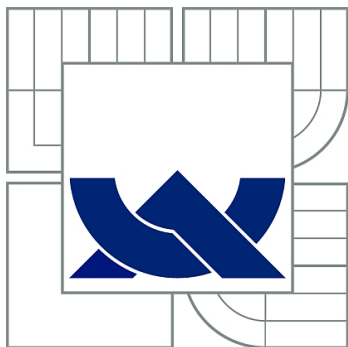
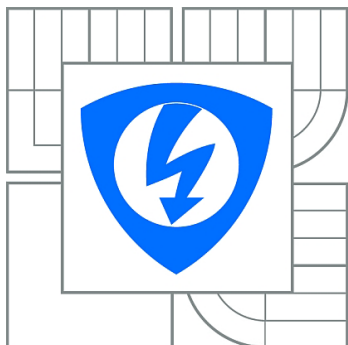




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

PŘESNÝ WATTMETR PRO MĚŘENÍ MĚRNÝCH ZTRÁT VE FEROMAGNETIKÁCH ŘÍZENÝ AVR

ACCURATE WATTMETER FOR MEASURE POWER LOSS IN FEROMAGNETIC CONTROLLED
AVR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MARTIN SMUTNÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. ZDENĚK ROUBAL

BRNO 2013

Originál zadání

Abstrakt

Elektronické wattmetry vynikají svou velmi malou (až zanedbatelnou) vlastní spotřebou. Základní částí těchto přístrojů je násobička – obvod, jehož výstupní napětí je úměrné součinu vstupních napětí. Wattmetr je zařízení, které obsahuje dvojici cívek, z nichž jedna je tzv. proudová cívka a druhá tzv. napěťová cívka. Proudová cívka je zapojena do série s měřeným elektrickým obvodem a napěťová cívka paralelně s měřeným obvodem. Proud protékající skrz proudovou cívku způsobí vytvoření magnetického pole, které je úměrné protékajícímu proudu a jeho fázovému posunu. Elektromagnetická pole obou cívek se navzájem ovlivňují a v případě měření ve stejnosměrném obvodu je výsledná výchylka úměrná jak napětí, tak proudu. Při měřeních ve střídavých obvodech lze elektrický výkon určit pomocí efektivních hodnot proudu a napětí a jejich vzájemného fázového posunu. A magnetickou indukci B lze určit pomocí středních hodnot.

Analogové násobičky jsou obvody, které realizují násobení dvou analogových signálů. Mohou být vytvořeny vhodným zapojením diskrétních součástek (dle požadované funkce). V dnešní době se však z pravidla jedná o integrované obvody, s předem danou funkcí, jejichž vnitřní struktura je tvořena komplexem obvodů s operačními zesilovači a dalšími pomocnými obvody. Tyto obvody se vyznačují vysokou přesností aritmetických operací, která je ve většině případů lepší než 1%. Analogové násobičky se používají v takových případech, kdy je potřeba realizovat násobení, dělení, umocňování, odmocňování a zlogaritmování analogových signálů.

Klíčová slova

Elektronický wattmetr, mikrokontrolér, měření ztrát, magnetická indukce, analogová násobička, násobení, dělení, umocňování, odmocňování, logaritmování

Abstract

Electronic wattmeters excel in very small (up to negligible) own consumption. The basic components of these devices is the multiplier - a circuit whose output voltage is proportional to the product of input voltage. Wattmeter is a device that contains two coils, one of which is the current coil voltage and the second coil. Current coil is connected in series with the measured electrical circuit and the voltage measured parallel to the coil circuit. Current flowing through the coil current causes a magnetic field is proportional to the current flowing through the phase shift and. Electromagnetic fields of both coils influence each other in case of measurements in a DC circuit, the resulting deflection proportional to both voltage and current. When measured in AC electrical power circuits can be determined using the effective values of current and voltage, and their mutual phase shift. A magnetic induction B can be determined using mean values.

An analog multiplier are circuits, that are realized multiplication of two analog signals. They can be made by suitable connection (according to function) discrete parts. Nowadays there are integrated circuits in advance function, whose internal structure is made by complex of circuits with operating amplifiers and other circuits. These circuits have a very high accuracy of arithmetic operation which is mostly better than 1%. The analog multiplier are used in situation, when we need realize multiplication, division, exponentation, square root extraction and logarithmic calculation of analog signals.

Keywords

Electronic wattmeter, microcontroller, measurement of losses, magnetic induction, analog multiplier, multiplication, dividing, exponentation, square root extraction, log ratio computation

SMUTNÝ, M. *Přesný wattmetr pro měření měrných ztrát ve feromagnetikách řízený AVR*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2013. 71 s., 24 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: ing. Zdeněk Roubal

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma PŘESNÝ WATTMETR PRO MĚŘENÍ MĚRNÝCH ZTRÁT VE FEROMAGNETIKÁCH ŘÍZENÝ AVR jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji velice vedoucímu bakalářské práce ing. Zdeňku Roubalovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Obsah

Seznam obrázků a grafů

1	Úvod	1
2	Požadavky:	1
2.1	Námi požadované parametry:	1
2.2	Základní parametry:	1
3	Základní princip wattmetru (měření):	1
4	Koncepce:	2
4.1	Koncepce wattmetru:	2
4.2	Celková výhoda koncepce:	2
4.3	Návrh řešení koncepce:	3
4.4	Úkol magnetických měření:	3
5	Měřící principy v elektrických wattmetrech:	4
5.1	Měření elektrického výkonu	4
5.1.1	Nepřímá metoda	4
5.1.2	Přímá metoda	4
5.2	Měření ztrát	5
6	Měření ztrát vzorku wattmetrem:	5
6.1	Princip (teoretický)	5
6.2	Princip	9
6.3	Postup měření:	9
6.4	Rozdělení ztrát:	10
6.4.1	Rozdělení ztrát měřením při různých kmitočtech	10
6.4.2	Rozdělení ztrát pomocí statické hysterezní smyčky	11
6.5	Chyby měření:	11
6.6	Výsledek měření:	11
7	Popis naší metody (všeobecně):	12
8	Simulace OZ (operačního zesilovače) OPA656:	12
9	Simulace amplitudové a fázové charakteristiky napětového a proudového kanálu:	15
10	Popis jednotlivých bloků:	16
10.1	Generátor	16

10.2	Napájecí zdroj	16
10.3	Napěťový kanál.....	16
10.4	Usměrnění s dolní propustí	17
10.5	Převodník I/U.....	17
10.6	Proudový kanál	17
10.7	Analogová násobička a dolní propust	17
10.8	A/D převodník, mikrokontrolér a displej.....	17
10.8.1	Program pro mikrokontrolér	18
11	Stádium vývoje	25
11.1	Přesnost metody:	27
12	Naměřené průběhy a charakteristiky	27
13	Důležité pojmy a jejich vysvětlení:	32
14	Analogové násobičky:	32
14.1	Násobička s rozdělením proudů (s proměnnou strmostí)	33
14.2	Logaritmické násobičky	34
15	Závěr	35
	Literatura	36
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	37
	Seznam příloh	38

SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

<i>Obr. 1: Principiální zapojení měřící části.</i>	<i>1</i>
<i>Obr. 2: Blokové zapojení měřícího řetězce.</i>	<i>2</i>
<i>Obr. 3: Blokové schéma zapojení.</i>	<i>3</i>
<i>Obr. 4: Nepřímá metoda měření výkonu.</i>	<i>4</i>
<i>Obr. 5: Přímá metoda měření výkonu - příklad zapojení W-metru v el. obvodu.</i>	<i>4</i>
<i>Obr. 6: Měření ztrát wattmetrem na uzavřeném vzorku s jedním vinutím.</i>	<i>5</i>
<i>Obr. 7: Měření ztrát wattmetrem na uzavřeném vzorku s dvojitým vinutím.</i>	<i>6</i>
<i>Obr. 8: Náhradní schéma pro sekundární obvod pro měření ztrát wattmetrem na uzavřeném vzorku s dvojitým vinutím.</i>	<i>6</i>
<i>Obr. 9: Grafické rozdělení ztrát několika měřeními při různých kmitočtech.</i>	<i>11</i>
<i>Obr. 10: Údaje překreslené z katalogového listu obvodu OPA 656.</i>	<i>12</i>
<i>Obr. 11: Zapojení OPA656 se zesílením jedna.</i>	<i>13</i>
<i>Obr. 12: Amplitudová a fázová charakteristika OZ OPA656 pro zesílení 1.</i>	<i>13</i>
<i>Obr. 13: Amplitudová a fázová charakteristika OZ OPA656 pro zesílení 10.</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 14: Amplitudová a fázová charakteristika OZ OPA656 pro zesílení 100.</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 15: Zapojení proudového kanálu pro zesílení x1 x1</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 16: Simulační graf proudového kanálu pro zesílení x1 x1</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 17: Měřící pracoviště s bode analyzátozem - měření napěťového kanálu</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 18: Bližší pohled na měření napěťového kanálu (s otevřenou stínící krabičkou) bode analyzátoru.</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 19: Napěťový kanál - zesílení 1</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 20: Napěťový kanál - zesílení 3</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 21: Napěťový kanál - zesílení 10</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 22: Napěťový kanál - zesílení 30</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 23: Napěťový kanál - zesílení 300</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 24: Napěťový kanál - zesílení 1000</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 25: Proudový kanál - zesílení 1</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 26: Proudový kanál - zesílení 3</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 27: Proudový kanál - zesílení 10</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 28: Proudový kanál - zesílení 30</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 29: Frekvenční charakteristika usměrňovače</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 30: Frekvenční charakteristika usměrňovače - do 50 kHz.</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 31: Přenosová charakteristika usměrňovače na 1kHz</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 32: Frekvenční charakteristiky dolních propustí</i>	<i>31</i>

<i>Obr. 33: Zapojení násobičky AD534 ve funkci násobení.</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 34: Zapojení násobičky MPY634 ve funkci násobení.</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 35: Princip násobičky s rozdělením proudů.</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 36: Zapojení logaritmické násobičky.</i>	<i>34</i>

1 Úvod

Cílem práce je navrhnout a sestavit přesný wattmetr pro měření měrných ztrát ve feromagnetikách řízený AVR, řádově od 10^{-7} W/kg do 10^1 W/kg. Naše aplikace i vlastní měření bude probíhat pouze pro harmonickou magnetickou indukci.

Vzhledem k uvažované koncepci budou systematické chyby wattmetru zanedbatelné, protože bude mít velmi malou vlastní spotřebu.

Navržený wattmetr má oproti třem voltmetrům méně měřících kanálů a jednodušší zapojení.

Bude možnost měření i běžného síťového transformátoru bez jakýchkoli dalších úprav a pouhou záměnou měřící části bude možné v budoucnu měřit dynamické hysterezi křivky.

2 Požadavky:

2.1 Námi požadované parametry:

Aby wattmetr měřil ztráty v železe pro různé druhy magnetických materiálů. Primárně pro feromagnetické materiály jako je křemíková ocel, slitiny železa s niklem a ferity. Je zde potřeba měřit pro více hodnot magnetické indukce a to i pro nízké hodnoty. Toho lze následně využít pro návrh proudových transformátorů.

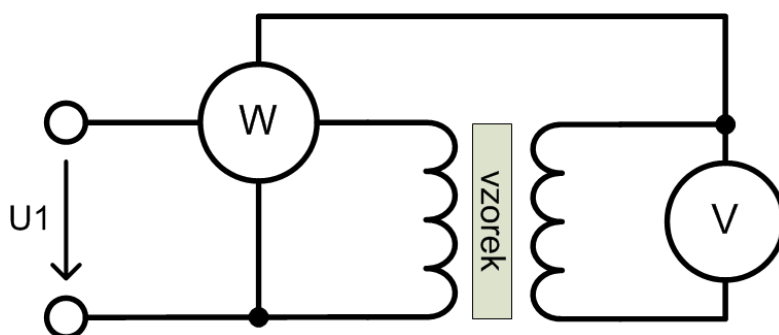
2.2 Základní parametry:

P_W od 10^{-7} W/kg do 10^1 W/kg (měrné ztráty v železe)

f od 10 Hz (možnost měření 16Hz pro lokomotivy) do 50 kHz (ferity pro spínané zdroje)

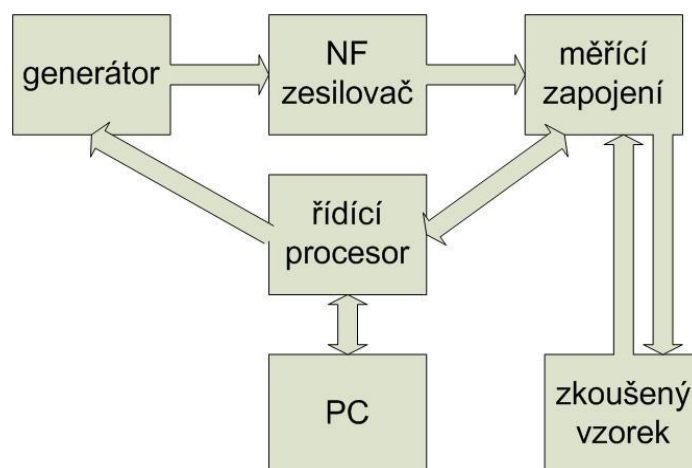
B od 1 mT do 2 T

3 Základní princip wattmetru (měření):



Obr. 1: Principiální zapojení měřící části.

Měřící uspořádání je obdobné jako u Epsteinova přístroje [2]. Plechy se ale nebudou nikam vkládat, nechá se navinout primární vinutí N_1 a sekundární vinutí N_2 na požadované magnetické jádro (toroidní, EI, C, UI, EE, atd.). V daném zapojení by se neměly uplatnit ztráty v primárním vinutí díky měření napětí pro wattmetr na sekundární straně. Díky tomuto zapojení není potřeba korekce, jako například u metody tří voltmetrů.



Obr. 2: Blokové zapojení měřícího řetězce.

4 Koncepce:

- 1) Generátor a nf zesilovač vyvíjen nebude, použije se funkční generátor a běžný nf zesilovač do 50-100 W.
- 2) Začalo by se měřícím zapojením s řídícím procesorem, což by bylo v jedné měřící krabici.
- 3) Pro wattmetr takto extrémních parametrů by se použila analogová násobička.
- 4) Tři mechanické bloky:
 - a) generátor
 - b) nf zesilovač
 - c) měřící část a řídící procesor

4.1 Koncepce wattmetru:

- 1) Použijeme násobičku MPY 634 která splňuje chybu 2 % do 50 kHz a můžeme ji získat zdarma.
- 2) V konečné verzi by byla nahrazena AD 534LDZ s chybou 0,25 % a zapojení zůstává stejné.

proudové rozsahy:

10	μA
100	μA
1	mA
10	mA
100	mA
1	A

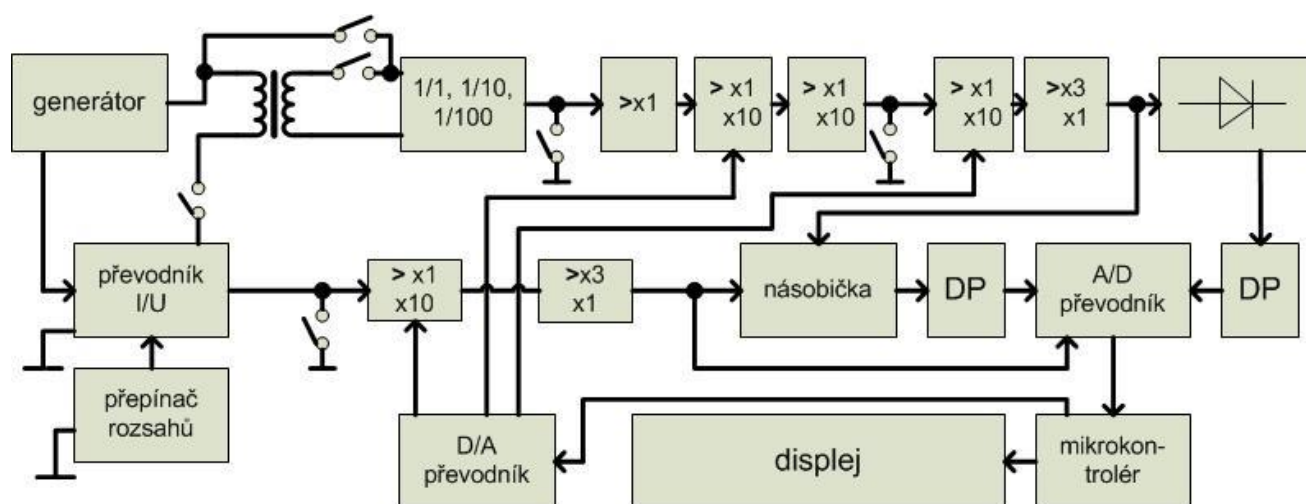
napět'ové rozsahy:

10	mV
100	mV
1	V
10	V
100	V(jen na síťový kmitočet)
1000	V(jen na síťový kmitočet)

- 3) Je nutné vhodně volit napět'ové rozsahy pro násobičku a přesný lineární usměrňovač pro minimální chybu (úroveň řádově 2 V).

4.2 Celková výhoda koncepce:

- 1) oproti třem voltmetrům méně měřících kanálů a jednodušší zapojení
- 2) je možné použít i klasický Epsteinův přístroj se zapojením vinutí
- 3) možnost měření i běžného síťového transformátoru bez jakýchkoli úprav
- 4) pouhou záměnou měřící části je možné v budoucnu měřit dynamické hysterezi křivky



Obr. 3: Blokové schéma zapojení.

4.3 Návrh řešení koncepce:

Vhodný mikrokontrolér, pro naši aplikaci, vzhledem ke svým vlastnostem a počtu vývodů bude mikrokontrolér typu AVR z řady ATmega. Konkrétně typ ATmega16.

Mikrokontrolér AVR ATmega16 bude programován v jazyce C díky své přehlednosti a jednoduchosti tohoto programovacího jazyka.

Jako přepínače rozsahů, abychom dosáhli požadovaných rozsahů, použijeme elektromagnetická relátka.

V zapojení musíme měřit (umístit W-metr) před primární cívkou na horní větví. Pokud bychom totiž měřili na opačné větvi, museli bychom použít lineární optočleny, ale tak bychom nemohli splnit naše požadované parametry.

Lineární optočleny totiž jsou jen do 200 kHz a vzniká na nich pokles o 3 dB, tudíž nám posouvají fázi o 45 stupňů $\Rightarrow$ pro nás nepoužitelné.

Dále jsme pro naše zapojení zvolili operační zesilovač OPA656 díky jeho malému offsetu a velké šířce pásma, který bude zapojen invertovaně, díky čemuž se nám bude lépe kompenzovat napěťový offset. Nastavíme na něm takové napětí, aby kompenzoval offset.

4.4 Úkol magnetických měření:

Úkolem magnetických měření materiálů magneticky měkkých je stanovení důležitých magnetických veličin (měrné ztráty, koercitivní síla, remanence, permeabilita apod., popřípadě jejich změny a závislosti na různých fyzikálních veličinách) při různých podmínkách. Tyto veličiny se zjišťují buď přímým měřením na jednoúčelových přístrojích a nebo se zjišťují z naměřených magnetizačních křivek.

5 Měřicí principy v elektrických wattmetrech:

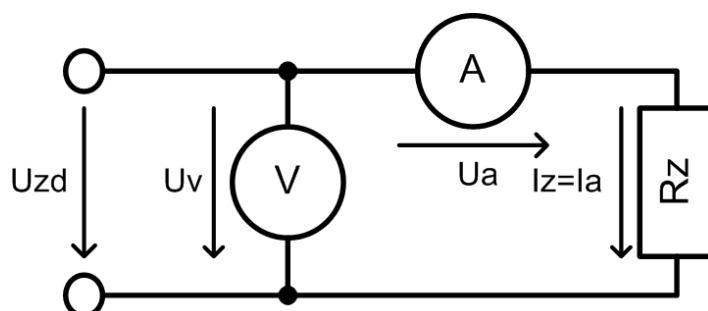
5.1 Měření elektrického výkonu

Výkon na spotřebiči v zapojení el. obvodu se střídavým nebo stejnosměrným zdrojem napětí lze určit pomocí nepřímé nebo přímé metody:

5.1.1 Nepřímá metoda [3],[5]

Napětí se změří voltmetrem a proud, protékající obvodem ampérmetrem. Elektrický výkon stejnosměrného proudu ve spotřebiči se stanoví součinem napětí U_v na spotřebiči a procházejícím proudem I_z .

Tuto metodu lze použít i ve střídavém obvodu, pokud víme, že $\cos \varphi = 1$. (tzn. v el. obvodu je zapojen pouze odporový bezindukční spotřebič).



Obr. 4: Nepřímá metoda měření výkonu.

Měření zdánlivého výkonu ve střídavých obvodech:

Pro měření zdánlivého výkonu se používá nepřímá metoda. Zdánlivý výkon zjistíme z naměřených hodnot proudu a napětí.

Platí vztah: $S = U \cdot I$ [VA, V, A]. (1)

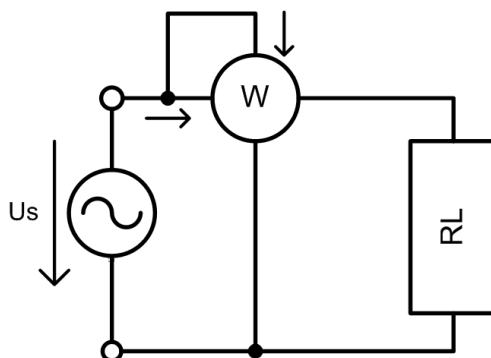
5.1.2 Přímá metoda [5]

Měření činného výkonu:

Pro měření jednofázového činného výkonu spotřebiče napájeného ze střídavého zdroje napětí použijeme wattmetr, zapojený podle obr.5.8.

Wattmetry jsou přístroje, které mají 2 měřicí obvody.

Proudový měřicí obvod (proudová cívka) je zapojen jako ampérmetr a napěťový měřicí obvod (napěťová cívka) jako voltmetr.



Obr. 5: Přímá metoda měření výkonu - příklad zapojení W-metru v el. obvodu.

Při měření výkonu je nutné dát pozor na přetížení wattmetru. Výchylka wattmetru α je úměrná činnému výkonu P :

$$\alpha = P/k_w = (U \cdot I \cdot \cos \phi) / (k_w); \quad (2)$$

k_wkonstanta wattmetru

Výchylka α je tedy úměrná proudu I , napětí U , ale také fázovému posunu ϕ . Wattmetr lze přetížit, aniž by ručička dosáhla maximální výchylky.

Měření jalového výkonu:

Z definice jalového výkonu $Q = U \cdot I \cdot \sin \phi = U \cdot I \cdot \cos(\frac{\pi}{2} - \phi)$ [var, V, A] (3)

vyplývá, že jalový výkon lze měřit přímou metodou pomocí var - metru (W-metru, zapojeného tak, že napětí je posunuto 90°).

Jestliže použijeme nepřímou metodu, potom jalový výkon určíme z trojúhelníku výkonů:

$$U^2 \cdot I^2 = P^2 + Q^2 \Rightarrow Q = \sqrt{U^2 \cdot I^2 - P^2} = \sqrt{(U \cdot I + P) \cdot (U \cdot I - P)}. \quad (4)$$

5.2 Měření ztrát [3],[5]:

Měření ztrát je možno provést několika metodami.

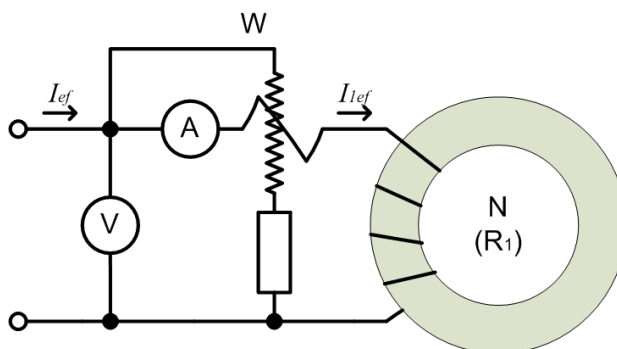
- Např.:
- měření absolutní metodou
 - srovnávací metodou
 - kalorimetrickou metodou
 - měření ztrát vzorku wattmetrem

V našem případě se jedná o měření ztrát vzorku wattmetrem.

6 Měření ztrát vzorku wattmetrem:

6.1 Princip (teoretický) [1]:

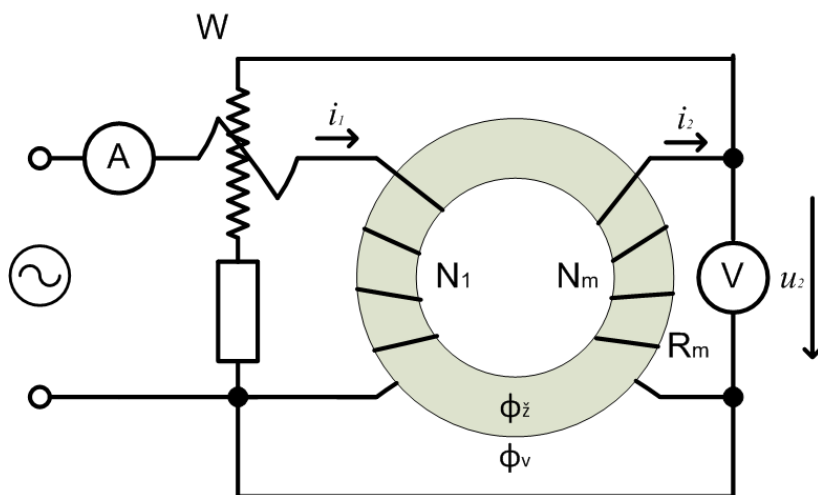
Při nízkých kmitočtech lze měřit ztráty vzorku wattmetrem, který udává výkon odebíraný vzorkem ze zdroje magnetizačního proudu. Nejjednodušší zapojení je podle obr.6, které používá vzorek jen s jedním vinutím. Wattmetr zde udává nejen ztráty vzorku, ale i ztráty v odporu magnetizačního vinutí a část spotřeby měřicích přístrojů.



Obr. 6: Měření ztrát wattmetrem na uzavřeném vzorku s jedním vinutím.

Nevýhodou jednoduchého zapojení podle obr.6 je vliv odporu magnetizačního vinutí R_{mv} . Při výpočtu ztrát lze sice ztráty v odporu R_{mv} vyloučit, ale při výpočtu magnetické indukce z napětí U_{ef} (efektivní hodnota napětí měřeného voltmetrem [V]) nelze vyloučit vliv úbytku napětí na odporu R_{mv} , které se přičítají k měřenému napětí. Toto jednoduché zapojení je proto vhodné jen pro značně rozměrné vzorky, u nichž je vliv úbytků napětí na odporu vinutí poměrně malý. Používá se ho například ke změření ztrát ve feromagnetických obvodech elektrických strojů (měření ztrát naprázdno).

K přesnějšímu měření ztrát a ztrátového čísla feromagnetických vzorků se většinou používá zapojení s dvojím vinutím vzorku podle obr.7. Napěťový obvod wattmetru a voltmetru jsou v tomto zapojení připojeny na měřicí vinutí (sekundární vinutí). Tak lze vyloučit vliv ztrát v magnetizačním vinutí.



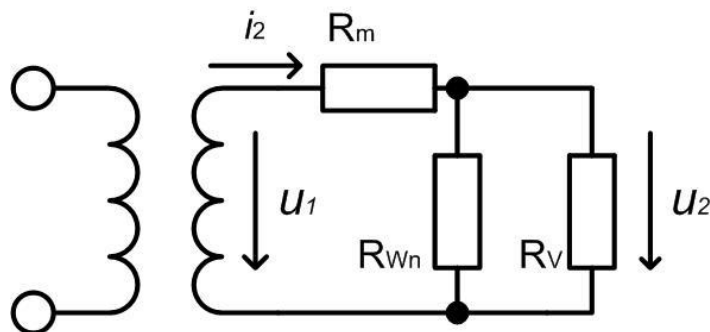
Obr. 7: Měření ztrát wattmetrem na uzavřeném vzorku s dvojím vinutím.

Při střídavém proudu a napětí s dobou periody T udává wattmetr hodnotu

$$P' = \frac{1}{T} \int_0^T u_2 i_1 dt , \quad (5)$$

kde u_2 je okamžitá hodnota napětí na napěťovém obvodu wattmetru,
 i_1 je okamžitá hodnota proudu proudové cívky.

V zapojení podle obr.7 je napětí u_2 dáno napětím u_1 , indukovaným v měřicím vinutí střídavým tokem, které je zmenšeno o úbytek napětí na odporu vinutí R_m . Jak je viditelné z náhradního schématu v obr.8,



Obr. 8: Náhradní schéma pro sekundární obvod pro měření ztrát wattmetrem na uzavřeném vzorku s dvojím vinutím.

platí:
$$u_2 = u_1 - R_m i_2 = u_1 \frac{R'}{R' + R_m} = N_m \frac{R'}{R' + R_m} \left(\frac{d\Phi_{zt}}{dt} + \frac{d\Phi_{vt}}{dt} \right) =$$

$$= N_m \frac{R'}{R' + R_m} \left[S_z \frac{dB_{zt}}{dt} + \mu_0 (S_0 - S_z) \frac{dH_{zt}}{dt} \right], \quad (6)$$

kde R_m je odpor měřicího vinutí [Ω],

R' výsledný odpor paralelně spojených přístrojů připojených na měřicí vinutí (voltmetr a napěťový obvod wattmetru) [Ω],

N_m počet závitů měřicího vinutí,

S_z průřez vzorku [m^2],

S_m plocha závitu měřicího vinutí [m^2],

B_{zt} okamžitá hodnota indukce vzorku (průměr z celého průřezu vzorku) [T],

H_{zt} okamžitá hodnota intenzity pole na povrchu vzorku [A/m],

φ_{zt} okamžitá hodnota toku vzorku; $\varphi_{zt} = S_z B_z$; [Wb],

φ_{vt} okamžitá hodnota toku vzduchem obepínaného měřicím vinutím, tj.

okamžitá hodnota toku procházejícího plochou $S_m - S_z$;

$\varphi_{vt} = (S_m - S_z) \mu_0 H_{zt}$ [Wb].

U uzavřeného vzorku je okamžitá hodnota intenzity pole H_{zt} dána okamžitými hodnotami proudů obou vinutí i_1 a i_2 . Indukovaný proud i_2 působí proti účinkům magnetizačního proudu i_1 . Platí tedy:

$$H_{zt} = \frac{N_1 i_1 - N_m i_2}{l_s}, \quad (7)$$

kde N_1 je počet závitů magnetizačního vinutí,

i_1 okamžitá hodnota magnetizačního proudu [A],

i_2 okamžitá hodnota proudu v měřicím vinutí [A],

l_s střední délka vzorku [m].

Proud i_1 lze vyjádřit intenzitou pole H_{zt}

$$i_1 = \frac{l_s}{N_1} H_{zt} + \frac{N_m}{N_1} i_2. \quad (8)$$

Vztah (8) dosadíme do vztahu (5)

$$P' = \frac{1}{T} \int_0^T u_2 i_1 dt = \frac{l_s}{N_1} \frac{1}{T} \int_0^T u_2 H_{zt} dt + \frac{N_m}{N_1} \frac{1}{T} \int_0^T u_2 i_2 dt. \quad (9)$$

Do prvního členu na pravé straně rovnice dosadíme za napětí u_2 výraz (6)

$$P' = \frac{N_m}{N_1} \frac{R'}{R' + R_m} \left[l_s S_z \frac{1}{T} \int_0^T H_{zt} \frac{dB_{zt}}{dt} dt + \mu_0 l_s (S_m - S_z) \frac{1}{T} \int_0^T H_{zt} \frac{dH_{zt}}{dt} dt \right] + \frac{N_m}{N_1} \frac{1}{T} \int_0^T u_2 i_2 dt \quad (10)$$

První člen v hranaté závorce na pravé straně rovnice je roven ztrátám vzorku P_z , protože platí

$$P_z = l_s S_z \frac{1}{T} \int_0^T H_{zt} \frac{dB_{zt}}{dt} dt = V_z f \oint H_z dB_z, \quad (11)$$

kde $V_z = l_s S_z$ je objem vzorku [m^3],

$f = 1/T$ kmitočet magnetizačního proudu [Hz].

Druhý člen v hranaté závorce je roven nule, jelikož platí

$$\int_0^T H_{zt} \frac{dH_{zt}}{dt} dt = \int_{H_{z0}}^{H_{zT}=H_{z0}} H_{zt} dH_{zt} = 0 \quad (12)$$

(pro okamžik $t=0$ i pro okamžik $t=T$ je intenzita pole stejná, $H_{zT} = H_{z0}$).

Tento člen je dán tokem vzduchem φ_{vt} . Je zřejmé, že tok vzduchem φ_{vt} nemá vliv na údaj wattmetru (má však vliv na údaj voltmetru V , tj. způsobí chybu při určování indukce výpočtem z indukovaného napětí).

Třetí člen na pravé straně rovnice znamená tedy spotřebu přístrojů připojených na měřicí vinutí, které odebírají proud i_2 při napětí u_2 .

$$\frac{N_m}{N_1} \frac{1}{T} \int_0^T u_2 i_2 dt = \frac{N_m}{N_1} P_{pr} = \frac{N_m}{N_1} \frac{U_{2ef}^2}{R'} \quad (13)$$

Vyjádříme-li spotřebu přístrojů P_{pr} jejich odporem R' a napětím U_{2ef} , platí

$$P' = \frac{N_m}{N_1} \left[\frac{R'}{R' + R_m} P_z + \frac{U_{2ef}^2}{R'} \right] \quad (14)$$

a ZTRÁTY VZORKU stanovíme podle VZTAHU:

$$P_z = \left[\frac{N_1}{N_m} P' - \frac{U_{2ef}^2}{R'} \right] \frac{R' + R_m}{R'}, \quad (15)$$

kde P' je údaj wattmetru [W],
 N_1 počet závitů magnetizačního vinutí,
 N_m počet závitů měřicího vinutí,
 U_{2ef} efektivní hodnota napětí měřicího vinutí (změřená voltmetrem V) [V],
 R' výsledný odpor přístrojů měřicích vinutí;

pro zapojení podle obr.8 je $R' = R_{wn} R_v / (R_v + R_{wn})$, kde R_v je odpor voltmetru a R_{wn} je odpor napěťového obvodu wattmetru, [Ω],

R_m odpor měřicího vinutí [Ω].

Když se voltmetr po změření napětí vypne – nezůstane zařazen při měření ztrát, počítá se jen s odporem napěťového obvodu wattmetru, $R' = R_{wn}$.

Pokud je odpor R_m zanedbatelný proti R' , můžeme použít zjednodušený vztah

$$P_z = \frac{N_1}{N_m} P' - \frac{U_{2ef}^2}{R'}. \quad (16)$$

Ze vztahů (15) a (16) je zřejmé, že změnou (zvětšováním/zmenšováním) poměru počtu závitů N_m / N_1 lze měnit (zvětšovat/zmenšovat) výchylku wattmetru. To znamená, že např. zvětšením počtu měřicích závitů N_m lze dosáhnout zřetelné výchylky wattmetru při měření malých vzorků s malými ztrátami P_z . Toto zvětšování ovšem má své hranice.

Se zvětšováním počtu závitů N_m se zvyšuje i napětí U_{2ef} a zvětšuje se spotřeba přístrojů $P_{pr} = U_{2ef}^2 / R'$. Pokud je $U_{2ef}^2 / R' \approx N_1 P' / N_m$, je měření velmi nepřesné, protože měřená veličina je dána malým rozdílem dvou přibližně stejných veličin.

6.2 Princip [1]:

Při menších nárocích na přesnost kmitočtu a tvaru křivky lze použít napájení ze sítě. Pokud ale chceme dosáhnout přibližně sinusového průběhu indukce, musí mít zdroj co nejmenší vnitřní odpor. Proto nelze k nastavení napětí použít regulační odpory. Musí se použít regulační transformátor s malým vnitřním odporem.

Pokud měření bude probíhat pro kmitočty odlišné od síťových kmitočtů nebo pokud je potřeba přesně nastavovat kmitočet a dodržet přesně sinusový tvar křivky, je vhodné použít synchronní generátor, u kterého lze měnit kmitočet změnou počtu otáček motoru a napětí měnit změnou buzení. Takový generátor musí být dimenzován na jednofázové zatížení a na výkon značně větší, než je velikost zdánlivého příkonu vzorku. – Tato podmínka je nutná proto, aby nesinusový magnetizační proud vzorku nezkreslil tvar křivky napětí generátoru.

Malý odpor musí mít i magnetizační vinutí a všechny přístroje, jimiž prochází magnetizační proud.

Aby se plně využilo citlivosti wattmetru, musí být vhodně zvoleny počty závitů obou vinutí vzorku N_1 a N_m tak, aby proud I_{2ef} odpovídaly rozsahům wattmetru.

K měření napětí se použije přesný voltmetr, který bude měřit střední hodnotu napětí, která je potřeba k určení indukce.

6.3 Postup měření:

Naše aplikace i vlastní měření bude probíhat pouze pro harmonickou magnetickou indukci. Ztráty se měří při předem zvolených hodnotách indukce B_{zm} (max. hodnoty). Indukce se stanoví z údaje voltmetru, který měří střední hodnotu napětí U_{2s} . Pro zvolenou indukci B_{zm} se vypočítá příslušné napětí U_{2s} [1].

$$U_{2s} = 4fN_mS_zB_{zm} \quad [V], \quad (17)$$

kde f je kmitočet [Hz],
 N_m počet závitů měřicího vinutí,
 S_z průřez vzorku [m²],
 B_{zm} maximální hodnota (amplituda) indukce [T].

Pokud není vliv odporu měřicího vinutí zanedbatelný, vzorec se nám trochu pozmění a napětí U_{2s} se počítá podle vztahu

$$U_{2s} = 4fN_mS_zB_{zm} \frac{R'}{R' + R_m} \quad [V], \quad (18)$$

kde R_m je odpor měřicího vinutí [Ω],
 R' výsledný odpor přístrojů připojených na měřicí vinutí (voltmetr a napěťový obvod wattmetru) [Ω].

Je-li zaručeno, že průběh indukce je dostatečně blízký sinusovce, stačí pouze jeden voltmetr, udávající efektivní hodnotu napětí U_{2ef} . A jelikož to v našem případě je zaručeno, postačí nám pouze jeden voltmetr měřící efektivní hodnotu. Požadovaná indukce B_{zm} je potom dána vztahem U_{2ef} dle vztahu

$$U_{2ef} = 4,44fN_mS_zB_{zm} \quad [V] \quad (19)$$

popř.

$$U_{2ef} = 4,44fN_mS_zB_{zm} \frac{R'}{R' + R_m} \quad [V] \quad (20)$$

Z těchto dvou vztahů si poté můžeme vypočíst B .

Napětí U_{2ef} (popř. U_{2s}) se nastaví nejprve přibližně při zkratované proudové cívce wattmetru. V proudové části obvodu se poté nastaví vhodný proudový rozsah wattmetru. Je výhodné voltmetr před čtením výsledku z wattmetru odpojit. Neuplatní se pak totiž jeho spotřeba. Po přečtení údaje wattmetru se voltmetr opět připojí, aby se zjistilo, zda se během měření nezměnilo napětí. Taktéž se kontroluje kmitočet před měřením a i po něm.

Ze změřených ztrát vzorku se určí ztrátové číslo pro danou hmotu vzorku m_z .

$$Z = \frac{P_z}{m_z} [\text{W/kg}] \quad (21)$$

Před měřením ztrát není povětšinou potřeba vzorek odmagnetovat, pokud se ovšem neměří při malých indukcích (menších než několik desetin T), což v našem případě se jedná i o měření velmi malých indukcí (měřicí rozsah od 1 mT).

K tomu abychom v našem zapojení zjistili napětí na vstupu a výstupu slouží úplně vrchní spínač (hned za cívkou) – viz Obr.3. Z toho následně lze zjistit poměr vinutí neznámého transformátoru.

Offset v našem zapojení budeme kompenzovat pomocí elektromagnetických relé. A jednotlivé bloky budeme ve třech krocích nulovat pomocí D/A převodníku. A to tak, že změříme výstupní napětí pomocí A/D převodníku a poté budeme měnit napětí na výstupu D/A převodníku dokud nedosáhneme nuly na vstupu A/D převodníku.

Kompenzace offsetu se uskuteční pomocí operačního zesilovače OPA656, který má malý vlastní offset.

6.4 Rozdělení ztrát:

Někdy je třeba ztráty dělit na hysterezní ztráty P_h ztráty a ztráty vířivými proudy P_v . Třeba pokud je zapotřebí přepočítat ztráty měřené při nesinusovém průběhu na ztráty při sinusovém průběhu indukce. Rozdělení ztrát je také užitečné pro vývoj nových druhů materiálů, protože umožňuje zjistit příčiny ztrát a nalézt způsoby k jejich zmenšení. Rozdělením ztrát lze například zjistit, zda nadměrné zvýšení ztrát je způsobeno nevhodným a znehodnoceným materiálem (příznakem jsou zvýšené hysterezní ztráty) nebo špatnou montáží jádra (zde jsou zvýšené ztráty vířivými proudy – následkem nedokonalé izolace a zkratů).[1]

Ztráty lze tedy rozdělit několika způsoby:

- Měřením při různých kmitočtech
- Měřením při různých tvarech křivky
- Pomocí statické hysterezní smyčky

-Toto je starší dělení. Od té doby přibýly další poznatky ohledně ztrát a tak je možné dělit ztráty třeba na ztráty:

- hysterezní
- vířivými proudy
- přídatné (anomálií vířivých proudů, ...)

6.4.1 **Rozdělení ztrát měřením při různých kmitočtech**

Pokud se málo uplatňuje povrchový jev, platí

$$P_z = P_h + P_v = af + bf^2 . \quad (22)$$

Energie spotřebovaná během jedné periody (jeden magnetizační cyklus) je

$$W_z = \frac{P_z}{f} = a + bf . \quad (23)$$

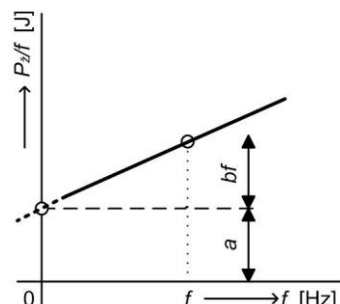
Rovnice $W_z = f(f)$ je rovnice přímky, která na ose W_z vytíná úsek a – viz Obr.9: Grafické rozdělení ztrát několika měřeními při různých kmitočtech. Tuto přímku můžeme sestavit, pokud změříme ztráty P_z pro několik různých kmitočtů, ovšem při stejné maximální indukci B_{zm} , a vypočítáme příslušné hodnoty $W_z = P_z / f$. K sestavení přímky logicky stačí dva body, ale pro zvýšení přesnosti se zjišťují alespoň tři až čtyři body pro tři až čtyři různé kmitočty [1].

Změříme-li v grafu podle Obr. 9 úsek a [J], udávající nám ztracenou energii při jednom magnetizačním cyklu, lze stanovit *hysterezní* ztráty pro kmitočet f

$$P_h = af \quad [W; J, Hz] \quad (24)$$

a ztráty vířivými proudy

$$P_v = P_z - af \quad [W; W, J, Hz]. \quad (25)$$



Všechny body přímky $W_z = f(f)$ se musí měřit buď při sinusovém průběhu indukce, nebo při sinusovém průběhu intenzity pole. V prvním případě jsou odpory obvodu magnetizačního proudu tak malé, že úbytky napětí, které na nich vznikají, jsou zanedbatelné i při nejnižším kmitočtu. V druhém případě jsou odpory a přídavné impedance obvodu tak velké, že úbytky napětí, které na nich vznikají, jsou i při nejvyšším kmitočtu značně větší než napětí indukované tokem vzorku [1].

Obr. 9: Grafické rozdělení ztrát několika měřeními při různých kmitočtech.

6.4.2 Rozdělení ztrát pomocí statické hysterezní smyčky [1]

Pokud známe plochu statické hysterezní smyčky, můžeme určit hysterezní ztráty podle vztahu

$$P_h = V_z f S_{h0} \quad [W; m^3, Hz, J/m^3], \quad (26)$$

kde V_z je objem vzorku,

f kmitočet,

S_{h0} plocha statické hysterezní smyčky, vyjádřená v jednotkách $[J/m^3]$

Statická hysterezní smyčka se změří při stejnosměrném magnetování. Musí se ovšem měřit pro indukci vrcholu B_{zm} , odpovídající maximální hodnotě indukce při střídavém magnetování.

Tento způsob je skrze své pracné měření statické hysterezní smyčky a možnost zkreslení výsledku samovolnými změnami indukce málo vhodný.

6.5 Chyby měření:

Chyby mohou vznikat nesprávnou úpravou vzorku či měřením při nesprávné indukci, kmitočtu a tvaru křivky nebo wattmetrem.

Vzhledem k naší koncepci budou chyby wattmetru zanedbatelné, protože bude mít velmi malou vlastní spotřebu.

6.6 Výsledek měření:

Výsledkem měření je údaj wattmetru-úměrný ztrátám měřeného vzorku.

7 Popis naší metody (všeobecně):

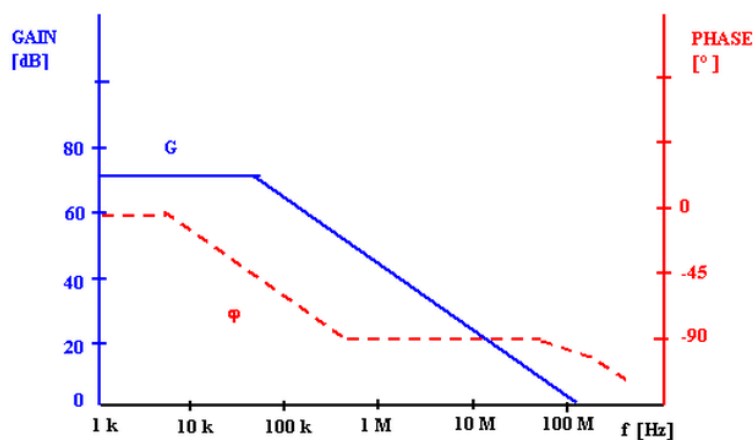
Ztráty se měří zapojením wattmetru podobně jako u Epsteinova přístroje. A to tím způsobem, že proudová cívka wattmetru se zapojí do magnetizačního obvodu a napěťová cívka na měřené vinutí.

Rozsahy wattmetru jsou voleny podle velikosti měřeného jádra.

Napěťový kanál připojený na měrné vinutí nám dává sinusový průběh o jisté amplitudě. Dále je signál přiveden na analogovou násobičku. Obdobně je to s napěťovým kanálem. Signál jde přes převodník I/U, kde je převeden proud na napětí, dále násoben na blocích napěťového kanálu a dále vstupuje do násobičky. Z té pokračuje signál přes dolní propust na A/D převodník, zde se schází se signálem z napěťového kanálu, který je usměrněn na stejnosměrnou hodnotu odpovídající dané frekvenci a amplitudě a filtrován dolní propustí odladěnou na 5 Hz. Obě tyto hodnoty jsou poté přivedeny do mikrokontroléru ATmega16 a je zobrazen výsledek analogové násobičky jako ztrátový výkon a ze stejnosměrné hodnoty z napěťového kanálu nám pomocí vzorce (17), kde je počet závitů vynutí pevný a hodnota průřezu vzorku a kmitočet je měnnou konstantou, tak se vypočte velikost magnetické indukce a obě hodnoty zobrazí na displej.

Jednotky pro zobrazené jednotky zjistíme pomocí dekodérů, na které jsou přivedeny zesilovací členy a podle informace o sepnutých zesíleních zjistíme rozsah.

8 Simulace OZ (operačního zesilovače) OPA656:

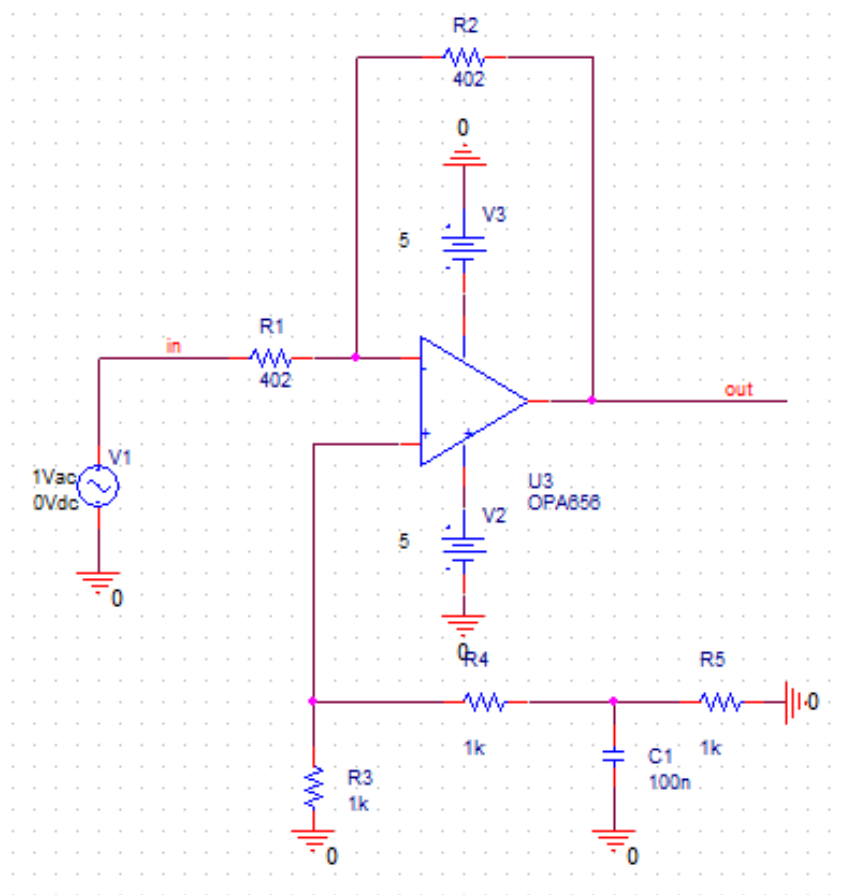


Obr. 10: Údaje překreslené z katalogového listu obvodu OPA 656

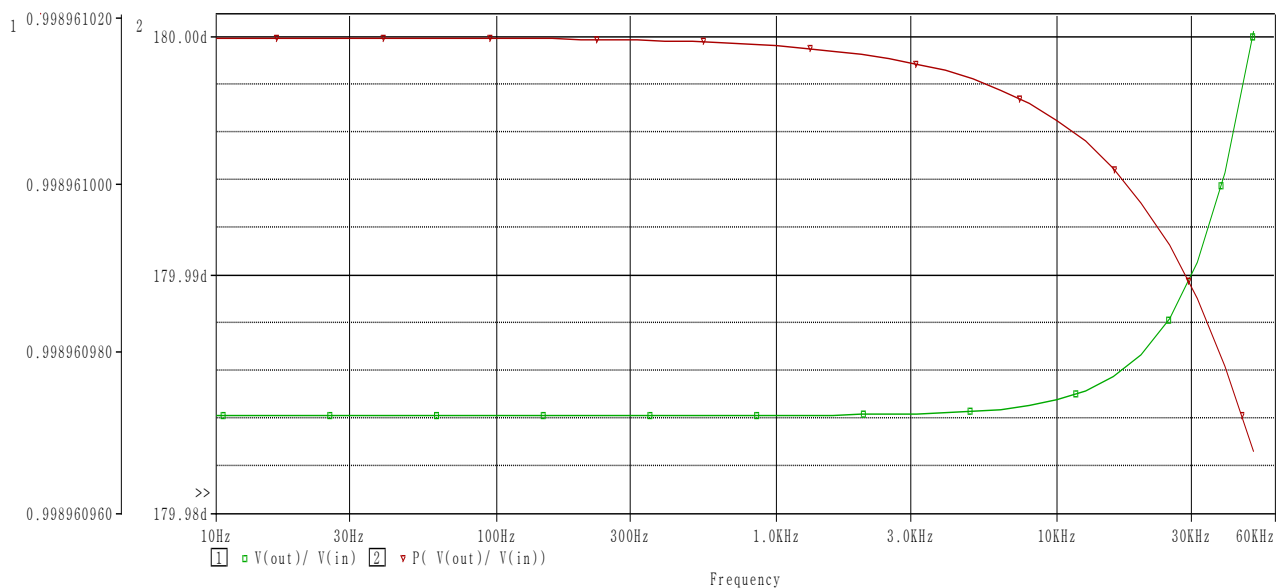
Amplitudová a fázová charakteristika OZ OPA656 pro zesílení 1, 10, 100

Amplitudová char.: $V(\text{out})/V(\text{in})$ – zelená křivka

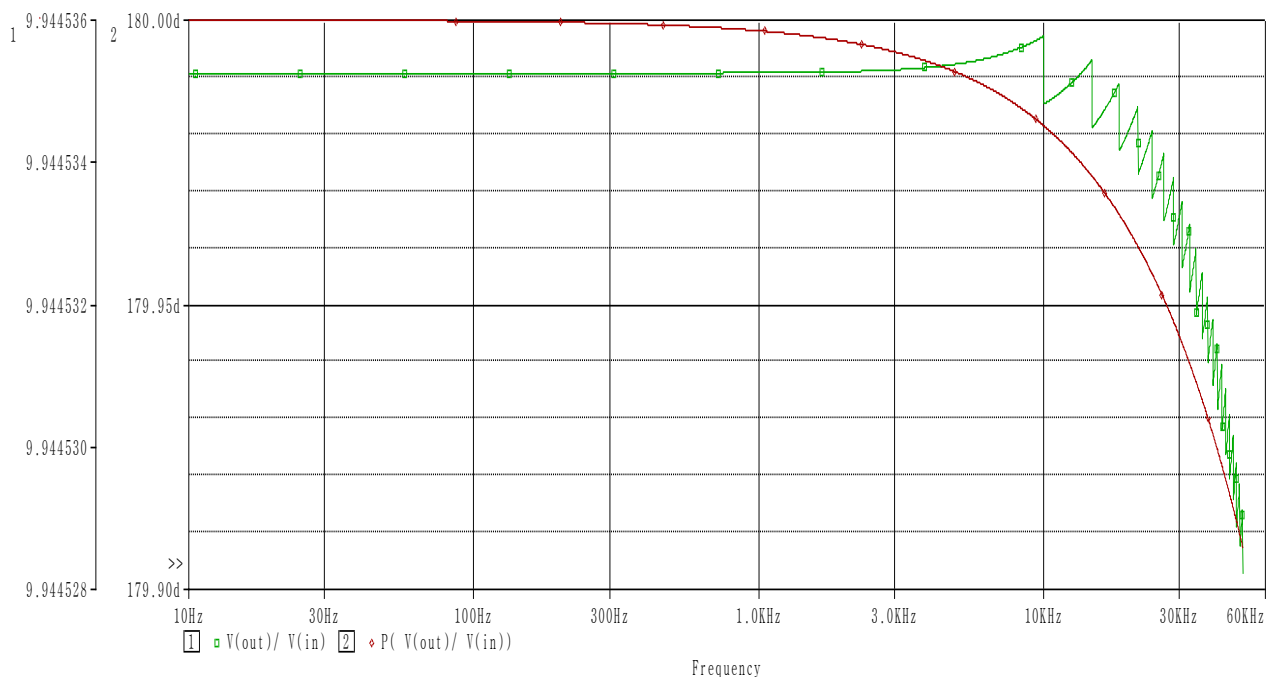
Fázová char.: $P(V(\text{out})/V(\text{in}))$ – červená křivka



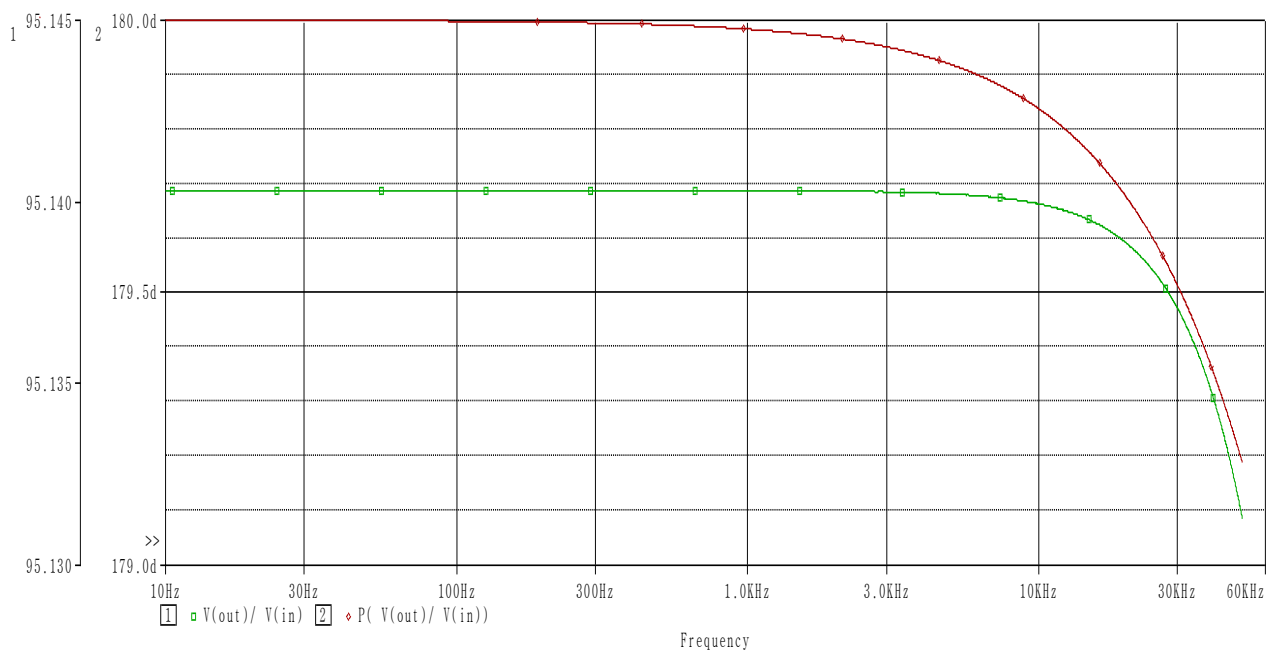
Obr. 11: Zapojení OPA656 se zesílením jedna



Obr. 12: Amplitudová a fázová charakteristika OZ OPA656 pro zesílení 1.



Obr. 13: Amplitudová a fázová charakteristika OZ OPA656 pro zesílení 10.



Obr. 14: Amplitudová a fázová charakteristika OZ OPA656 pro zesílení 100.

Zesílení není přesně 10 a 100, ale o něco málo nižší. Přesnější hodnoty zesílení (tudiž většího zesílení) dosáhneme snížením hodnot odporů $R1$ a $R2$ – ve stejném poměru.

9 Simulace amplitudové a fázové charakteristiky napětového a proudového kanálu:

Pro oba kanály se jedná o sériové řazení invertujících zesilovačů. Kdy v proudovém kanálu jsou dva, v napětovém čtyři.

Jde nám o to, při jaké frekvenci překročí danou mez 20 minut (0,33 stupně) – pro splnění přesnosti, a zjistit jaký je fázový posun na 50 Hz.

Napětový kanál, bez uvažování sledovače na vstupu, pro zesílení:

x1 x1 x1 x1; x1 x1 x1 x3; x10 x1 x1 x1; x10 x1 x1 x3;
x10 x10 x1 x1; x10 x10 x1 x3; x10 x10 x10 x1; x10 x10 x10 x3

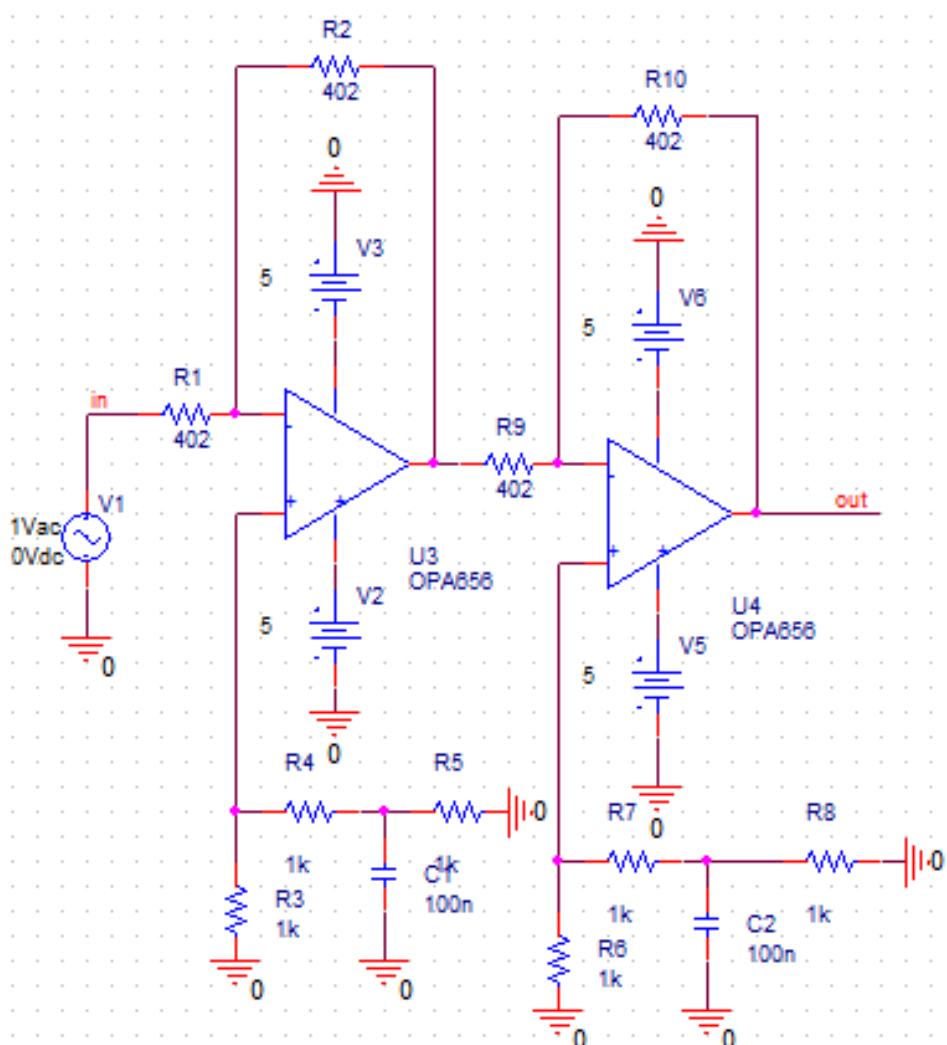
ERROR -- EVALUATION VERSION analog Node Limit (64 Nodes) Exceeded!

(-Studentská verze PSpice umožňuje simulovat schéma pouze pro omezený počet uzlů.)

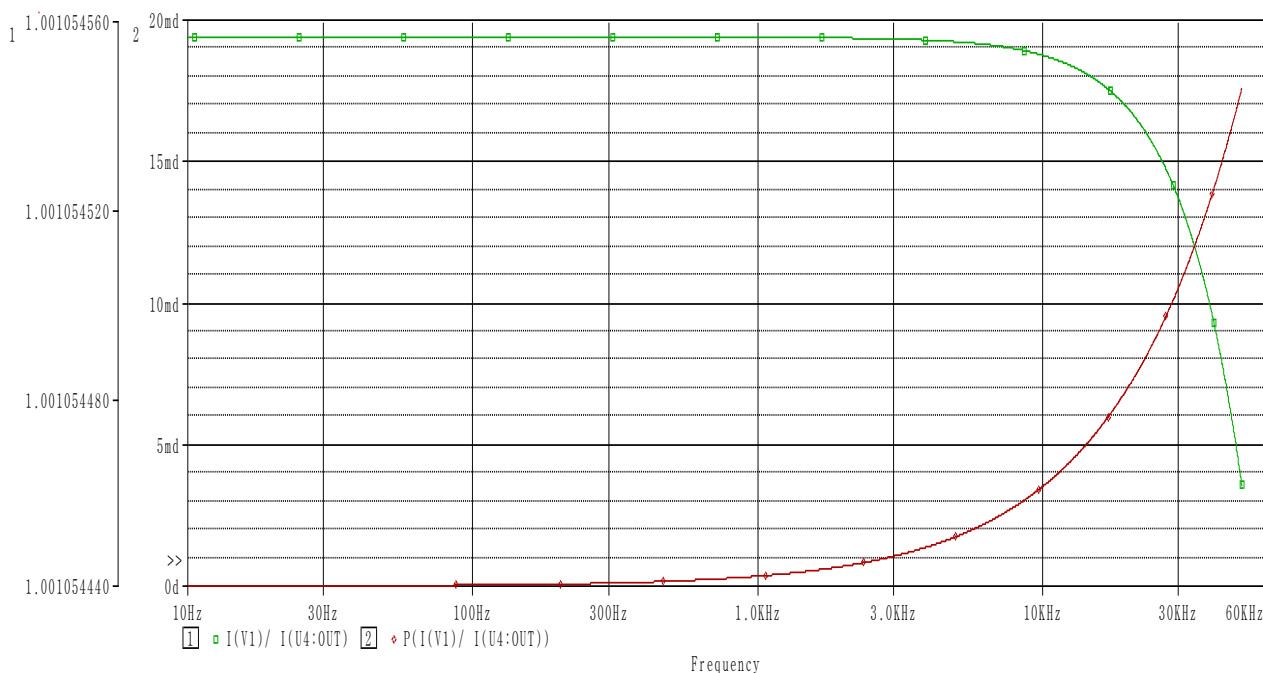
- tudíž se mi nepodařilo odsimulovat napětový kanál, který má obvodové schéma pro tuto verzi PSpice příliš rozsáhlé

Proudový kanál pro zesílení:

x1 x1; x1 x3; x10 x1; x10 x3



Obr. 15: Zapojení proudového kanálu pro zesílení x1 x1



Obr. 16: Simulační graf proudového kanálu pro zesílení x1 x1

Zesílení	x1 x1	x1 x3	x10 x1	x10 x3
Překročení meze 20 minut při	$f > 50$ kHz	29,17 kHz	$f > 50$ kHz	29,3 kHz
Fázový posun na 50 Hz (vůči 10 Hz)	14,12''	27,63''	13,99''	27,5''

10 Popis jednotlivých bloků:

10.1 Generátor

- bude použit laboratorní

10.2 Napájecí zdroj

- +/- 12 V; +/- 5 V; + 5 V
- Uvažováno bylo napájení z laboratorního zdroje
- (přesto navržen, ale z nedostatku času nezrealizován)
- Schéma viz příloha A.1
- DPS viz přílohy A.2 (top) a A.3 (bottom)

10.3 Napěťový kanál

- Jednotlivé bloky nám násobí napětí ze sekundární cívky – násobící poměry jednotlivých bloků jsou od 1x až 3 000x (1, 3, 10, 30, 100, 300, 1 000, 3 000)
- Přepínání jednotlivých násobení se provádí pomocí elektromagnetických relé
- Signál z tohoto kanálu je veden rozvětveně na usměrnění s dolní propustí a na analogovou násobičku
- Od každého násobícího člunu vede spoj na desku s mikrokontrolérem (to z důvodu zjištění násobícího poměru)
- Schéma viz příloha A.4
- DPS viz přílohy A.5 (top) a A.6 (bottom)

10.4 Usměrnění s dolní propustí

- Jako usměrnění je použit NE5534N
- Tyto bloky nám usměrní sinusový signál na stejnosměrnou hodnotu (čím větší frekvence či amplituda) tím větší hodnota stejnosměrného napětí
- Dolní propust, ta nám filtruje signál od 5 Hz
- Odtud signál pokračuje na A/D převodník
- Schéma viz příloha A.7
- DPS viz přílohy A.8 (top) a A.9 (bottom)

10.5 Převodník I/U

- Převádí nám hodnotu proudu z vinutí na napětí (má rozsahy 10 μ A, 100 μ A, 1 mA, 10 mA, 100 mA, 1 A)
- Přepínání jednotlivých násobení se provádí pomocí elektromagnetických relé
- Dále signál pokračuje na proudový kanál
- Schéma viz příloha A.10
- DPS viz přílohy A.11 (top) a A.12 (bottom)

10.6 Proudový kanál

- Násobí nám signál z převodníku
- Násobící poměry jsou 1, 3, 10, 30
- Přepínání jednotlivých násobení se provádí pomocí elektromagnetických relé
- Signál dále pokračuje na analogovou násobičku
- Schéma viz příloha A.13
- DPS viz přílohy A.14 (top) a A.15 (bottom)

10.7 Analogová násobička a dolní propust

- Jedná se o analogovou násobičku MPY64
- Zde se nám setkává signál s proudového a napěťového kanálu a jsou mezi sebou násobeny
- Dále je výsledek filtrován dolní propustí a přiveden na vstup A/D převodníku
- Pokud násobíme dva sinusové (ve fázi) signály, výsledek je vždy kladný a frekvence dvojnásobná
- Pokud je jeden ze signálů fázově posunut, průměr záporné části je jalový výkon a průměr kladné části je efektivní výkon
- Schéma viz příloha A.16
- DPS viz přílohy A.17 (top) a A.18 (bottom)

10.8 A/D převodník, mikrokontrolér a displej

- Jedná se o 24 bitový převodník ADS1253
- Zde je analogová hodnota z násobičky a hodnota stejnosměrného proudu z napěť. kanálu převedena na digitální a přivedena do mikrokontroléru
- Pomocí vzorce (17) mikrokontrolér vypočte velikost magnetické indukce B
- Snímá informace o sepnutých násobících blocích a podle toho určí násobící poměr a posléze vhodné jednotky
- Zobrazí výsledek analog.násobičky - ztrátový výkon a velikost magnetické indukce po vypočtení ze vzorce na displej

- ### 10.8.1 Program pro mikrokontrolér
- #### Settings.h
- ```
#ifndef _settings_library
#define _settings_library

// Pocet zavitu
#define N 10

// Prurez vzorku v m^2
#define S 0.0056

// Frekvence (Hz)
#define frekvence 1000

/* Speed of CPU. This is used for delay routines
*/
#define F_CPU 16000000UL /* 16MHz for debug, else should be 1MHz
 * Lower frequency -> lower power consumption
 */
#include <util/delay.h>

// Perioda pro CLK pro externi ADC
#define ADC_EXT_perioda _delay_us(100)
// Perioda pro SCLK pro externi ADC
#define ADC_EXT_SCLK_perioda _delay_us(500)

// Prevodni konstanty
#define prevodni_konstanta_nasobicka 0.208333333333333333
#define prevodni_konstanta_pk 0.208333333333333333
#define prevodni_konstanta_nk 0.208333333333333333
#define prevodni_konstanta_napeti_na_vstupu 0.208333333333333333

// Referencni hodnota pro kalibraci (digital. hodnota na ADC)
// 3355443 -> cca 1V
#define reference_napetovy_kanal 3355443
#define reference_proudovy_kanal 3355443

// Symbolicka jmena pro piny
// LCD
#define LCD_RW_PORT PORTD
#define LCD_RW_PIN 3

// Externi ADC
#define ADC_EXT_CHSEL0_PORT PORTB
#define ADC_EXT_CHSEL0_PIN 4

#define ADC_EXT_CHSEL1_PORT PORTB
#define ADC_EXT_CHSEL1_PIN 2

#define ADC_EXT_DATA_PORT PORTA
```

```

#define ADC_EXT_DATA_PIN 7

#define ADC_EXT_CLK_PORT PORTC
#define ADC_EXT_CLK_PIN 2

#define ADC_EXT_SCLK_PORT PORTB
#define ADC_EXT_SCLK_PIN 7

// Externi DAC
#define DAC_EXT_LDAC_PORT PORTB
#define DAC_EXT_LDAC_PIN 3

#define DAC_EXT_SYNC_PORT PORTB
#define DAC_EXT_SYNC_PIN 1

// Napetovy kanal - zesileni
#define NAP_KAN3_PORT PORTA
#define NAP_KAN3_PIN 6

#define NAP_KAN2_PORT PORTA
#define NAP_KAN2_PIN 5

#define NAP_KAN1_PORT PORTA
#define NAP_KAN1_PIN 4

#define NAP_KAN0_PORT PORTA
#define NAP_KAN0_PIN 3

// Proudovy kanal - zesileni
#define PROUD_KAN1_PORT PORTA
#define PROUD_KAN1_PIN 2

#define PROUD_KAN0_PORT PORTA
#define PROUD_KAN0_PIN 1

#endif

```

### **Wattmetr.c**

```

int main(void)
{
 // Promenne pro ukladani dat z 24. bit ADC
 uint32_t nasobicka = 0; // CH1
 uint32_t proud_kan = 0; // CH2
 uint32_t napet_kan = 0; // CH3

 // Hodnota predavana DAC
 uint16_t hodnota_pro_dac = 0;

 // Promenne pro vypocet zesileni - napetove
 uint16_t zesileni_napetovy_kan = 0;
 // Promenne pro vypocet zesileni - napetove
 uint16_t zesileni_proudovy_kan = 0;

 // Celkove zesileni
 uint16_t zesileni_celkove = 0;

```

```

// Pomocna promenna
uint8_t tmp;

// Docasna promenna pro float cisla
double d_tmp = 0;

// Pro vypis textu na LCD, resp. prevod floatu na text
char text[10];

// Nastavime RW na LCD na 0 -> mozny jen zapis - defaultne nastavi na 0
set_pin(&LCD_RW_PORT, LCD_RW_PIN, dir_out);

// Pripravi LCD
LCD1602_init();

// Inicializace externiho DAC
init_ext_dac();
// Nastaveni nuly na DAC (vsechny kanaly)
nahraj_data_do_DAC(0x8000, 0b00000100);

// Inicializace externiho ADC
init_ext_adc();

nastav_kanal_ext_adc(2);
cekej_na_prevod_ext_adc();
proud_kan = nacti_data_ext_adc();

nastav_kanal_ext_adc(3);
cekej_na_prevod_ext_adc();
napet_kan = nacti_data_ext_adc();

// Vypocet odchylek a kalibrace
// OK, takze nyní zase aktivujeme DAC
init_ext_dac();

/* Zjistime, jestli odchylka na napetovem kanalu je vetsi, nebo mensi nez
 * reference
 */
if(napet_kan > reference_napetovy_kanal)
{ // Hodnota je vetsi -> kompenzace tim, ze napeti na DAC snizime
 // Vypocet rozdilu
 napet_kan = napet_kan - reference_napetovy_kanal;
 // protoze je zde kompenzace 2x, tak se rozdil jeste rozdeli na dva
 napet_kan = napet_kan >> 1; // Rotace vpravo - deleni 2

 /* Ok, takze nyní je to skoro pripraveno. Ted se musi jeste data upravit
 * pro DAC, ktery je 16 bitovy a navíc pracuje v rozsahu +-5V, coz z nej
 * v principu dela 15 bit (pro rozsah 0~5V) -> nutno rotovat rozdíl o 9
 */
 napet_kan = napet_kan >> 9;
 hodnota_pro_dac = napet_kan; // No a upraveny rozdíl uložíme do 16b
 // A jeste posuv. Protoze napeti bylo vyssi, tak musime od 0x8000 odcist
 hodnota_pro_dac = 0x8000 - hodnota_pro_dac;

 // Konecne mame hodnotu, ktera udava offset (do obou kanalu)
 nahraj_data_do_DAC(hodnota_pro_dac, 1);
 nahraj_data_do_DAC(hodnota_pro_dac, 2);
}
else
{ // Hodnota je mensi -> kompenzace tim, ze napeti na DAC zvysime
 napet_kan = reference_napetovy_kanal - napet_kan;

```

```

napet_kan = napet_kan>>1;
napet_kan = napet_kan>>9;
hodnota_pro_dac = napet_kan;
hodnota_pro_dac = 0x8000 + hodnota_pro_dac;
nahraj_data_do_DAC(hodnota_pro_dac, 1);
nahraj_data_do_DAC(hodnota_pro_dac, 2);
}

// A prakticky to same pro proudovy kanal
if(proud_kan > reference_proudovy_kanal)
{
 proud_kan = proud_kan - reference_proudovy_kanal;
 proud_kan = proud_kan>>9;
 hodnota_pro_dac = proud_kan;
 hodnota_pro_dac = 0x8000 - hodnota_pro_dac;

 nahraj_data_do_DAC(hodnota_pro_dac, 3);
}
else
{
 proud_kan = reference_proudovy_kanal - proud_kan;
 proud_kan = proud_kan>>9;
 hodnota_pro_dac = proud_kan;
 hodnota_pro_dac = 0x8000 + hodnota_pro_dac;

 nahraj_data_do_DAC(hodnota_pro_dac, 3);
}

// Nyni uz bude aktivni jen ADC
init_ext_adc();

while(1)
{
 // Jako aktivni kanal nastavi CH1
 nastav_kanal_ext_adc(1);

 // Poceka na to, az budou data prevedena
 cekej_na_prevod_ext_adc();

 // Preci data
 nasobicka = nacti_data_ext_adc();

 nastav_kanal_ext_adc(3);
 cekej_na_prevod_ext_adc();
 napet_kan = nacti_data_ext_adc();

 // Nacte data z napetoveho dekoderu
 tmp = read_in_pin(&NAP_KAN0_PORT, NAP_KAN0_PIN);
 tmp |= (read_in_pin(&NAP_KAN1_PORT, NAP_KAN1_PIN))<<1;
 tmp |= (read_in_pin(&NAP_KAN2_PORT, NAP_KAN2_PIN))<<2;
 tmp |= (read_in_pin(&NAP_KAN3_PORT, NAP_KAN3_PIN))<<3;

 switch(tmp)
 {
 case 0: zesileni_napetovy_kan = 1; break;
 case 1: zesileni_napetovy_kan = 3; break;
 case 2: zesileni_napetovy_kan = 10; break;
 case 3: zesileni_napetovy_kan = 30; break;
 case 4: zesileni_napetovy_kan = 100; break;
 case 5: zesileni_napetovy_kan = 300; break;
 }
}

```

```

case 6: zesileni_napetovy_kan = 1000; break;
case 7: zesileni_napetovy_kan = 3000; break;
default: zesileni_napetovy_kan = 0; // Pro pripad, ze bude neco spatne
}

// Nacte data z proudoveho dekodery
tmp = read_in_pin(&PROUD_KAN0_PORT, PROUD_KAN0_PIN);
tmp |= (read_in_pin(&PROUD_KAN1_PORT, PROUD_KAN1_PIN))<<1;

switch (tmp)
{
case 0: zesileni_proudovy_kan = 1; break;
case 1: zesileni_proudovy_kan = 3; break;
case 2: zesileni_proudovy_kan = 10; break;
case 3: zesileni_proudovy_kan = 30; break;
default: zesileni_proudovy_kan = 0; // Pro pripad ze bude neco spatne
}

// Vypocet celkového zesileni a podle toho se zvolí jednotky
zesileni_celkove = zesileni_napetovy_kan * zesileni_proudovy_kan;

// NASOBICKA
// Prepocet cislo na float a prevod na text
d_tmp = (double)nasobicka * prevodni_konstanta_nasobicka;
dtostrf(d_tmp, 5, 5, &text[0]);

LCD1602_Clear_display();
LCD1602_write_text("P= ");
LCD1602_write_text(&text[0]);
LCD1602_write_char(' ');

// Zvoleni radu
if(zesileni_celkove < 4)
{
 LCD1602_write_text("kW");
}
else if(zesileni_celkove < 91)
{
 LCD1602_write_text("W");
}
else if(zesileni_celkove < 901)
{
 LCD1602_write_text("mW");
}
else
{
 LCD1602_write_text("uW");
}

// Presun na dalsi radek
LCD1602_set_address(0x40);

// Mag. indukce
// Vypocet U
d_tmp = (double)napet_kan * prevodni_konstanta_napeti_na_vstupu;

// B = U/(4.44*f*N*S)
d_tmp = d_tmp / (4.44 * frekvence * N * S);
dtostrf(d_tmp, 5, 5, &text[0]);

```

```

LCD1602_write_text("B= ");
LCD1602_write_text(&text[0]);
LCD1602_write_text(" T");

_delay_ms(130); // Necha data nejakou dobu zobrazena
}
return(0);
}

// Nastavi piny a inicializuje ADS1253
void init_ext_adc(void)
{
 // Nastavi CHSEL[1..0] jako vystupni a nastavi oba do 0
 set_pin(&ADC_EXT_CHSEL0_PORT, ADC_EXT_CHSEL0_PIN, dir_out);
 set_pin(&ADC_EXT_CHSEL1_PORT, ADC_EXT_CHSEL1_PIN, dir_out);

 // CLK - vystup
 set_pin(&ADC_EXT_CLK_PORT, ADC_EXT_CLK_PIN, dir_out);

 // Datovy - jako vstup
 set_pin(&ADC_EXT_DATA_PORT, ADC_EXT_DATA_PIN, dir_in);

 // Vypne HW SPI
 SPCR = (0<<SPE);

 // SCLK jako vystupni
 set_pin(&ADC_EXT_SCLK_PORT, ADC_EXT_SCLK_PIN, dir_out);
}

// Inicializace externiho DAC
void init_ext_dac(void)
{
 // Inicializace pinu
 set_pin(&DAC_EXT_LDAC_PORT, DAC_EXT_LDAC_PIN, dir_out);
 set_out_pin(&DAC_EXT_LDAC_PORT, DAC_EXT_LDAC_PIN, 1); // Vystup do 1

 set_pin(&DAC_EXT_SYNC_PORT, DAC_EXT_SYNC_PIN, dir_out);
 set_out_pin(&DAC_EXT_SYNC_PORT, DAC_EXT_SYNC_PIN, 1); // Taky do 1

 // Inicializace SPI (CLK)
 SPCR = (0<<SPIE)|(1<<SPE)|(0<<DORD)|(1<<MSTR)|(0<<CPOL)|(0<<CPHA)|\
 (0<<SPI2X)|(1<<SPR1)|(1<<SPR0);
}

// Inicializace pro pripojeni dekoderu
void init_dekoder(void)
{
 set_pin(&NAP_KAN0_PORT, NAP_KAN0_PIN, dir_in);
 set_pin(&NAP_KAN1_PORT, NAP_KAN1_PIN, dir_in);
 set_pin(&NAP_KAN2_PORT, NAP_KAN2_PIN, dir_in);
 set_pin(&NAP_KAN3_PORT, NAP_KAN3_PIN, dir_in);

 set_pin(&PROUD_KAN0_PORT, PROUD_KAN0_PIN, dir_in);
 set_pin(&PROUD_KAN1_PORT, PROUD_KAN1_PIN, dir_in);
}

// Podle cisla (1 az 4) nastavi aktivni kanal
void nastav_kanal_ext_adc(uint8_t cislo_kanal)
{

```

```

switch(cislo_kanalu)
{
 // Podle cisla nastavi kanal
 case 1:
 set_out_pin(&ADC_EXT_CHSEL0_PORT, ADC_EXT_CHSEL0_PIN, 0);
 set_out_pin(&ADC_EXT_CHSEL1_PORT, ADC_EXT_CHSEL1_PIN, 0);
 break;
 case 2:
 set_out_pin(&ADC_EXT_CHSEL0_PORT, ADC_EXT_CHSEL0_PIN, 1);
 set_out_pin(&ADC_EXT_CHSEL1_PORT, ADC_EXT_CHSEL1_PIN, 0);
 break;
 case 3:
 set_out_pin(&ADC_EXT_CHSEL0_PORT, ADC_EXT_CHSEL0_PIN, 0);
 set_out_pin(&ADC_EXT_CHSEL1_PORT, ADC_EXT_CHSEL1_PIN, 1);
 break;
 case 4:
 set_out_pin(&ADC_EXT_CHSEL0_PORT, ADC_EXT_CHSEL0_PIN, 1);
 set_out_pin(&ADC_EXT_CHSEL1_PORT, ADC_EXT_CHSEL1_PIN, 1);
 break;
 default: // Pro pripad, ze zadame spatne cislo
 set_out_pin(&ADC_EXT_CHSEL0_PORT, ADC_EXT_CHSEL0_PIN, 0);
 set_out_pin(&ADC_EXT_CHSEL1_PORT, ADC_EXT_CHSEL1_PIN, 0);
}
}

// generuje jeden CLK : |^_|_
static inline void generuj_CLK_pro_EXT_ADC(void)
{
 set_out_pin(&ADC_EXT_CLK_PORT, ADC_EXT_CLK_PIN, 1); // Jednicka
 ADC_EXT_perioda; // Pauza
 set_out_pin(&ADC_EXT_CLK_PORT, ADC_EXT_CLK_PIN, 0); // Nula
 ADC_EXT_perioda; // Pauza
}

static inline void generuj_SCLK_pro_EXT_ADC(void)
{
 set_out_pin(&ADC_EXT_SCLK_PORT, ADC_EXT_SCLK_PIN, 1); // 1
 ADC_EXT_SCLK_perioda; // Pauza
 set_out_pin(&ADC_EXT_SCLK_PORT, ADC_EXT_SCLK_PIN, 0); // 0
 ADC_EXT_SCLK_perioda; // Pauza
}

// Pocka, az budou data prevedena
void cekej_na_prevod_ext_adc(void)
{
 // Ceka, az bude pin v nule
 while(read_in_pin(&ADC_EXT_DATA_PORT, ADC_EXT_DATA_PIN) != 0)
 {
 // Bude generovat hodiny pro ADC
 generuj_CLK_pro_EXT_ADC();
 }
}

uint32_t nacti_data_ext_adc(void)
{
 uint32_t data = 0;

 // Pocka az bude datovy vstup v High
 while(read_in_pin(&ADC_EXT_DATA_PORT, ADC_EXT_DATA_PIN) == 0)
 {
 generuj_CLK_pro_EXT_ADC();
 }
}

```

```

// Pak zacne cist data
for(uint8_t i=23 ; i<24 ; i--)
{
 // Vygeneruje pulz
 generuj_SCLK_pro_EXT_ADC();

 // Vycete data - nacte bit a posune ho vlevo
 data |= (read_in_pin(&ADC_EXT_DATA_PORT, ADC_EXT_DATA_PIN))<<i;
}
return data;
}

// Nahraje data do DAC. Cislovani kanalu od 0 (A) do 3 (D)
void nahraj_data_do_DAC(uint16_t data_dac, uint8_t kanal)
{
 set_out_pin(&DAC_EXT_SYNC_PORT, DAC_EXT_SYNC_PIN, 0); // Sync = 0

 // Odesle horni bity (23~16) - pro rizeni atd.
 SPDR = kanal;

 // Pocka az budou data odeslana
 while(((1<<SPIF) & SPSR) == 0);

 set_out_pin(&DAC_EXT_SYNC_PORT, DAC_EXT_SYNC_PIN, 1); // Sync = 1
 _delay_us(10); // Casova prodleva
 set_out_pin(&DAC_EXT_SYNC_PORT, DAC_EXT_SYNC_PIN, 0); // Sync = 0

 uint8_t spodni_bity = (0x00FF & data_dac);
 uint8_t horni_bity = ((0xFF00 & data_dac)>>8);

 // Odesle horni bity
 SPDR = horni_bity;

 set_out_pin(&DAC_EXT_SYNC_PORT, DAC_EXT_SYNC_PIN, 1); // Sync = 1
 _delay_us(500); // Casova prodleva
 set_out_pin(&DAC_EXT_SYNC_PORT, DAC_EXT_SYNC_PIN, 0); // Sync = 0

 // Pocka az budou data odeslana
 while(((1<<SPIF) & SPSR) == 0);

 SPDR = spodni_bity;

 set_out_pin(&DAC_EXT_SYNC_PORT, DAC_EXT_SYNC_PIN, 1); // Sync = 1

 set_out_pin(&DAC_EXT_LDAC_PORT, DAC_EXT_LDAC_PIN, 0); // Nyni se DAC nastavi
 _delay_us(500); // Casova prodleva
 set_out_pin(&DAC_EXT_LDAC_PORT, DAC_EXT_LDAC_PIN, 1);

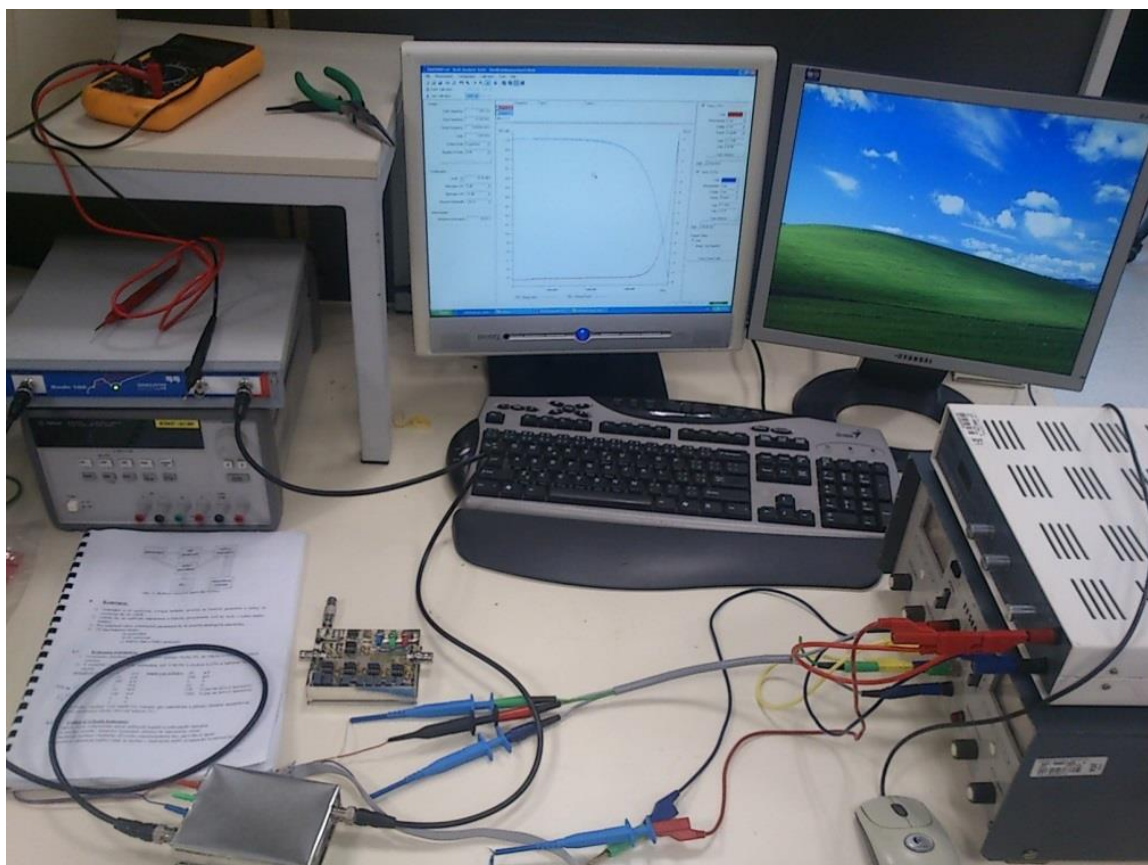
}

```

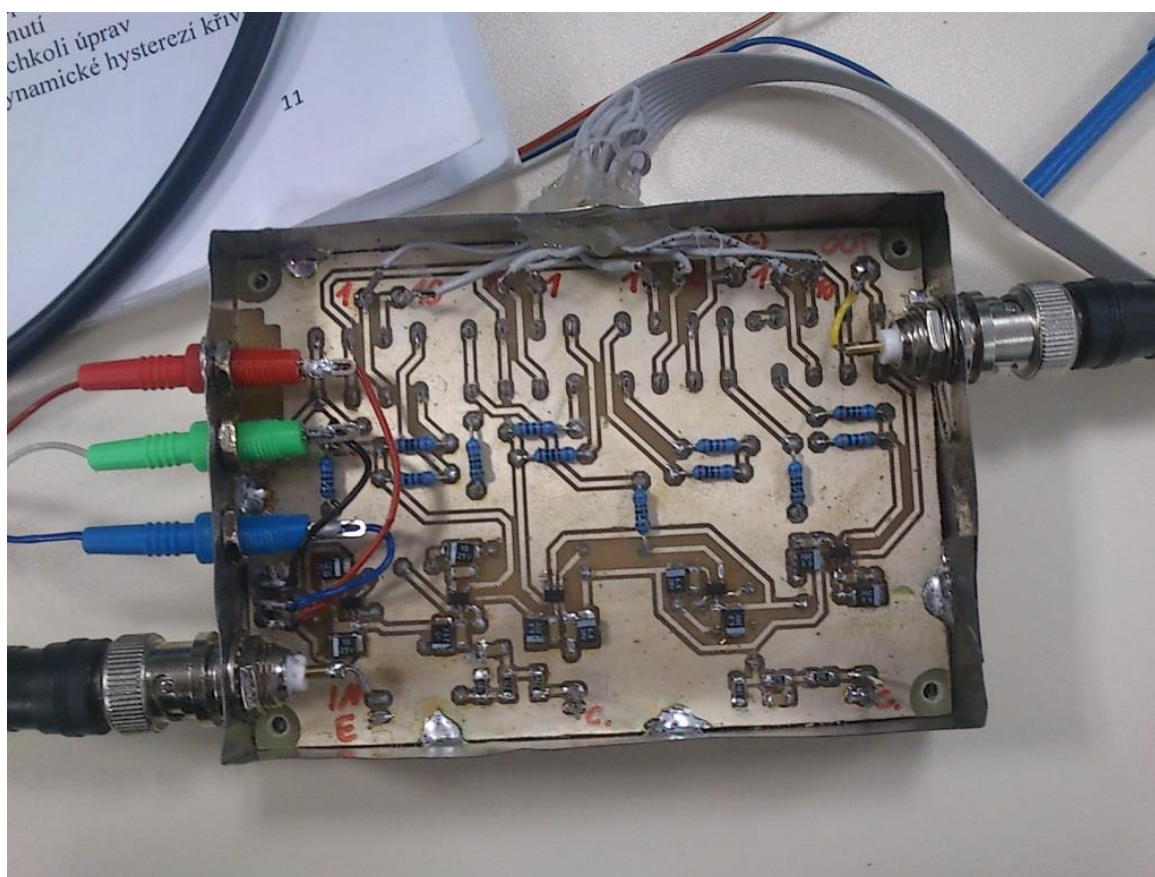
## 11 Stádium vývoje

Všechny desky zařízení jsou navrženy.

Proudový a napěťový kanál jsou osazeny, oživeny a uvedeny do plně funkčního stavu, taktéž desky s usměrňením a dolní propustí. Jsou změřeny jejich vlastnosti pomocí bodyanalýzátoru a osciloskopu. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v grafech-viz níže. Pohled na jedno z měření konkrétně měření napěťového kanálu na bode analyzátoru...



Obr. 17: Měřicí pracoviště s bode analyzátozem - měření napětového kanálu



Obr. 18: Bližší pohled na měření napětového kanálu (s otevřenou stínící krabičkou) bode analyzátoru

Desky násobička, převodník I/U a deska s mikrokontrolérem jsou rozpracovány a chybí jen detaily. Na převodníku I/U chybí dva rozsahy z důvodu nesehnání vhodných odporových drátů.

Co nás ale při práci nejvíce zbrzdilo a omezilo a zapříčinilo celkovou nefunkčnost zařízení je násobička MPY634-srdce celého zařízení. Všechny tři objednávky tohoto vzorkového kusu od Texas Instruments byly zklamáním, jelikož nám dorazil pokaždé zcela jiný obvod. A tudíž došlo k měsíčnímu zpoždění naší práce. Poté se zakoupila násobička MPY634 z Farnellu, ale bohužel i tento integrovaný obvod nesplnil svou funkci - byl vadný. Tudíž nebylo možné uvést zařízení do funkčního stavu.

Plánuji ovšem po státnicích zařízení dokončit a zprovoznit.

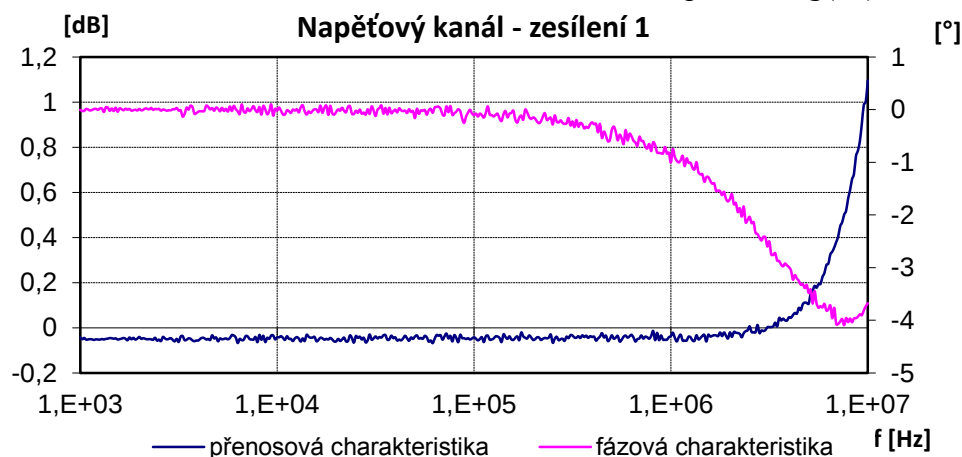
### 11.1 Přesnost metody:

Přesnost metody závisí na přesnosti užitých komponent a na míře vykompenzování offsetu. Obvykle se dosahuje přesnosti lepší než  $\pm 5\%$ . My máme za cíl dosáhnout přesnosti pod  $\pm 2\%$ .

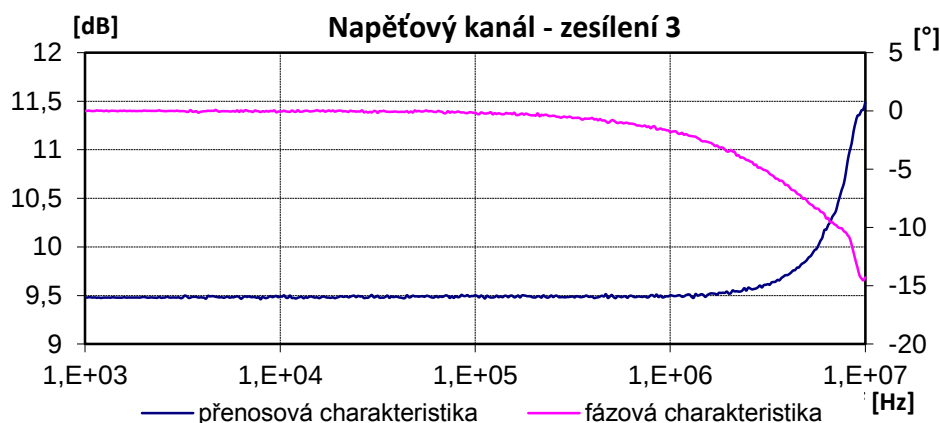
## 12 Naměřené průběhy a charakteristiky

Teoreticky předpokládaný výsledek zesílení se vypočítá pomocí vztahu  $20 \cdot \log$  (požadované zesílení), kde požadované zesílení je 1, 3, 10, ....

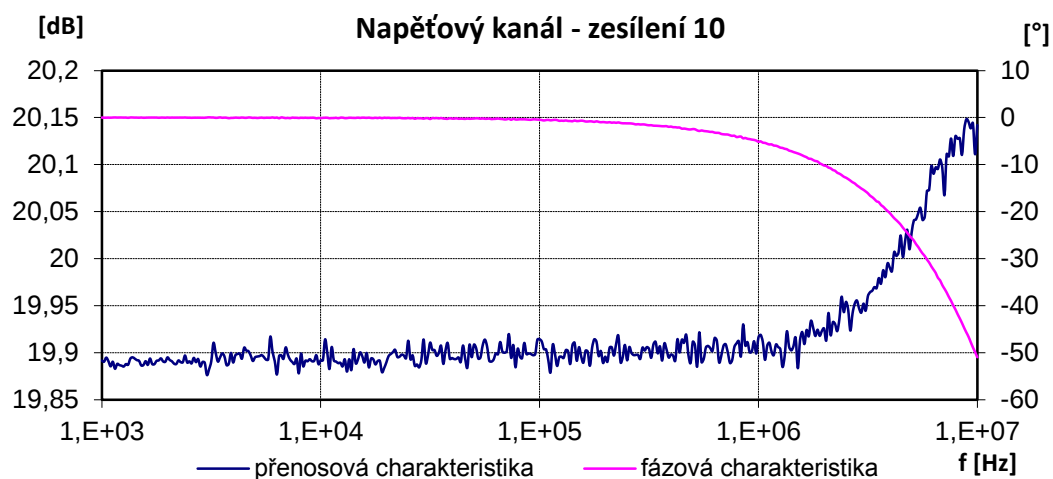
Např.:  $20 \cdot \log(30) = 29,54 \text{ dB}$



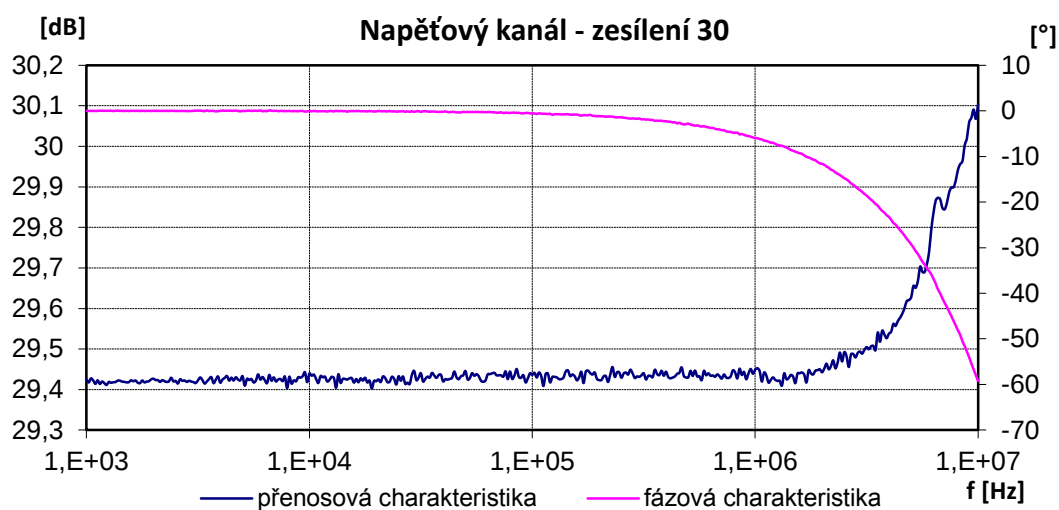
Obr. 19: Napěťový kanál - zesílení 1



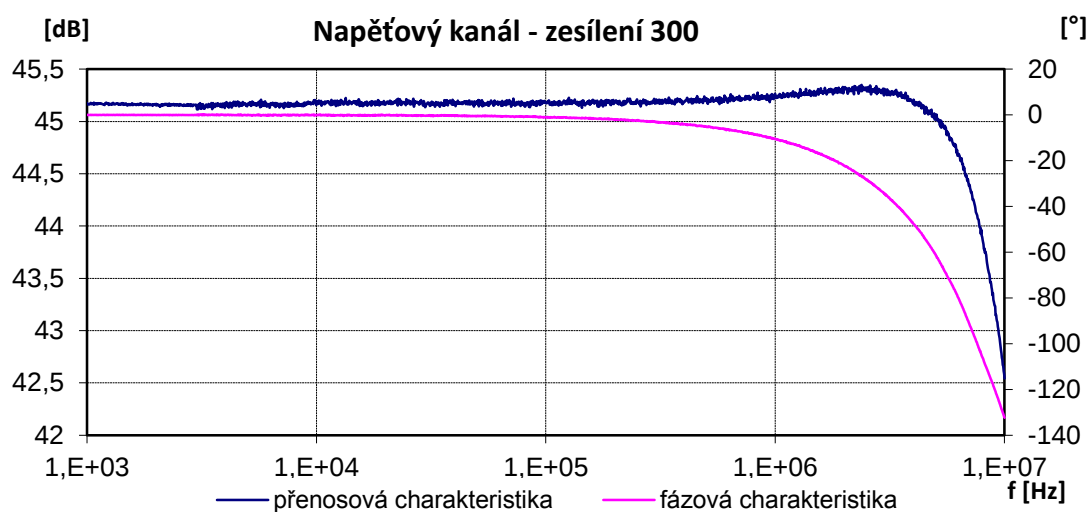
Obr. 20: Napěťový kanál - zesílení 3



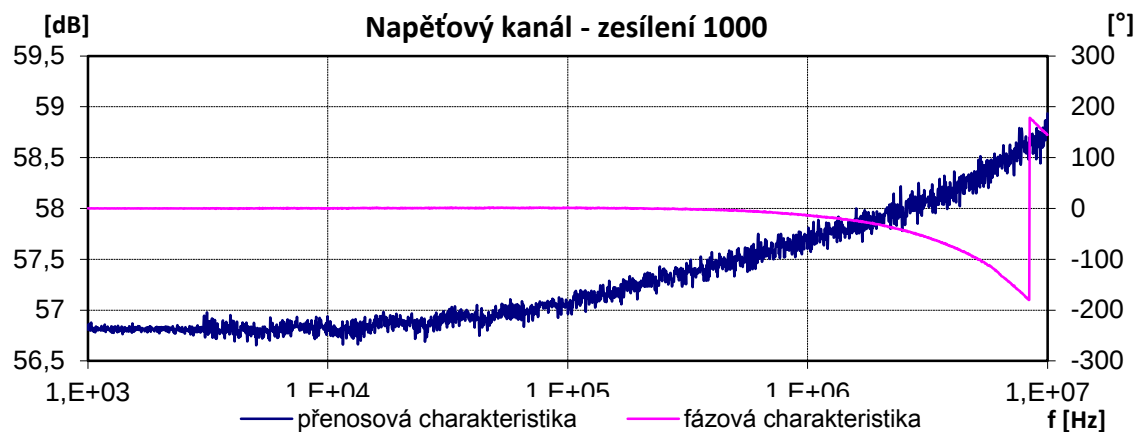
Obr. 21: Napěťový kanál - zesílení 10



Obr. 22: Napěťový kanál - zesílení 30



Obr. 23: Napěťový kanál - zesílení 300

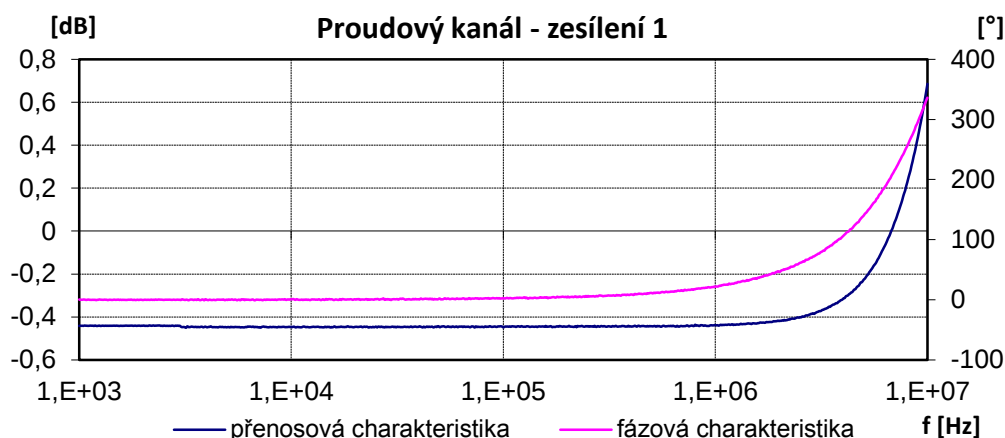


Obr. 24: Napětový kanál - zesílení 1000

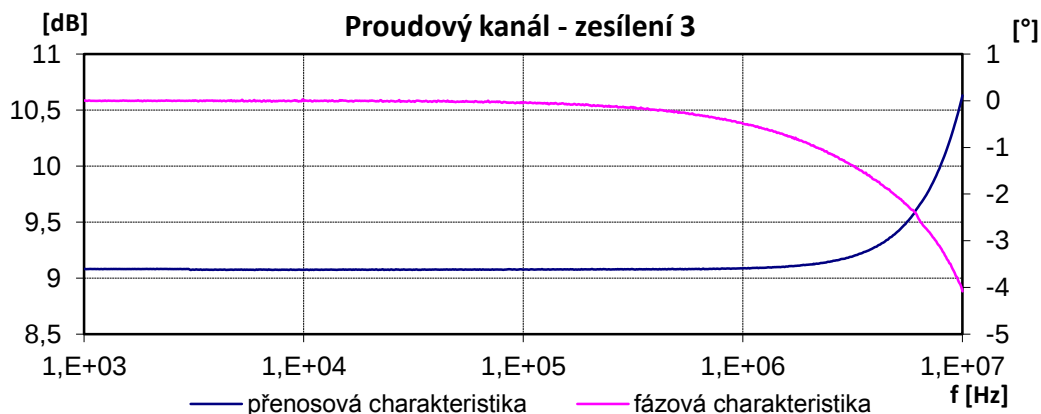
Zesílení 3000 u napětového kanálu již není uvedeno, jelikož při měření došlo k přebuzení obvodu a z důvodu stěhování nebyl k dispozici již jiný útlumový článek.

Šum v přenosových charakteristikách byl způsoben zřejmě dlouhými přívodními koaxiálními kabely signálu, spoji, vlivem okolí a vlastním obvodem.

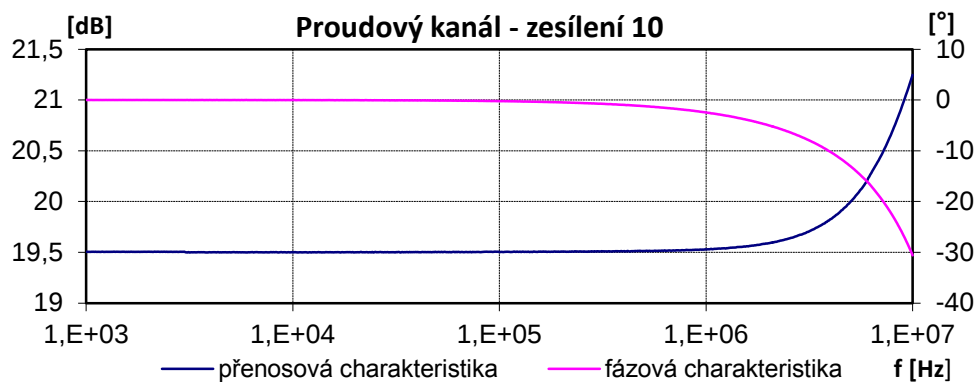
Napětový kanál splnil naše očekávání a požadavky, teoretické zesílení se odchylovalo od skutečného jen nepatrně.



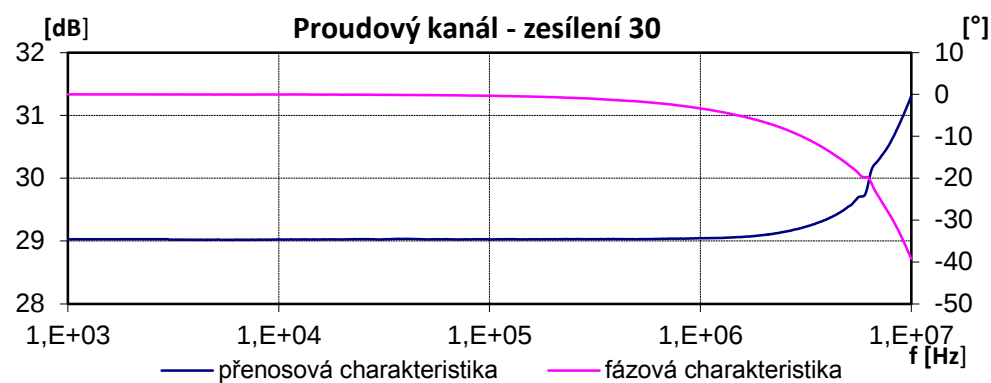
Obr. 25: Proudový kanál - zesílení 1



Obr. 26: Proudový kanál - zesílení 3

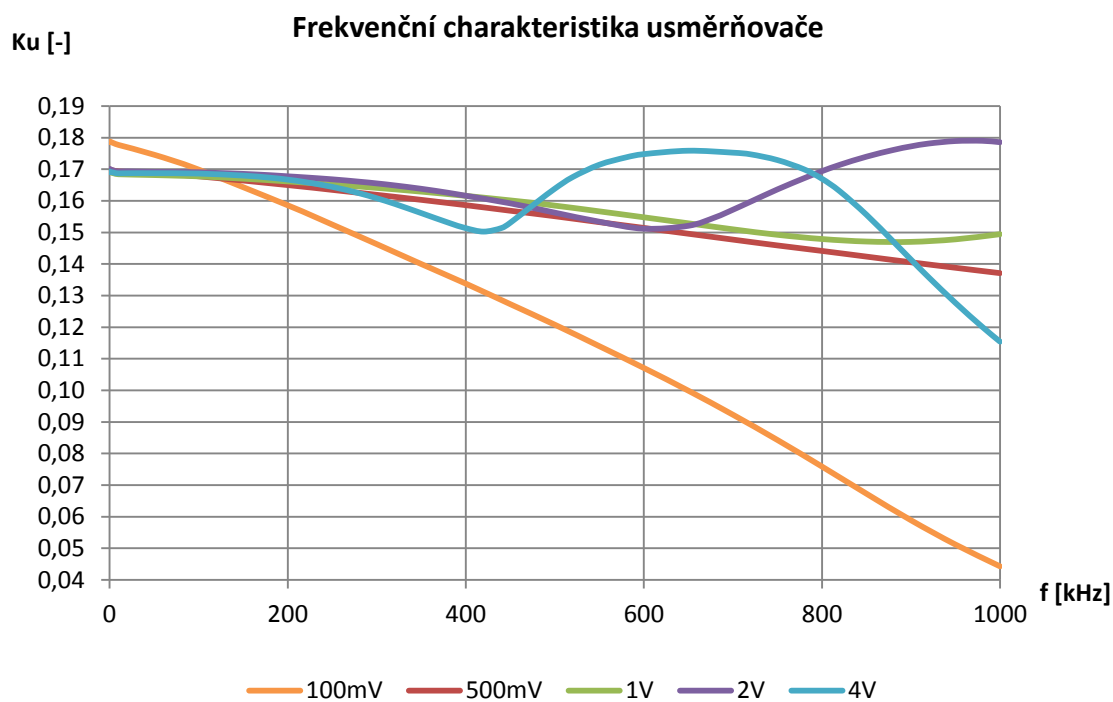


Obr. 27: Proudový kanál - zesílení 10

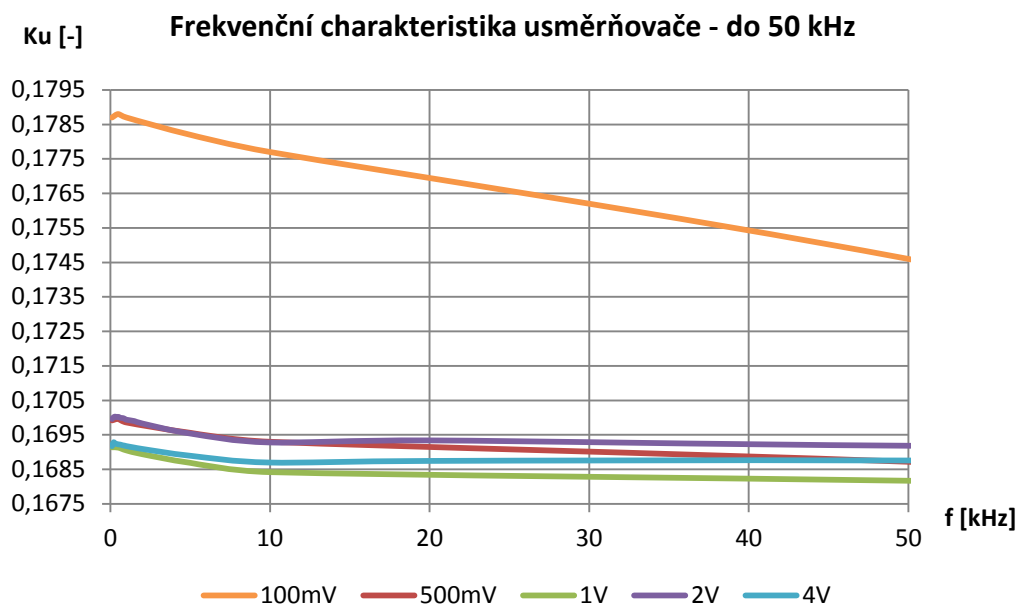


Obr. 28: Proudový kanál - zesílení 30

I proudový kanál splnil naše očekávání a požadavky, teoretické zesílení se odchylovalo od skutečného jen nepatrně.

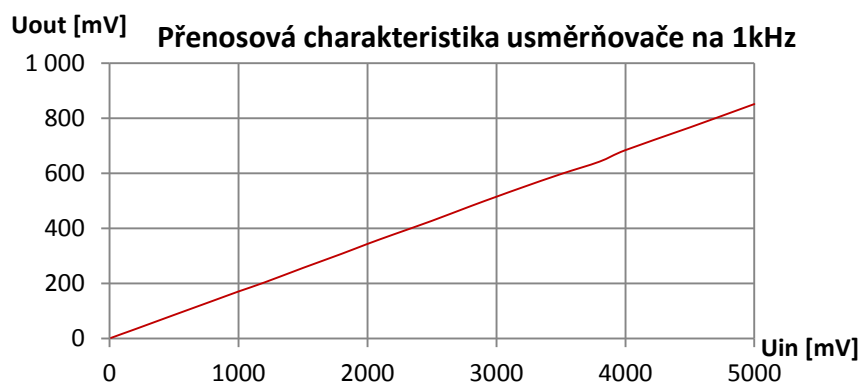


Obr. 29: Frekvenční charakteristika usměrňovače

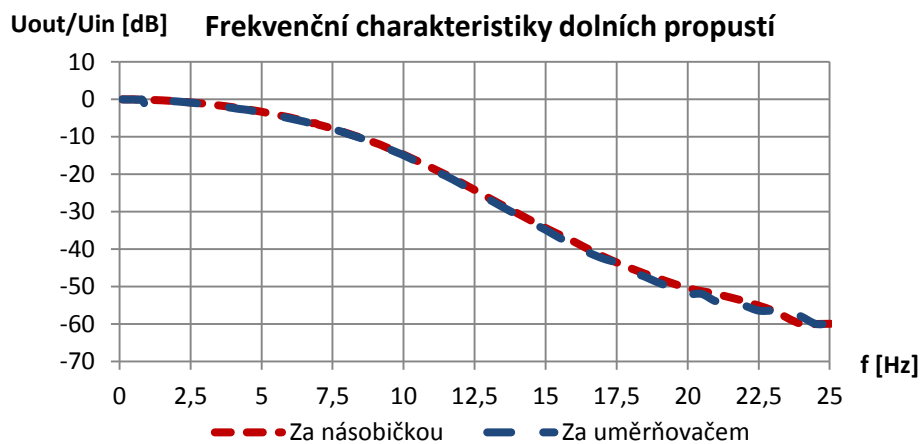


Obr. 30: Frekvenční charakteristika usměrňovače - do 50 kHz

Z grafu je patrné, že z hlediska přesnosti je vhodné, aby na vstupu usměrňovače bylo napětí alespoň 500mV.



Obr. 31: Přenosová charakteristika usměrňovače na 1kHz



Obr. 32: Frekvenční charakteristiky dolních propustí

### 13 Důležité pojmy a jejich vysvětlení:

**Měrné ztráty  $Z$**  – jsou ztráty ve feromagnetiku, vznikající v důsledku střídavého přemagnetování, vztažené na 1 kg proměřovaného materiálu. Při údaji je nutno uvést indukci a kmitočet, při kterých byly ztráty změřeny.

**Ztrátové číslo (např.  $Z_{10}$ ,  $Z_{15}$ )** – měrné ztráty, vznikající v důsledku střídavého přemagnetování při sinusovém průběhu indukce při její maximální hodnotě  $B_m = 1$  T nebo 1,5 T a při kmitočtu 50 Hz.

**Ztrátový činitel** – je převratná hodnota činitele jakosti cívky s feromagnetickým jádrem

**Činitel jakosti  $Q$**  – cívky s feromagnetickým jádrem – je poměr indukční reaktance k celkovému sériovému ztrátovému odporu cívky s jádrem  $R_z$ .

Podle vztahu  $Q = \frac{2\pi f L}{R_z}$ .

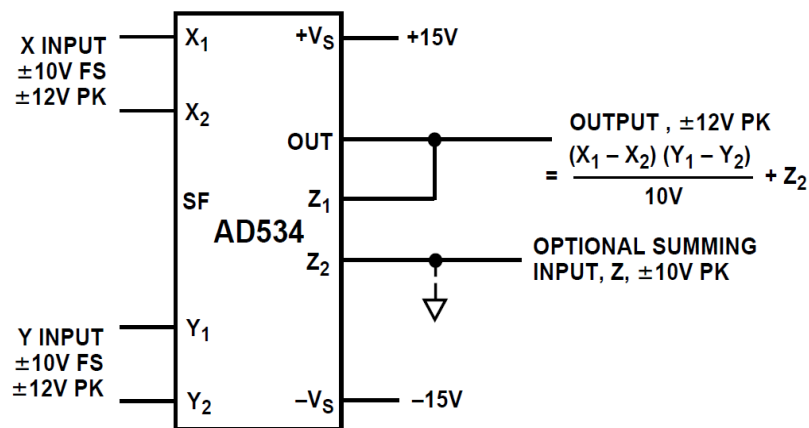
### 14 Analogové násobičky:

Analogové násobičky jsou elektronické obvody, které slouží k provádění matematických operací dvou nebo více proměnných analogových signálů. Zejména se jedná o násobení dvou analogových signálů, jimiž jsou nejčastěji elektrický proud nebo napětí. Pro násobení a dělení byla vyvinuta řada obvodů, které se liší podle způsobu činnosti (modulační, logaritmické, s rozdělením proudů, s Hallovým článkem, amplitudově-šířkovou modulací,...). Tyto obvody se v současnosti vyrábějí v integrované podobě.

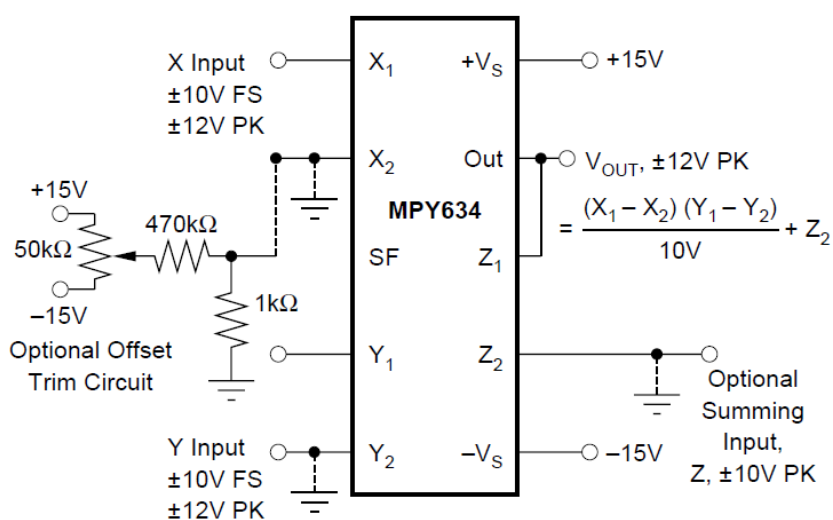
Analogová násobička realizuje přenosovou funkci tvaru:  $w = \frac{(X_1 - X_2)(Y_1 - Y_2)}{10} + Z$  (viz obr.6), kde  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $Y_1$ ,  $Y_2$  a  $Z$  jsou napětí příslušných vstupů proti zemní svorce, konstanta 10 je napětí vnitřního stabilizovaného zdroje a  $W$  je výstupní napětí. Výše uvedená násobička je čtyřkvadrantová násobička (AD534), která nevyžaduje žádné vnější součástky. Má diferenční vstupy  $X$  a  $Y$  s vysokou vstupní impedancí 10 MΩ a vysokoimpedanční sumační vstup  $Z$ , který umožňuje uživateli například připojit výstupy dalších násobiček a realizovat složitější funkce [4].

Impedance výstupu  $W$  je dána výstupní impedancí OZ. Součin vstupních napětí je normován ke vnitřnímu Zenerovou diodou stabilizovanému napětí (full scale, FS) o nominální hodnotě 10 V. Toto měřítko lze v případě potřeby (pro malá vstupní napětí) změnit připojením vhodného odporového děliče mezi výstupy  $Z$  a  $W$ . Symetrické napájecí napětí může být v rozsahu  $\pm 8$  V až  $\pm 18$  V, výrobcem udávané provozní parametry jsou zaručeny při napájecím napětí  $\pm 15$  V. Šířka pásma pro malé signály je 1 MHz, rychlost přeběhu 20 V/μs. Násobička může pracovat s kapacitními zátěžemi. Další technické specifikace uvádějí tabulky v dokumentaci výrobce [4].

Tato zařízení fungují na principu, že mezi sebou násobí analogové signály. Pokud se jedná o dva signály, jež jsou ve fázi, výsledkem je zcela kladný signál a dvojnásobné frekvenci. Pokud jsou od sebe signály fázově posunuty, průměrná hodnota kladné části je hodnota efektivního výkonu a průměr záporné části je výkon jalový.

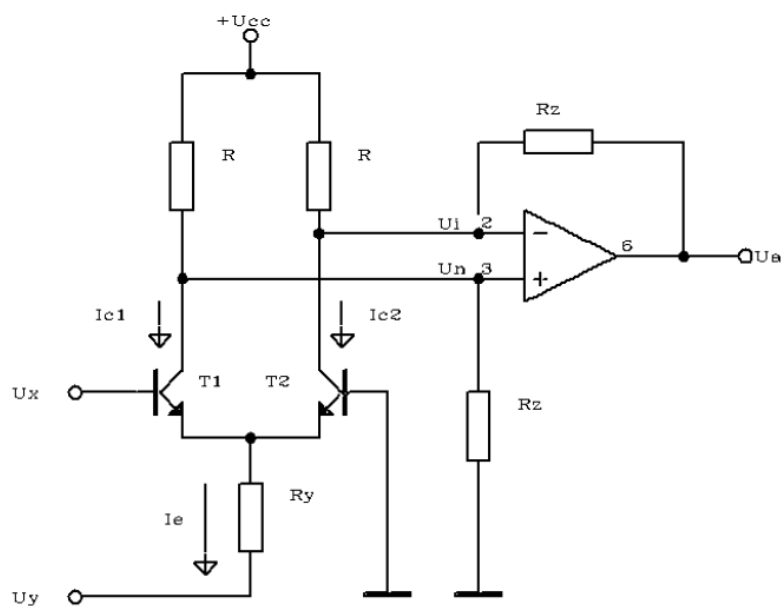


Obr. 33: Zapojení násobičky AD534 ve funkci násobení.



Obr. 34: Zapojení násobičky MPY634 ve funkci násobení.

#### 14.1 Násobička s rozdělením proudů (s proměnnou strmostí) [4]:

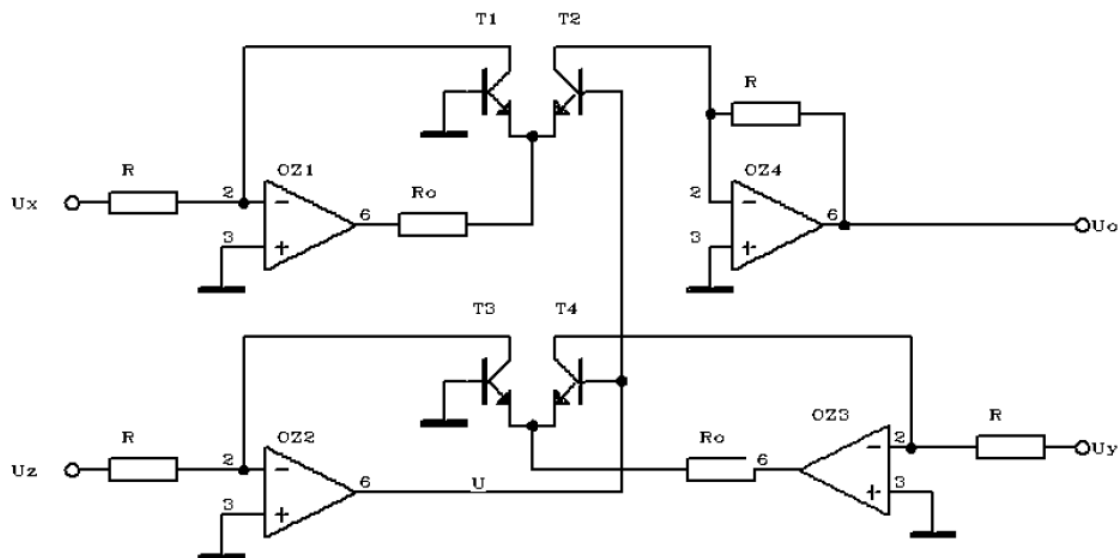


Obr. 35: Princip násobičky s rozdělením proudů.

Změna kolektorového proudu je úměrná součinu změny vstupního napětí a klidového proudu kolektoru. Tato vlastnost je využita v diferenčním zesilovači k násobení. Aby obvod pracoval správně je nutné, aby napětí  $U_y$  bylo pouze záporné, přičemž  $U_x$  může nabývat obou polarit. Jde tedy o dvoukvadrantovou násobičku.

#### 14.2 Logaritmické násobičky [4]:

Princip těchto násobiček spočívá v převedení vztahu pro součin nebo dělení na jiný matematický výraz, který se analogovými prostředky snáze modeluje.



Obr. 36: Zapojení logaritmické násobičky.

Protože v tomto zapojení mohou být všechna napětí pouze kladná, jedná se o jednokvadrantovou násobičku.

## 15 Závěr

V první části práce bylo za úkol teoretický rozbor měření a měřících postupů pro měření ztrát ve feromagnetikách. Dále prostudovat typy analogových násobiček. To jsem provedl a získané poznatky souhrnně poznamenal a zapsal důležité informace.

V další části bylo úkolem vlastní návrh zařízení, návrh desek, výroba, osazení a oživení desek. Výroba krabiček kvůli stínění a zhotovení propojení a ostatních nutných mechanických nutností pro správnou funkci jednotlivých desek, čili bloků. Celkem se jednalo o osm desek plošných spojů, což jsme zredukovaly na šest desek. Napěťová dělička nebyla uvažována z důvodu, že bylo plánováno měření jen pro nízké hodnoty napětí. A deska zdroje byla v plánu nad rámec práce, aby zařízení mělo svůj vlastní zdroj a nemusel být používán laboratorní. Byl proveden návrh desek jednotlivých bloků, vyrobeny, poté provedeno jejich osazení a následně postupně ožívány. U oživených desek jsem změřil jejich charakteristiky námi požadovaných funkcí či vlastností. Zkonstruoval jsem a uvedl do plně funkčního stavu proudový a napěťový kanál, převodník I/U bez dvou rozsahů 100 mA a 1 A z důvodu nesehnání vhodného odporového drátu. Dále jsem navrhl program pro mikrokontrolér ATmega16, který snímá nastavení rozsahů, kompenzuje ofset na prvním bloku proudového kanálu a druhém a čtvrtém bloku napěťového kanálu. Také odebírá hodnotu z analogové násobičky, která je měřeným ztrátovým výkonem a pomocí vzorce vypočítává hodnotu magnetické indukce  $B$  z informací o měřeném vzorku a hodnoty stejnosměrného napětí z napěťového kanálu. Dále jsem udělal desku násobičky a dolních propustí. Kvůli chybně dodaných násobičkám MPY634 není deska zprovozněna, to se mi doposud nepodařilo z důvodu chyby Texas Instruments, která třikrát dodala místo analogové násobičky MPY634 zcela jiný integrovaný obvod. Stačí již pouze do patice vsadit správný obvod a odladit desku. Celé zařízení je téměř kompletní. Po státnicích plánuji zařízení zcela zprovoznit. Tudíž dokončit pomocí vhodného odporového drátu zbývající dva rozsahy na převodníku I/U, nahrát připravený program do ATmega16 a vsadit do patice na desce správnou a funkční násobičku.

Z naměřených hodnot a sestavených grafů je viditelné, že pro správné fungování usměrňovače je zapotřebí, aby na jeho vstupu bylo napětí alespoň 500mV či vyšší. Dále Proudový i napěťový kanál splnil očekávání a výsledná zesílení se jen nepatrně liší od teoretických. Z grafu přenosové charakteristiky usměrňovače vidíme, že má součástka krásně lineární přenos. Dále ze změřených hodnot z obou navržených dolních propustí je vidět, že filtry, které jsou jsou navrženy na mezní kmitočet 5 Hz filtrují tak, jak je předpokládáno. Útlum na 25 Hz mají již přes 60 dB a pokles signálu o 3 dB je již na 4,8 Hz.

# Literatura

- [1] DUFEK, Milan, Jaroslav HRABÁK a Zdeněk TRNKA. *Magnetická měření*. První vydání. Spálená 51, Praha 1: Státní nakladatelství technické literatury, 1964.
- [2] ČSN 34 5675. *Československá státní norma: Měření magneticky měkkých materiálů*. Úřad pro normalizaci, Václavské nám. 19, Praha 1: Obchodní tiskárny, n.p. v Kolíně, 1962.
- [3] GESCHEIDTOVÁ, Eva, Jiří REZ a Miloslav STEINBAUER. *Měření v elektrotechnice*. První vydání. Antonínská 1, Brno: Ing. J.Kučík, Brno, 2002. ISBN 80-214-1990-3.
- [4] PAVELEK, Tomáš. Microsoft Word - Tech\_prostředky.doc: Analogové násobičky. Ing: PAVELEK, Tomáš. *Analogové násobičky* [online]. 24.2.2005 8:14:22 - [cit. 2011-12-21]. Dostupná na: <http://fei1.vsb.cz/kat430/old/Studium/Materialy/TPREP/Nasobicky.pdf> >.
- [5] MLČÁK, Tomáš, Václav VRÁNA a Jan VAŇUŠ. 5. ELEKTRICKÁ MĚŘENÍ [online]. Ostrava, Leden 2008, 26.3.2008 13:52:16 - [cit. 21. Prosince 2011]. Dostupné na: [http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske\\_FMMI/Prednasky/5\\_elmer\\_sylab\\_bc.pdf](http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FMMI/Prednasky/5_elmer_sylab_bc.pdf) >.
- [6] VŠB-TU Ostrava, Násobičky s rozdělením proudu [online]. - [cit. 30. května 2013]. Dostupné na www: <http://fei1.vsb.cz/kat430/data/tprep/Laboratori%20uloha%206%20-%20Nasobicky%20s%20rozdelenim%20proudu.pdf> >.
- [7] VŠB-TU Ostrava, Elektrická měření [online]. Fakulta elektrotechniky a informatiky - [cit. 30. května 2013]. Dostupné na www: [http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske\\_FMMI/Prednasky/5\\_elmer\\_sylab\\_bc.pdf](http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FMMI/Prednasky/5_elmer_sylab_bc.pdf) >.
- [8] VUT v Brně – UREL, Teorie elektronických obvodů (MTEO) : Analogová násobička [online]. - [cit. 30. května 2013]. Dostupné na www: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/MTEO/mteo/07%20analogova%20nasobicka%20-%20teoreticky%20uvod.pdf> >.
- [9] TEXAS INSTRUMENTS *Wideband, Unity-Gain Stable, FET-Input OPERATIONAL AMPLIFIER*. Datasheet OPA656 [online]. Dostupné na www: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa656.pdf> >.
- [10] AmaPro [online]. Analogové konstrukce a schéma zapojení - [cit. 30. května 2013]. Dostupné na www: [http://www.amapro.cz/datove\\_zdroje/ar/konstrukce\\_ar\\_1/ar1\\_393.php](http://www.amapro.cz/datove_zdroje/ar/konstrukce_ar_1/ar1_393.php) >.
- [11] Elektross [online]. Integrované obvody - [cit. 30. května 2013]. Dostupné na www: [http://elektross.gjn.cz/int\\_obv/int\\_obv.html](http://elektross.gjn.cz/int_obv/int_obv.html) >.
- [12] CHRÁST, J. *Návrh a realizace symetrických převodníků U/I a I/U*. Diplomová práce. Brno: FEKT VUT v Brně, 2010. Dostupné na www: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=26115](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=26115) >.

## Seznam symbolů, veličin a zkratek

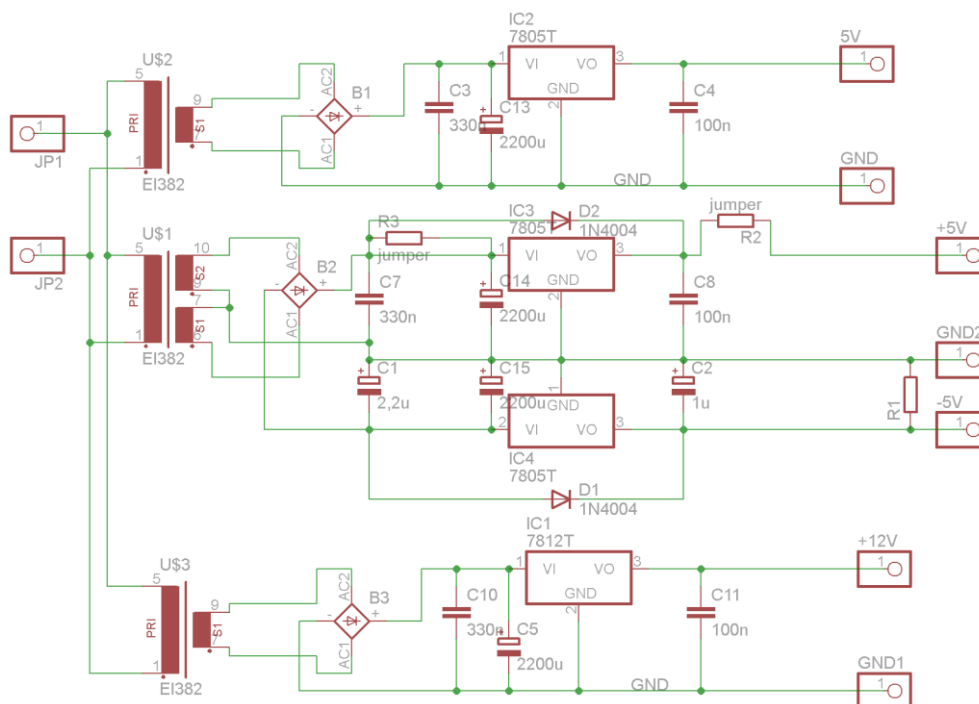
|                |                                                                  |
|----------------|------------------------------------------------------------------|
| AGND           | analogová zem                                                    |
| $B$            | magnetická indukce                                               |
| $B_{zm}$       | maximální hodnota (amplituda) indukce                            |
| $B_{zt}$       | okamžitá hodnota indukce vzorku                                  |
| DPS            | deska plošných spojů                                             |
| $f$            | frekvence                                                        |
| GND            | zem/uzemění                                                      |
| $H_{zt}$       | okamžitá hodnota intenzity pole na povrchu vzorku                |
| $I$            | proud                                                            |
| IN             | vstup                                                            |
| IO             | integrovaný obvod                                                |
| $i_1$          | okamžitá hodnota proudu proudové cívky                           |
| $i_2$          | okamžitá hodnota proudu v měřicím vinutí                         |
| $k_w$          | konstanta wattmetru                                              |
| $l_s$          | střední délka vzorku                                             |
| $N_m$          | počet závitů měřicího vinutí                                     |
| $N_1$          | počet závitů magnetizačního vinutí                               |
| OUT            | výstup                                                           |
| $P'$           | údaj wattmetru                                                   |
| $P_w$          | měrné ztráty v železe                                            |
| $R'$           | odpor paralelně spojených přístrojů připojených na měřicí vinutí |
| $R_m$          | odpor měřicího vinutí                                            |
| $R_v$          | odpor voltmetru                                                  |
| $R_{wn}$       | odpor napěťového obvodu wattmetru                                |
| $S$            | zdánlivý výkon                                                   |
| $S_{h0}$       | plocha statické hysterezní smyčky                                |
| $S_m$          | plocha závitů měřicího vinutí                                    |
| $S_z$          | průřez vzorku                                                    |
| $U$            | napětí                                                           |
| $u_2$          | okamžitá hodnota napětí na napěťovém obvodu wattmetru            |
| $U_{2ef}$      | efektivní hodnota napětí měřicího vinutí                         |
| $V_z$          | je objem vzorku                                                  |
| $\varphi_{vt}$ | okamžitá hodnota toku vzduchem obepínaného měřicím vinutím       |
| $\varphi_{zt}$ | okamžitá hodnota toku vzorku                                     |
| $\phi$         | fázový posun                                                     |

# SEZNAM PŘÍLOH

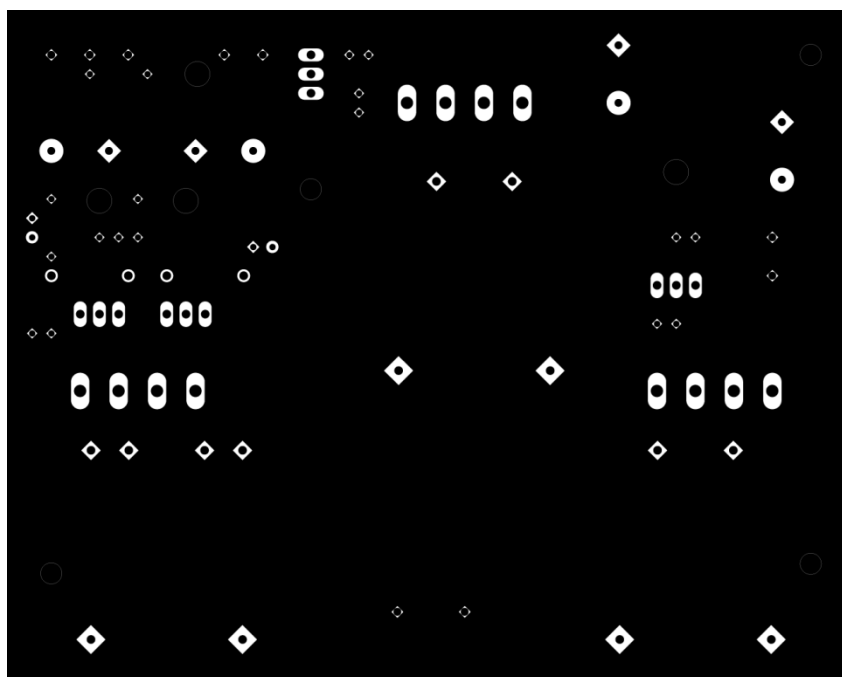
|          |                                                                               |           |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>A</b> | <b>Schémata a DPS</b>                                                         | <b>39</b> |
| A.1      | Obvodové zapojení – napájecí zdroj .....                                      | 39        |
| A.2      | Deska plošného spoje – top (napájecí zdroj) .....                             | 39        |
| A.3      | Deska plošného spoje – bottom (napájecí zdroj) .....                          | 40        |
| A.4      | Obvodové zapojení – napěťový kanál .....                                      | 40        |
| A.5      | Deska plošného spoje – top (napěťový kanál) .....                             | 41        |
| A.6      | Deska plošného spoje – bottom (napěťový kanál) .....                          | 41        |
| A.7      | Obvodové zapojení – usměrnění s dolní propustí .....                          | 42        |
| A.8      | Deska plošného spoje – top (usměrnění s dolní propustí) .....                 | 42        |
| A.9      | Deska plošného spoje – bottom (usměrnění s dolní propustí) .....              | 43        |
| A.10     | Obvodové zapojení – převodník I/U .....                                       | 43        |
| A.11     | Deska plošného spoje – top (převodník I/U) .....                              | 44        |
| A.12     | Deska plošného spoje – bottom (převodník I/U) .....                           | 44        |
| A.13     | Obvodové zapojení – proudový kanál .....                                      | 45        |
| A.14     | Deska plošného spoje – top (proudový kanál) .....                             | 45        |
| A.15     | Deska plošného spoje – bottom (proudový kanál) .....                          | 46        |
| A.16     | Obvodové zapojení – násobička a dolní propust .....                           | 46        |
| A.17     | Deska plošného spoje – top (násobička a dolní propust) .....                  | 47        |
| A.18     | Deska plošného spoje – bottom (násobička a dolní propust) .....               | 47        |
| A.19     | Obvodové zapojení – A/D převodník, mikrokontrolér a displej .....             | 48        |
| A.20     | Deska plošného spoje – top (A/D převodník, mikrokontrolér a displej) .....    | 49        |
| A.21     | Deska plošného spoje – bottom (A/D převodník, mikrokontrolér a displej) ..... | 49        |
| <b>B</b> | <b>Seznam součástek</b>                                                       | <b>50</b> |
| B.1      | Napájecí zdroj - seznam součástek .....                                       | 50        |
| B.2      | Napěťový kanál - seznam součástek .....                                       | 51        |
| B.3      | Usměrnění s dolní propustí - seznam součástek .....                           | 53        |
| B.4      | Převodník I/U - seznam součástek .....                                        | 55        |
| B.5      | Proudový kanál - seznam součástek .....                                       | 56        |
| B.6      | Násobička a dolní propust - seznam součástek .....                            | 57        |
| B.7      | A/D převodník, mikrokontrolér a displej - seznam součástek .....              | 59        |

## A SCHÉMATA A DPS

### A.1 Obvodové zapojení – napájecí zdroj

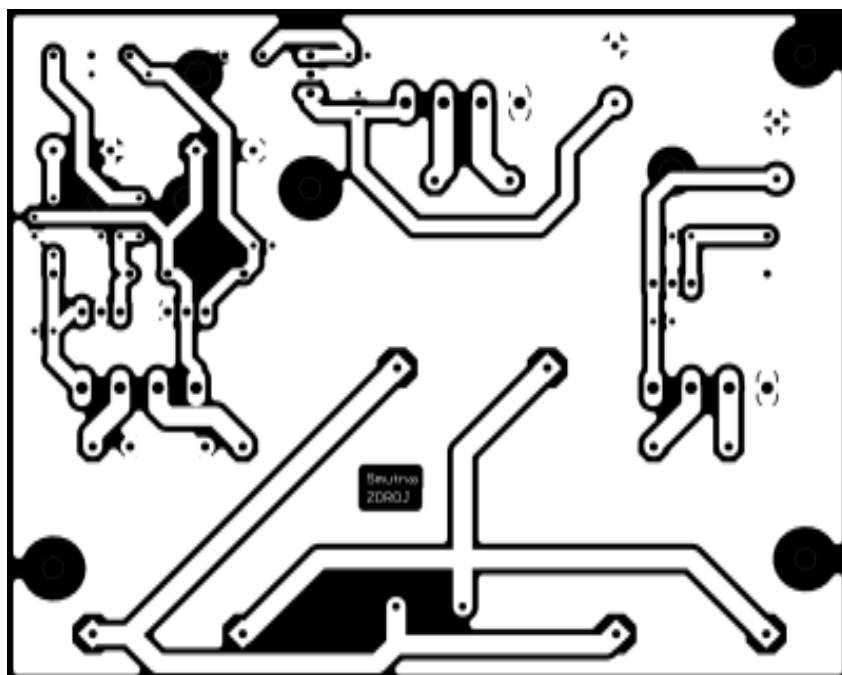


### A.2 Deska plošného spoje – top (napájecí zdroj)



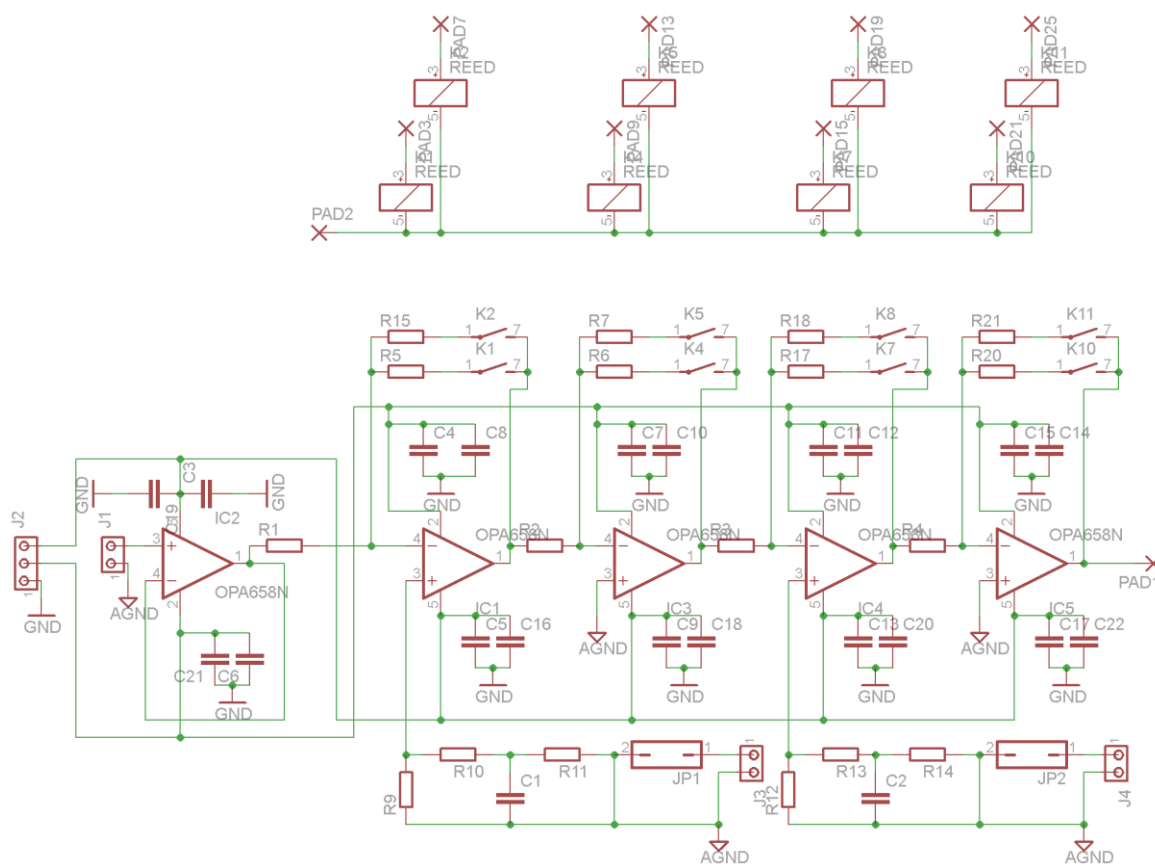
Rozměr desky 111,9 x 89 [mm], měřítko M1:1

### A.3 Deska plošného spoje – bottom (napájecí zdroj)

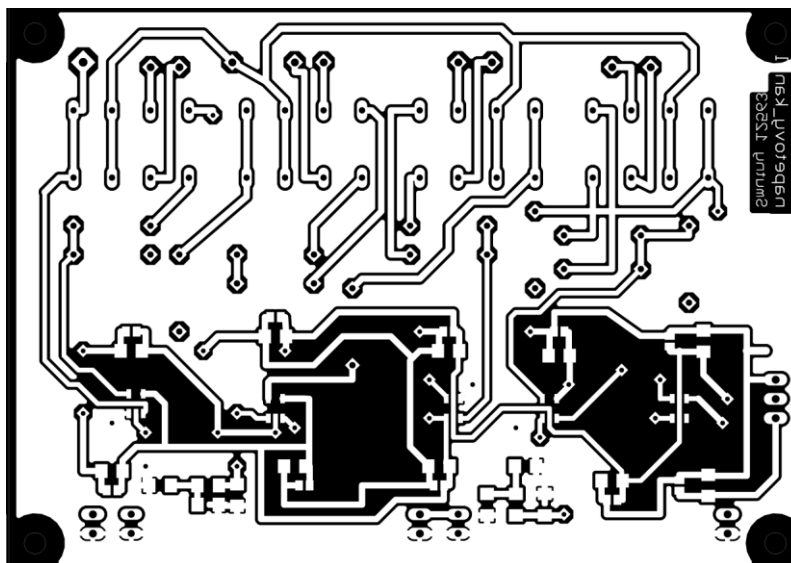


Rozměr desky 111,9 x 89 [mm], měřítko M1:1

### A.4 Obvodové zapojení – napěťový kanál

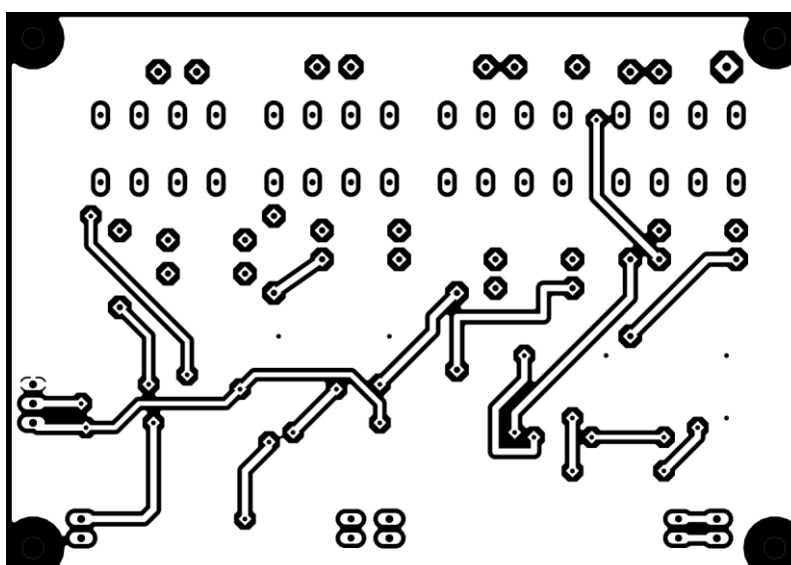


## A.5 Deska plošného spoje – top (napěťový kanál)



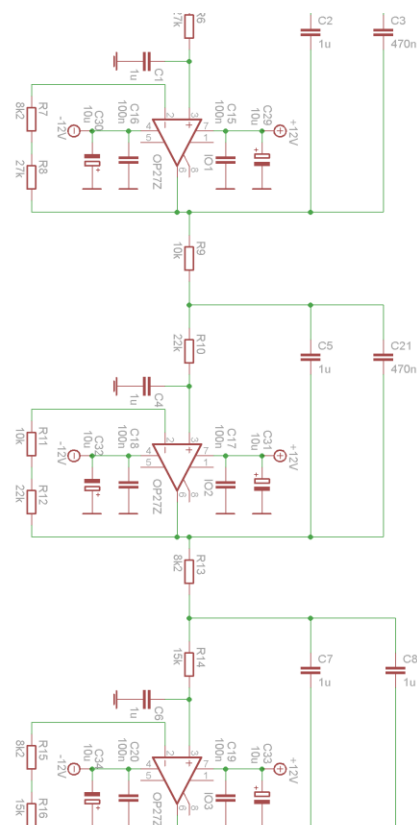
Rozměr desky 105,2 x 74,1 [mm], měřítko M1:1

## A.6 Deska plošného spoje – bottom (napěťový kanál)

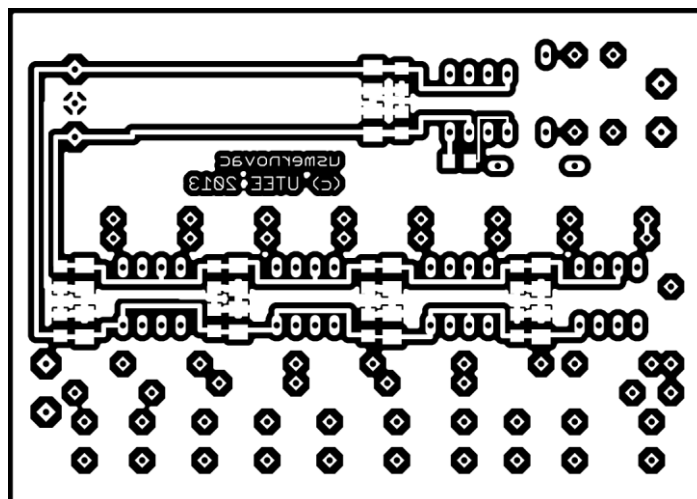


Rozměr desky 105,2 x 74,1 [mm], měřítko M1:1

## A.7 Obvodové zapojení – usměrnění s dolní propustí

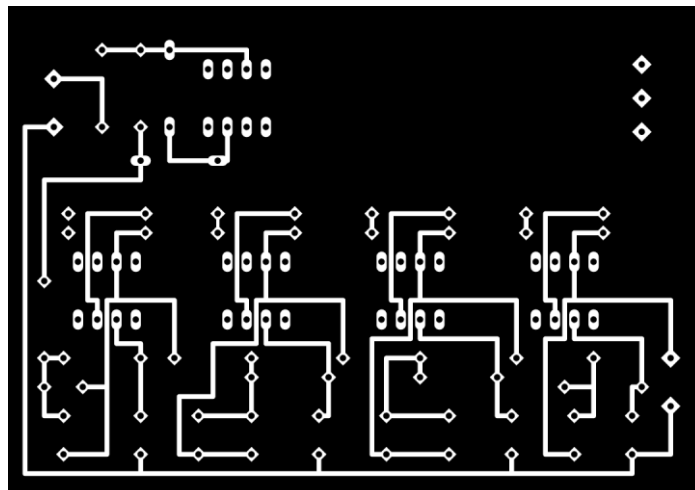


## A.8 Deska plošného spoje – top (usměrnění s dolní propustí)



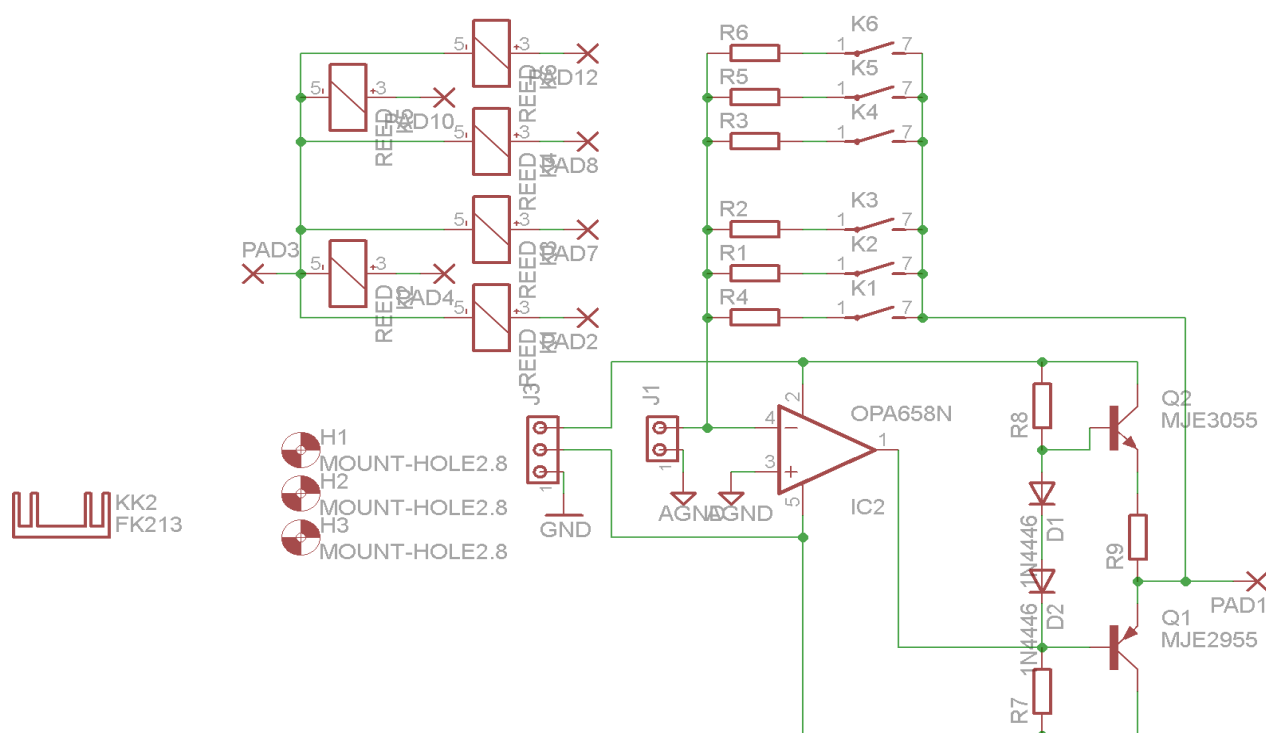
Rozměr desky 92,5 x 65,8 [mm], měřítko M1:1

## A.9 Deska plošného spoje – bottom (usměrnění s dolní propustí)

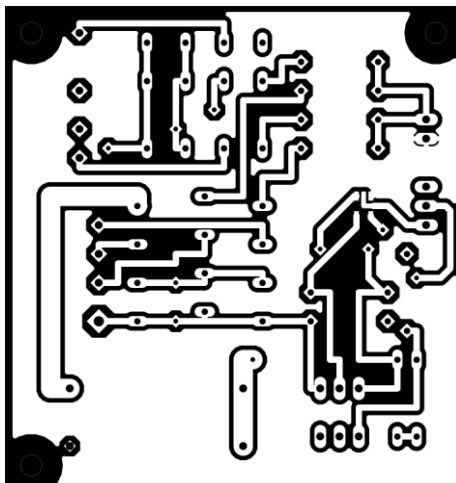


Rozměr desky 92,5 x 65,8 [mm], měřítko M1:1

## A.10 Obvodové zapojení – převodník I/U

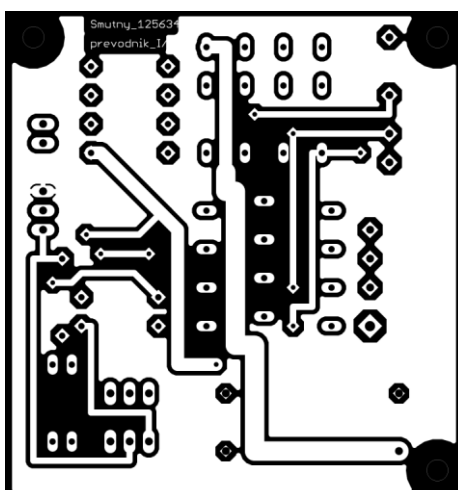


### A.11 Deska plošného spoje – top (převodník I/U)



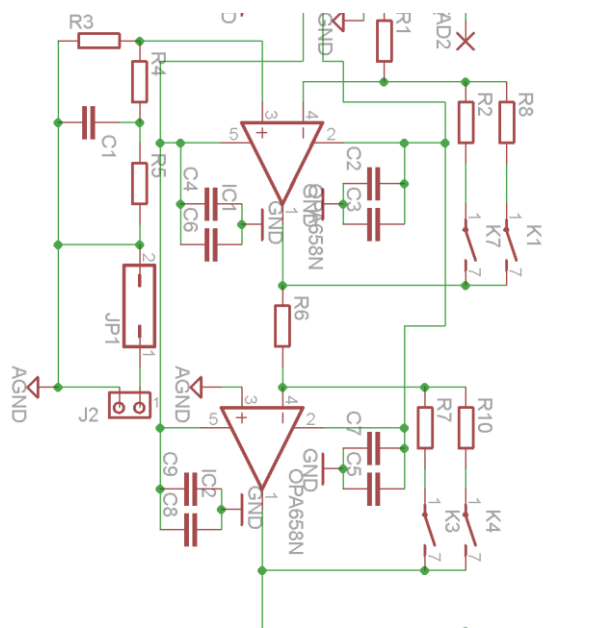
Rozměr desky 64,1 x 60,4 [mm], měřítko M1:1

### A.12 Deska plošného spoje – bottom (převodník I/U)

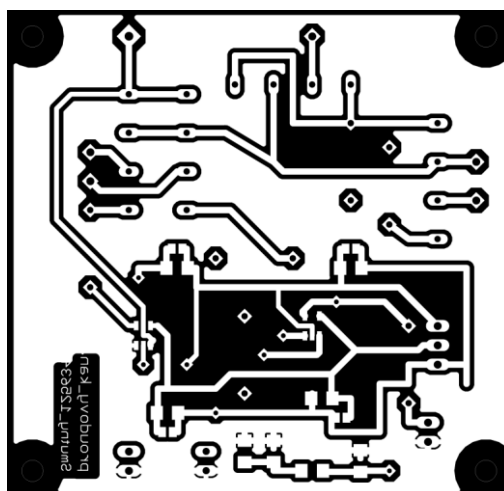


Rozměr desky 64,1 x 60,4 [mm], měřítko M1:1

### A.13 Obvodové zapojení – proudový kanál

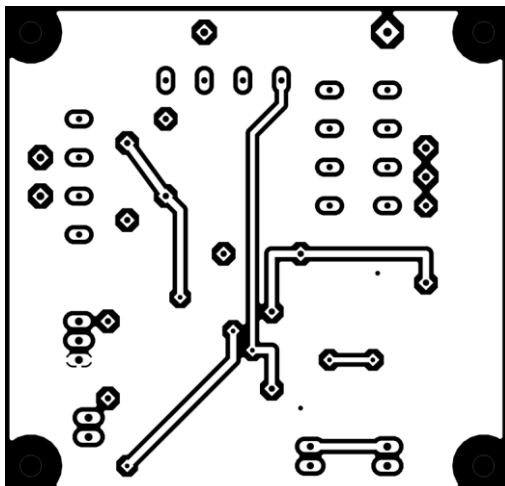


### A.14 Deska plošného spoje – top (proudový kanál)



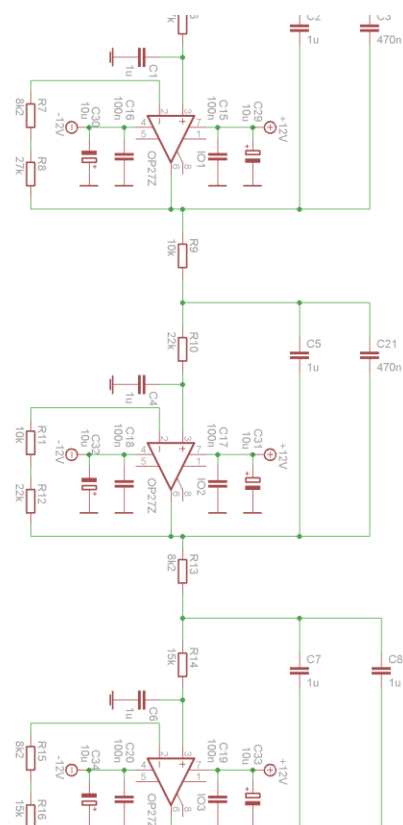
Rozměr desky 66,6 x 64,2 [mm], měřítko M1:1

## A.15 Deska plošného spoje – bottom (proudový kanál)

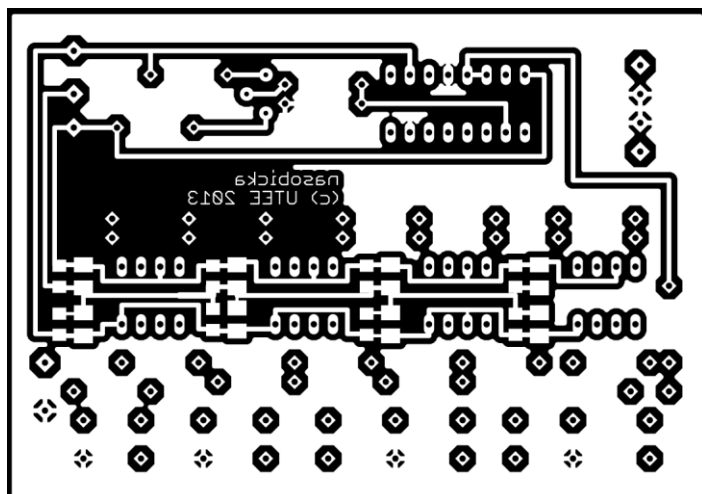


Rozměr desky 66,6 x 64,2 [mm], měřítko M1:1

## A.16 Obvodové zapojení – násobička a dolní propust

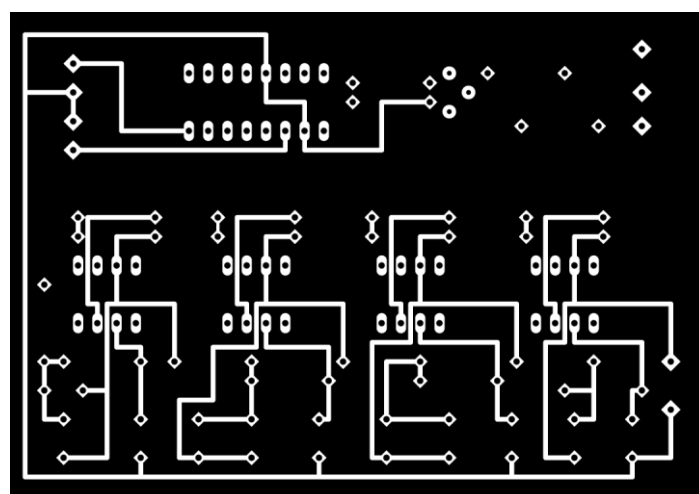


### A.17 Deska plošného spoje – top (násobička a dolní propust)



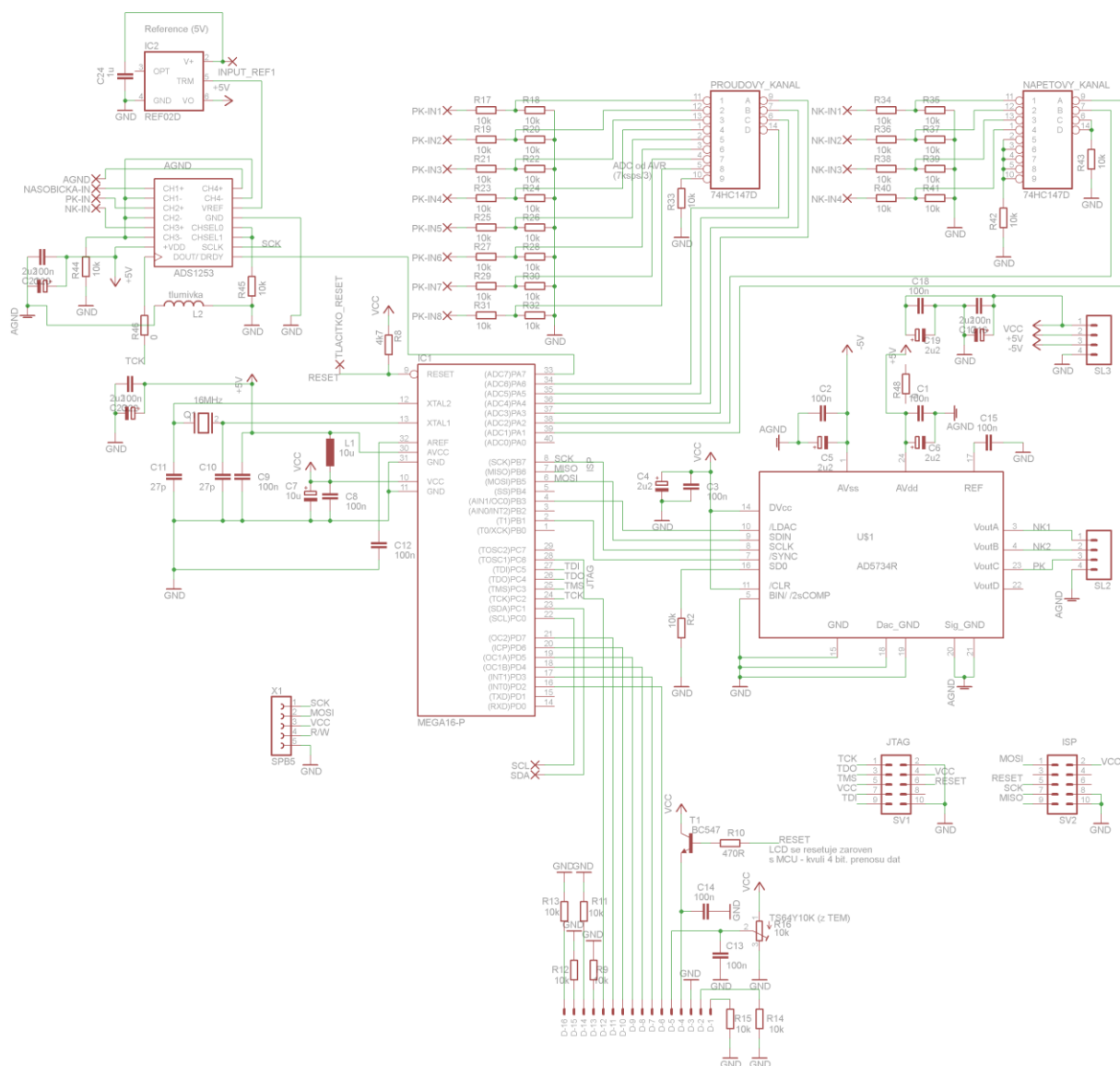
Rozměr desky 92,7 x 65,5 [mm], měřítko M1:1

### A.18 Deska plošného spoje – bottom (násobička a dolní propust)

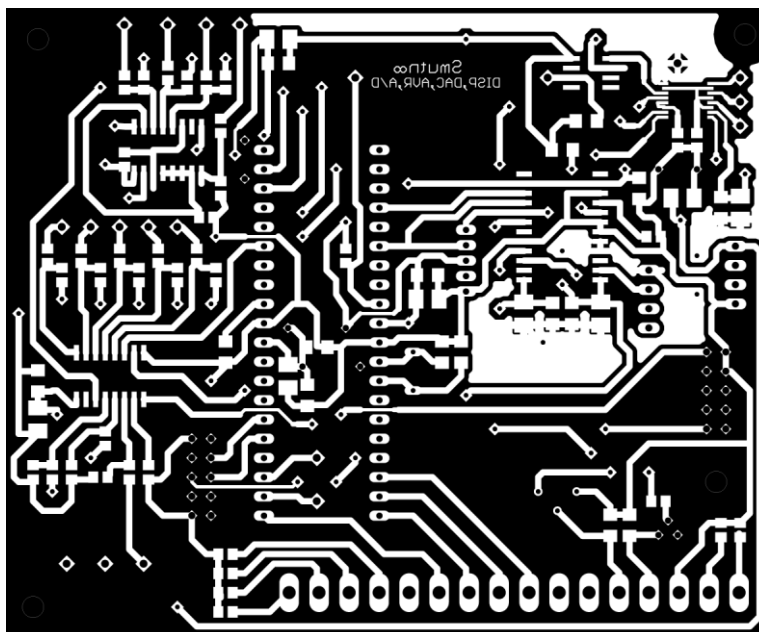


Rozměr desky 92,7 x 65,5 [mm], měřítko M1:1

## A.19 Obvodové zapojení – A/D převodník, mikrokontrolér a displej

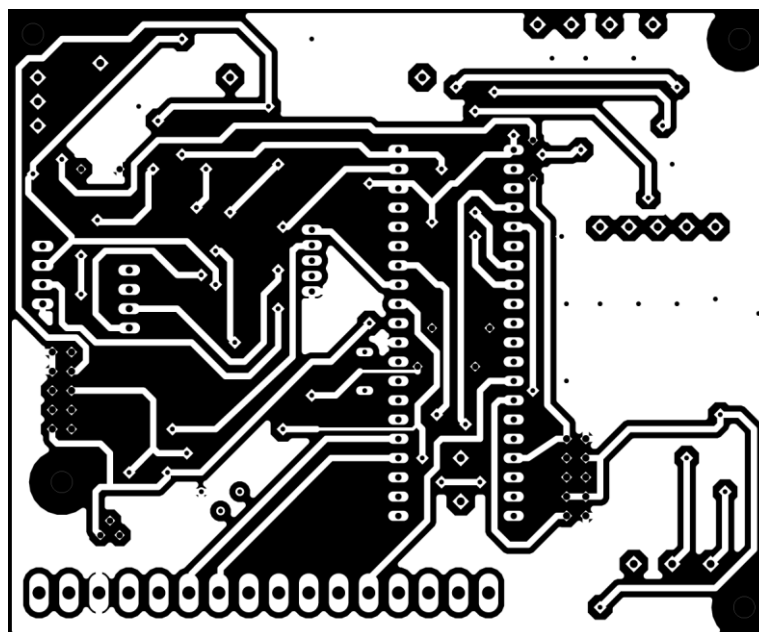


### A.20 Deska plošného spoje – top (A/D převodník, mikrokontrolér a displej)



Rozměr desky 100,8 x 83,3 [mm], měřítko M1:1

### A.21 Deska plošného spoje – bottom (A/D převodník, mikrokontrolér a displej)



Rozměr desky 100,8 x 83,3 [mm], měřítko M1:1

## B SEZNAM SOUČÁSTEK

### B.1 Napájecí zdroj - seznam součástek

| Označení | Hodnota | Pouzdro      | Popis                      |
|----------|---------|--------------|----------------------------|
| +5V      | +5V     | -            | konektor                   |
| +12V     | +12V    | -            | konektor                   |
| -5V      | -5V     | -            | konektor                   |
| 5V       | 5V      | -            | konektor                   |
| B1       | -       | KBL          | usměrňovač                 |
| B2       | -       | KBL          | usměrňovač                 |
| B3       | -       | KBL          | usměrňovač                 |
| C1       | 2,2u    | E2,5-5       | kondenzátor elektrolytický |
| C2       | 1u      | E2,5-5       | kondenzátor elektrolytický |
| C3       | 330n    | C025-040X050 | kondenzátor fóliový        |
| C4       | 100n    | C025-040X050 | kondenzátor fóliový        |
| C5       | 2200u   | E7,5-16      | kondenzátor elektrolytický |
| C7       | 330n    | C025-040X050 | kondenzátor fóliový        |
| C8       | 100n    | C025-040X050 | kondenzátor fóliový        |
| C10      | 330n    | C025-040X050 | kondenzátor fóliový        |
| C11      | 100n    | C025-040X050 | kondenzátor fóliový        |
| C13      | 2200u   | E7,5-16      | kondenzátor elektrolytický |
| C14      | 2200u   | E7,5-16      | kondenzátor elektrolytický |
| C15      | 2200u   | E7,5-16      | kondenzátor elektrolytický |
| D1       | 1N4004  | DO41-10      | dioda                      |
| D2       | 1N4004  | DO41-10      | dioda                      |
| GND      | GND     | -            | konektor                   |
| GND1     | GND     | -            | konektor                   |
| GND2     | GND     | -            | konektor                   |
| IC1      | 7812T   | TO220H       | integrovaný obvod          |
| IC2      | 7805T   | TO220H       | integrovaný obvod          |
| IC3      | 7805T   | TO220H       | integrovaný obvod          |
| IC4      | 7805T   | TO220H       | integrovaný obvod          |
| JP1      | -       | PINHD-1X1    | konektor                   |
| JP2      | -       | PINHD-1X1    | konektor                   |
| R1       | 1k      | 0204/7       | rezistor                   |

|      |   |         |        |
|------|---|---------|--------|
| R2   | 0 | 0207/5V | jumper |
| R3   | 0 | 0204/7  | jumper |
| U\$1 | - | EI30-2  | trafo  |
| U\$2 | - | EI30-2  | trafo  |
| U\$3 | - | EI30-2  | trafo  |

## B.2 Napěťový kanál - seznam součástek

| Označení | Hodnota | Pouzdro | Popis                     |
|----------|---------|---------|---------------------------|
| C1       | 100n    | C1206   | SMD kondenzátor keramický |
| C2       | 100n    | C1206   | SMD kondenzátor keramický |
| C3       | 100n    | C1206   | SMD kondenzátor keramický |
| C4       | 6,8μ    | B       | SMD kondenzátor tantalový |
| C5       | 6,8μ    | B       | SMD kondenzátor tantalový |
| C6       | 100n    | C1206   | SMD kondenzátor keramický |
| C7       | 6,8μ    | B       | SMD kondenzátor tantalový |
| C8       | 100n    | C1206   | SMD kondenzátor keramický |
| C9       | 6,8μ    | B       | SMD kondenzátor tantalový |
| C10      | 100n    | C1206   | SMD kondenzátor keramický |
| C11      | 6,8μ    | B       | SMD kondenzátor tantalový |
| C12      | 100n    | C1206   | SMD kondenzátor keramický |
| C13      | 6,8μ    | B       | SMD kondenzátor tantalový |
| C14      | 100n    | C1206   | SMD kondenzátor keramický |
| C15      | 6,8μ    | B       | SMD kondenzátor tantalový |
| C16      | 100n    | C1206   | SMD kondenzátor keramický |
| C17      | 6,8μ    | B       | SMD kondenzátor tantalový |
| C18      | 100n    | C1206   | SMD kondenzátor keramický |
| C19      | 6,8μ    | B       | SMD kondenzátor tantalový |
| C20      | 100n    | C1206   | SMD kondenzátor keramický |
| C21      | 6,8μ    | B       | SMD kondenzátor tantalový |
| C22      | 100n    | C1206   | SMD kondenzátor keramický |
| IC1      | OPA656N | SOT23-5 | operační zesilovač        |
| IC2      | OPA656N | SOT23-5 | operační zesilovač        |
| IC3      | OPA656N | SOT23-5 | operační zesilovač        |
| IC4      | OPA656N | SOT23-5 | operační zesilovač        |
| IC5      | OPA656N | SOT23-5 | operační zesilovač        |

|              |                  |           |                        |
|--------------|------------------|-----------|------------------------|
| <b>J1</b>    | IN, AGND         | MTA02-100 | konektor               |
| <b>J2</b>    | +/-5V, GND       | MTA03-100 | konektor               |
| <b>J3</b>    | nulování offsetu | MTA02-100 | konektor               |
| <b>J4</b>    | nulování offsetu | MTA02-100 | konektor               |
| <b>JP1</b>   | 0                | 0207      | jumper                 |
| <b>JP2</b>   | 0                | 0207      | jumper                 |
| <b>K1</b>    | x1               | REED      | elektromagnetické relé |
| <b>K2</b>    | x10              | REED      | elektromagnetické relé |
| <b>K4</b>    | x1               | REED      | elektromagnetické relé |
| <b>K5</b>    | x10              | REED      | elektromagnetické relé |
| <b>K7</b>    | x1               | REED      | elektromagnetické relé |
| <b>K8</b>    | x10              | REED      | elektromagnetické relé |
| <b>K10</b>   | x1               | REED      | elektromagnetické relé |
| <b>K11</b>   | x3               | REED      | elektromagnetické relé |
| <b>PAD1</b>  | OUT              | 3,17/1,1  | konektor               |
| <b>PAD2</b>  | -12V             | 2,15/1,0  | konektor               |
| <b>PAD3</b>  | 0/+12V           | 2,15/1,0  | konektor               |
| <b>PAD7</b>  | 0/+12V           | 2,15/1,0  | konektor               |
| <b>PAD9</b>  | 0/+12V           | 2,15/1,0  | konektor               |
| <b>PAD13</b> | 0/+12V           | 2,15/1,0  | konektor               |
| <b>PAD15</b> | 0/+12V           | 2,15/1,0  | konektor               |
| <b>PAD19</b> | 0/+12V           | 2,15/1,0  | konektor               |
| <b>PAD21</b> | 0/+12V           | 2,15/1,0  | konektor               |
| <b>PAD25</b> | 0/+12V           | 2,15/1,0  | konektor               |
| <b>R1</b>    | 1k               | 0207/10   | rezistor               |
| <b>R2</b>    | 1k               | 0207/10   | rezistor               |
| <b>R3</b>    | 1k               | 0207/10   | rezistor               |
| <b>R4</b>    | 1k               | 0207/10   | rezistor               |
| <b>R5</b>    | 1k               | 0207/10   | rezistor               |
| <b>R6</b>    | 1k               | 0207/10   | rezistor               |
| <b>R7</b>    | 10k              | 0207/10   | rezistor               |
| <b>R9</b>    | 170              | R1206     | SMD rezistor           |
| <b>R10</b>   | 270              | R1206     | SMD rezistor           |
| <b>R11</b>   | 270              | R1206     | SMD rezistor           |
| <b>R12</b>   | 170              | R1206     | SMD rezistor           |
| <b>R13</b>   | 270              | R1206     | SMD rezistor           |

|            |     |         |              |
|------------|-----|---------|--------------|
| <b>R14</b> | 270 | R1206   | SMD rezistor |
| <b>R15</b> | 10k | 0207/10 | rezistor     |
| <b>R17</b> | 1k  | 0207/10 | rezistor     |
| <b>R18</b> | 10k | 0207/10 | rezistor     |
| <b>R20</b> | 1k  | 0207/10 | rezistor     |
| <b>R21</b> | 10k | 0207/10 | rezistor     |

### **B.3 Usměrnění s dolní propustí - seznam součástek**

| <b>Označení</b> | <b>Hodnota</b> | <b>Pouzdro</b> | <b>Popis</b>              |
|-----------------|----------------|----------------|---------------------------|
| <b>C1</b>       | 1u             | C050-075X075   | kondenzátor fóliový       |
| <b>C2</b>       | 1u             | C050-075X075   | kondenzátor fóliový       |
| <b>C3</b>       | 470n           | C050-045X075   | kondenzátor fóliový       |
| <b>C4</b>       | 1u             | C050-075X075   | kondenzátor fóliový       |
| <b>C5</b>       | 1u             | C050-075X075   | kondenzátor fóliový       |
| <b>C6</b>       | 1u             | C050-075X075   | kondenzátor fóliový       |
| <b>C7</b>       | 1u             | C050-075X075   | kondenzátor fóliový       |
| <b>C8</b>       | 1u             | C050-075X075   | kondenzátor fóliový       |
| <b>C9</b>       | 100n           | C050-045X075   | kondenzátor fóliový       |
| <b>C10</b>      | 680n           | C050-045X075   | kondenzátor fóliový       |
| <b>C11</b>      | 10u            | B/3528-21R     | SMD kondenzátor tantalový |
| <b>C12</b>      | 100n           | C1206          | SMD kondenzátor keramický |
| <b>C13</b>      | 10u            | B/3528-21R     | SMD kondenzátor tantalový |
| <b>C14</b>      | 100n           | C1206          | SMD kondenzátor keramický |
| <b>C15</b>      | 100n           | C1206          | SMD kondenzátor keramický |
| <b>C16</b>      | 100n           | C1206          | SMD kondenzátor keramický |
| <b>C17</b>      | 100n           | C1206          | SMD kondenzátor keramický |
| <b>C18</b>      | 100n           | C1206          | SMD kondenzátor keramický |
| <b>C19</b>      | 100n           | C1206          | SMD kondenzátor keramický |
| <b>C20</b>      | 100n           | C1206          | SMD kondenzátor keramický |
| <b>C21</b>      | 470n           | C050-045X075   | kondenzátor fóliový       |
| <b>C22</b>      | 30p            | C1206          | SMD kondenzátor keramický |
| <b>C23</b>      | 100n           | C1206          | SMD kondenzátor keramický |
| <b>C24</b>      | 100n           | C1206          | SMD kondenzátor keramický |
| <b>C29</b>      | 10u            | B/3528-21R     | SMD kondenzátor tantalový |
| <b>C30</b>      | 10u            | B/3528-21R     | SMD kondenzátor tantalový |

|              |         |            |                           |
|--------------|---------|------------|---------------------------|
| <b>C31</b>   | 10u     | B/3528-21R | SMD kondenzátor tantalový |
| <b>C32</b>   | 10u     | B/3528-21R | SMD kondenzátor tantalový |
| <b>C33</b>   | 10u     | B/3528-21R | SMD kondenzátor tantalový |
| <b>C34</b>   | 10u     | B/3528-21R | SMD kondenzátor tantalový |
| <b>C37</b>   | 10u     | B/3528-21R | SMD kondenzátor tantalový |
| <b>C38</b>   | 10u     | B/3528-21R | SMD kondenzátor tantalový |
| <b>D1</b>    | BAT42   | DO35-10    | dioda                     |
| <b>D2</b>    | BAT42   | DO35-10    | dioda                     |
| <b>IC1</b>   | NE5534N | DIL08      | usměrňovací IO            |
| <b>IO1</b>   | OP27Z   | DIL08      | operační zesilovač        |
| <b>IO2</b>   | OP27Z   | DIL08      | operační zesilovač        |
| <b>IO3</b>   | OP27Z   | DIL08      | operační zesilovač        |
| <b>IO4</b>   | OP27Z   | DIL08      | operační zesilovač        |
| <b>PAD1</b>  | OUT     | 2,54/0,8   | konektor                  |
| <b>PAD2</b>  | AGND    | 2,54/0,8   | konektor                  |
| <b>PAD3</b>  | IN      | 2,54/0,8   | konektor                  |
| <b>PAD10</b> | AGND    | 2,54/0,8   | konektor                  |
| <b>PAD11</b> | +12V    | 2,54/0,8   | konektor                  |
| <b>PAD12</b> | GND     | 2,54/0,8   | konektor                  |
| <b>PAD13</b> | -12V    | 2,54/0,8   | konektor                  |
| <b>R1</b>    | 1k      | 0207/10    | rezistor                  |
| <b>R2</b>    | 1k      | 0207/10    | rezistor                  |
| <b>R5</b>    | 8k2     | 0207/10    | rezistor                  |
| <b>R6</b>    | 27k     | 0207/10    | rezistor                  |
| <b>R7</b>    | 8k2     | 0207/10    | rezistor                  |
| <b>R8</b>    | 27k     | 0207/10    | rezistor                  |
| <b>R9</b>    | 10k     | 0207/10    | rezistor                  |
| <b>R10</b>   | 22k     | 0207/10    | rezistor                  |
| <b>R11</b>   | 10k     | 0207/10    | rezistor                  |
| <b>R12</b>   | 22k     | 0207/10    | rezistor                  |
| <b>R13</b>   | 8k2     | 0207/10    | rezistor                  |
| <b>R14</b>   | 15k     | 0207/10    | rezistor                  |
| <b>R15</b>   | 8k2     | 0207/10    | rezistor                  |
| <b>R16</b>   | 15k     | 0207/10    | rezistor                  |
| <b>R17</b>   | 39k     | 0207/10    | rezistor                  |
| <b>R18</b>   | 82k     | 0207/10    | rezistor                  |

|            |     |         |          |
|------------|-----|---------|----------|
| <b>R19</b> | 39k | 0207/10 | rezistor |
| <b>R20</b> | 82k | 0207/10 | rezistor |

## B.4 Převodník I/U - seznam součástek

| Označení     | Hodnota    | Pouzdro   | Popis                    |
|--------------|------------|-----------|--------------------------|
| <b>D1</b>    | 1N4446     | DO35-10   | dioda                    |
| <b>D2</b>    | 1N4446     | DO35-10   | dioda                    |
| <b>IC2</b>   | OPA656N    | SOT23-5   | operační zesilovač       |
| <b>J1</b>    | IN, AGND   | MTA02-100 | konektor                 |
| <b>J3</b>    | +/-5V, GND | MTA03-100 | konektor                 |
| <b>K1</b>    | PAD2       | REED      | elektromagnetické relé   |
| <b>K2</b>    | PAD4       | REED      | elektromagnetické relé   |
| <b>K3</b>    | PAD7       | REED      | elektromagnetické relé   |
| <b>K4</b>    | PAD8       | REED      | elektromagnetické relé   |
| <b>K5</b>    | PAD10      | REED      | elektromagnetické relé   |
| <b>K6</b>    | PAD12      | REED      | elektromagnetické relé   |
| <b>PAD1</b>  | OUT        | 3,17/1,3  | konektor                 |
| <b>PAD2</b>  | 0/+12V     | 2,15/1,0  | konektor                 |
| <b>PAD3</b>  | -12V       | 2,15/1,0  | konektor                 |
| <b>PAD4</b>  | 0/+12V     | 2,15/1,0  | konektor                 |
| <b>PAD7</b>  | 0/+12V     | 2,15/1,0  | konektor                 |
| <b>PAD8</b>  | 0/+12V     | 2,15/1,0  | konektor                 |
| <b>PAD10</b> | 0/+12V     | 2,15/1,0  | konektor                 |
| <b>PAD12</b> | 0/+12V     | 2,15/1,0  | konektor                 |
| <b>Q1</b>    | MJE2955    | TO220AV   | výkonový tranzistor      |
| <b>Q2</b>    | MJE3055    | TO220AV   | výkonový tranzistor      |
| <b>R1</b>    | 100        | 0207/10   | rezistor                 |
| <b>R2</b>    | 10         | 0207/10   | rezistor                 |
| <b>R3</b>    | 10k        | 0207/10   | rezistor                 |
| <b>R4</b>    | 1k         | 0207/10   | rezistor                 |
| <b>R5</b>    | 0,1        | 0617/22   | rezistor (odporový drát) |
| <b>R6</b>    | 1          | 0617/22   | rezistor (odporový drát) |
| <b>R7</b>    | 1k         | 0207/10   | rezistor                 |
| <b>R8</b>    | 1k         | 0207/10   | rezistor                 |
| <b>R9</b>    | 0M1        | 0207/10   | rezistor                 |

## B.5 Proudový kanál - seznam součástek

| Označení | Hodnota          | Pouzdro   | Popis                     |
|----------|------------------|-----------|---------------------------|
| C1       | 100n             | C1206     | SMD kondenzátor keramický |
| C2       | 6,8μ             | B         | SMD kondenzátor tantalový |
| C3       | 100n             | C1206     | SMD kondenzátor keramický |
| C4       | 6,8μ             | B         | SMD kondenzátor tantalový |
| C5       | 100n             | C1206     | SMD kondenzátor keramický |
| C6       | 100n             | C1206     | SMD kondenzátor keramický |
| C7       | 6,8μ             | B         | SMD kondenzátor tantalový |
| C8       | 100n             | C1206     | SMD kondenzátor keramický |
| C9       | 6,8μ             | B         | SMD kondenzátor tantalový |
| IC1      | OPA656N          | SOT23-5   | operační zesilovač        |
| IC2      | OPA656N          | SOT23-5   | operační zesilovač        |
| J1       | IN, AGND         | MTA02-100 | konektor                  |
| J2       | nulování offsetu | MTA02-100 | konektor                  |
| J3       | +/-5V, GND       | MTA03-100 | konektor                  |
| JP1      | 0                | 0207      | jumper                    |
| K1       | x10              | REED      | elektromagnetické relé    |
| K3       | x1               | REED      | elektromagnetické relé    |
| K4       | x3               | REED      | elektromagnetické relé    |
| K7       | x1               | REED      | elektromagnetické relé    |
| PAD1     | OUT              | 3,17/1,1  | konektor                  |
| PAD2     | 0/+12V           | 2,15/1,0  | konektor                  |
| PAD4     | 0/+12V           | 2,15/1,0  | konektor                  |
| PAD5     | -12V             | 2,15/1,0  | konektor                  |
| PAD8     | 0/+12V           | 2,15/1,0  | konektor                  |
| PAD10    | 0/+12V           | 2,15/1,0  | konektor                  |
| R1       | 1k               | 0207/10   | rezistor                  |
| R2       | 1k               | 0207/10   | rezistor                  |
| R3       | 170              | R1206     | SMD rezistor              |
| R4       | 270              | R1206     | SMD rezistor              |
| R5       | 270              | R1206     | SMD rezistor              |
| R6       | 1k               | 0207/10   | rezistor                  |
| R7       | 1k               | 0207/10   | rezistor                  |
| R8       | 10k              | 0207/10   | rezistor                  |

|            |    |         |          |
|------------|----|---------|----------|
| <b>R10</b> | 3k | 0207/10 | rezistor |
|------------|----|---------|----------|

## B.6 Násobička a dolní propust - seznam součástek

| Označení   | Hodnota | Pouzdro      | Popis                     |
|------------|---------|--------------|---------------------------|
| <b>C1</b>  | 1u      | C050-075X075 | kondenzátor fóliový       |
| <b>C2</b>  | 1u      | C050-075X075 | kondenzátor fóliový       |
| <b>C3</b>  | 470n    | C050-045X075 | kondenzátor fóliový       |
| <b>C4</b>  | 1u      | C050-075X075 | kondenzátor fóliový       |
| <b>C5</b>  | 1u      | C050-075X075 | kondenzátor fóliový       |
| <b>C6</b>  | 1u      | C050-075X075 | kondenzátor fóliový       |
| <b>C7</b>  | 1u      | C050-075X075 | kondenzátor fóliový       |
| <b>C8</b>  | 1u      | C050-075X075 | kondenzátor fóliový       |
| <b>C9</b>  | 100n    | C050-045X075 | kondenzátor fóliový       |
| <b>C10</b> | 680n    | C050-045X075 | kondenzátor fóliový       |
| <b>C15</b> | 100n    | C1206        | SMD kondenzátor keramický |
| <b>C16</b> | 100n    | C1206        | SMD kondenzátor keramický |
| <b>C17</b> | 100n    | C1206        | SMD kondenzátor keramický |
| <b>C18</b> | 100n    | C1206        | SMD kondenzátor keramický |
| <b>C19</b> | 100n    | C1206        | SMD kondenzátor keramický |
| <b>C20</b> | 100n    | C1206        | SMD kondenzátor keramický |
| <b>C21</b> | 470n    | C050-045X075 | kondenzátor fóliový       |
| <b>C23</b> | 100n    | C1206        | SMD kondenzátor keramický |
| <b>C24</b> | 100n    | C1206        | SMD kondenzátor keramický |
| <b>C29</b> | 10u     | B/3528-21R   | SMD kondenzátor tantalový |
| <b>C30</b> | 10u     | B/3528-21R   | SMD kondenzátor tantalový |
| <b>C31</b> | 10u     | B/3528-21R   | SMD kondenzátor tantalový |
| <b>C32</b> | 10u     | B/3528-21R   | SMD kondenzátor tantalový |
| <b>C33</b> | 10u     | B/3528-21R   | SMD kondenzátor tantalový |
| <b>C34</b> | 10u     | B/3528-21R   | SMD kondenzátor tantalový |
| <b>C37</b> | 10u     | B/3528-21R   | SMD kondenzátor tantalový |
| <b>C38</b> | 10u     | B/3528-21R   | SMD kondenzátor tantalový |
| <b>IO1</b> | OP27Z   | DIL08        | operační zesilovač        |
| <b>IO2</b> | OP27Z   | DIL08        | operační zesilovač        |
| <b>IO3</b> | OP27Z   | DIL08        | operační zesilovač        |

|              |         |          |                     |
|--------------|---------|----------|---------------------|
| <b>IO4</b>   | OP27Z   | DIL08    | operační zesilovač  |
| <b>IO5</b>   | MPY634  | DIL16    | analogová násobička |
| <b>PAD1</b>  | OUT     | 2,54/0,8 | konektor            |
| <b>PAD2</b>  | AGND    | 2,54/0,8 | konektor            |
| <b>PAD3</b>  | IN (X1) | 2,54/0,8 | konektor            |
| <b>PAD4</b>  | AGND    | 2,54/0,8 | konektor            |
| <b>PAD5</b>  | IN (Y1) | 2,54/0,8 | konektor            |
| <b>PAD10</b> | AGND    | 2,54/0,8 | konektor            |
| <b>PAD11</b> | +12V    | 2,54/0,8 | konektor            |
| <b>PAD12</b> | GND     | 2,54/0,8 | konektor            |
| <b>PAD13</b> | -12V    | 2,54/0,8 | konektor            |
| <b>R1</b>    | 47k     | RTRIM64Y | odporový trimr      |
| <b>R2</b>    | 8k2     | 0207/10  | rezistor            |
| <b>R3</b>    | 8k2     | 0207/10  | rezistor            |
| <b>R4</b>    | 470k    | 0207/10  | rezistor            |
| <b>R5</b>    | 8k2     | 0207/10  | rezistor            |
| <b>R6</b>    | 27k     | 0207/10  | rezistor            |
| <b>R7</b>    | 8k2     | 0207/10  | rezistor            |
| <b>R8</b>    | 27k     | 0207/10  | rezistor            |
| <b>R9</b>    | 10k     | 0207/10  | rezistor            |
| <b>R10</b>   | 22k     | 0207/10  | rezistor            |
| <b>R11</b>   | 10k     | 0207/10  | rezistor            |
| <b>R12</b>   | 22k     | 0207/10  | rezistor            |
| <b>R13</b>   | 8k2     | 0207/10  | rezistor            |
| <b>R14</b>   | 15k     | 0207/10  | rezistor            |
| <b>R15</b>   | 8k2     | 0207/10  | rezistor            |
| <b>R16</b>   | 15k     | 0207/10  | rezistor            |
| <b>R17</b>   | 39k     | 0207/10  | rezistor            |
| <b>R18</b>   | 82k     | 0207/10  | rezistor            |
| <b>R19</b>   | 39k     | 0207/10  | rezistor            |
| <b>R20</b>   | 82k     | 0207/10  | rezistor            |
| <b>R21</b>   | 1k      | 0207/10  | rezistor            |

## B.7 A/D převodník, mikrokontrolér a displej - seznam součástek

| Označení   | Hodnota      | Pouzdro    | Popis                     |
|------------|--------------|------------|---------------------------|
| ADS1       | ADS1253      | ads1253    | A/D převodník             |
| AGND       | AGND         | 2,15/1,0   | konektor                  |
| C1         | 100n         | C1206      | SMD kondenzátor keramický |
| C2         | 100n         | C1206      | SMD kondenzátor keramický |
| C3         | 100n         | C1206      | SMD kondenzátor keramický |
| C4         | 2u2          | B/3528-21R | SMD kondenzátor tantalový |
| C5         | 2u2          | B/3528-21R | SMD kondenzátor tantalový |
| C6         | 2u2          | B/3528-21R | SMD kondenzátor tantalový |
| C7         | 10u          | B/3528-21R | SMD kondenzátor tantalový |
| C8         | 100n         | C1206      | SMD kondenzátor keramický |
| C9         | 100n         | C1206      | SMD kondenzátor keramický |
| C10        | 27p          | C1206      | SMD kondenzátor keramický |
| C11        | 27p          | C1206      | SMD kondenzátor keramický |
| C12        | 100n         | C1206      | SMD kondenzátor keramický |
| C13        | 100n         | C1206      | SMD kondenzátor keramický |
| C14        | 100n         | C1206      | SMD kondenzátor keramický |
| C15        | 100n         | C1206      | SMD kondenzátor keramický |
| C16        | 100n         | C1206      | SMD kondenzátor keramický |
| C17        | 2u2          | B/3528-21R | SMD kondenzátor tantalový |
| C18        | 100n         | C1206      | SMD kondenzátor keramický |
| C19        | 2u2          | B/3528-21R | SMD kondenzátor tantalový |
| C20        | 100n         | C1206      | SMD kondenzátor keramický |
| C21        | 2u2          | B/3528-21R | SMD kondenzátor tantalový |
| C22        | 100n         | C1206      | SMD kondenzátor keramický |
| C23        | 2u2          | B/3528-21R | SMD kondenzátor keramický |
| C24        | 1u           | C1206      | SMD kondenzátor keramický |
| D          | displej      | KK-156-16  | konektor                  |
| IC1        | MEGA16-P     | DIL40      | IO ATmega16               |
| IC2        | REF02D       | SO08       | napěťová reference +5V    |
| INPUT_REF1 | reference 5V | 2,15/1,0   | konektor                  |
| L1         | 10u          | 0204/7     | cívka                     |
| L2         | 1u           | 0207/5V    | tlumivka                  |

|                       |                   |          |                |
|-----------------------|-------------------|----------|----------------|
| <b>NAPETOVY_KANAL</b> | 74HC147D          | SO16     | dekodér        |
| <b>NASOBICKA-IN</b>   | IN násobička      | 2,15/1,0 | konektor       |
| <b>NK-IN</b>          | IN napěťový kanál | 2,15/1,0 | konektor       |
| <b>NK-IN1</b>         | x1                | 2,15/1,0 | konektor       |
| <b>NK-IN2</b>         | x10               | 2,15/1,0 | konektor       |
| <b>NK-IN3</b>         | x1                | 2,15/1,0 | konektor       |
| <b>NK-IN4</b>         | x3                | 2,15/1,0 | konektor       |
| <b>PK-IN</b>          | IN proudový kanál | 2,15/1,0 | konektor       |
| <b>PK-IN1</b>         | x1                | 2,15/1,0 | konektor       |
| <b>PK-IN2</b>         | x10               | 2,15/1,0 | konektor       |
| <b>PK-IN3</b>         | x1                | 2,15/1,0 | konektor       |
| <b>PK-IN4</b>         | x10               | 2,15/1,0 | konektor       |
| <b>PK-IN5</b>         | x1                | 2,15/1,0 | konektor       |
| <b>PK-IN6</b>         | x10               | 2,15/1,0 | konektor       |
| <b>PK-IN7</b>         | x1                | 2,15/1,0 | konektor       |
| <b>PK-IN8</b>         | X3                | 2,15/1,0 | konektor       |
| <b>PROUDOVY_KANAL</b> | 74HC147D          | SO16     | dekodér        |
| <b>Q1</b>             | 16MHz             | Q        | krystal        |
| <b>R2</b>             | 10k               | R0805    | SMD rezistor   |
| <b>R8</b>             | 4k7               | R0805    | SMD rezistor   |
| <b>R9</b>             | 10k               | R0805    | SMD rezistor   |
| <b>R10</b>            | 470R              | R0805    | SMD rezistor   |
| <b>R11</b>            | 10k               | R0805    | SMD rezistor   |
| <b>R12</b>            | 10k               | R0805    | SMD rezistor   |
| <b>R13</b>            | 10k               | R0805    | SMD rezistor   |
| <b>R14</b>            | 10k               | R0805    | SMD rezistor   |
| <b>R15</b>            | 10k               | R0805    | SMD rezistor   |
| <b>R16</b>            | 10k               | RTRIM64Y | odporový trimr |
| <b>R17</b>            | 10k               | R0805    | SMD rezistor   |
| <b>R18</b>            | 10k               | R0805    | SMD rezistor   |
| <b>R19</b>            | 10k               | R0805    | SMD rezistor   |
| <b>R20</b>            | 10k               | R0805    | SMD rezistor   |
| <b>R21</b>            | 10k               | R0805    | SMD rezistor   |
| <b>R22</b>            | 10k               | R0805    | SMD rezistor   |
| <b>R23</b>            | 10k               | R0805    | SMD rezistor   |
| <b>R24</b>            | 10k               | R0805    | SMD rezistor   |

|                       |                          |          |               |
|-----------------------|--------------------------|----------|---------------|
| <b>R25</b>            | 10k                      | R0805    | SMD rezistor  |
| <b>R26</b>            | 10k                      | R0805    | SMD rezistor  |
| <b>R27</b>            | 10k                      | R0805    | SMD rezistor  |
| <b>R28</b>            | 10k                      | R0805    | SMD rezistor  |
| <b>R29</b>            | 10k                      | R0805    | SMD rezistor  |
| <b>R30</b>            | 10k                      | R0805    | SMD rezistor  |
| <b>R31</b>            | 10k                      | R0805    | SMD rezistor  |
| <b>R32</b>            | 10k                      | R0805    | SMD rezistor  |
| <b>R33</b>            | 10k                      | R0805    | SMD rezistor  |
| <b>R34</b>            | 10k                      | R0805    | SMD rezistor  |
| <b>R35</b>            | 10k                      | R0805    | SMD rezistor  |
| <b>R36</b>            | 10k                      | R0805    | SMD rezistor  |
| <b>R37</b>            | 10k                      | R0805    | SMD rezistor  |
| <b>R38</b>            | 10k                      | R0805    | SMD rezistor  |
| <b>R39</b>            | 10k                      | R0805    | SMD rezistor  |
| <b>R40</b>            | 10k                      | R0805    | SMD rezistor  |
| <b>R41</b>            | 10k                      | R0805    | SMD rezistor  |
| <b>R42</b>            | 10k                      | R0805    | SMD rezistor  |
| <b>R43</b>            | 10k                      | R0805    | SMD rezistor  |
| <b>R44</b>            | 10k                      | R0805    | SMD rezistor  |
| <b>R45</b>            | 10k                      | R0805    | SMD rezistor  |
| <b>R46</b>            | 0                        | 0207/5V  | jumper        |
| <b>R48</b>            | 0                        | 0207/7   | jumper        |
| <b>SCL</b>            | SCL                      | 2,15/1,0 | konektor      |
| <b>SDA</b>            | SDA                      | 2,15/1,0 | konektor      |
| <b>SL2</b>            | NK1, NK2, PK, AGND       | M04      | konektor      |
| <b>SL3</b>            | VCC,+/-5V, GND           | M04      | konektor      |
| <b>SV1</b>            | JTAG                     | ML10L    | konektor      |
| <b>SV2</b>            | ISP                      | ML10L    | konektor      |
| <b>T1</b>             | BC547                    | TO92     | transistor    |
| <b>TLACITKO_RESET</b> | RESET                    | 2,15/1,0 | konektor      |
| <b>U\$1</b>           | AD5734R                  | SO24W    | D/A převodník |
| <b>X1</b>             | SCK, MOSI, VCC, R/W, GND | SPB5     | konektor      |