd. 1. Praha: ČVUT, Elektrotechnická fakulta, 1997, 147 s. ISBN 80-010-1591-2.
- [3] Current Transducer LA 55-P: Datasheet. s. 1-3. Dostupné z: [www.lem.com](http://www.lem.com)
- [4] Další literatura podle pokynů zadavatele

Vedoucí: Ing. Michal Brejcha, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016

Ing. Karel Dušek, Ph.D.  
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 25. 3. 2015

## Prohlášení

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

V Praze dne

.....

Jan Ševčík

## Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Ing. Michalu Brejchovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky a odborný dohled. Dále bych rád poděkoval za pomoc Ing. Pavlu Hrzinovi, Ph.D., který mi byl konzultantem při práci ve vývojovém prostředí Formica Schematic a Layout. Poděkování také patří doc. Ing. Václavu Papežovi, CSc. a Ing. Tomáši Cetlovi, kteří mě v rámci volitelného předmětu Konstrukce a realizace elektronických obvodů (A0B13KEO) zasvětili do této problematiky.

## Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá konstrukcí přípravku pro měření proudu a napětí. V práci jsou uvedeny základní metody měření obvodových veličin a popisy LEM čidel. Cílem práce je navrhnout modul pro měření proudu a napětí v rozsahu  $\pm 1000$  V a  $\pm 50$  A. Tyto signály mají být vyvedeny v podobě napětí  $\pm 10$  V na filtrovaný a nefiltrovaný výstup. Jako filtr je použita dolní propust s mezním kmitočtem 2,5 kHz. Návrh obsahuje: elektrické zapojení, DPS a mechanický návrh krytu a předního panelu přípravku.

## Annotation

This thesis deals with the realization of sensor module for measurement of current and voltage. The thesis presents basic methods of circuit variables measurement and descriptions of LEM sensors. The goal is to design a module for current and voltage measurement in the range of  $\pm 1000$  V and  $\pm 50$  A. These signals have to be led out in the form of voltage  $\pm 10$  V for filtered and unfiltered output. Low-pass filter with a cutoff frequency of 2.5 kHz is used as an output filter. The proposal includes: wiring, PCB and the cover and front panel mechanical design.

# Obsah

1	Úvod .....	8
2	Měření proudu a napětí .....	9
2.1	Metody měření proudu a napětí .....	9
2.1.1	Měření proudu a napětí pomocí odporového děliče .....	9
2.1.2	Měření pomocí měřicího transformátoru .....	11
2.1.3	Měření pomocí magnetických senzorů .....	12
2.2	Měření pomocí LEM čidel .....	13
2.2.1	Napěťové LEM čidlo .....	13
2.2.2	Proudové LEM čidlo .....	15
3	Blokový návrh přípravku .....	16
4	Elektrický návrh .....	18
4.1	Návrh zapojení .....	18
4.1.1	Návrh zapojení napájení .....	18
4.1.2	Návrh zapojení proudového LEM čidla .....	21
4.1.3	Návrh zapojení napěťového LEM čidla .....	23
4.1.4	Návrh zapojení filtru .....	25
4.1.5	Celkové schéma zapojení .....	27
4.2	Výběr součástek .....	28
4.3	Návrh desky plošného spoje .....	29
4.3.1	Návrh napájecí DPS: .....	29
4.3.2	Návrh Měřicí DPS .....	30
5	Mechanický návrh .....	33
5.1	Výkres modulu .....	33
5.2	Popis mechanického návrhu .....	33
6	Závěr .....	34
	Použitá literatura .....	34
7	Přílohy .....	36

## 1 Úvod

Tématem bakalářské práce je návrh měřicího modulu pro pracoviště aktivního harmonického filtru. Úkolem bylo navrhnout schéma pro zapojení měřicího modulu s LEM čidly pro měření proudu a napětí. Účelem modulu je převést vstupní veličiny velkých hodnot na vhodné výstupní napěťové úrovně. Protože na výstupu LEM čidel je proudový signál (proudová smyčka), bylo nutné pro přípravku navrhnout převodník proud-napětí pro získání žádaného rozsahu výstupního napětí  $\pm 10$  V. Z modulu je možno odebírat výstupní signál ze dvou konektorů, z nichž je jeden filtrovaný dolní propustí s mezní frekvencí  $f_m = 2,5$  kHz. Na druhém konektoru je signál nefiltrovaný. Měřicí rozsah modulu je navržen až do efektivní hodnoty  $\pm 1000$  V u napěťových vstupů a efektivní hodnoty  $\pm 50$  A u proudových vstupů. Měřené průběhy mohou být střídavého, stejnosměrného i impulzního charakteru.

Dále bylo nutno navrhnout symetrické napájení pro LEM čidla a operační zesilovače, které využívá filtr a převodník proud-napětí. Na základě těchto návrhů byly vybrány vhodné součástky, dimenzovány šířky vodivých cest, izolační vzdálenosti mezi cestami a návrh tras. Výstupem této části jsou výrobní data ve formátu Gerber.

Vytvořil jsem mechanický návrh měřicího modulu s umístěním veškerých potřebných prvků, včetně jeho předního panelu. Výsledkem této práce jsou kompletní výrobní podklady pro výrobu.



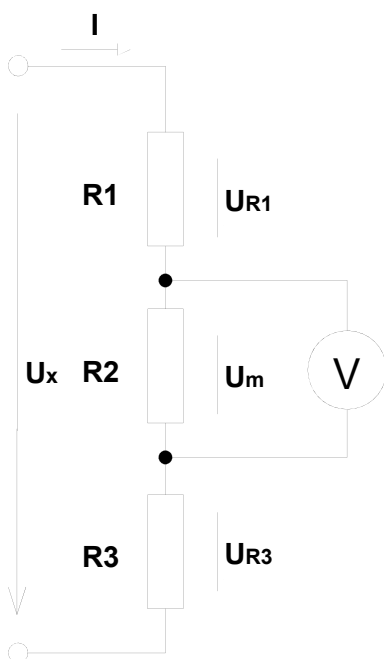
## 2 Měření proudu a napětí

### 2.1 Metody měření proudu a napětí

Tato část obsahuje popis několika základních metod měření proudu a napětí, dále jejich výhody a nevýhody, a nakonec jejich stručné matematické modely.

#### 2.1.1 Měření proudu a napětí pomocí odporového děliče

Jedná se o nejjednodušší metodu, kdy snižujeme měřenou hodnotu v poměru, který si zvolíme. Tato metoda je velmi jednoduchá na realizaci. Nevýhoda je, že měřicí část není galvanicky oddělena od měřené (silové) části. Ovšem největší nevýhoda této metody spočívá v tom, že přebytečnou část výkonu vznikající v důsledku úpravy hodnoty napětí nebo proudu maříme v rezistoru. S tím jsou spojeny další problémy vyvolané např. oteplením součástek. Rezistory tedy musí být dimenzovány na výkony, které se v nich budou mařit.



Obrázek 1: Měření pomocí napěťového děliče

#### Výpočet napěťového děliče:

$$U_x = U_{R1} + U_m + U_{R3} \quad (1)$$

$$I = \frac{U_x}{R1 + R2 + R3} \quad (2) \quad R1 = R3 \quad (3)$$

$$U_m = U_x \cdot \frac{R2}{R1 + R2 + R3} \quad (4)$$

$$n \cdot U_V = U_m \quad (5) \quad R_x = R1 + R3 \quad (6)$$

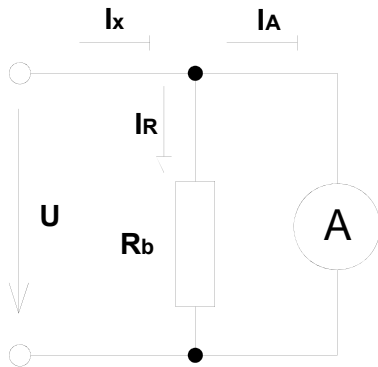
$$R_x = R2 \cdot \frac{1-n}{n} \quad (7)$$

$$P = I^2 \cdot (R1 + R2 + R3) \quad (8)$$

$$R = R1 + R2 + R3 \quad (9)$$

K rezistoru R2 na obr. 1 je paralelně připojen voltmetr, takže výsledný odpor bude ovlivněn i vnitřním odporem voltmetru. Protože u voltmetru je požadována velká vstupní impedance, celkové R bude v řádech desítek MΩ.

### Výpočet proudového děliče:



Obrázek 2: Měření pomocí proudového děliče

$$I_x = I_R + I_A \quad (10)$$

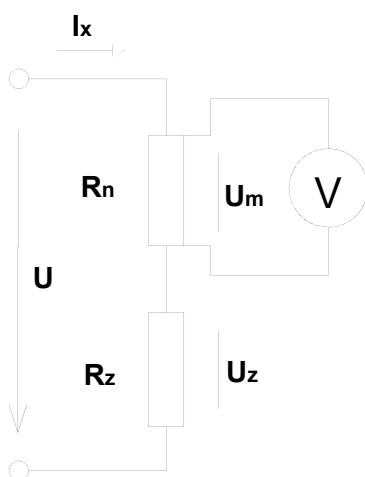
$$U = \frac{R_b \cdot R_A}{R_b + R_A} \cdot I_x \quad (11)$$

$$I_A = I_x \cdot \frac{R_b}{R_b + R_A} \quad (12)$$

$$I_x = n \cdot I_A \quad R_b = \frac{R_A}{n-1} \quad (14)$$

Proud  $I_x$  na obr. 2 je rozdělen v poměru velikostí odporů  $R_b$  a  $R_A$  (odpor Ampér metru), který je reprezentován symbolem  $n$ .

Další možnost měření proudu pomocí měření úbytku napětí na známém odporu  $R_n$ . Tato metoda využívá napěťový dělič jak je vidět na obr. 3.  $R_n$  je vyroben takřka z vodiče, jeho odpor se pohybuje v řádech mΩ (aby  $U_z \approx U$ ) a je dimenzován na průchod velkých proudů. Napětí na  $R_n$  se měří na čtyřbodovém zapojení, aby se eliminoval vliv přechodových proudů a přechodových odporů svorek. Touto metodou lze měřit proudy v řádech desítek ampér.



Obrázek 3: Měření proudu pomocí úbytku napětí

### Výpočet proudu z úbytku napětí:

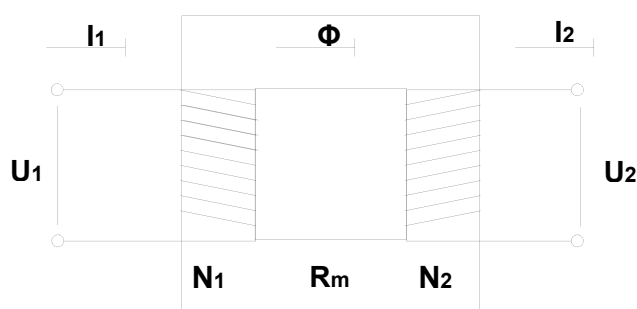
$$U_m = U \cdot \frac{R_n}{R_z + R_n} = I_x \cdot R_n \quad (15)$$

$$I_x = \frac{U_m}{R_n} \quad (16)$$

$$U_z = U - U_m \quad (17)$$

### 2.1.2 Měření pomocí měřicího transformátoru

Pro měření střídavých proudů desítek ampér a větších měření vysokých napětí se při technických kmitočtech (50 Hz, 60 Hz, 400 Hz) používají měřicí transformátory. Výhodou této metody je, že měřicí obvod je galvanicky oddělen od obvodu vysokého napětí. Nevýhodou větší rozměry a nelze měřit stejnosměrné napětí nebo proud.



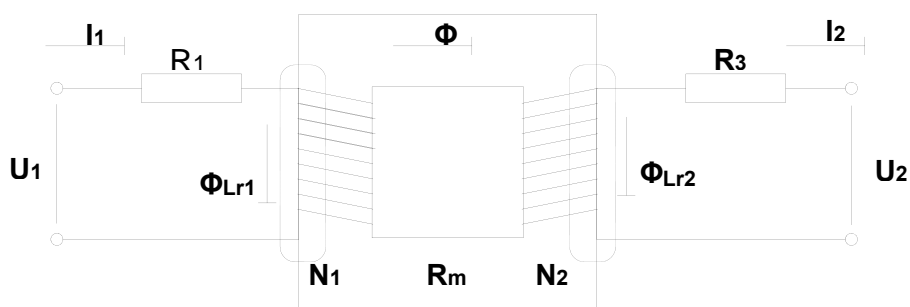
Pro ideální transformátor platí:

$$p_U = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (18)$$

$$p_I = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (19)$$

Obrázek 4: ideální transformátor

Ve skutečnosti se však musí vzít v úvahu odpor obou vinutí ( $R_1$  a  $R_2$ ), rozptylové magnetické toky ( $\Phi_{Lr1}$ ,  $\Phi_{Lr2}$ ) reprezentované rozptylovými indukčnostmi  $L_{r1}$  a  $L_{r2}$  a reluktance feromagnetického jádra  $R_m$ .



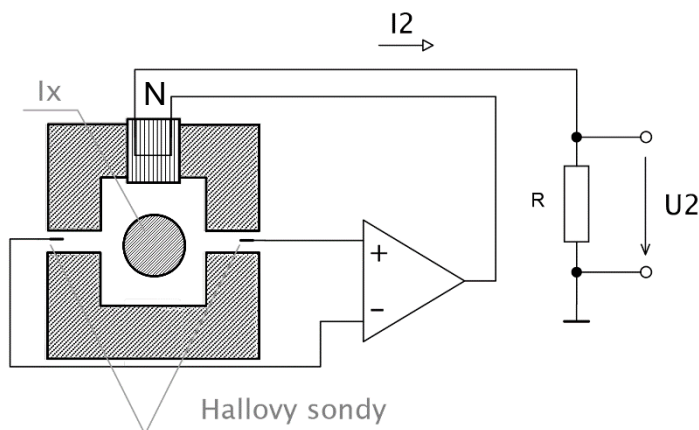
Obrázek 5: reálný transformátor

V případě měření napětí je reálný transformátor zatížen odporem a indukčností vinutí. Abychom minimalizovali úbytek napětí jimi způsobenými a tím i chybu měření, požadujeme co největší impedanci sekundárního obvodu. Na primárním vinutí  $N_1$  má velký počet závitů a transformátor pracuje ve stavu na prázdko.

V případě měření proudu je transformátor zatížen chybou způsobenou magnetizačním proudem  $I_0$ . Abychom ho minimalizovali, požadujeme na sekundárním vinutí co nejmenší impedanci, čímž dosáhneme snížení indukovaného napětí  $U_i$ . Sekundární svorky se nesmí nikdy rozpojit. Jednak dojde k přesycení jádra, čímž se zkreslí výstupní průběh napětí a navíc je na výstupu kvůli velkému počtu sekundárních závitů vysoká hodnota napětí, která by mohla prorazit izolaci sekundárního vinutí. Proto jsou tyto transformátory vybaveny zkratovacími svorkami. Malému indukovanému napětí odpovídá malý magnetický tok jádra  $\Phi$ . Aby magnetizační proud vytvořil potřebný magnetický tok, musí být magnetický odpor jádra co nejmenší. Z toho důvodu je nutný dostatečný průřez magnetického jádra z kvalitního feromagnetického materiálu bez vzduchových mezer. Transformátor proudu je dále zatížen chybou úhlu, která je rovněž způsobena velikostí magnetizačního proudu. Transformátor pracuje na krátko a primární vinutí je nejčastěji reprezentováno jedním, nebo půl závitem v případě měřicích kleští, kdy vodič prochází magnetickým jádrem.

### 2.1.3 Měření pomocí magnetických senzorů

Tato metoda využívá magnetických senzorů, respektive dvou Hallovy sond umístěných ve vzduchových mezerách magnetického obvodu a měřicí zesilovač se zpětnou vazbou.



**Pro velké zesílení**

**použitého zesilovače platí:**

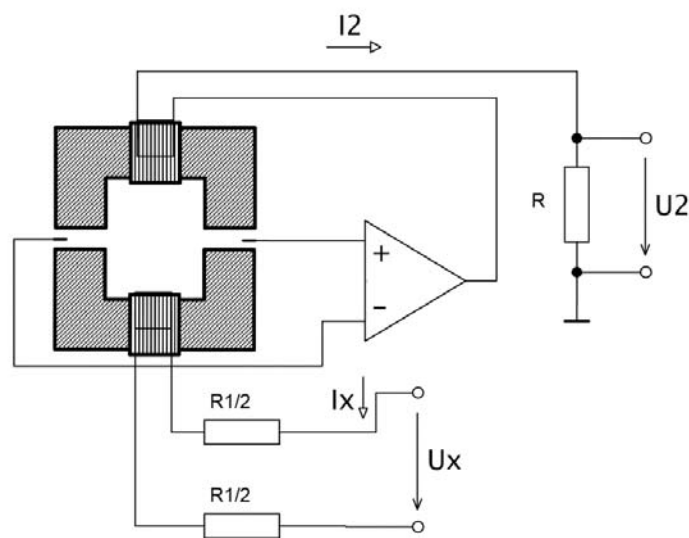
$$I_x = N \cdot I_2 = N \cdot \frac{U_2}{R} \quad (20)$$

Obrázek 6: Převodník pro měření proudů

Dvě symetricky umístěné Hallovy sondy společně s rozdílovým zesilovačem kompenzují vliv vnějšího magnetického pole. Dále je zde kompenzační vinutí, které svou polaritou potlačuje magnetický tok vytvářený primárním vodičem. Touto metodou lze měřit stejnosměrný i střídavý proud ve frekvenčním rozsahu do několika desítek kHz. Princip měření využívá Biot-Savartova zákona. Tyto snímače vykazují prakticky nulové ztráty v měřeném obvodu. Výhody této metody jsou: malá konstrukční velikost a hmotnost, velký měřicí rozsah, nízká spotřeba,

měření bez přidaných ztát, široké frekvenční pásmo, krátká doba odezvy, nízký teplotní drift, výborná linearita a velmi dobrá celková přesnost.

V případě měření napětí vychází snímač z principu snímače proudu s uzavřenou smyčkou. V tomto případě je vstupní měřené napětí převedeno prostřednictvím odporu  $R_1$  na proud primárním vinutím cívky snímače. Magnetické pole primární a kompenzační cívky působí proti sobě a jejich rozdíl je opět detekován Hallovou sondou. Výstupem snímače je opět proud kompenzační cívky. Jeho velikost je určena poměrem závitů obou cívek a velikostí primárního odporu  $R_1$ . To je princip dále používaných senzorů LEM.



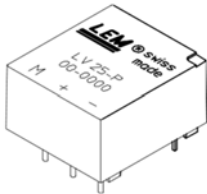
Obrázek 7: Převodník pro měření napětí

## 2.2 Měření pomocí LEM čidel

### 2.2.1 Napěťové LEM čidlo

Pro měření napětí bylo zadavatelem zvoleno čidlo LEM LV 25-P. Typicky se toto čidlo používá pro měření vstupních efektivních hodnot napětí střídačů a pulzních měničů. Jedná se tedy o stejnosměrné napětí, které je ještě vyhlazeno kondenzátorem s velkou kapacitou ve stejnosměrném mezi-obvodu. Napěťové čidlo obsahuje Hallovu sondu. Umožňuje měření střídavých, stejnosměrných a impulsních napětí. Proud úměrný měřenému napětí je dán externím odporem  $R_1$ , který je vypočítán uživatelem. Primární obvod (vysoko-napěťový) je galvanicky oddělen od sekundárního obvodu (výstupního). Vstup tohoto snímače je na rozdíl od snímače proudu „měkký“ (vnitřní odpor je dán předřadným odporem  $R_1$ ) tj. kompenzační

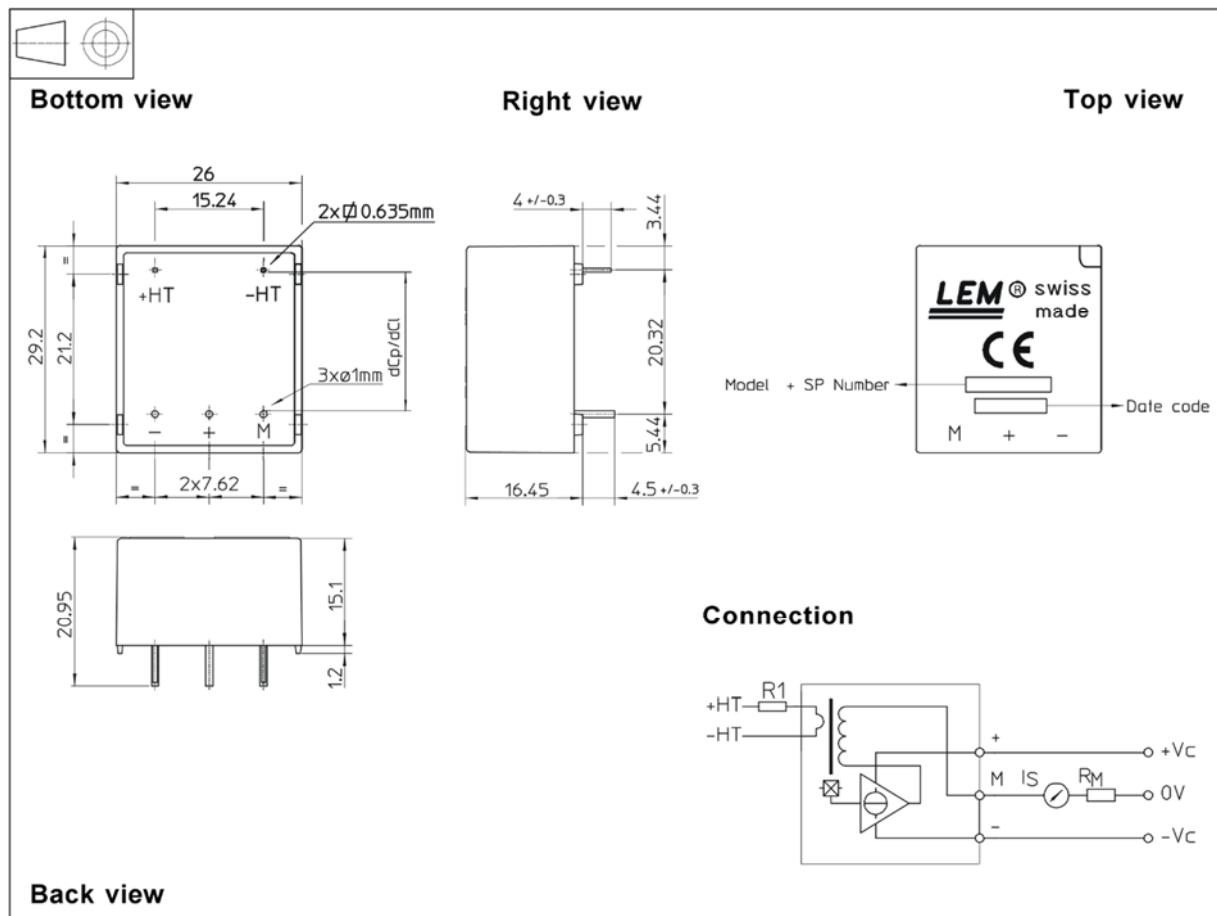
elektronika uvnitř snímače ovlivňuje magnetické poměry v magnetickém obvodu a odezva snímače je proto pomalejší než u čidla LA55. Na obr. 8 je vidět zapojení čidla.



Obrázek 8: model čidla LEM LV 25-P [4]

Tabulka 1 : Parametry čidla LV 25-P

Veličina	min.	max.	Jednotky
$V_{pn}$	10	500	V
$I_{pm}$	0	$\pm 14$	mA
$I_{pn}$	50		mA
$I_{sn}$	25		mA
$K_n$	2500:1000		-
$V_c (\pm 5\%)$	$\pm 12$	$\pm 15$	V
$R_m (\pm 15V, \pm 50mA)$	100	350	$\Omega$
$I_c$	$10 + I_s$		mA
$T_a$	0	+70	$^{\circ}C$



Obrázek 9: Kotovaný výkres čidla LEM LV 25-P [4]

### 2.2.2 Proudové LEM čidlo

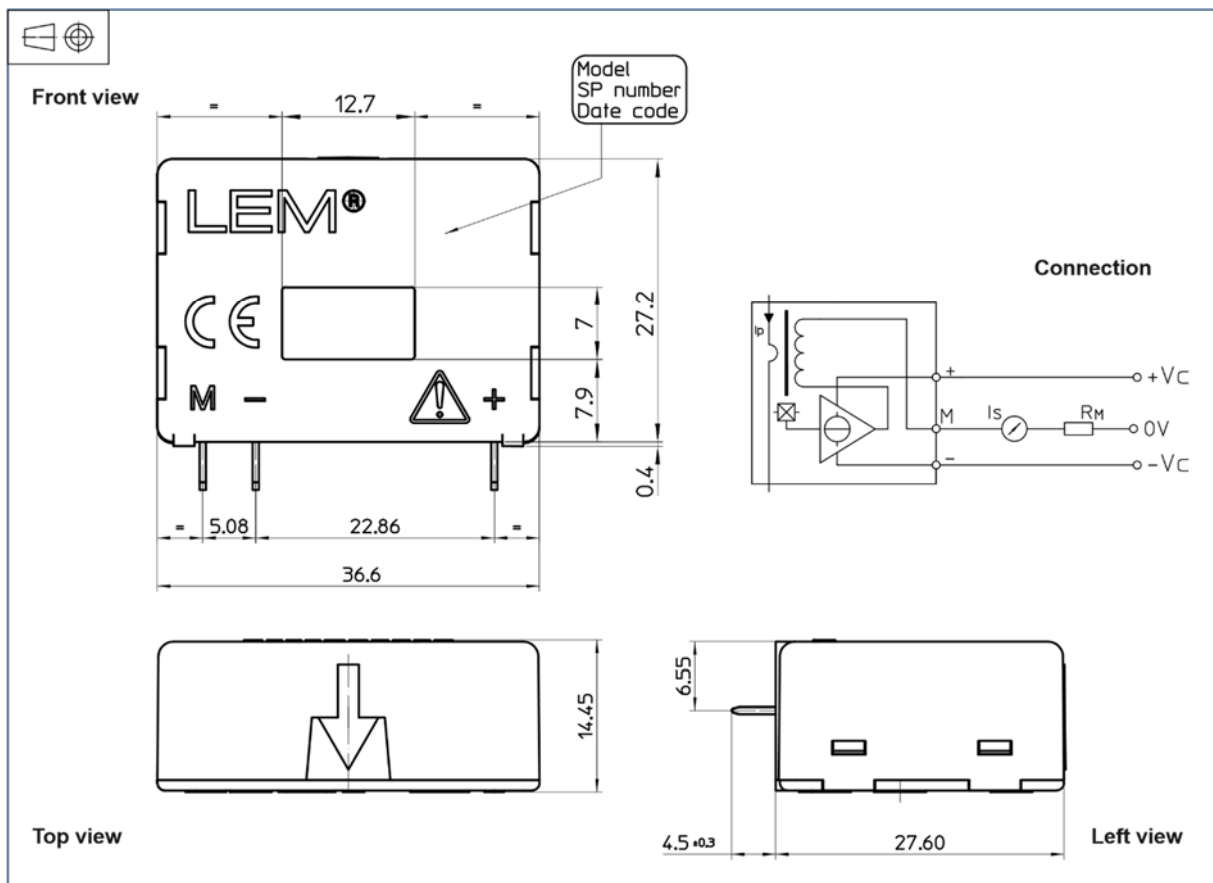
Pro měření proudu zátěže bylo použito čidlo LEM LA55-P. Toto čidlo obsahuje Hallovu sondu v kompenzačním zapojení (kompenzace magnetických účinků měřeného proudu). Je určeno pro měření efektivních hodnot (True RMS) AC, DC a pulzních proudů. Primární obvod (silový) je galvanicky oddělen od sekundárního (elektronického). Toto čidlo je umístěno v plastovém pouzdře a je určeno přímo pro uchycení na desku plošného spoje. Snímač LA55 je průvlekový, to znamená, že počtem závitů (průvleků) vodiče, skrz který teče měřený proud, lze měnit rozsah čidla. Měřicí rozsah čidla je  $\pm 70$  A. Při měření AC proudu je také důležité znát frekvenční rozsah. Podle výrobce nastává útlum 1 dB při frekvenci měřeného proudu 200 kHz. Jelikož hodláme zpracovávat proudy do frekvencí 2,5 kHz, není pro nás tento údaj kritický. V tabulce 1 níže jsou uvedené důležité údaje čidla LA55-P. Výstupní proud  $I_s$  je kladný, pokud měřený proud prochází ve směru šipky vyznačené na pouzdru jak je vidět na obr 10 a obr. 11.



Obrázek 10: model čidla LEM LA 55-P [3]

Tabulka 2: Parametry čidla LEM LA 55-p

Veličina	min.	max.	Jednotky
$I_{pm}$		$\pm 70$	A
$I_{pn}$		50	A
$I_{sn}$		50	mA
$K_n$		1:1000	-
$V_c (\pm 5\%)$	$\pm 12$	$\pm 15$	V
$R_m (\pm 15V, \pm 50mA)$	100	350	$\Omega$
$I_c$		$10 + I_s$	mA
$T_a$	-40	+85	$^{\circ}C$

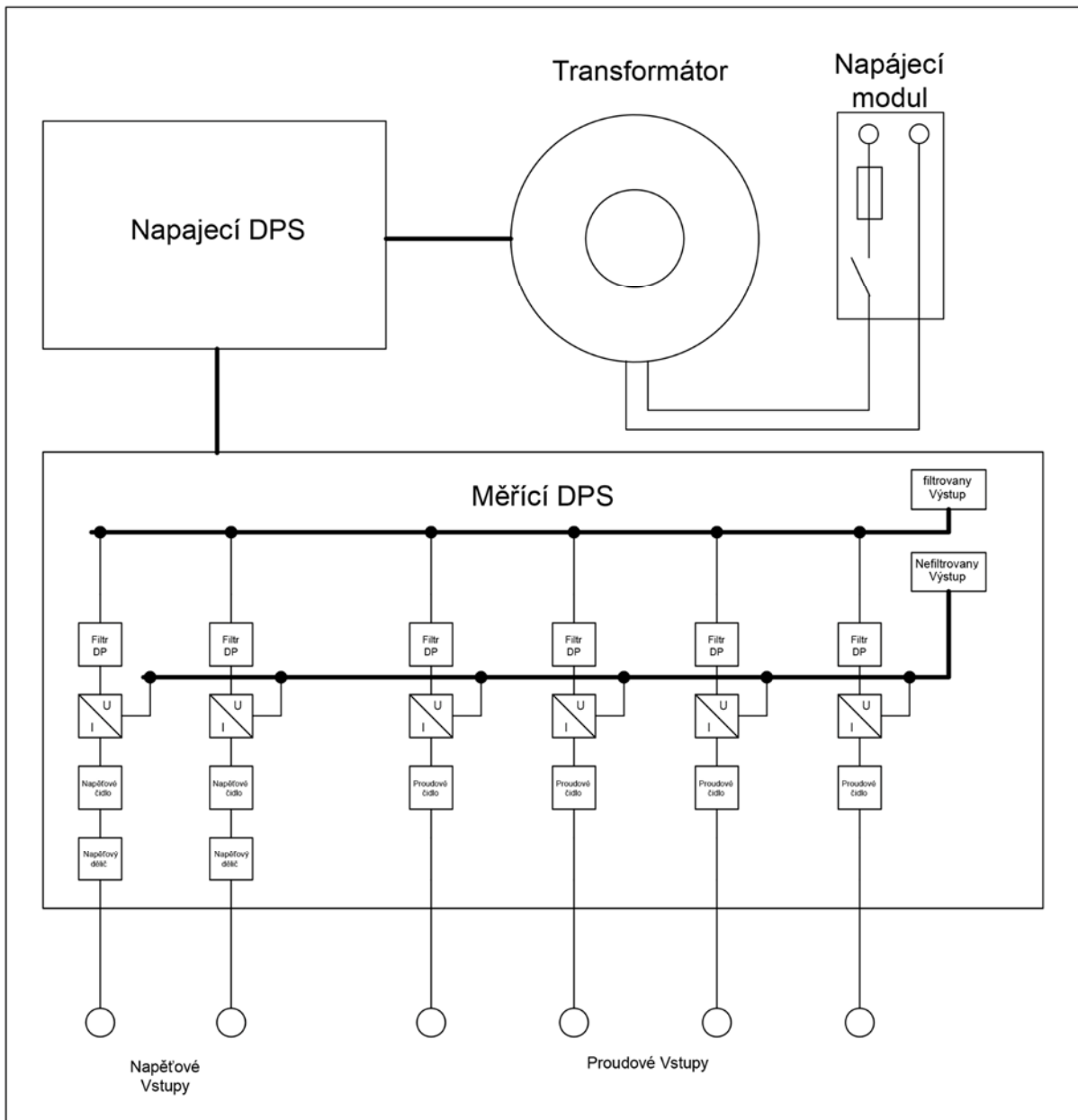


Obrázek 11: Kotovaný výkres čidla LEM LA 55-P [3]

### 3 Blokový návrh přípravku

Na obr. 12 je zakresleno základní blokové schéma celého měřicího rozhraní. Měřicí modul je napájen ze síťového napětí 230 V přivedeného na napájecí modul s EURO konektorem, vypínačem a pojistkou. Z napájecího modulu je síťové napětí vedeno na transformátor s vyvedeným středem. Za transformátorem je napájecí deska, která napájí hlavní měřicí desku  $\pm 15$  V, 3 A. Měřicí deska je vybavena napěťovými a proudovými vstupy zakončenými panelovou svorkou. Výstupy z desky jsou zakončeny konektorem CAN9 pro snadné připojení dalších přístrojů. Modulem tedy lze měřit čtyři proudy a dvě napětí. Proudový signál z měřicí svorky je veden na proudové LEM čidlo. Proud vystupující z čidla je pomocí převodníku proud-napětí převeden na napětí o maximální hodnotě  $\pm 10$  V, které je dále vedeno na nefiltrovaný výstup a filtr s dolní propustí s mezním kmitočtem  $f_m = 2,5$  kHz. Výstup filtru je připojen na druhý konektor, kde lze získat filtrované měřené signály. Napěťový signál je nejdříve přiveden na děličku napětí pro rozsahy  $\pm 500$  a  $\pm 1000$  V a až poté na napětí LEM čidla. Další bloky jsou stejné jako u proudové části.





Obrázek 12: Blokové schéma měřicího modulu

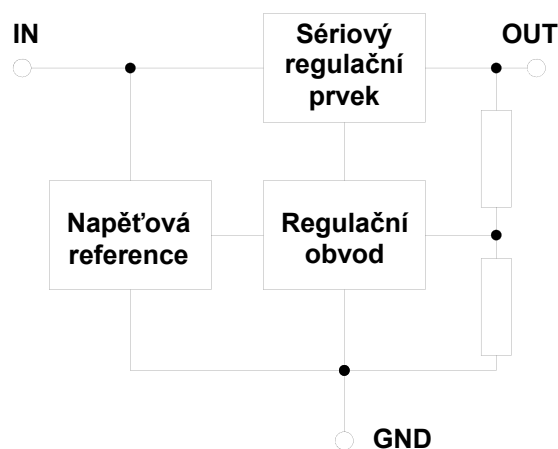
## 4 Elektrický návrh

### 4.1 Návrh zapojení

Návrh těchto zapojení byl proveden ve vývojovém prostředí Formica Schematic.

#### 4.1.1 Návrh zapojení napájení

Nejdříve byl navržen zdroj stabilizované symetrické napájení pro LEM čidla a operační zesilovače. Pro tento účel byly zvoleny integrované stabilizační obvody 7815 pro kladná napětí +15 V a 7915 pro záporná napětí -15 V. Lineární tříbodové stabilizátory jsou v principu sériovými stabilizátory. To znamená, že do série se zátěží je zapojen výkonový regulační prvek, který je řízen odchylkou výstupního napětí od napětí na referenčním obvodu. Vývod "IN" je společným přívodem sériového regulačního prvku a napájení regulačního obvodu. Vývod "OUT" je výstupem sériového regulačního prvku a vstupem regulačního obvodu pro napětí na výstupu. Vývod "GND" je vstupem pro připojení na uzel se vztahnou hodnotou napětí. Zjednodušené blokové schéma je uvedeno na obr. 13.

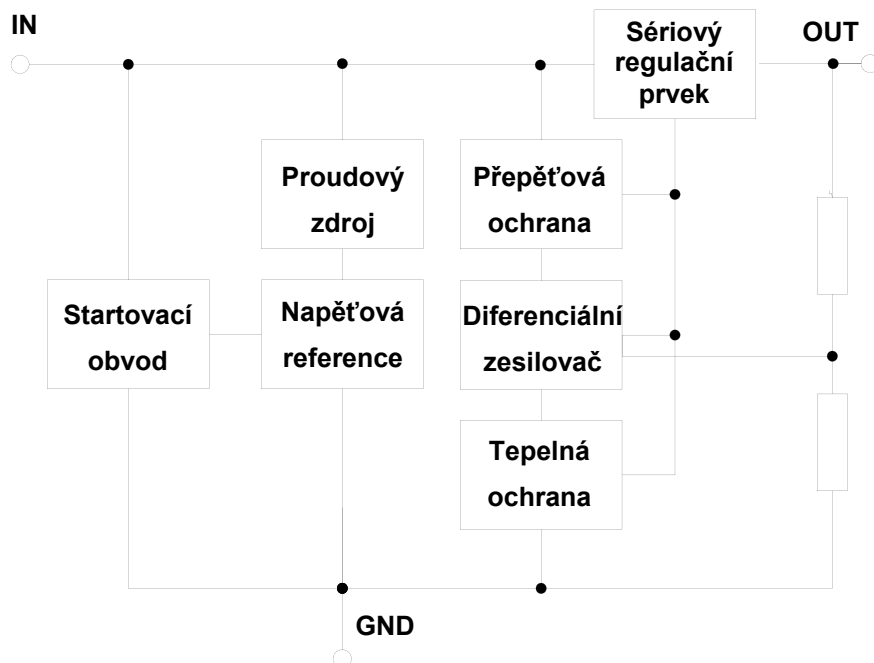


Obrázek 13: Stabilizátor základní schéma

Z tohoto blokového schématu je zřejmé, že ke správné činnosti musí mít regulační výkonový prvek k dispozici rozdíl potenciálů mezi vstupem a výstupem. Rozhodující část výkonu, který se v něm maří a který musí být odváděn z obvodu v podobě tepla je dán součinem daného rozdílu potenciálů a výstupního proudu.

Pro součástky řady 78XX je většinou minimální možný rozdíl potenciálů 2V. Skutečný stabilizátor obsahuje ještě další pomocné funkční bloky. Především se jedná o startovací obvod, tepelnou ochranu a přepětovou ochranu. Regulační obvod se skládá dále z obvodů

napěťové reference a zesilovače regulační odchylky. Podrobnější blokové schéma je na obr. 14. Startovací obvod zajišťuje spuštění funkce stabilizátoru po zapnutí zdroje vstupního napětí. U řady 78XX zpravidla tento obvod nenastartuje stabilizátor, pokud je na výstupních svorkách zbytkové napětí.



Obrázek 14: Blokové schéma třibodového sériového stabilizátoru

Základní parametry těchto stabilizátoru jsou uvedeny v tabulce 3.

Tabulka 3: Parametry stabilizátorů

typ	7815	7915
maximální vstupní napětí	35 V	-35 V
výstupní napětí	15 V	-15V
maximální výstupní proud	0,75 A	1 A
úbytek napětí	2 V	1,3 V

Protože námi žádaný výstupní proud jsou 3 A zvolil jsem zapojení s tranzistorem jak je vidět na obr. 16. Tím jsem docílil nejen zvýšení výstupního proudu až na desítky A podle použitého tranzistoru, ale také zlepšení vlastností stabilizátoru, který je závislý na teplotě. Protože teplo v něm vznikající odpovídá rozdílu vstupního a výstupního napětí a proudu jím procházejícím, který bude minimalizován díky použitým tranzistorům T1 a T2. V tom zapojení přes vlastní stabilizátor tedy teče pouze proud mezi 0 a  $I_{Stab} = 125 \text{ mA}$ . Při prahové napětí přechodu báze-emitor  $U_p = 0,7 \text{ V}$  lze odpory R21 a R22 určit jako:

$$I_{Stab} = \frac{U_p}{R_E} \gg R_E = 5,6\Omega \quad (21)$$

Vzrůstá-li proud zátěží od nuly, teče nejprve pouze přes vlastní stabilizátor. Při dosažení proudu  $I_{stab}$  přesáhne napětí na odporu  $R_E$  prahového napětí báze-emitor tranzistoru a tranzistor převezme další nárůst proudu do zátěže. Kondenzátory C3 – C6 jsou tlumící keramické kondenzátory, které jsou předepsány v datových listech daných stabilizátorů a na desce plošného spoje jsou umístěny co nejbližší k jejich kontaktům. Kondenzátory C1, C2 jsou vstupní vyhlazovací kondenzátory. Jejich hodnota byla počítána společně s napájecím transformátorem. Při zvoleném transformátoru 2x18V je dovolený pokles napětí  $\Delta U$  6,75 V.

### Výpočet $\Delta U$ :

$$\Delta U = U_{ef} \cdot \sqrt{2} - U_n - U_D - U_{st} - U_{BE} \quad (22)$$

$$\Delta U = 18 \cdot \sqrt{2} - 15 - 1 - 2 - 0,7 = 6,75 \text{ V} \quad (23)$$

$U_{ef}$  – efektivní napětí na sekundárním vinutí transformátoru

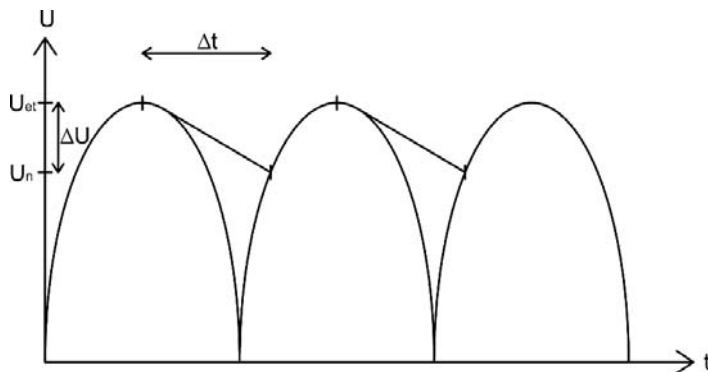
$U_n$  – žádané napětí

$U_D$  – úbytek napětí na diodách usměrňovače

$U_{st}$  – úbytek napětí na stabilizátoru napětí

$U_{BE}$  – úbytek napětí na rezistorech  $R_{BE}$

### Výpočet kapacity C1, C2:



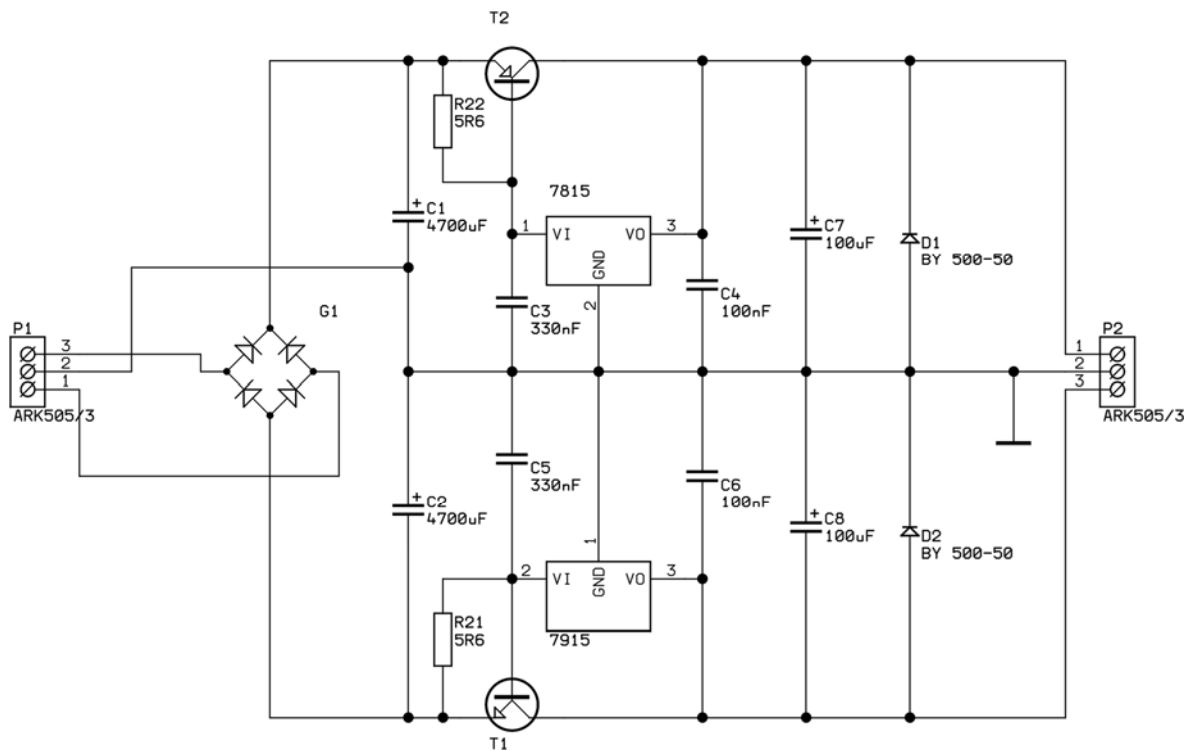
$$\Delta t \approx \frac{T}{2} \quad (24)$$

Obrázek 15: Průběh napětí z usměrňovače, vliv kondenzátoru a důležité hodnoty pro výpočet kapacity

$$C = \frac{I \cdot T}{\Delta U} = \frac{3 \cdot 0,01}{6,75} = 4444,4 \mu F \gg 4700 \mu F \quad (25)$$

$\Delta t$  – doba vybíjení kondenzátoru C1, C2

Kondenzátory C7, C8 jsou elektrolytické kondenzátory pro vyhlazení výstupního napětí.

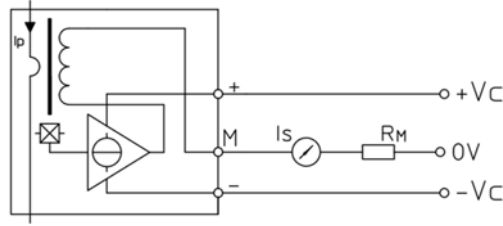


Obrázek 16: Schéma zapojení zdroje stabilizovaného, symetrického napětí

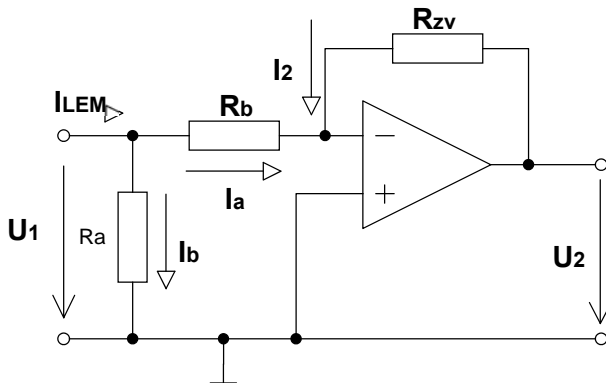
Diody D1, D2 jsou ochranné diody, pro případ kdyby byl na výstup připojen napěťový zdroj opačné polaroty. Tyto diody by měli být dimenzovány minimálně na výstupní hodnoty zdroje: napětí 15 V v závěrném směru, proud 3 A v propustném směru. V tomto projektu jsou použity součástky BY 500-50 s parametry  $U_{rrm} = 50 \text{ V}$  a  $I_F = 3 \text{ A}$ .

#### 4.1.2 Návrh zapojení proudového LEM čidla

Nyní k měřicí části. Pro změnu výstupního proudu z LEM čidla o hodnotě 50 mA na napětí  $\pm 10 \text{ V}$  byl použit převodník proud-napětí v podobě zapojení invertujícího operačního zesilovače LM358. LM358 je napájen  $\pm 15 \text{ V}$  a blízko u pouzdra jsou keramické odrušovací kondenzátory C5 a C6 = 100 nF. U samotného LEM čidla jsou kromě C1 a C3 = 100 nF paralelně zařazeny kondenzátory C2 a C4 = 22  $\mu\text{F}$  z důvodu vyhlazení případných špiček odběrů proudu. RM, který je vidět na obr. 17 je reprezentován proudovým děličem na vstupu operačního zesilovače v převodníku proud-napětí. Dle parametrů LEM čidla musí být rovem hodnotě 135  $\Omega$ . Proud  $I_a$  vstupující do převodníku proud-napětí je 10 mA a musí být odvozen z proudu  $I_{LEM} = 50 \text{ mA}$  vystupující z LEM čidla.



Obrázek 17: Technologické schéma zapojení proudového LEM čidla [3]



Obrázek 18: Zapojení invertujícího operačního zesilovače pro proudové LEM čidlo

$$U_I = R_M \cdot I_{LEM} = 135 \cdot 0,05 = 6,75 \text{ V} \quad (26)$$

$$I_{LEM} = I_a + I_b \rightarrow I_b = 40 \text{ mA} \quad (27)$$

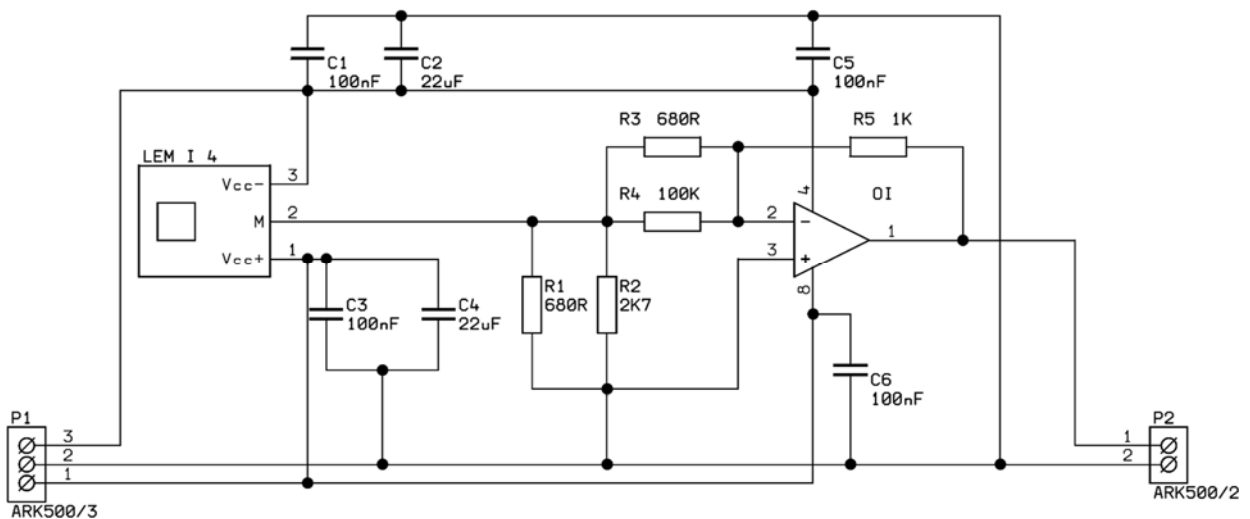
$$I_{LEM} = \frac{U_1}{R_a} + \frac{U_1}{R_b} \rightarrow R_{a,b} = \frac{U_1}{I_{a,b}} \quad (28)$$

$$R_a = 6,75 \cdot 0,04 = 168,75 \Omega = R_1 || R_2 \quad (29)$$

$$R_b = 6,75 \cdot 0,01 = 675 \Omega = R_3 || R_4 \quad (30)$$

$$I_a = -I_2 \rightarrow I_2 = -10 \text{ mA} \quad (31)$$

$$R_{zv} = U_2 \cdot I_2 = 10 \cdot 0,01 = 1 \text{ k}\Omega = R_5 \quad (32)$$

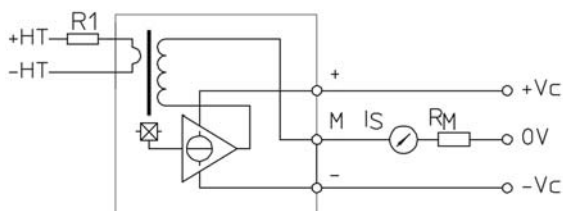


Obrázek 19: Kompletní schéma zapojení proudového LEM čidla s převodníkem proud-napětí

Protože odpor mezi vstupy operační ho zesilovače představuje virtuální nulu, považujeme vstupy OZ za spoj, z toho vyplývá, že napětí na  $R_a$  a  $R_b$  jsou stejná a rovna  $U_1$ . Výsledné odpory jsem rozdělil do paralelní kombinace z řady E12 rovné těmto hodnotám.

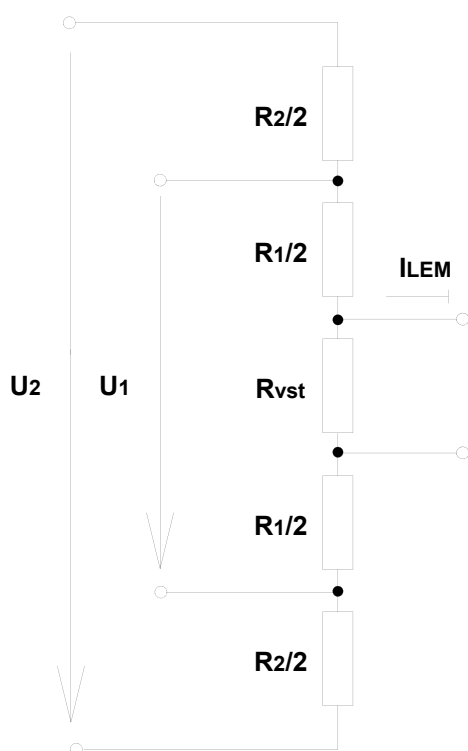
#### 4.1.3 Návrh zapojení napěťového LEM čidla

U napěťového čidla jsou výpočty pro převodník proud-napětí totožné změna je pouze v proudu čidla  $I_{LEM} = 25 \text{ mA}$  a požadovaného odporu LEM čidla  $R_M = 100 \Omega$ , jak je vidět na obr. 20.



Obrázek 20: Technologické schéma zapojení napěťové LEM čidla [4]

Dalším požadovaným prvkem LEM čidla je odpor  $R_1$ , který by měl odpovídat proudu LEM čidla  $I_{LEM} = 10 \text{ mA}$  při jmenovité hodnotě napětí. Tyto napětí jsou  $U_1 = 500 \text{ V}$  a  $U_2 = 1000 \text{ V}$  na obr. 21.  $R_{vst} = \infty$  je určen pro případné doladění proudu jdoucí do LEM čidla.



Obrázek 21: napěťový dělič napěťového LEM čidla

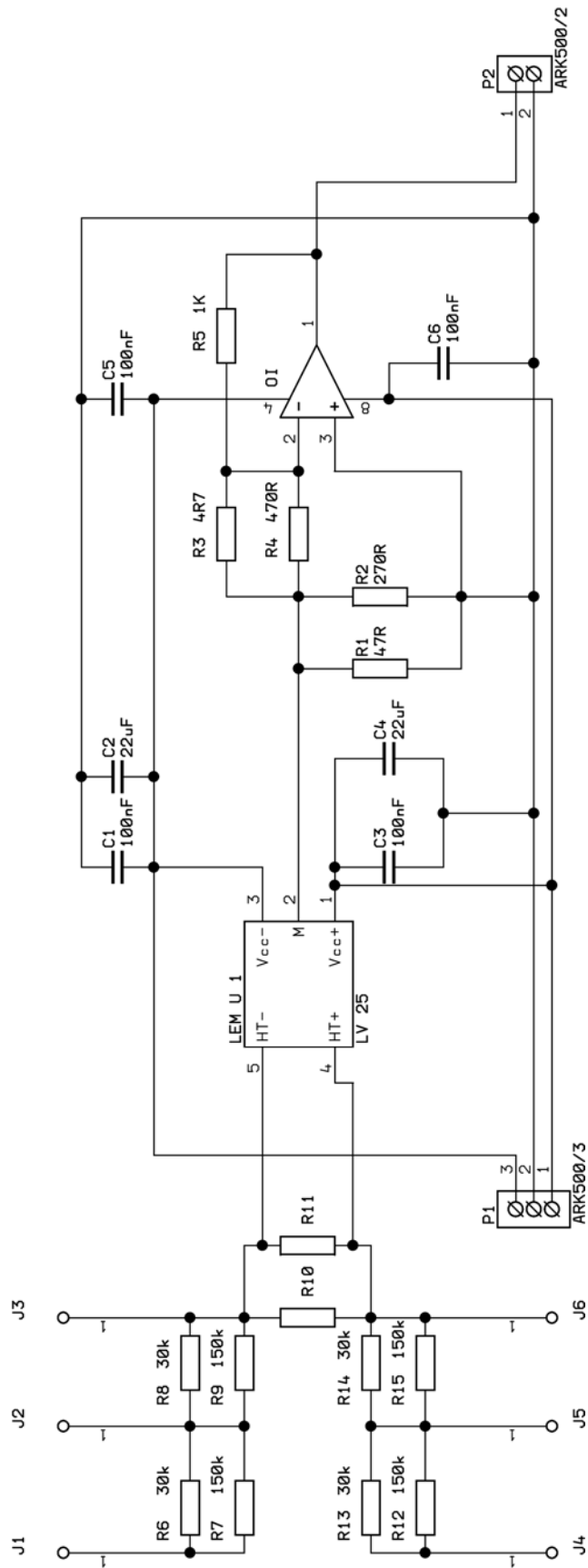
$$R_1 = \frac{U_1}{I_{LEM}} = \frac{500}{0,01} = 50 \text{ k}\Omega \quad (33)$$

$$R_2 = \frac{U_2 - U_1}{I_{LEM}} = 50 \text{ k}\Omega \quad (34)$$

Pro snížení tepelných ztrát na jednom rezistoru jsou rozděleny na  $R_1/2$  a  $R_2/2$ . Tyto rezistory jsou opět vytvořeny paralelní kombinací rezistorů z řady E24, proto výkon na jednotlivých rezistorech bude ještě menší a budou se méně zahřívat. Tyto hodnoty jsou 150 a 30 k $\Omega$ .

$$P = U_R \cdot I_{PR} = 250 \cdot 0,01 = 2,5 \text{ W} \quad (35)$$

$U_R$  je maximální napětí na rezistoru a výkon  $P$  se dále dělí na paralelní kombinaci, která představuje proudový dělič. Na odporu 30 k $\Omega$  tak teče proud o hodnotě 8,333 mA, která odpovídá 2,1 W.

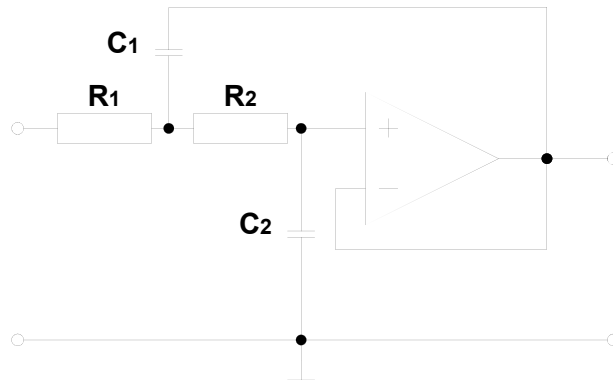


Obrázek 22: Kompletní schéma zapojení napětového LEM čidla s převodníkem proud-napětí a vstupním napětovým děličem



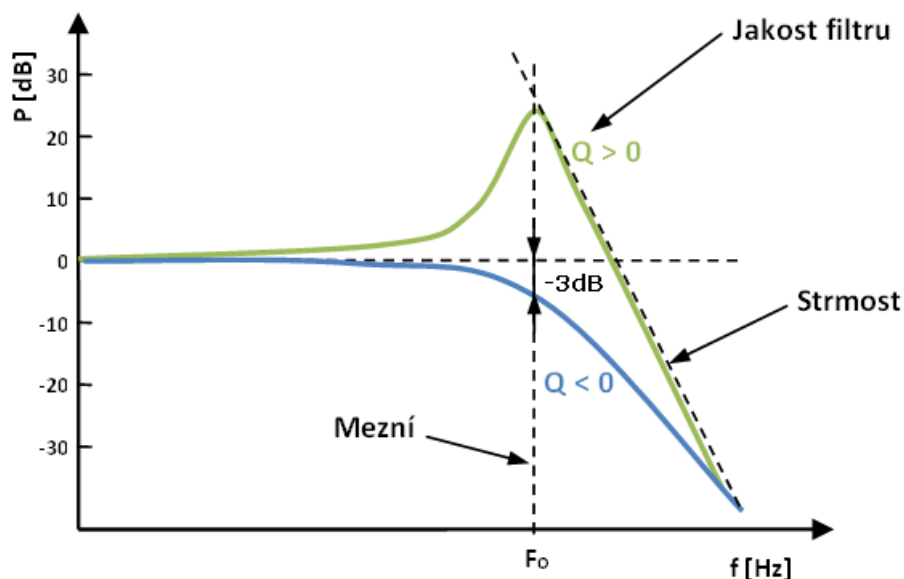
#### 4.1.4 Návrh zapojení filtru

Dále byl zadán RC filtr dolní propust s mezním kmitočtem  $f_m = 2,5 \text{ kHz}$ ,  $R$  v řádech  $k\Omega$  a činiteli jakosti  $Q = 3/4$ . Použil jsem zapojení aktivní dolní propusti Sallen-Key, které se skládá ze dvou rezistorů  $R_1$  a  $R_2$ , dvou kondenzátorů  $C_1$  a  $C_2$  a zesilovače napětí. Ten je v praxi reprezentován neinvertujícím zapojením operačního zesilovače. V tomto případě je zvolen zesilovač s jednotkovým zesílením, takže je operační zesilovač použit ve funkci téměř ideálního sledovače napětí.



Obrázek 23: Schéma zapojení s dolní propustí Sallen-key

Funkci zapojení lze zjednodušeně popsat ve třech základních kmitočtových oblastech. Na nízkých kmitočtech se kondenzátory  $C_1$  a  $C_2$  jeví jako rozpojený obvod (mají velkou impedanci) a vstupní signál je pouze převeden sledovačem na výstup. V okolí kmitočtu pólu mají kondenzátory impedanci přibližně stejného řádu jako rezistory  $R_1$ ,  $R_2$  a signál je pomocí kladné zpětné vazby přes kondenzátor  $C_1$  zesílen podle nastavené hodnoty jakosti  $Q$ .



Obrázek 24: Charakteristika dolní propusti Sallen-Key [7]

Na vysokých kmitočtech se kondenzátory chovají jako zkrat (malá impedance), takže se signál na vstupu OZ blíží nule a je dále přenesen sledovačem na výstup. Kmitočtové vlastnosti dolní propusti Sallen-Key jsou značně závislé na frekvenčních parametrech použitého operačního zesilovače. Mezi nimi má na chování dolní propusti největší vliv nenulový výstupní odpor operačního zesilovače označený jako  $R_{outOZ}$  a projeví se deformací přenosu zejména v oblasti vyšších kmitočtů. Modulovou kmitočtovou charakteristiku lze popsat pomocí několika parametrů – přenos v propustném pásmu  $K_0$ , maximum přenosu na kmitočtu pólu  $K_{max} = K(f_p)$ , jakost pólu  $Q_p$ , minimum přenosu  $K_{min}$ , kmitočet minima přenosu  $f_{Kmin}$  a dalších.

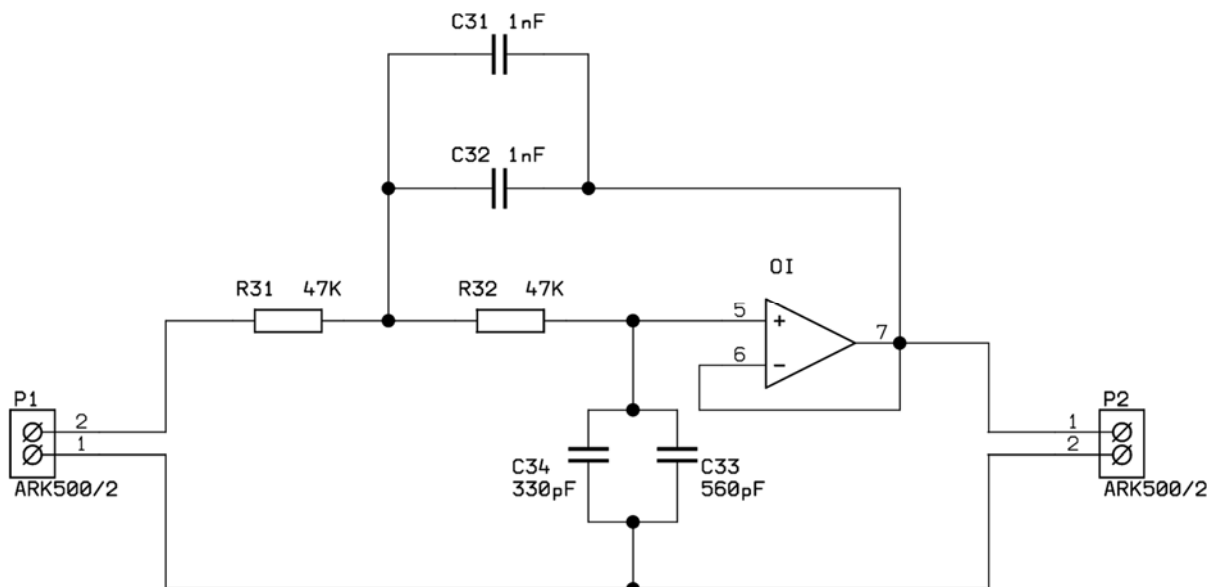
$$C_1 = 2nF = C31||C32 \quad (36)$$

$$C_2 = \frac{C_1}{4 \cdot Q^2} = \frac{2 \cdot 10^{-9}}{4 \cdot \left(\frac{3}{4}\right)^2} = 888,88pF \approx C33||C34 \quad (37)$$

$$\omega_0 = 2\pi \cdot f_m = 15\,708 \quad (38)$$

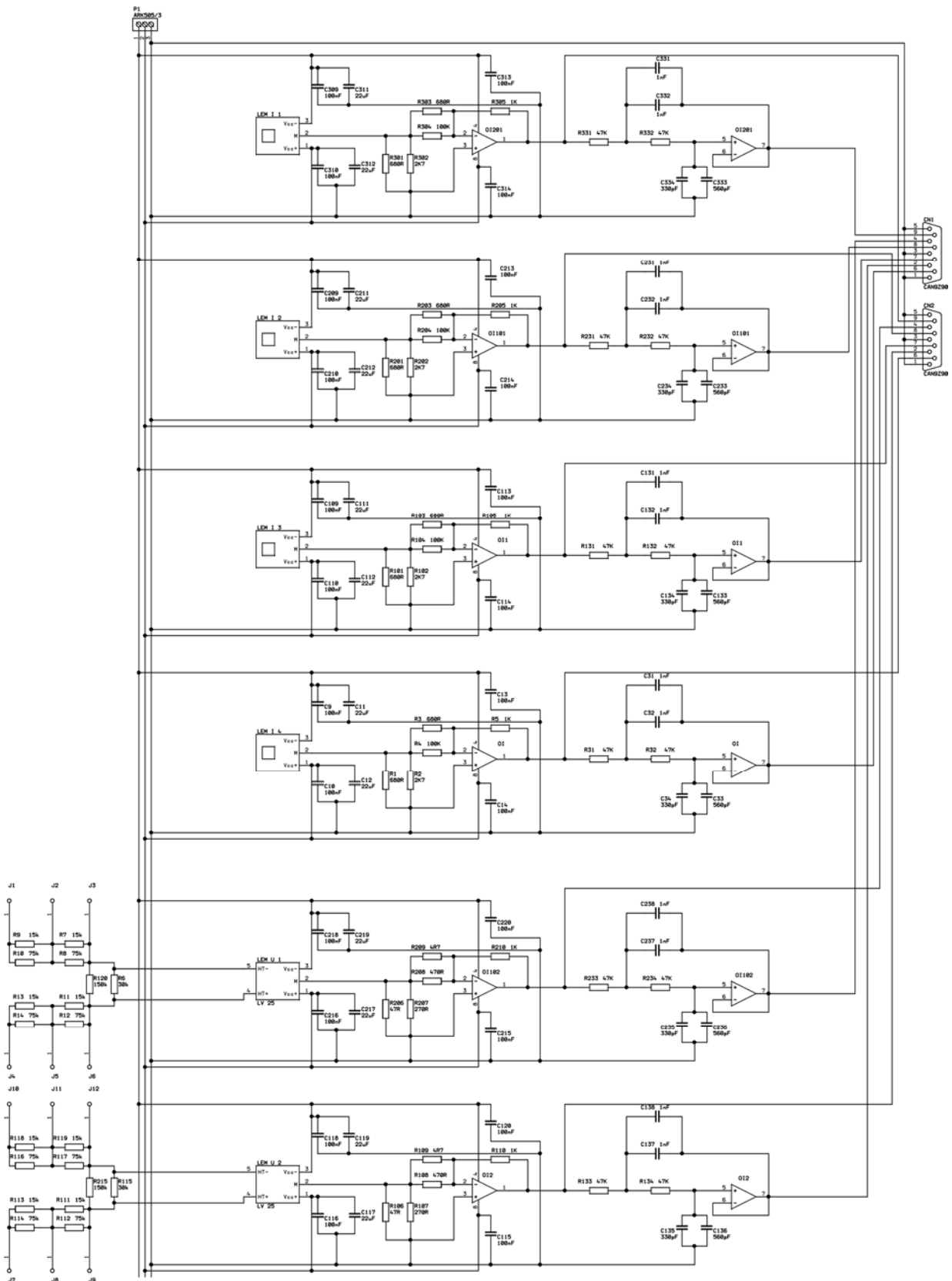
$$R_1 = R_2 = \frac{1}{\omega_0 \cdot \sqrt{C_a \cdot C_b}} = 47\,k\Omega = R31 = R32 \quad (39)$$

Je zde použit druhý OZ z LM358 a proto na obr. 25 není zakresleno jeho napájení. Volil jsem  $C_1$  tak, aby  $R_{1,2}$  vyšlo v řádech  $k\Omega$ .



Obrázek 25: kompletní zapojení filtru s dolní propustí Sallen-key

### 4.1.5 Celkové schéma zapojení



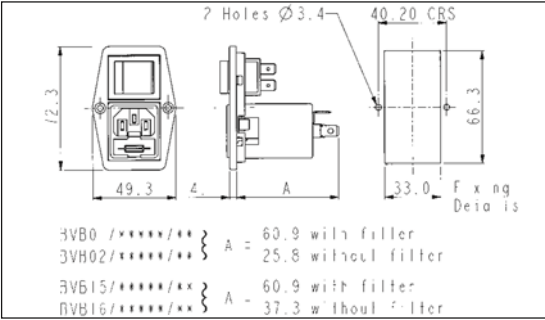
Obrázek 26: Kompletní schéma zapojení celé měřicí desky

## 4.2 Výběr součástek

<b>Součástky pro napájecí DPS:</b>
Jednofázový diodový můstek G1: typ - B250C6000, $I = 6 \text{ A}$ , $U_{DC} = 600 \text{ V}$ , $U_{AC} = 420 \text{ V}$ , $I_{FSM} = 200 \text{ A}$ (maximální povolený impulzní proud), $U_f = 1 \text{ V}$ (úbytek napětí na můstku)
Stabilizátor pevného napětí 7815: pouzdro - TO220, $U_{OUT} = 15 \text{ V}$ , $I_{OUT} = 0,75 \text{ A}$ , $U_{INMAX} = 35 \text{ V}$ , $U_{DROP} = 2 \text{ V}$ (úbytek napětí), $I_q = 8 \text{ mA}$ (proud nulovým pinem), Provozní teplota $0 - 125^\circ\text{C}$
Stabilizátor pevného napětí 7915: pouzdro - TO220, $U_{OUT} = -15 \text{ V}$ , $I_{OUT} = 1 \text{ A}$ , $U_{INMAX} = -35 \text{ V}$ , $U_{DROP} = 1,3 \text{ V}$ (úbytek napětí), $I_q = 6 \text{ mA}$ (proud nulovým pinem), Provozní teplota $0 - 125^\circ\text{C}$
PNP tranzistor T1: typ – MJE2955T, $I_c = 10 \text{ A}$ , $U_{CE0} = 60 \text{ V}$ , $U_{CB0} = 70 \text{ V}$ , $P_d = 75 \text{ W}$ , $h_{21E} = 5 - 100$ , $f_T = 2 \text{ MHz}$ , pouzdro – TO220
NPN tranzistor T2: typ – MJE3055T, $I_c = 10 \text{ A}$ , $U_{CE0} = 60 \text{ V}$ , $U_{CB0} = 70 \text{ V}$ , $P_d = 75 \text{ W}$ , $h_{21E} = 5 - 70$ , $f_T = 2 \text{ MHz}$ , pouzdro – TO220
Chladič pro 7815, 7915, T1 a T2: o rozměrech 20x20x15 mm
Ochranné diody D1, D2: typ - BY500-50, $U_{RRM} = 50 \text{ V}$ , $I = 5 \text{ A}$ , $U_f = 1,3 \text{ A}$ , $t_{rr} = 200\text{ns}$ , Pouzdro = 5,4 x 7,5 mm
Elektrolytické radiální standartní kondenzátory C1, C2: $C = 4700 \mu\text{F}$ , $U = 35 \text{ V}$ , tolerance 20%, rozměry 18 x 36 mm, $RM = 7,5 \text{ mm}$ , maximální teplota - $105^\circ\text{C}$
Elektrolytické radiální standartní kondenzátory C7, C8: $C = 100 \mu\text{F}$ , $U = 35 \text{ V}$ , tolerance 20%, rozměry 8 x 16 mm, $RM = 3,5 \text{ mm}$ , maximální teplota - $105^\circ\text{C}$
Tantalové kondenzátory C3, C5: $C = 330 \text{ nF}$ , $U = 35 \text{ V}$ , tolerance 20%, rozměry 4,5 x 7 mm, $RM = 2,54 \text{ mm}$ , maximální teplota - $125^\circ\text{C}$
Tantalové kondenzátory C4, C6: $C = 100 \text{ nF}$ , $U = 35 \text{ V}$ , tolerance 20%, rozměry 4,5 x 7 mm, $RM = 2,54 \text{ mm}$ , maximální teplota - $125^\circ\text{C}$
Rezistor metalizovaný R21, R22: $R = 5,6 \Omega$ , tolerance 1%, $P_z = 0,6 \text{ W}$ , $TK = 50 \text{ ppm/K}$ , pouzdro – 0207, rozměry 6,3x2,4 mm

<b>Součástky pro měřicí DPS:</b>
Proudové LEM čidlo LA 55-P, $I_{MAX} = 50 \text{ A}$ , $I_{VYST} = 50 \text{ mA}$ , $U_c = +/- 15 \text{ V}$
Napěťové LEM čidlo LV 25-P, $U_{MAX} 500 \text{ V}$ , $I_{VYST} = 25 \text{ mA}$ , $U_c = +/- 15 \text{ V}$
Operační zesilovač LM358, 2x bipolární OZ - univerzální, DIP8, $U_c = +/- 16 \text{ V}$ , pracovní teplota $0 - 70^\circ\text{C}$ , $I_{IN} = 50 \text{ mA}$ ,

Konektor CAN9 zásuvka, 9 pinů
Fastony J: rozměry 2,8 x 0,8 mm, kontakt d = 1,3 mm, materiál CuZnSn
Rezistory pro Napěťový dělič R 15 K, 30 K, 75 K, 150 K tedy odpory 25 a 12,5 kΩ, metaloxidový v keramickém pouzdru, P <sub>Z</sub> = 5 W, tolerance 5 %, T <sub>K</sub> = 300 ppm/K, rozměry 22x9,5x9 mm
Ostatní rezistory metalizovaný, tolerance 1%, P <sub>Z</sub> = 0,6 W, T <sub>K</sub> = 50 ppm/K, pouzdro – 0207, rozměry 6,3x2,4 mm
Všechny kondenzátory na DPS Tantalové, U = 35 V, tolerance 20%, rozměry 4,5 x 7 mm, RM = 2,54 mm, maximální teplota - 125°C

<b>Součástky mimo DPS:</b>											
Transformátor: typ - toroidní, výkon - 120 VA, vstupní napětí - 230 V, výstupné napětí - 2x 18 V, výstupní proud – 2x3,333 A, váha – 1,29 kg, výška – 47 mm, průměr – 96 mm											
 <p>2 Holes Ø3.4 40.20 CBS 49.3 12.3 4 66.3 33.0 F x ng Detail is</p> <table border="0"> <tr> <td>3VB0 /*****/*</td> <td rowspan="2">} A =</td> <td>60.9 with filler</td> </tr> <tr> <td>3VB02 /*****/*</td> <td>25.8 without filler</td> </tr> <tr> <td>3VB15 /*****/*</td> <td rowspan="2">} A =</td> <td>60.9 with filler</td> </tr> <tr> <td>3VB16 /*****/*</td> <td>37.3 without filler</td> </tr> </table>	3VB0 /*****/*	} A =	60.9 with filler	3VB02 /*****/*	25.8 without filler	3VB15 /*****/*	} A =	60.9 with filler	3VB16 /*****/*	37.3 without filler	Napájecí modul: Bulgin, typ – BVB01/5000/11, vypínač, euro konektor, pojistková zdířka, možnost vstupního síťového filtru.
3VB0 /*****/*	} A =		60.9 with filler								
3VB02 /*****/*		25.8 without filler									
3VB15 /*****/*	} A =	60.9 with filler									
3VB16 /*****/*		37.3 without filler									
Panlové zdířky, barvy červené a černé, napětí AC/DC 1000 V, proud 24 A, přechodový odpor 5 mΩ, Průměr zásuvky 4 mm, instalační otvor 12 mm											

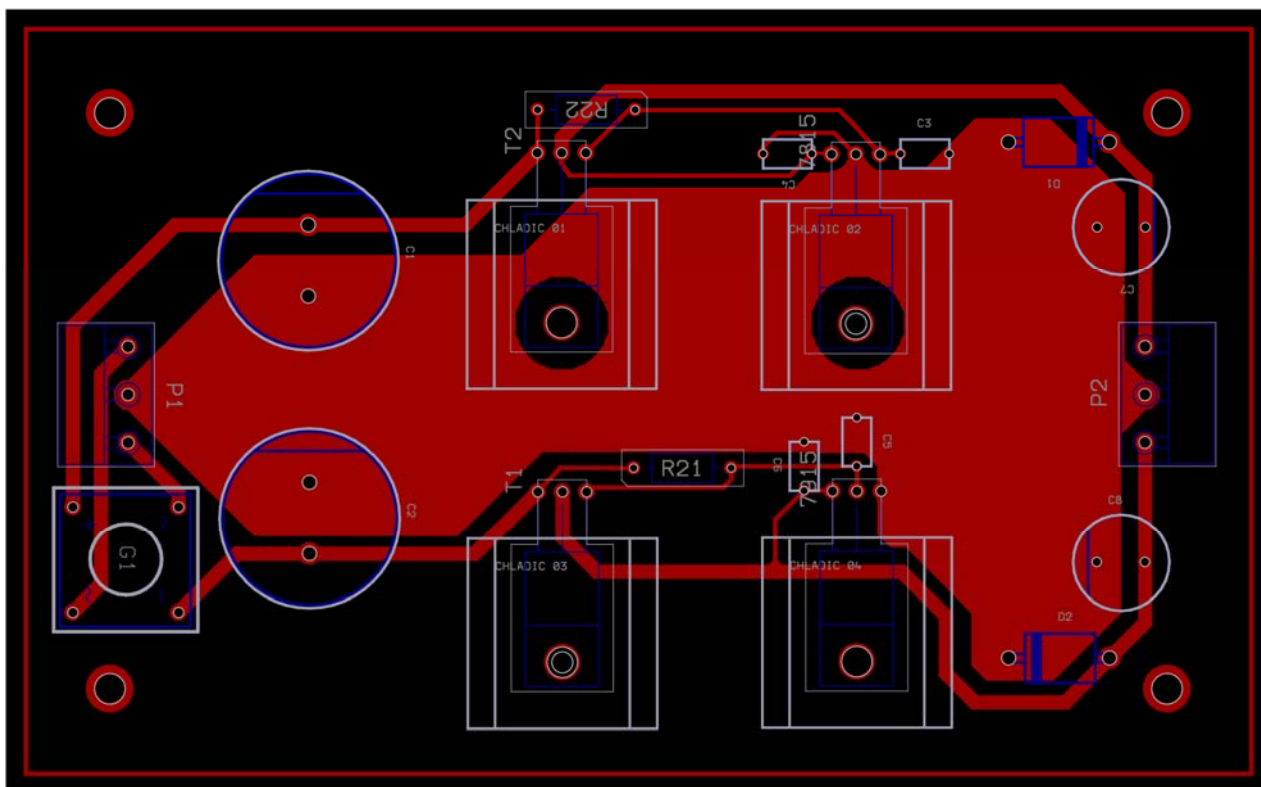
Obrázek 27: Výkres modulu [14]

### 4.3 Návrh desky plošného spoje

Návrh těchto desek byl proveden ve vývojovém prostředí formica Layout.

#### 4.3.1 Návrh napájecí DPS:

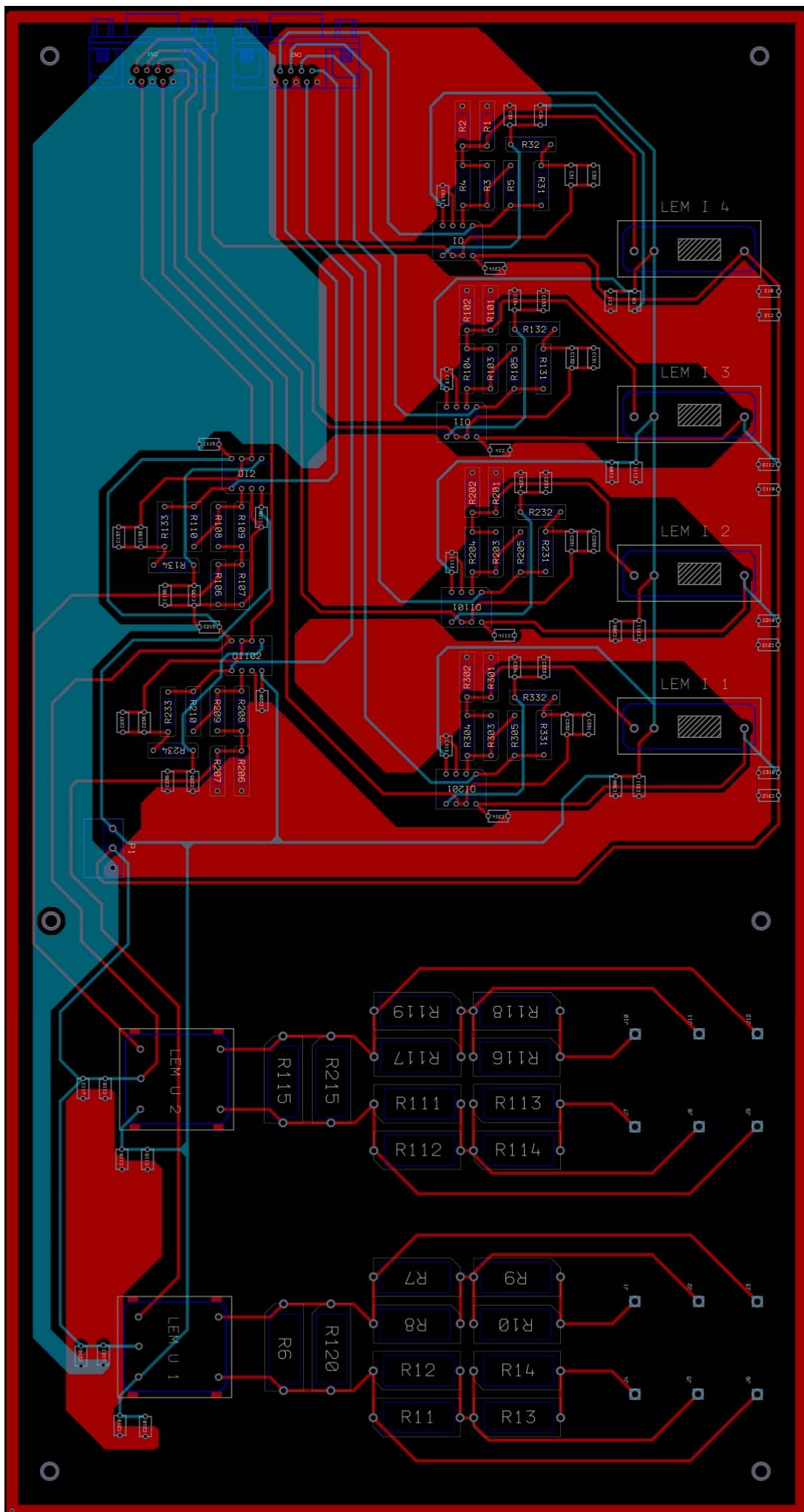
Kondenzátory C3 až C6 viz obr. 28 jsou umístěny co nejbližší k vývodům stabilizátorů napětí. Protože kondenzátory C1, C2, C7, C8 viz obr. 28 jsou elektrolytické a jsou umístěny co nejdál od zdroje tepla, tedy od chladičů, a zároveň co nejbližší u vývodu z desky. Požadovaná minimální šířka cest pro tloušťku mědi = 35 μm je určena podle grafu na obr. 31. Dále byla ve středu rozlita měď, aby se snížily přechodové odpory a zkrátily se zpětné proudové cesty.



Obrázek 28: Napájecí DPS s cestami a součástkami

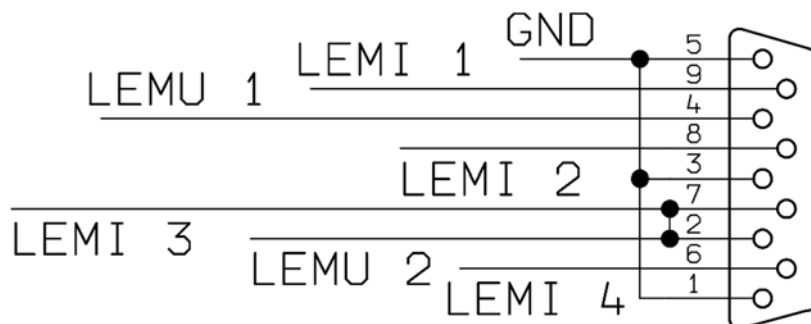
#### 4.3.2 Návrh Měřicí DPS

Na této desce viz obr. 29 nebylo možné si vystačit pouze s jednou vodivou vrstvou spoje, proto jsou zde dvě a jejich propojení zajišťují prokovy. Kondenzátory pro eliminování napěťových špiček jsou opět co nejbližší k vývodům součástek. Desku je možno rozdělit do několika sekcí. Sekce s operačními zesilovači, sekce s proudovými LEM čidly a nakonej sekce napěťovými děliči a napěťovými LEM čidly. U této sekce bylo zvlášť důležité dodržení izolační vzdálenosti, která je určena z grafu na obr. 32. Na tomto DPS je měď rozlita z důvodu stínění signálových cest a omezení jejich přenosu na jinou cestu (rušení). Pro připojení napětí pro napěťová čidla jsou zde použity konektory typu faston s označením součástky J.

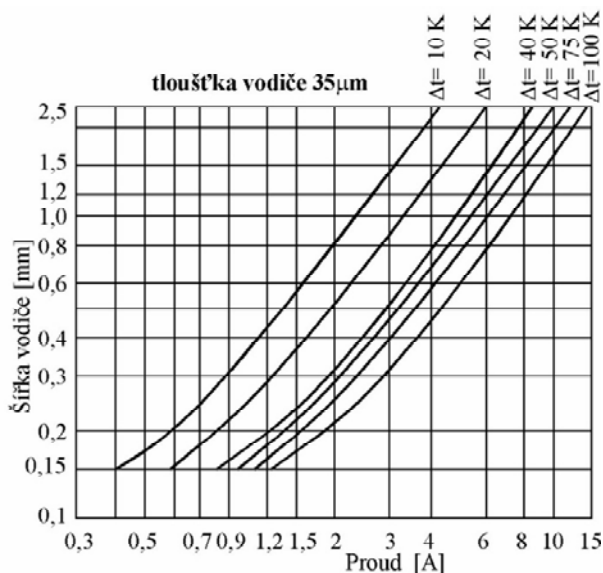


Obrázek 29: Měřicí DPS s cestami a součástkami

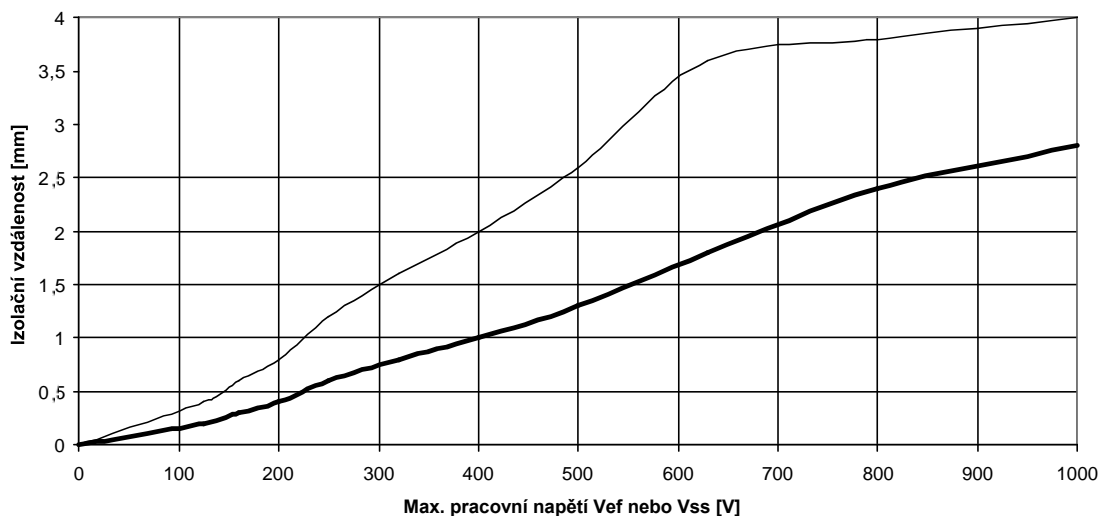
Další důležitá informace je umístění jednotlivých signálů na výstupních konektorech CAN9. Dané uspořádání je totožné pro filtrovaný i nefiltrovaný výstup a lze ho vidět na obr. 30.



Obrázek 30: uspořádání výstupních konektorů CAN9



Obrázek 31: Graf šířky vodivých cest [13]

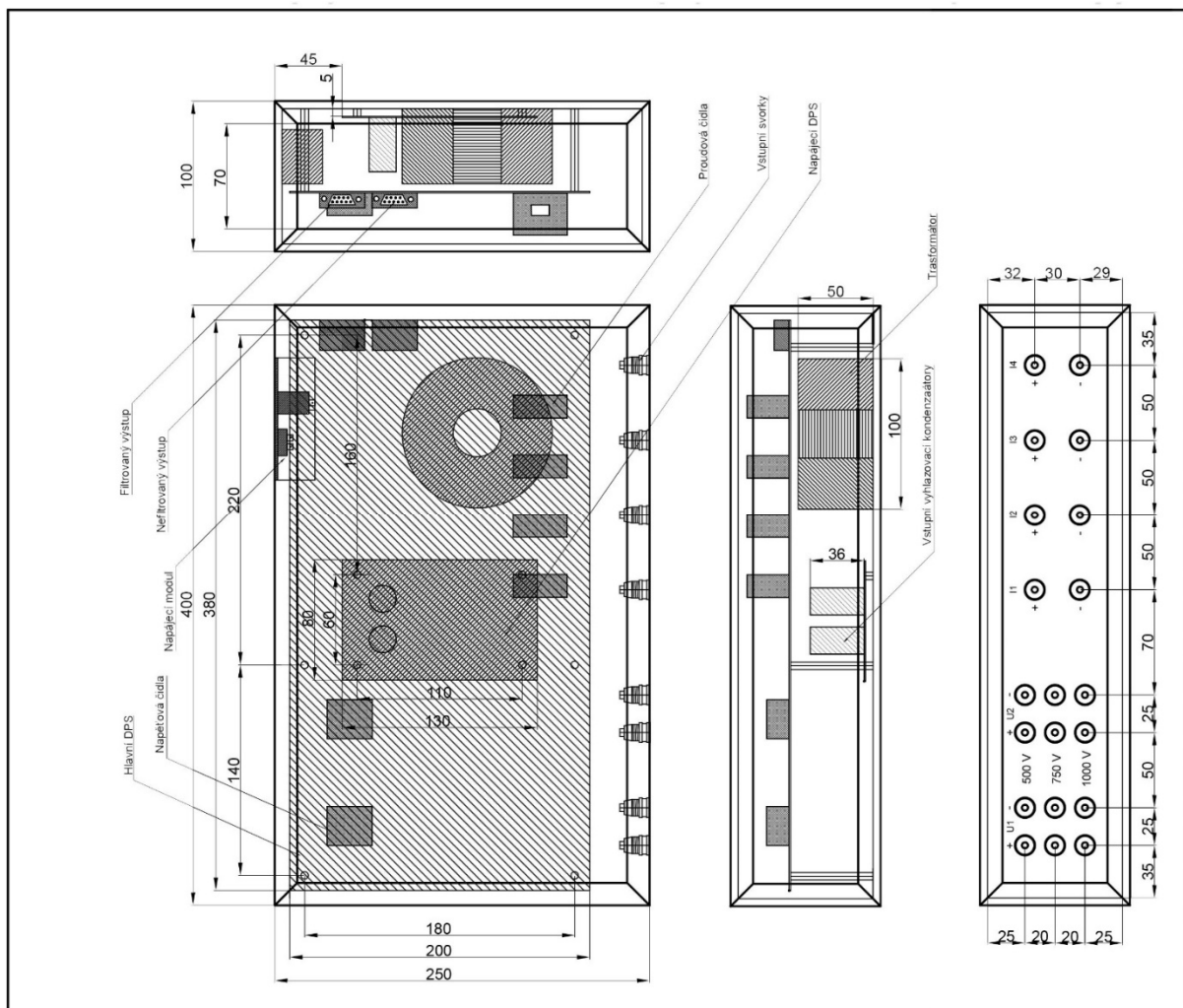


Obrázek 32: Graf izolačních vzdáleností dle CSN EN 60950. [13]



## 5 Mechanický návrh

### 5.1 Výkres modulu



Obrázek 33: kompletní výkres modulu

### 5.2 Popis mechanického návrhu

Pro měřicí modul bylo navrženo umístění ve svařené kovové kostře z L profilů. Vnější rozměry této kostry jsou: 400×250×100 mm. Na výkresu na obr. 33. lze vidět tříosé zobrazení celého měřicího modulu a návrh předního panelu. Napájecí deska, transformátor a napájecí modul v zadní části, jsou umístěny pod měřicí deskou.

## 6 Závěr

Práce obsahuje kompletní výrobní dokumentaci měřicího modulu. Pro výrobu Jednotlivých DPS by byla použita data ve formě Gerberu. Grafický výstup těchto dat lze vidět v příloze.

Při dalších úpravách tohoto návrhu by bylo možné minimalizovat velikost měřicí desky zmenšením vzájemných vzdáleností jednotlivých součástek. Nicméně to by mohlo vést k jejich vyššímu zahřívání. Proto myslím, že by mohlo být zajímavé rozdělení této desky. Každá deska by obsahovala jedno LEM čidlo, převodník proud-napětí a filtr. Tyto jednotlivé desky by byly propojeny v jedné výstupní a napájecí desce. Propojovací kabel by tedy obsahoval  $\pm 15V$ , filtrovaný a nefiltrovaný signál a zem, která by byla umístěna mezi jednotlivými signály, aby nedocházelo k přeslechům. Tímto by bylo možné celé zařízení zmenšit. Všechny desky plošných spojů by navíc mohly mít stejný rozměr. Nejspíše by stačilo umístění dvou čidel s příslušenstvím na desku, ale to by zaleželo na požadovaných rozměrech modulu a velikosti výsledného DPS s moduly.

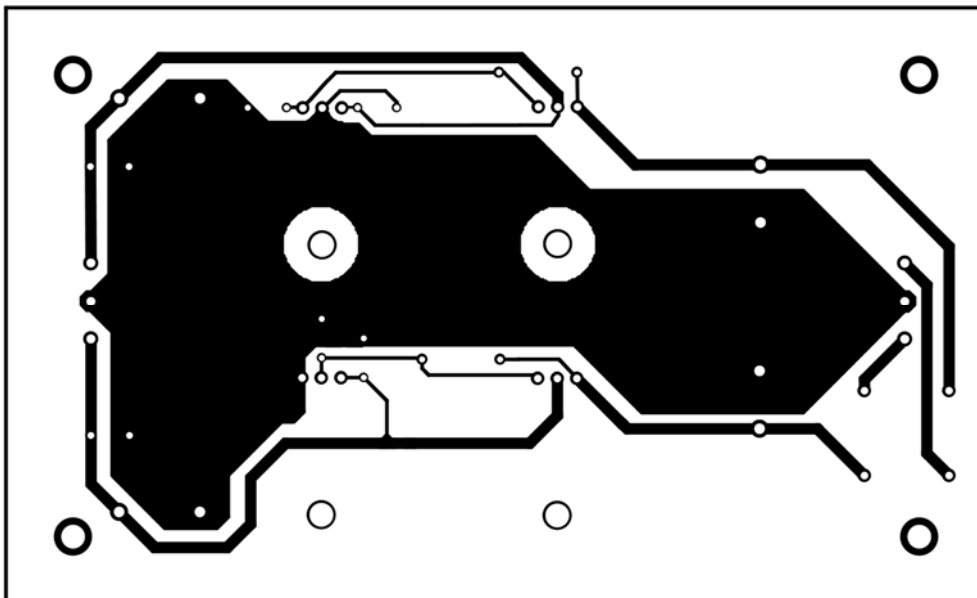
Dále by bylo vhodné mít na panelu více proudových rozsahů, kterých by se dosáhlo různým počtem průvleků skrz sensor LEM. S více závity vzroste citlivost. Nicméně otvor v LEM čidlu není příliš velký proto by bylo nutné vyzkoušet kolik rozsahů je možno umístit do otvoru.

## Použitá literatura

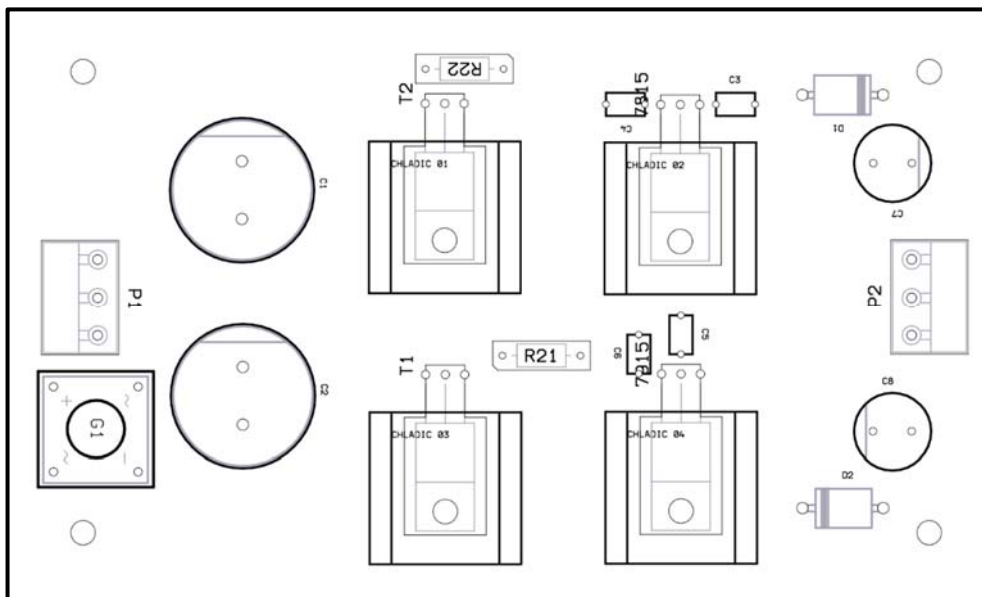
- [1] HAASZ, Vladimír. Elektrická měření: Přístroje a metody. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005, 337 s. ISBN 80-010-2731-7.
- [2] MARTINEK, Pravoslav, Ivan MATZNER a Petr BOREŠ. Elektrické filtry: přístroje a metody. Vyd. 1. Praha: ČVUT, Elektrotechnická fakulta, 1997, 147 s. ISBN 80-010-1591-2.
- [3] Current Trasdducer LA 55-P: Datasheet. s. 1-3. Dostupné z: [www.lem.com](http://www.lem.com)
- [4] Voltage Trasdducer LV 25-P: Datasheet. s. 1-3. Dostupné z: [www.lem.com](http://www.lem.com)
- [5] LM78XX Series Voltage regulators: Datasheet. s. 1-11. Dostupné z: [www.ti.com](http://www.ti.com)
- [6] LM79XX Series 3-Terminal Negative regulators: Datasheet. s. 1-13. Dostupné z: [www.ti.com](http://www.ti.com)
- [7] Charakteristika dolní propusti Sallen-Key: Obrázek. Dostupné z: [http://elektronicka-hudba.telotone.cz/include/articles/syntezeator/04\\_dolni-propust.png](http://elektronicka-hudba.telotone.cz/include/articles/syntezeator/04_dolni-propust.png)

- [8] Dolní propust Sallen-Key: Teorie elektronických obvodů (MTEO), Lab. úloha číslo 9 – teoretická část, Ústav Radioelektroniky, VUT Brno. s. 1-3. Dostupné z: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/MTEO/mteo/09%20dolni%20propust%20Sallen%20Key%20-%20teoreticky%20uvod.pdf>
- [9] Porovnání vlastností přístrojových transformátorů proudu a proudových senzorů: Bakalářská práce, Jiří POPEK, Brno 2010, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně. s. 1-62. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=26561](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=26561)
- [10] Stavba driveru výkonového 4f střídače: diplomová práce, Bc.Lukáš CHALOUPEK, Plzeň 2012, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky. s. 1-68. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/5053/Diplomova%20prace.pdf?sequence=1>
- [11] Hallova sonda: Článek. s. 1-48. Dostupný z: <http://www.peed.cz/file/201102156839.pdf>
- [12] Sériový stabilizátor napětí: Článek. Dostupný z: [http://panwiki.panska.cz/index.php/S%C3%A9riov%C3%BD\\_stabiliz%C3%A1tor\\_nap%C4%9Bt%C3%AD](http://panwiki.panska.cz/index.php/S%C3%A9riov%C3%BD_stabiliz%C3%A1tor_nap%C4%9Bt%C3%AD)
- [13] Metodika návrhu plošných spojů: Skriptum. SEMACH, výroba plošných spojů a SMT osazovacích planžet. s. 1-81. Dostupné z: <http://www.semach.cz/pdf/metodika.pdf>
- [14] LMx58-N Low-Power, Dual-Operational Amplifiers: Datasheet. s. 1-36. Dostupné z: [www.ti.com](http://www.ti.com)
- [15] Polysnap power inlet moduls: Datasheet. s.1. Dostupné z: [www.bulgin.co.uk](http://www.bulgin.co.uk)

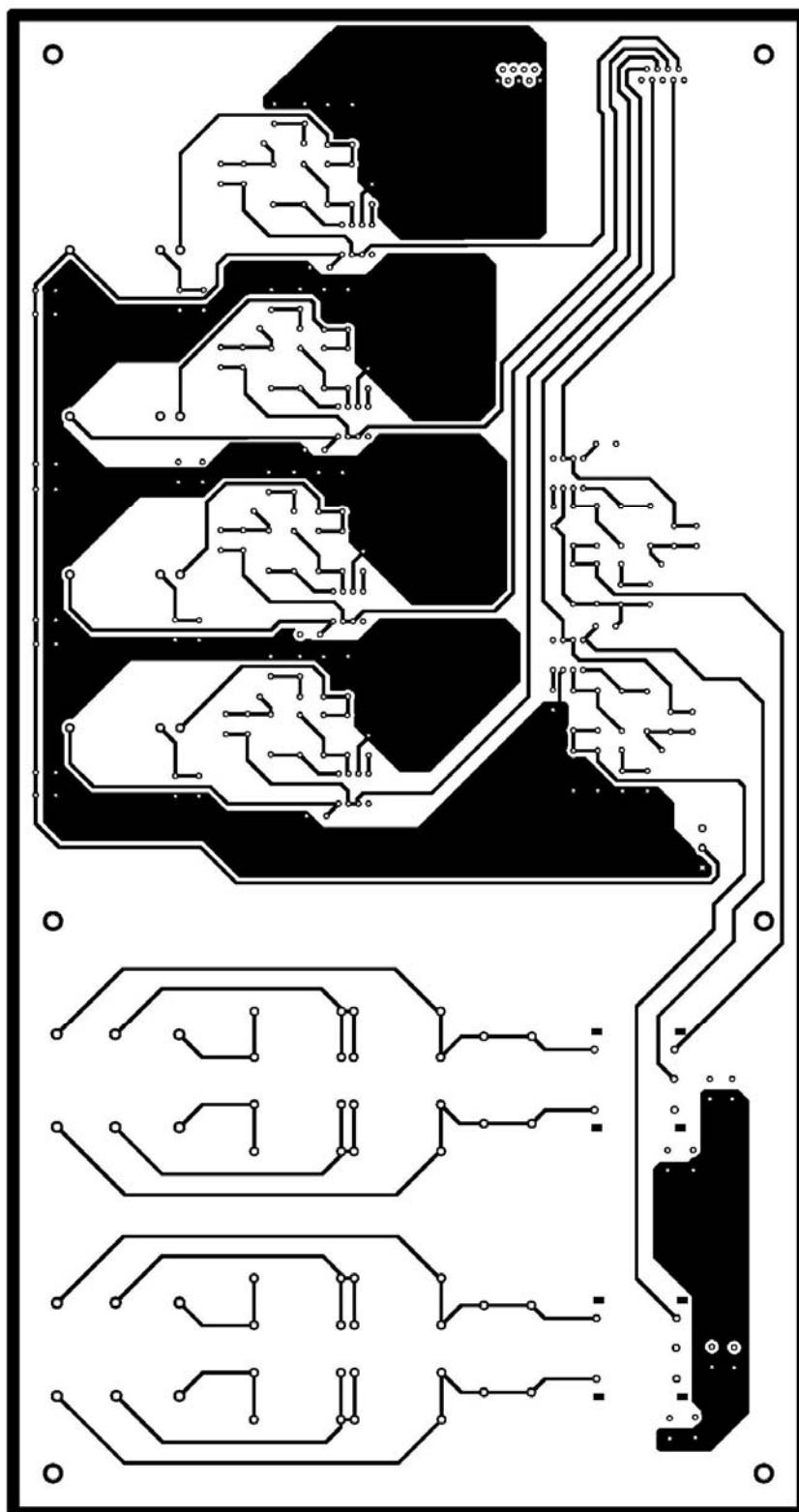
## 7 Přílohy



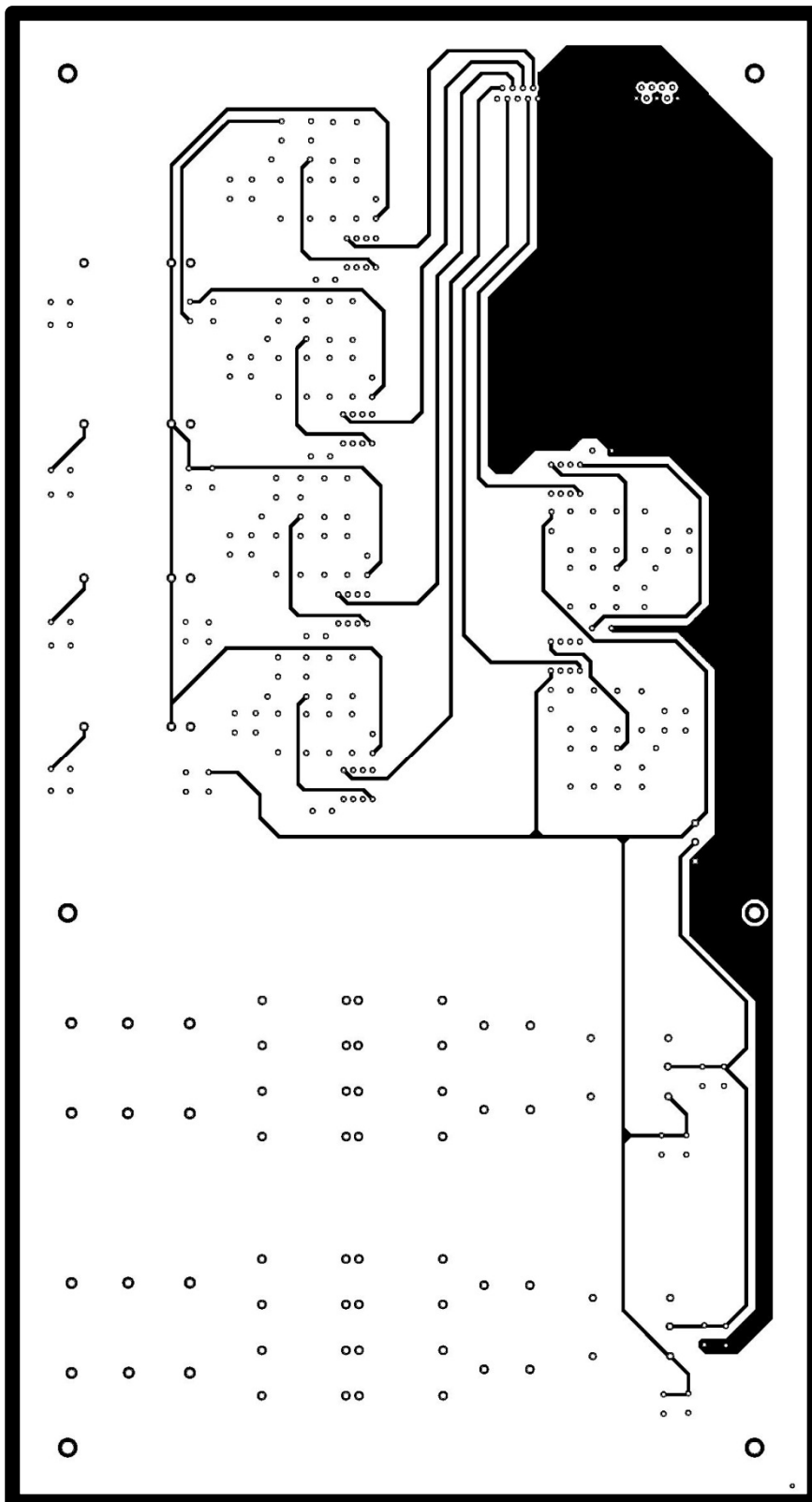
Obrázek 34: Tisk vodivých cest napájecí DPS



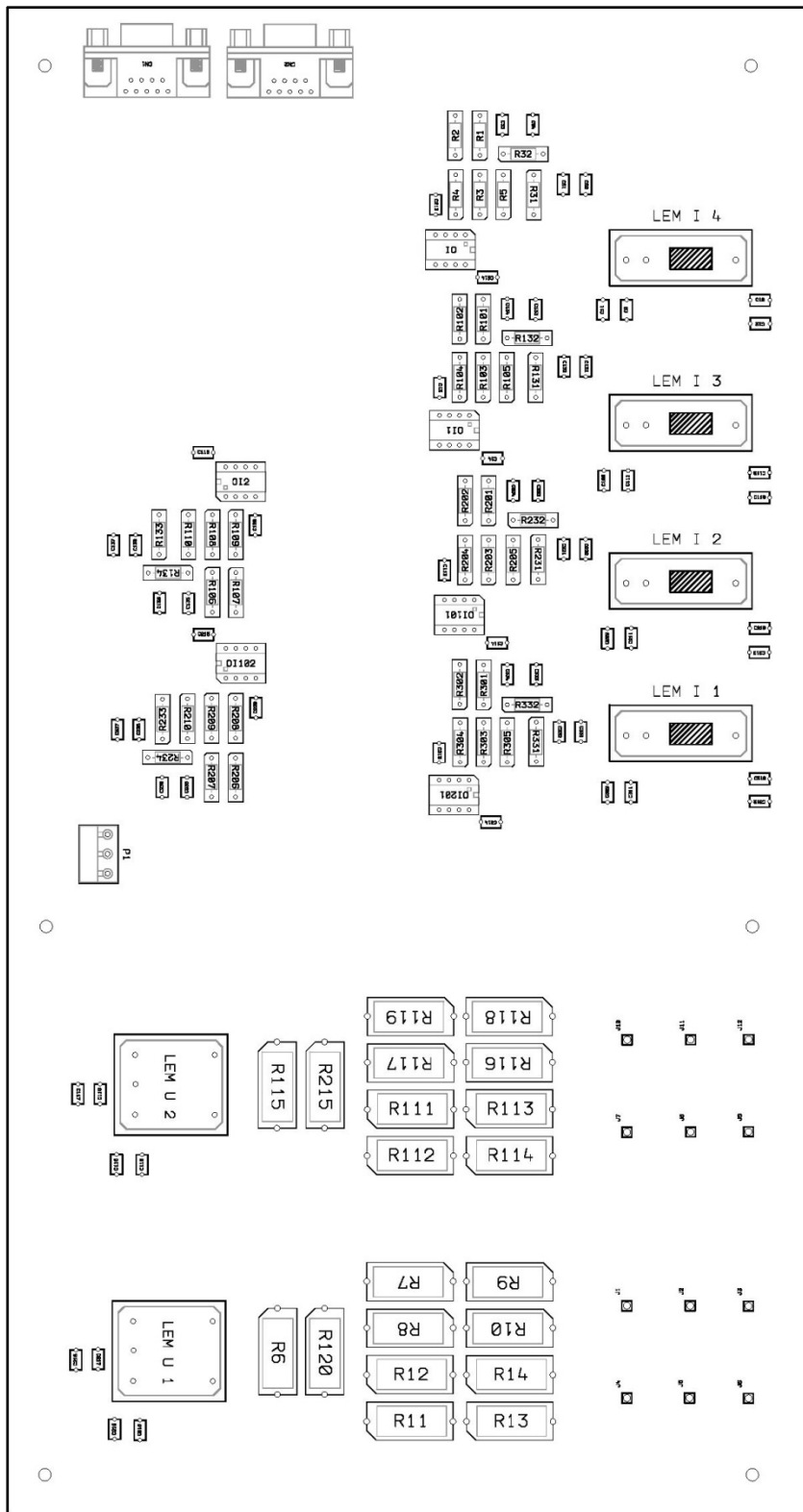
Obrázek 35: Umístění součástek na napájecím DPS



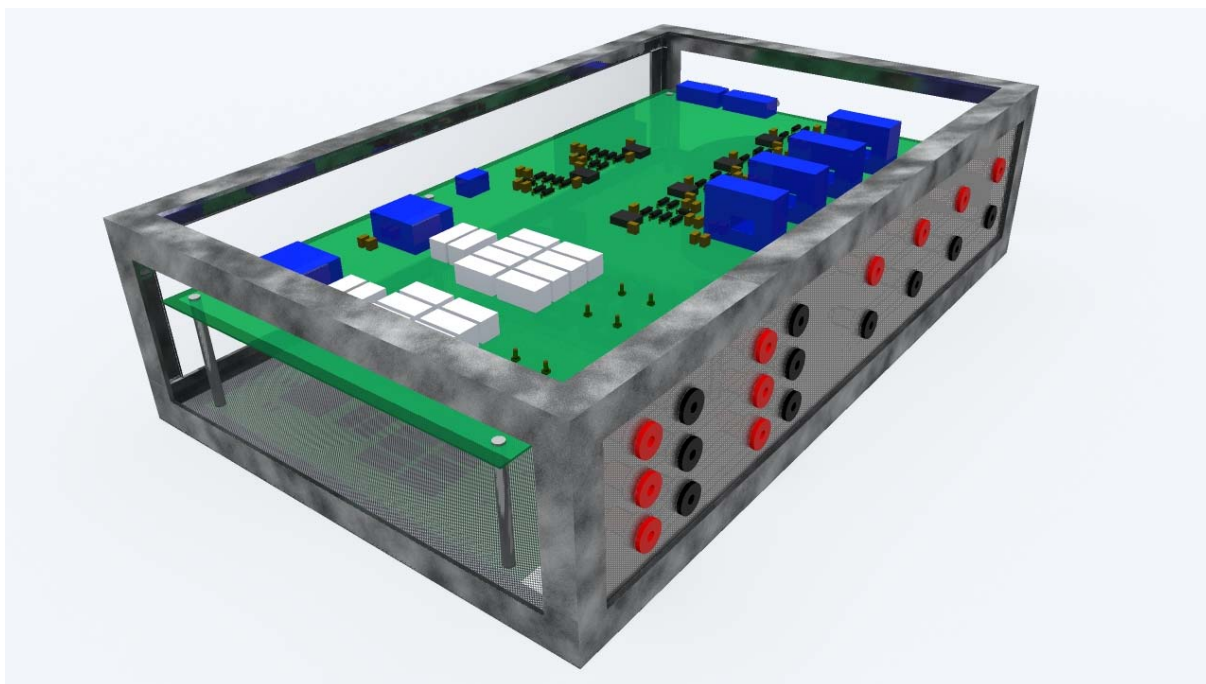
Obrázek 36: Tisk vodivých cest Měřicí DPS vrstva A



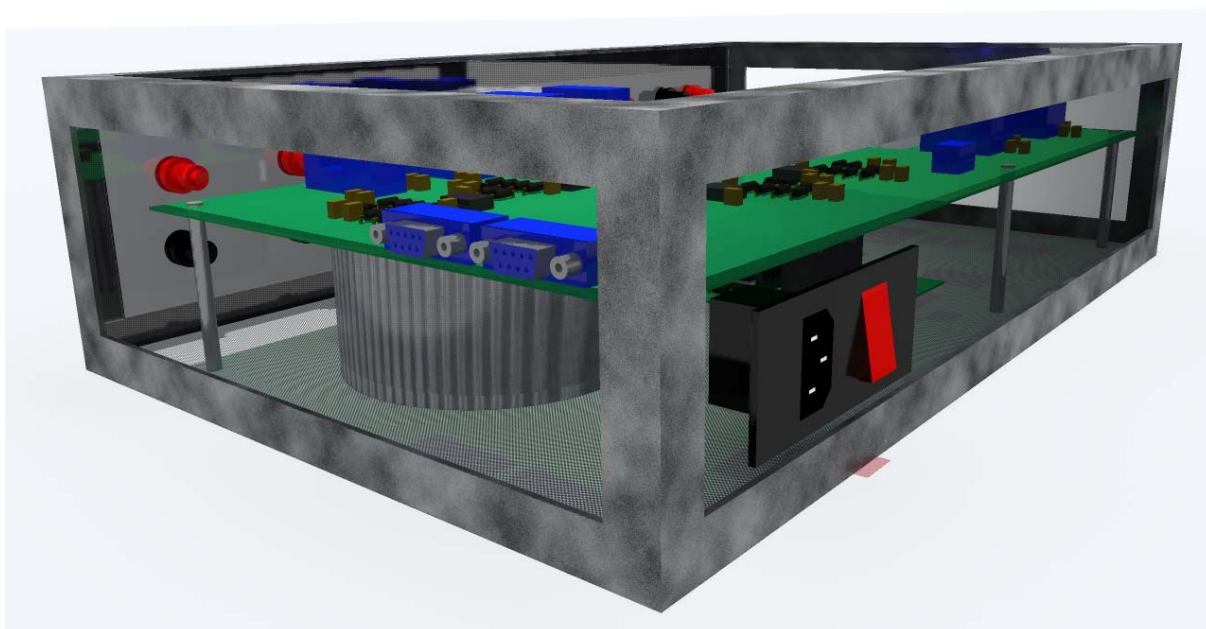
Obrázek 37: Tisk vodivých cest Měřicí DPS vrstva B



Obrazek 38: Umístění součástek na měřící DPS

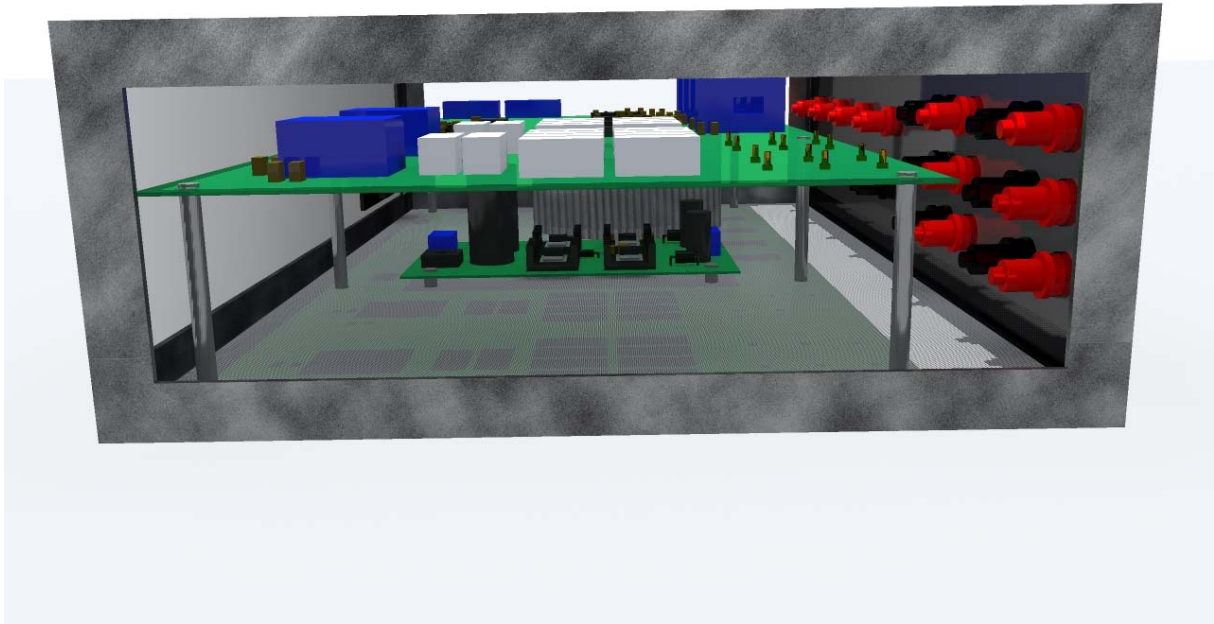


Obrázek 39: 3D model měřicího modulu, pohled 1



Obrázek 40: 3D model měřicího modulu, pohled 2





*Obrázek 41: 3D model měřicího modulu, pohled 3*