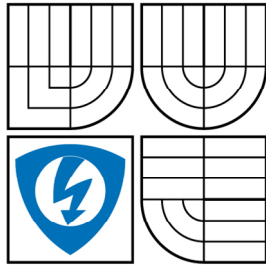


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A  
KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘÍCÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## ZESILOVAČ PRO TENZOMETRY STRAIN GAGE AMPLIFIER

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. ADAM KNEBLÍK

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. PETR BENEŠ, Ph.D.

BRNO 2008

# LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

## 1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Adam Kneblík  
Bytem: Žižkov II 3130, 580 01, Havlíčkův Brod  
Narozen/a (datum a místo): 18.1.1984, Havlíčkův Brod

(dále jen „autor“)

a

## 2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
se sídlem Údolní 244/53, 602 00, Brno  
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:  
doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.  
(dále jen „nabyvatel“)

### Čl. 1

#### Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
  - diplomová práce
  - bakalářská práce
  - jiná práce, jejíž druh je specifikován jako .....
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Zesilovač pro tenzometry

Vedoucí/ školitel VŠKP: doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

Ústav: Ústav automatizace a měřicí techniky

Datum obhajoby VŠKP: .....

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v\*:

- tištěné formě – počet exemplářů .....
- elektronické formě – počet exemplářů .....

---

\* hodící se zaškrtněte

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

## **Článek 2**

### **Udělení licenčního oprávnění**

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
  - ihned po uzavření této smlouvy
  - 1 rok po uzavření této smlouvy
  - 3 roky po uzavření této smlouvy
  - 5 let po uzavření této smlouvy
  - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## **Článek 3**

### **Závěrečná ustanovení**

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: .....

.....  
Nabyvatel

.....  
Autor

**Vysoké učení technické v Brně**  
**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií**  
**Ústav automatizace a měřicí techniky**

## **Zesilovač pro tenzometry**

Diplomová práce

Studijní obor: Kybernetika, automatizace a měření  
Student: Bc. Adam Kneblík  
Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Petr Beneš Ph.D

### **Abstract :**

Tato práce se zabývá návrhem zesilovače pro zesílení signálů z tenzometrického mostu. Navržený zesilovač má nahradit stávající zesilovač Vishay P-3500 ve školních laboratořích. V úvodní části je tato práce zaměřena na popis různých používaných zapojení pro zesílení signálu z mostu. Jsou zde uvedeny požadavky na zesilovač a podrobně popsány vlastnosti přístrojových zesilovačů.

Druhá část této práce je zaměřena na popis moderních integrovaných obvodů, které se používají pro zesílení signálů z mostu, v závěru je pak uvedeno srovnání parametrů těchto obvodů.

Další část práce se zabývá návrhem jednotlivých variant zapojení zesilovačů: přístrojový zesilovač s AD524, přístrojový zesilovač s TL074, oddělovací zesilovač a přístrojový zesilovač založený na přepínání kapacity. Pro tyto navržené zesilovače a zesilovač Vishay P-3500 je pak měřením zjištěna chyba zesílení, chyba offsetu, činitel potlačení souhlasného napětí a frekvenční rozsah.

**Klíčová slova:** přístrojový zesilovač, odporový most, tenzometr, potlačení souhlasného napětí, zesílení, offset, oddělovací zesilovač, přístrojový zesilovač založený na přepínání kapacity

**Brno University of Technology**  
**Faculty of Electrical Engineering and Communication**  
**Department of Control, Measurement and Instrumentation**

## **Strain Gage amplifier**

Master's Thesis

Specialisation of study:      Cybernetics, Control and Measurement  
Student:                              Bc. Adam Kneblík  
Supervisor:                         doc. Ing. Petr Beneš Ph.D

### **Abstract :**

The thesis deals with design an amplifier for amplification signal from strain gauge transducer. The designed strain gauge amplifier should replace current amplifier Vishay P-3500 used in school laboratory.

In the first part of this thesis there is description some signal conditioning methods for bridges. There are mentioned requirements for bridge output amplifier and in detail described properties of instrumentation amplifier.

The second part of the thesis is aimed at charactering modern integrated circuits (IO) with is using for amplify signal from bridges. In the end of this chapter is compared their properties.

The next part of the thesis is aimed at design some types of bridge output amplifiers: instrumentation amplifier with AD524, instrumentation amplifier with TL074, isolation amplifier and switched capacitor based instrumentation amplifier. For these designed amplifiers and amplifier Vishay P-3500 are measured these parameters: gain and offset error, common mode rejection (CMR) and gain bandwidth.

**Keywords:** instrumentation amplifier, resistance bridge, strain gauge, common mode rejection, gain, offset, isolation amplifier, switched capacitor based instrumentation amplifier

## **Bibliografická citace**

KNEBLÍK, A. *Zesilovač pro tenzometry*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 76 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

## **P r o h l á š e n í**

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma "Zesilovač pro tenzometry" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.“

V Brně dne :

Podpis:

## **P o d ě k o v á n í**

Děkuji tímto doc. Ing. Petru Benešovi Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

V Brně dne :

Podpis:

## OBSAH

<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>13</b>
<b>2. MŮSTKOVÉ OBVODY [5] .....</b>	<b>14</b>
2.1 Odporové mosty .....	14
2.2 Mostové zesilovače .....	15
2.2.1 Přístrojové zesilovače [15] .....	15
2.3 Zapojení zesilovačů pro stejnosměrně napájené mosty .....	19
2.3.1 Způsoby potlačení souhlasného napětí .....	22
2.3.2 Přístrojové zesilovače založené na přepínání kapacity .....	26
<b>3. INTEGROVANÉ OBVODY PRO MOSTY .....</b>	<b>28</b>
3.1 PGA309 [14] .....	28
3.2 XTR112, XTR114 [18] .....	30
3.3 AD7730 [4] .....	32
3.4 LTC2418 [10] .....	34
3.5 Porovnání uvedených obvodů .....	36
<b>4. NÁVRH ZESILOVAČŮ PRO TENZOMETRY .....</b>	<b>38</b>
4.1 Návrh zesilovače pro tenzometrický most .....	38
4.1.1 Zdrojová část zesilovače .....	38
4.1.2 Zesilovací část .....	40
4.1.3 Výpočet chyby zesilovače AD524[2] .....	42
4.2 Konstrukce jednoduchého PZ[16] .....	46
4.3 Oddělovací zesilovač [1][8] .....	47
4.4 Přístrojový zesilovač založený na přepínání kapacity .....	48
<b>5. PROTOKOL O MĚŘENÍ ZESILOVAČŮ .....</b>	<b>51</b>
5.1 Úkol měření .....	51
5.2 Teoretický rozbor .....	51
5.3 Schéma zapojení .....	51
5.4 Postup při měření .....	52
5.4.1 Měření převodní charakteristiky zesilovače .....	52
5.4.2 Měření kmitočtové závislosti zesílení .....	53
5.4.3 Měření činitele potlačení souhlasného napětí (CMR) .....	53

5.5 Použité přístroje .....	53
5.6 Vypracování .....	54
5.6.1 Měření převodních charakteristik zesilovačů .....	54
5.6.2 Měření kmitočtové charakteristiky zesílení .....	63
5.6.3 Měření činitele potlačení souhlasného napětí (CMR) .....	65
5.7 Srovnání měřených zesilovačů .....	67
<b>6. ZÁVĚR .....</b>	<b>69</b>
<b>7. LITERATURA .....</b>	<b>71</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 2-1: Jednoduchý Wheatstonův most vynalezený S.H. Christie [5] .....	14
Obrázek 2-2: PZ složený ze 3 OZ [7] .....	16
Obrázek 2-3: Model napět'ového ofsetu pro PZ [15] .....	18
Obrázek 2-4: Šumový model PZ [15] .....	18
Obrázek 2-5: Klasické zapojení pro měření tlaku s tenzometrickým mostem[5] .....	22
Obrázek 2-6: Zapojení potlačující souhlasné napětí[5] .....	23
Obrázek 2-7: Nízkošumový zesilovač s potlačením souhlasného napětí[5] .....	23
Obrázek 2-8: Další varianta nízkošumového zesilovače[5] .....	24
Obrázek 2-9: Zesilovač napájený z jednoho zdroje napětí[5] .....	25
Obrázek 2-10: Vylepšená verze zapojení z obr. 2-9 [5] .....	26
Obrázek 2-11: Zapojení velmi přesné váhy [5] .....	27
Obrázek 2-12: Průběh A je na výstupu zesilovače A3, průběh B je vyfiltrovaný A na výstupu A4 [5] .....	27
Obrázek 3-1: Katalogové zapojení obvodu PGA309 [14] .....	28
Obrázek 3-2: Vnitřní zapojení XTR112 (XTR114)[18] .....	30
Obrázek 3-3: Katalogové zapojení pro mostová měření [18] .....	31
Obrázek 3-4: Vnitřní zapojení AD7730 [4] .....	32
Obrázek 3-5: Typické připojení stejnosměrně napájeného mostu [4] .....	33
Obrázek 3-6: Typické připojení střídavě napájeného mostu[4] .....	34
Obrázek 3-7: Katalogové zapojení LTC2418 [10] .....	35
Obrázek 3-8: Jednoduché připojení mostu [10] .....	35
Obrázek 3-9: Frekvenční charakteristika pro $F_O=LOW$ a $F_O=HIGH$ [10] .....	36
Obrázek 4-1: Schéma zapojení zdroje .....	38
Obrázek 4-2: Schéma zesilovače .....	41
Obrázek 4-3: Osazovací plán zesilovače .....	42
Obrázek 4-4: Deska plošných spojů zesilovače .....	42
Obrázek 4-5: Typické připojení mostu k zesilovači [2] .....	43
Obrázek 4-6: Zapojení přístrojového zesilovače .....	46
Obrázek 4-7: Schéma zapojení oddělovacího zesilovače .....	48
Obrázek 4-8: Přístrojový zesilovač založený na přepínání kapacity .....	49

Obrázek 4-9: Závislost CMRR na frekvenci oscilátoru [9] .....	50
Obrázek 4-10: Přístrojový zesilovač založený na přepínání kapacity .....	50
Obrázek 5-1: Schéma zapojení pro měření převodní charakteristiky .....	51
Obrázek 5-2: Schéma zapojení pro měření frekvenční charakteristiky zesílení .....	52
Obrázek 5-3: Zapojení pro měření činitele potlačení souhlasného napětí (CMR).....	52
Obrázek 5-4: Převodní charakteristika zesilovače P-3500 pro $t=25\text{ °C}$ .....	54
Obrázek 5-5: Převodní charakteristika zesilovače AD524 pro $t=25\text{ °C}$ .....	55
Obrázek 5-6: Převodní charakteristika zesilovače AD524 pro $t=60\text{ °C}$ .....	55
Obrázek 5-7: Převodní charakteristika zesilovače TL074 pro $t=25\text{ °C}$ .....	56
Obrázek 5-8: Převodní charakteristika zesilovače TL074 pro $t=60\text{ °C}$ .....	56
Obrázek 5-9: Převodní charakteristika zesilovače AD210+LT1101 pro $t=25\text{ °C}$ .....	57
Obrázek 5-10: Převodní charakteristika zesilovače AD210+LT1101 pro $t=60\text{ °C}$ ...	58
Obrázek 5-11: Převodní charakteristika zesilovače LTC1043+OP27 pro $t=25\text{ °C}$ ...	59
Obrázek 5-12: Převodní charakteristika zesilovače LTC1043+OP27 pro $t=60\text{ °C}$ ...	59
Obrázek 5-13: Frekvenční charakteristika měřených zesilovačů.....	64
Obrázek 5-14: CMR v závislosti na kmitočtu.....	66
Obrázek 5-15: Závislost CMRR na frekvenci pro LT1101 [8].....	67

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 2-1: Parametry vybraných přístrojových zesilovačů.....	19
Tabulka 2-2: Výhody a nevýhody jednotlivých zapojení[5].....	20
Tabulka 3-1: Srovnání hlavních parametrů uvedených obvodů .....	37
Tabulka 4-1: Výpočet chyby zesilovače při teplotě $T_a=25^{\circ}\text{C}$ .....	44
Tabulka 4-2: Výpočet chyby zesilovače při teplotě $T_a=60^{\circ}\text{C}$ .....	45
Tabulka 4-3: Výpočet chyby která má vliv na rozlišení[2].....	45
Tabulka 5-1: Převodní charakteristika zesilovače P-3500 pro $t=25^{\circ}\text{C}$ .....	54
Tabulka 5-2: Převodní charakteristika zesilovače AD524 pro $t=25^{\circ}\text{C}$ .....	54
Tabulka 5-3: Převodní charakteristika zesilovače AD524 pro $t=60^{\circ}\text{C}$ .....	54
Tabulka 5-4: Převodní charakteristika zesilovače TL074 pro $t=25^{\circ}\text{C}$ .....	55
Tabulka 5-5: Převodní charakteristika zesilovače TL074 pro $t=60^{\circ}\text{C}$ .....	56
Tabulka 5-6: Převodní charakteristika zesilovače AD210+LT1101 pro $t=25^{\circ}\text{C}$ .....	57
Tabulka 5-7: Převodní charakteristika zesilovače AD210+LT1101 pro $t=60^{\circ}\text{C}$ .....	57
Tabulka 5-8: Převodní charakteristika zesilovače LTC1043+OP27 pro $t=25^{\circ}\text{C}$ .....	58
Tabulka 5-9: Převodní charakteristika zesilovače LTC1043+OP27 pro $t=25^{\circ}\text{C}$ .....	58
Tabulka 5-10: Vypočítané chyby offsetu a zesílení pro teplotu $t=25^{\circ}\text{C}$ .....	60
Tabulka 5-11: Vypočítané chyby offsetu a zesílení pro teplotu $t=60^{\circ}\text{C}$ .....	60
Tabulka 5-12: Srovnání zesilovačů ohledně změny zesílení a offsetu s teplotou.....	61
Tabulka 5-13: Kmitočtová charakteristika pro zesilovače P-3500, AD524, TL074 a AD210+LT1101 .....	63
Tabulka 5-14: Kmitočtová charakteristika pro zesilovač LTC1043+OP27.....	63
Tabulka 5-15: Měření činitele potlačení souhlasného napětí (CMR) .....	65
Tabulka 5-16: Srovnání zesilovačů .....	68

## SEZNAM ZKRATEK

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
CMR	[dB]	Potlačení souhlasného napětí
CMRR		Potlačení souhlasného napětí
$G_C$		Souhlasné zesílení
$G_{C1-5}$		Vypočítané souhlasné zesílení zesilovačů
$G_D$		Rozdílové zesílení
OZ		Operační zesilovač
PZ		Přístrojový zesilovač
$R_{S-}$	[ $\Omega$ ]	Vnitřní odpor zdroje pro záporný vstup PZ
$R_{S+}$	[ $\Omega$ ]	Vnitřní odpor zdroje pro kladný vstup PZ
$T_a$	[ $^{\circ}C$ ]	Teplota zesilovače
$U_{1-5}$	[mV]	Napětí naměřené na výstupu zesilovačů
$U_{IN}$	[mV]	Nastavené napětí na vstupu zesilovače
$U_{OUT}$	[mV]	Napětí na výstupu zesilovače
$V_{CM}$	[V]	Souhlasné napětí na vstupech zes.
$V_{DG}$	[ppm/ $^{\circ}C$ ]	Drift zesílení zesilovače
$V_{DIFF}$	[mV]	Výstupní diferenční napětí z mostu
$V_{DO}$	[ $\mu V/^{\circ}C$ ]	Drift výstupního offsetu
$V_N$	[V]	Napájecí napětí mostu
$V_O$	[mV]	Výstupní offsetové napětí
$V_{OUT}$	[mV]	Výstupní napětí zesilovače
$\delta_C$	[ppm]	Celková chyba
$\delta_G$	[ppm]	Chyba zesílení
$\delta_O$	[ppm]	Chyba offsetu

## 1. ÚVOD

Pro měření deformací se používají odporové snímače nazývané tenzometry. Tyto snímače se pak zapojují do můstku kvůli vykompenzování teplotní závislosti odporu tenzometru a také kvůli zvýšení citlivosti. Velikost výstupního napětí z mostu je pak závislá na velikosti napájení mostu a je v řádu milivoltů. Pro zvýšení citlivosti je potřeba rozdílový signál z mostu přesně zesílit. Problémem je, že rozdílový signál je v řádu  $mV$  a souhlasné napětí na vstupech zesilovače v řádu  $V$ , proto zesilovač musí mít vysoký činitel potlačení souhlasného napětí. Cílem této práce je navrhnout zesilovač, který toto bude splňovat.

Podle zadání práce má navrhovaný zesilovač nahradit stávající zesilovač Vishay P-3500 ve školních laboratořích. Je konstruován pro laboratorní úlohu č.8 – “Měření s odporovými tenzometry“ předmětu BMFV. Tento zesilovač má mít frekvenční rozsah minimálně do  $4\text{ kHz}$ , nastavitelné zesílení rozdílového signálu  $1000\times$  ( $100\times$ ) a napájení zesilovače má být  $24\text{ Vss}$ . Další funkcí je volba napětí pro napájení tenzometrického mostu  $2\text{ V}$  nebo  $10\text{ V}$  a možnost připojení čtvrt, půl a celého můstku, bez kompenzace offsetu mostu. Dále má být realizována i varianta zesilovače s galvanickým oddělením měřeného signálu.

První část této práce je věnována popisu můstkových obvodů, jsou zde uvedeny jednotlivé zapojení zesilovačů pro mosty a popsány jejich vlastnosti. V druhé části je uveden popis vybraných integrovaných obvodů, které jsou navrženy pro mostové senzory. Další část se pak zabývá návrhem zesilovače podle zadání diplomové práce a dalších třech variant zesilovačů. V poslední části této práce jsou provedena měření parametrů navržených zesilovačů a zesilovače Vishay P-3500.

## 2. MŮSTKOVÉ OBVODY [5]

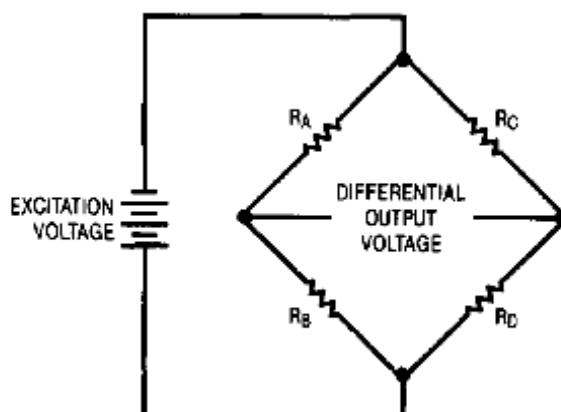
Tato kapitola je citována z *Application note 43* viz. literatura [5].

Zapojení do můstku patří mezi základní používané techniky. Používají se v měření, v přepínačích, oscilátorech a v převodnících. Můstek je elektrická analogie rovnoramenných vah a je základním zapojením všech diferenčních metod měření.

### 2.1 ODPOROVÉ MOSTY

Na obrázku 2-1 je zapojení jednoduchého rezistorového mostu. Jeho zapojení je pojmenováno podle Charlese Wheatstona, ačkoli ho první předvedl v roce 1833 S.H. Christie. Důvod je ten, že Charles Wheatston ho dříve zveřejnil.

Pokud všechny rezistory mají stejnou hodnotu (nebo poměr rezistorů na jedné a druhé straně můstku je shodný) rozdílové napětí na výstupu můstku je nulové. Výstup z tohoto mostu je nelineární pokud dochází ke změně odporu pouze u jednoho rezistoru. Podobně je výstup nelineární pokud se mění odpor ve dvou ramenech (např.  $R_C$ ,  $R_B$ ), ale v tomto případě je citlivost dvojnásobná. Lineárního výstupu je dosaženo, pokud se mění odpor u obou rezistorů v jedné nebo v obou větvích mostu.



**Obrázek 2-1: Jednoduchý Wheatstonův most vynalezený S.H. Christie [5]**

Ke zvýšení linearity, citlivosti a stability tohoto jednoduchého zapojení se využívá mnoho technik. Ke zvýšení citlivosti, lze například použít vyšší budící napětí. Budící napětí, ale nelze zvyšovat příliš, jelikož by mostem procházel veliký

proud, na který by museli být dimenzovány snímače a rezistory zapojené v mostu. Proto se ke zvýšení citlivosti využívá diferenčních zesilovačů, které zesilují výstupní napětí z mostu a tím dojde ke zvýšení citlivosti.

## 2.2 MOSTOVÉ ZESILOVAČE

Primární požadavek na tyto zesilovače je přesné zesílení výstupního rozdílového napětí. Dalším požadavkem je co nejlepší potlačení souhlasného napětí. Například deseti volty napájený tenzometrický most produkuje na výstupu pouze 30 *mV* signálu na společném napětí 5 *V*. Proto je definován činitel potlačení souhlasného napětí, používaná zkratka pro tento činitel je CMRR (Common Mode Rejection Ratio). CMRR je určen poměrem rozdílového a souhlasného zesílení. Další parametry zesilovače jsou označovány jako statické, sem patří například chyba nuly, zesílení a nelinearita převodní charakteristiky. Dále se definují dynamické parametry jako mezní kmitočet, mezní výkonový kmitočet, doba náběhu a rychlost přeběhu výstupního napětí.

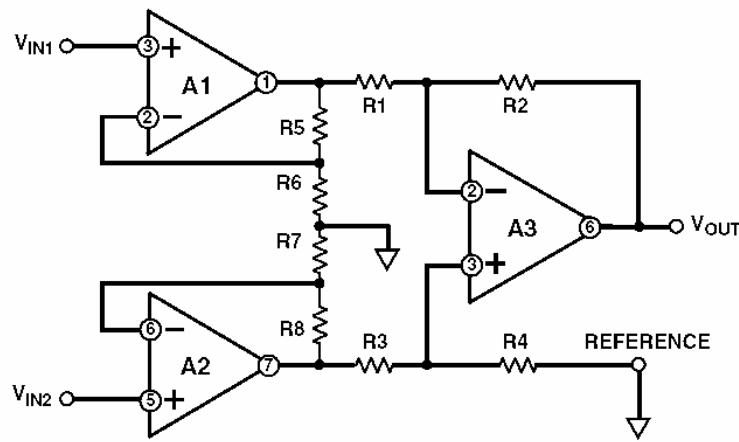
K zesílení výstupního signálu z můstku se velmi často používá přístrojový zesilovač, který má velmi dobré výše uvedené parametry.

### 2.2.1 Přístrojové zesilovače [15]

Tyto zesilovače jsou vyráběny jako zesilovací průmyslové bloky, které mají diferenční vstup a výstup. Mají vysokou hodnotu vstupní impedance typicky  $10^9 \Omega$  a vyšší. Přístrojový zesilovač - PZ obsahuje vnitřní zpětnou vazbu tvořenou odporovou sítí, která je oddělená od signálového vstupu. Zisk tohoto zesilovače bývá nastaven vnějším rezistorem, který je oddělen od signálových vstupů, nebo v případě, že to přístrojový zesilovač umožňuje, tak se dá zesílení nastavit propojením vývodů (rezistory pro nastavení zesílení jsou umístěny v pouzdře PZ). Typické zesílení PZ se dá nastavit od 1 do 10 000.

Vnitřní uspořádání přístrojových zesilovačů je založeno na operačním zesilovači - OZ. Základní diferenční zesilovač s OZ není možné použít pro přesné aplikace. Proto jsou PZ konstruovány tak, aby vylepšily některé vlastnosti tohoto zesilovače. Hlavní důvody proč nelze použít klasické zapojení diferenčního zesilovače jsou malá vstupní impedance a nízké potlačení souhlasného napětí

(CMRR). Zlepšení těchto parametrů dosáhneme nejčastěji zapojením 3 OZ podle obrázku 2-2. V tomto zapojení je operační zesilovač A3 zapojen jako klasický diferenční zesilovač a zesilovače A1 a A2 jsou zapojeny jako neinvertující zesilovače. Operační zesilovače A1 a A2 mají vysokou vstupní impedanci a tak dojde k zvýšení vstupní impedance. Výstupní napětí je pak dáno ziskem neinvertujícího a diferenčního zapojení, vzorec (2.1).



Obrázek 2-2: PZ složený ze 3 OZ [7]

$$V_{OUT} = (V_{IN2} - V_{IN1}) \cdot \left(1 + \frac{R_5}{R_6}\right) \cdot \left(\frac{R_2}{R_1}\right) \quad (2.1)$$

Tento vzorec ale platí pouze pro případ, že  $R_5=R_8$ ,  $R_6=R_7$ ,  $R_2=R_4$ ,  $R_1=R_3$ .

Rozdílové zesílení tohoto zesilovače se vypočítá ze vzorce 2.2.

$$G_D = \left(1 + \frac{R_5}{R_6}\right) \cdot \left(\frac{R_2}{R_1}\right) \quad (2.2)$$

Souhlasné zesílení  $G_C$  zesilovače je určeno poměrem jeho výstupního napětí k souhlasnému vstupnímu napětí. Za předpokladu ideálních vlastností operačních zesilovačů je souhlasné zesílení určeno párovou nepřesností rezistorů R1 s R3, R2 s R4, R5 s R8. [16]

Činitel potlačení souhlasného napětí CMRR (common mode rejection ratio) je definován poměrem rozdílového a souhlasného zesílení. [7]

$$CMRR = \frac{G_D}{G_C} \quad (2.3)$$

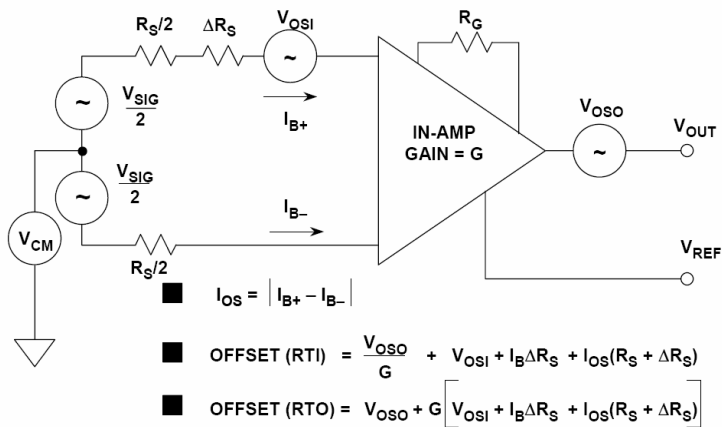
Častěji se činitel potlačení souhlasného napětí udává v dB, zkratka činitele potlačení souhlasného napětí je pak CMR (common mode rejection) a jeho výpočet je uveden ve vzorci 2.4.

$$CMR = 20 \log \frac{G_D}{G_C} \quad [\text{dB}] \quad (2.4)$$

### 2.2.1.1 Zdroje DC chyb přístrojových zesilovačů [15]

Stejnoseměrné chyby zesilovačů jsou způsobeny hlavně chybou zesílení a offsetu. Zesílení PZ se obvykle nastavuje jednoduchým rezistorem. Jeho hodnota se buď vypočte ze vzorce, nebo vybere z tabulky hodnot podle požadovaného zesílení. Absolutní přesnost a teplotní koeficient tohoto rezistoru přímo ovlivňuje přesnost zesílení a změnu zesílení s teplotou PZ. Protože vnější rezistor nebude nikdy mít stejnou teplotu jako vnitřní rezistor, který je na stejné teplotě jako čip, měl by být vybrán s nízkým teplotním koeficientem ( $<25 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ ) v provedení nejlépe s 0.1 % nebo lepší tolerancí. Rozsah zesílení pro PZ je od 1 do 1000 nebo od 1 do 10 000, mnoho PZ bude pracovat i do vyšších zesílení, ale při těchto zesíleních výrobce neručí za typickou úroveň frekvenční charakteristiky. V případě nižší hodnoty rezistoru pro nastavení zesílení se projeví chyby způsobené spojením a odporem vodičů. Tyto chyby jsou dále zvyšovány šumem a mohou způsobit vyšší zesílení. Při programovatelných hodnotách zesílení pomocí vývodů (např. obvod AD524), nastavovací rezistory zesílení jsou interní, dobře přizpůsobené a specifikace přesnosti zesílení a driftu zesílení zahrnuje jejich účinky. Chyba zesílení roste s rostoucím zesílením.

Celkový vstupní offset napětí PZ se skládá ze dvou složek viz. Obrázek 2-3. Vstupní offset napětí  $V_{OSI}$  je složka vstupního offsetu, která se vztahuje na výstup PZ se zesílením  $G$ . Výstupní offset napětí  $V_{OSO}$  je nezávislý na zesílení. Při nízkých zesíleních se projeví hlavně výstupní offset napětí, zatímco při vysokých zesíleních převládá vstupní offset. Drift výstupního offsetového napětí je normálně specifikován jako drift při  $G = 1$  (kde vstupní účinky jsou bezvýznamné), zatímco drift vstupního offsetového napětí je dán driftem při vysokém zesílení (kde účinky výstupního offsetu jsou zanedbatelné).



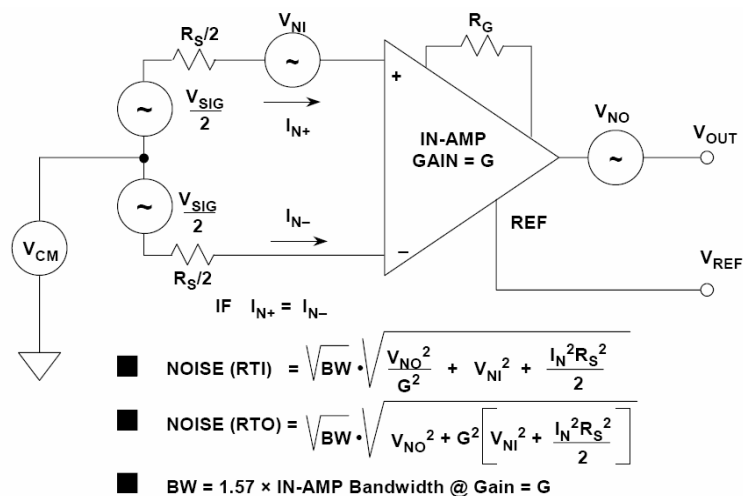
Obrázek 2-3: Model napěťového offsetu pro PZ [15]

### 2.2.1.2 Zdroje šumu přístrojových zesilovačů [15]

Protože jsou PZ převážně používány pro zesílení malých přesných signálů, je důležité znát přírůstky všech zdrojů šumu. Šumový model PZ je na obrázku 2-4. Jsou zde dva vstupní zdroje šumu. První je reprezentován jako zdroj šumu  $V_{NI}$  v sérii se vstupním signálem. Tento šum je přenesen na výstup se zesílením  $G$ . Druhým zdrojem šumu je výstupní šum  $V_{NO}$ , který je reprezentován jako šumové napětí v sérii s výstupem zesilovače.

Dále jsou zde dva zdroje šumu související se vstupními šumovými proudy  $I_{N+}$  a  $I_{N-}$ . Tyto zdroje šumu se na výstupu zesilovače projeví vynásobené zesílením  $G$ .

U PZ se udává nejčastěji celkový napěťový šum RTI, který je funkcí zesílení.



Obrázek 2-4: Šumový model PZ [15]

### 2.2.1.3 Srovnání parametrů vybraných PZ

V následující tabulce je uvedeno srovnání vybraných přístrojových zesilovačů. Obvody LTC1100, LT1101 a LT1102 jsou obvody od firmy Linear Technology, tabulku uvedenou v literatuře [5] jsem ještě doplnil dvěma přístrojovými zesilovači od Analog Devices. Obvod AD524 je PZ který má rezistory pro nastavení zesílení zabudovány uvnitř pouzdra a zesílení se tak dá nastavit pomocí propojení pinů tohoto obvodu. Naopak zesílení PZ AD620 se nastavuje externě připojeným rezistorem.

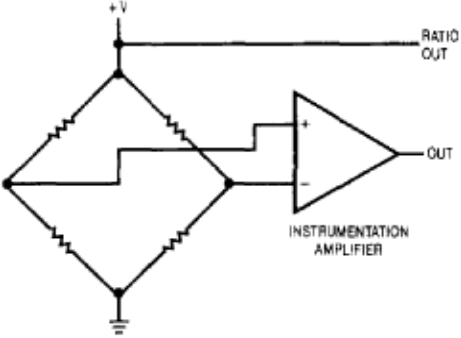
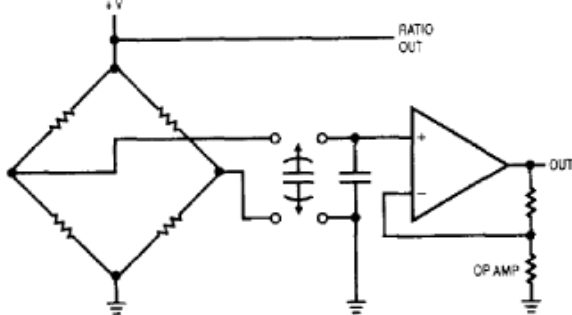
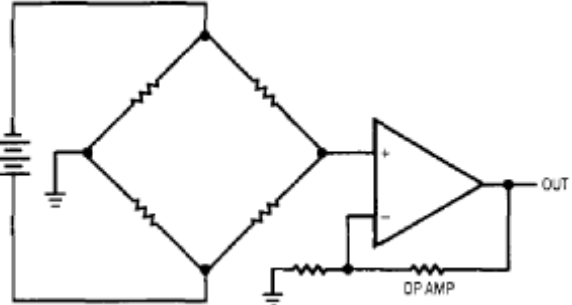
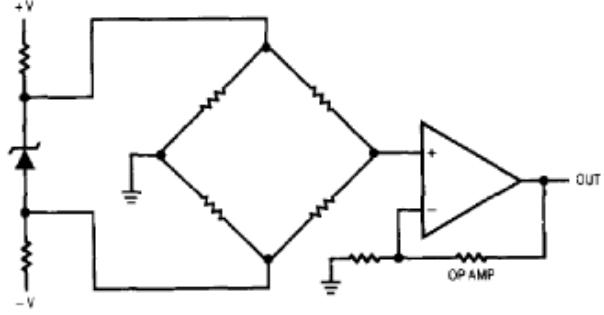
**Tabulka 2-1: Parametry vybraných přístrojových zesilovačů**

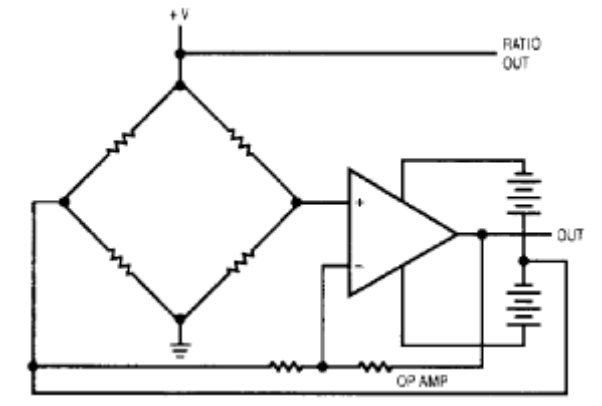
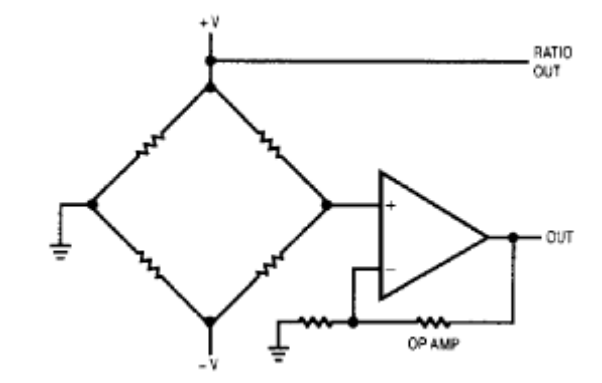
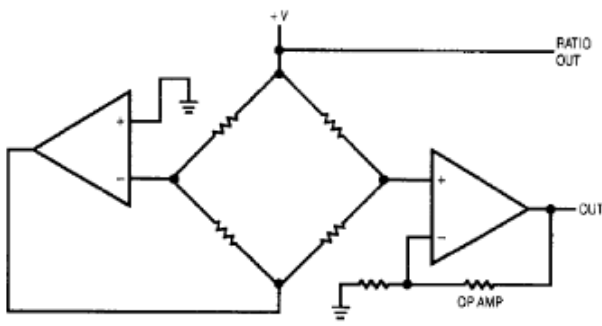
PARAMETR	LTC1100	LT1101	LT1102	AD524	AD620
<b>Ofset</b>	10 $\mu$ V	160 $\mu$ V	500 $\mu$ V	50 $\mu$ V	125 $\mu$ V
<b>Drift offsetu</b>	100nV/°C	2 $\mu$ V/°C	2.5 $\mu$ V/°C	0.5 $\mu$ V/°C	1 $\mu$ V/°C
<b>Klidový proud</b>	50pA	8nA	50pA	15nA	1nA
<b>Šum(0.1Hz-10Hz)</b>	2 $\mu$ V <sub>p-p</sub>	0.9 $\mu$ V <sub>p-p</sub>	2.8 $\mu$ V <sub>p-p</sub>	0.3 $\mu$ V <sub>p-p</sub>	0.28 $\mu$ V <sub>p-p</sub>
<b>Zesílení</b>	100	10,100	10,100	1,10,100,1000	1-1000
<b>Chyba zesílení</b>	0.03%	0.03%	0.05%	0.5%	0.3%
<b>Teplotní změna zesílení</b>	4ppm/°C	4ppm/°C	5ppm/°C	25ppm/°C	40ppm/°C
<b>Nelinearita zesílení</b>	8ppm	8ppm	10ppm	10ppm	10ppm
<b>CMR</b>	104dB	100dB	100dB	110dB	110dB
<b>Napájecí napětí</b>	16V Max	44VMax	44V Max	36V Max	36V Max
<b>Proudový odběr</b>	2.2mA	105 $\mu$ A	5mA	3.5mA	1.3mA
<b>Rychlost přeběhu</b>	1.5V/ $\mu$ s	0.07V/ $\mu$ s	25V/ $\mu$ s	5V/ $\mu$ s	0.75V/ $\mu$ s
<b>Šířka pásma</b>	8kHz	2,5kHz	220kHz	150kHz	120kHz

## 2.3 ZAPOJENÍ ZESILOVAČŮ PRO STEJNOSMĚRNĚ NAPÁJENÉ MOSTY

V tabulce 2-2 jsou uvedeny jednotlivé používané zapojení zesilovačů pro mosty a dále jsou zde uvedeny výhody a nevýhody tohoto zapojení. Pro každé zapojení je uvedeno jakých parametrů (CMR, drift offsetu, přesnost zesílení, drift zesílení) je možné dosáhnout.

Tabulka 2-2: Výhody a nevýhody jednotlivých zapojení[5]

KONFIGURACE	VÝHODY	NEVÝHODY
	<p>Jednoduché zapojení, CMR &gt;110dB, teplotní drift offsetu <math>0.05\mu\text{V}/^\circ\text{C}</math>, přesnost zesílení 0.03%, drift zesílení <math>4\text{ppm}/^\circ\text{C}</math></p>	<p>CMR, Drift a stabilita zesílení nejsou dobré pro velmi přesné aplikace</p>
	<p>CMR&gt;120dB, teplotní drift <math>0.05\mu\text{V}/^\circ\text{C}</math>, přesnost zesílení 0.001%, drift zesílení <math>1\text{ppm}/^\circ\text{C}</math>, jednoduše nastavitelné zesílení</p>	<p>Složitější konstrukce (potřeba více integrovanych obvodů), limitovaná šířka pásma, potřeba zpětnovazebních rezistorů pro nastavení zesílení</p>
	<p>CMR&gt;160dB, teplotní drift <math>0.05\mu\text{V}/^\circ\text{C} - 0.25</math> <math>\mu\text{V}/^\circ\text{C}</math>, přesnost zesílení 0.001%, drift zesílení <math>1\text{ppm}/^\circ\text{C}</math>, jednoduše nastavitelné zesílení</p>	<p>Potřebuje plovoucí zdroj napětí, zpětnovazební rezistory pro nastavení zesílení,</p>
	<p>CMR<math>\approx</math>140dB, teplotní drift <math>0.05\mu\text{V}/^\circ\text{C} - 0.25</math> <math>\mu\text{V}/^\circ\text{C}</math>, přesnost zesílení 0.001%, jednoduše nastavitelné zesílení, drift zesílení <math>1\text{ppm}/^\circ\text{C}</math></p>	<p>Potřebuje zpětnovazební rezistory pro nastavení zesílení, mosty s nízkou impedancí odebírají značný proud z bočnicku</p>

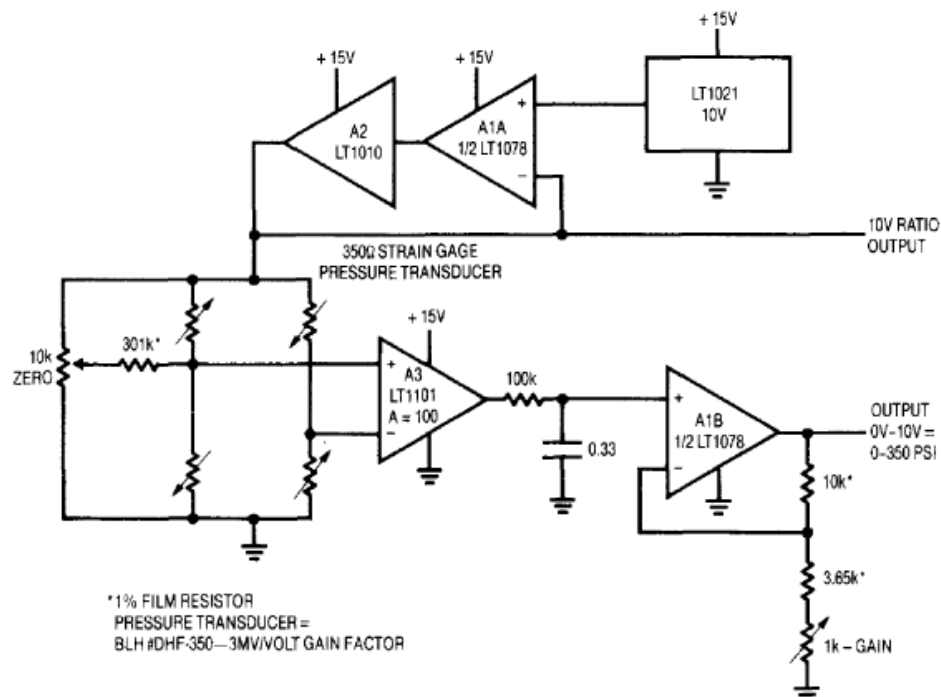
	<p>CMR&gt;160dB, teplotní drift <math>0.05\mu V/^{\circ}C - 0.25\mu V/^{\circ}C</math>, přesnost zesílení 0.001%, jednoduše nastavitelné zesílení, drift zesílení 1ppm/<math>^{\circ}C</math></p>	<p>Obvykle potřeba izolačního zesilovače, potřebuje zpětnovazební rezistory pro natavení zesílení.</p>
	<p>CMR<math>\approx</math>120dB-140dB, teplotní drift <math>0.05\mu V/^{\circ}C - 0.25\mu V/^{\circ}C</math>, přesnost zesílení 0.001%, jednoduše nastavitelné zesílení, drift zesílení 1ppm/<math>^{\circ}C</math></p>	<p>Potřebuje napájecí zdroj s nastavováním souběhu napětí a zpětnovazební rezistory pro nastavení napětí.</p>
	<p>CMR 160dB, teplotní drift <math>0.05\mu V/^{\circ}C - 0.25\mu V/^{\circ}C</math>, přesnost zesílení 0.001%, jednoduše nastavitelné zesílení, drift zesílení 1ppm/<math>^{\circ}C</math></p>	<p>K realizaci zesilovače potřebujeme dva zesilovače a několik diskretních součástek, potřeba zdroje záporného napětí</p>

Dále jsou podrobně popsány a vysvětleny jednotlivá zapojení.

Na obrázku 2-5. je zobrazeno klasické zapojení zesilovače pro zesílení signálu z tenzometrického mostu, který je určen pro měření tlaku. Tento most produkuje na výstupu signál o amplitudě 3 mV na 1 V napájení mostu. Most je napájen z přesné napěťové reference LT1021, která dává napětí 10 V. Obvod LT1078 je operační zesilovač (OZ), který je zapojen jako komparátor, jeho funkcí je přesné udržování napájecího napětí. Obvod A2 LT1010 proudově posiluje výstup z A1A. Přístrojový zesilovač A3 (LT1101) zesiluje diferenční výstup napětí z mostu 100x. K výstupu tohoto zesilovače je dále připojen RC filtr, který odstraní vysoké

frekvence ze signálu – šum. Operační zesilovač A1B (LT1078) je v neinvertujícím zapojení, jeho zesílení se dá nastavit trimrem GAIN. Trimr ZERO slouží pro nastavení nulového napětí na výstupu při nulovém tlaku.

Při kalibraci tohoto zapojení se nejdříve potenciometrem ZERO nastaví na výstupu nulové napětí při nulovém tlaku. Poté se do snímače tlaku pustí maximální měřený tlak a potenciometrem GAIN se na výstupu nastaví 10 V.



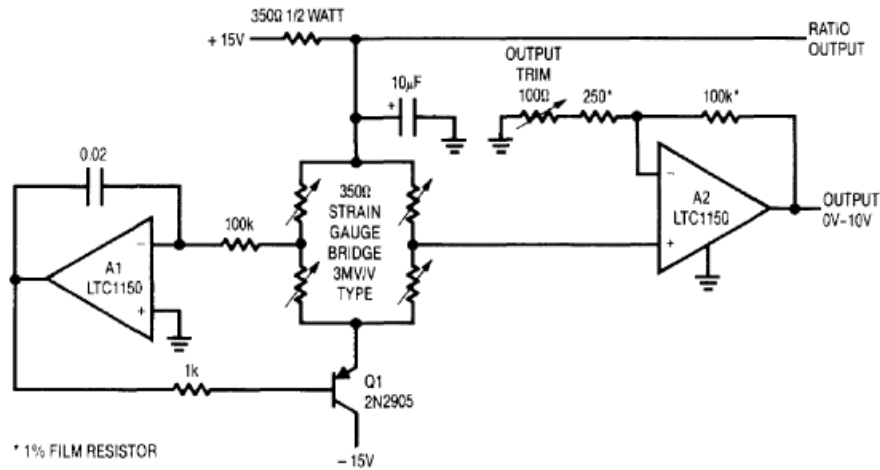
Obrázek 2-5: Klasické zapojení pro měření tlaku s tenzometrickým mostem[5]

### 2.3.1 Způsoby potlačení souhlasného napětí

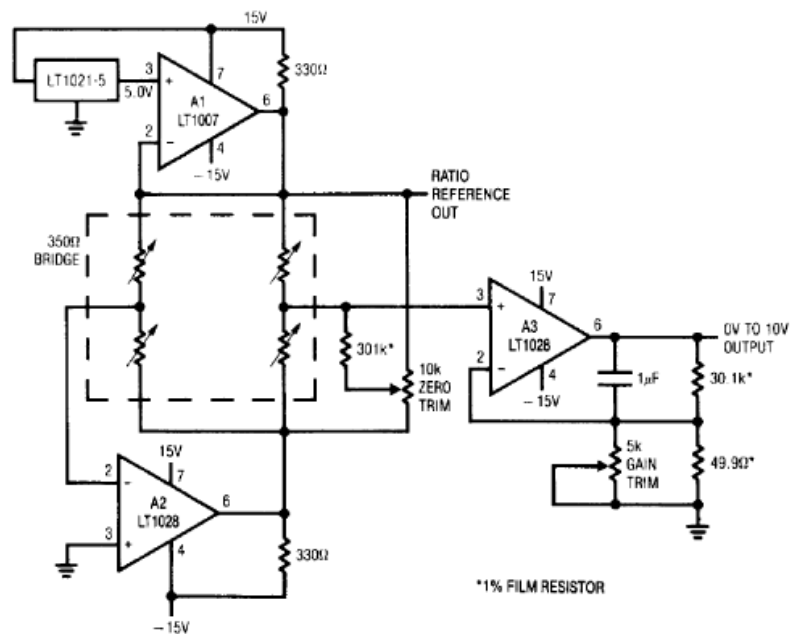
Předchozí zapojení vyžadovalo přístrojový zesilovač kvůli potlačení souhlasného napětí 5 V, které bylo na jeho vstupu. Následující zapojení Obrázek 2-6 ukazuje druhý způsob jak zesílit výstupní napětí z mostu pomocí neinvertujícího zesilovače.

Operační zesilovač A1 otvírá výstupním proudem tranzistor Q1 tak, aby ve středu jedné strany mostu bylo nulové napětí. Neinvertujícím zesilovačem A2 je pak zesíleno napětí z druhé strany mostu, které je závislé pouze na rozvážení mostu. Výhodou tohoto zapojení je, že při vyváženém mostu není na výstupu polovina napájecího napětí mostu jak tomu bylo v předchozím případě, ale je zde napětí

nulové. Proto vystačíme s klasickým neinvertujícím zesilovačem. Naopak nevýhoda je větší složitost zapojení a potřeba zdroje záporného napětí. Toto zapojení funguje velmi dobře a často se používá ve velmi přesných aplikacích.



Obrázek 2-6: Zapojení potlačující souhlasné napětí[5]



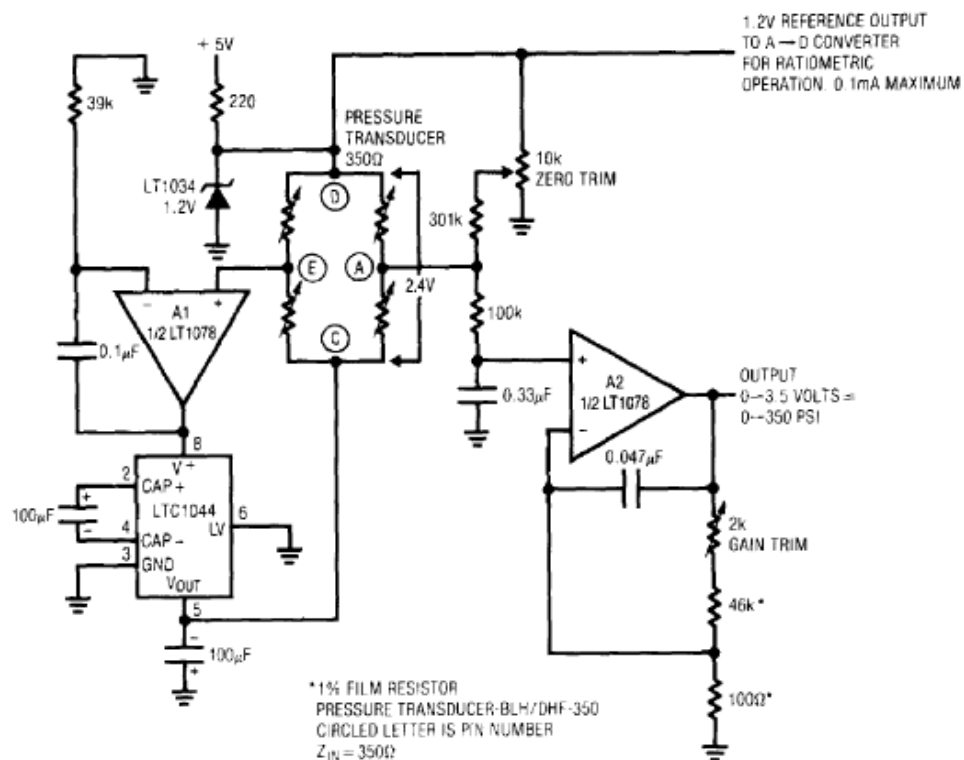
Obrázek 2-7: Nízkošumový zesilovač s potlačením souhlasného napětí[5]

Následující zapojení na obrázku 2-7 je velmi podobné, akorát byly použity nízkošumové bipolární zesilovače. Další změnou je použitá napěťová reference LT1021-5, která zaručuje napájecí napětí mostu 10 V. Operační zesilovač A1 udržuje

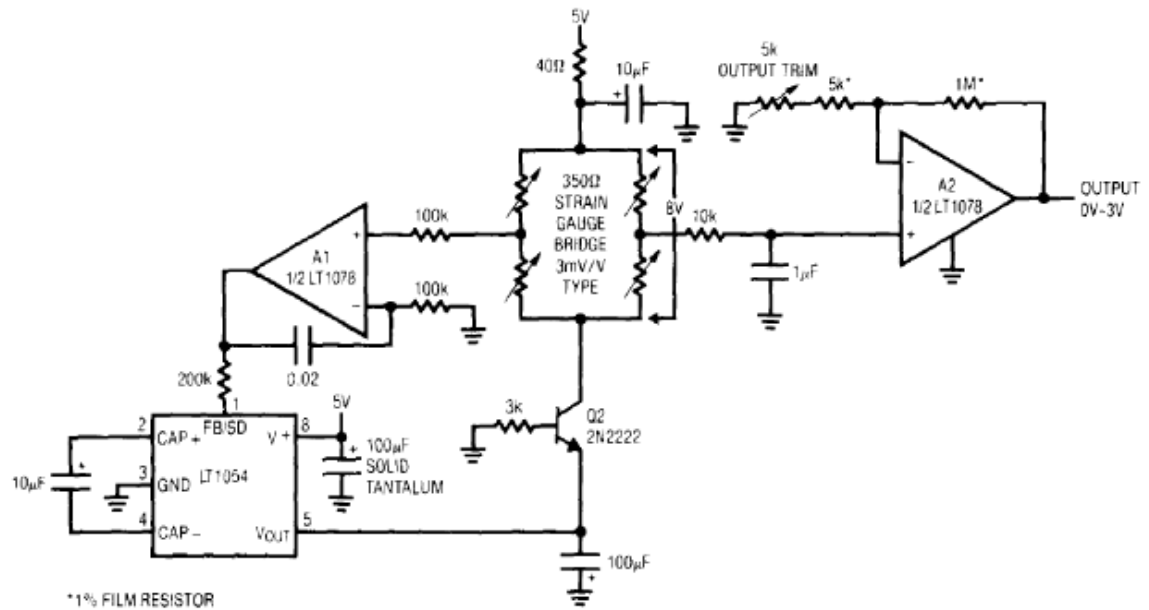


Obrázek 2-9 ukazuje způsob jak potlačit souhlasné napětí je-li k dispozici pouze jeden zdroj napětí. Záporné napětí pro napájení mostu je získáno pomocí obvodu LTC1044 což je invertor napětí. Stabilní napětí na mostu je získáno z napěťové reference LT1034, která má napětí 1.2 V. Tenzometrický most je tedy v tomto případě napájen pouze 2.4 V a tak citlivost není příliš velká. Výstupní signál z mostu je připojen k RC filtru složeného z rezistoru 100 k $\Omega$  a kondenzátoru o kapacitě 0.33  $\mu$ F. Tento filtr odstraní vysoké frekvence ze signálu, které nebudou zesíleny zesilovačem A2 – LT1078.

Zapojení které zvyšuje citlivost je na obrázku 2-10, hlavní změna je, že je použit invertor napětí LT1054 s vyšším výstupním proudem a proto lze zvýšit napájecí napětí mostu na 8 V. Výstupní napětí z mostu je opět vyfiltrováno RC filtrem a zesíleno zesilovačem LT1078 v neinvertujícím zapojení.



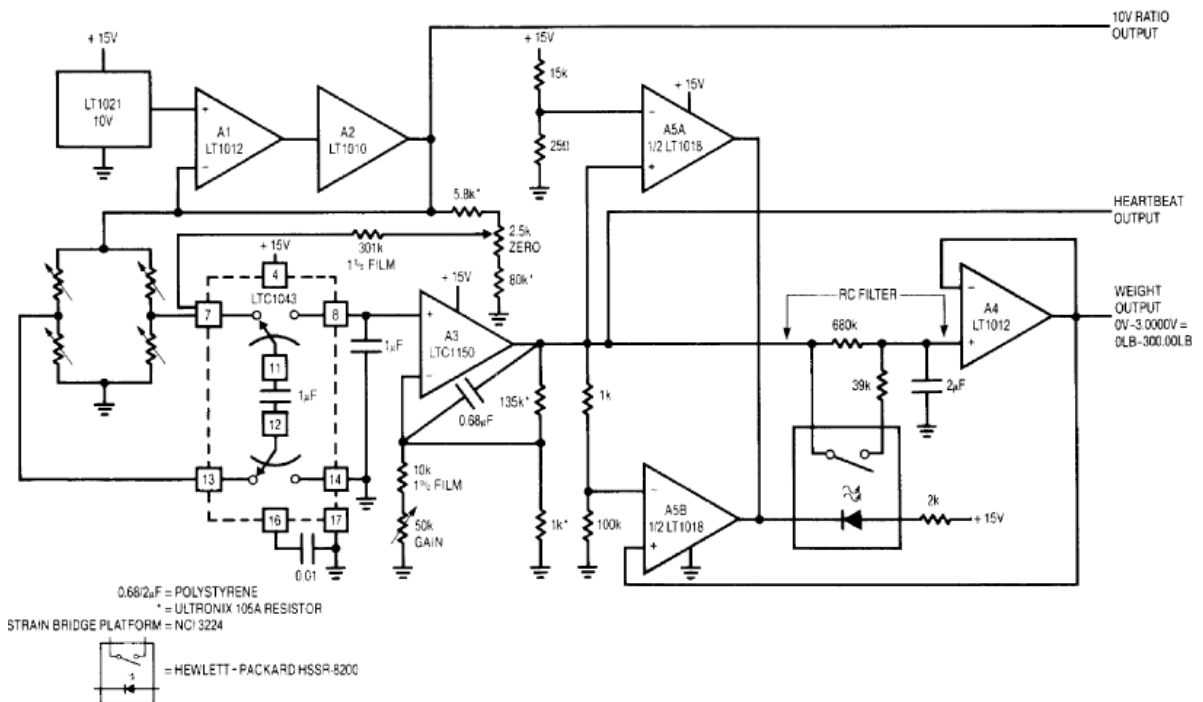
Obrázek 2-9: Zesilovač napájený z jednoho zdroje napětí[5]



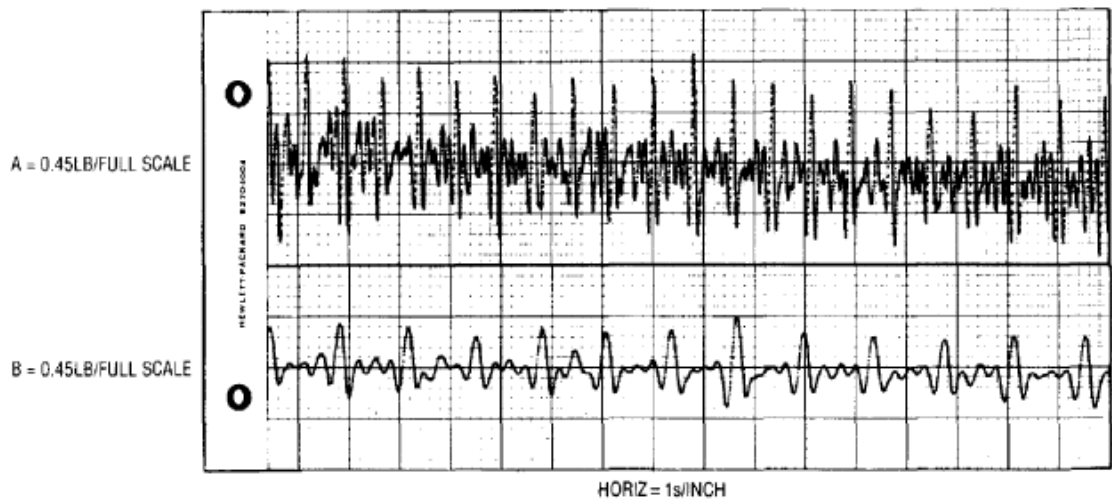
Obrázek 2-10: Vylepšená verze zapojení z obr. 2-9 [5]

### 2.3.2 Přístrojové zesilovače založené na přepínání kapacity

Další způsob jak potlačit zesílení souhlasného signálu je založen na přepínání kapacity. K tomu slouží integrovaný obvod LTC1043, který kondenzátor střídavě připojuje k diferenčnímu výstupu z mostu, kde se nabije na rozdílové napětí, a poté ho připojí k vstupu zesilovače A3, který toto napětí zesílí. Toto zapojení Obrázek 2-11 je určeno pro přesné vážení s rozlišením 0.01 liber při rozsahu 300 liber. Tenzometrický most je napájen z napěťové reference 10 V LT1021. Potenciometrem ZERO se nastavuje nulové napětí na výstupu, když na tenzometry v mostu nepůsobí žádná síla. Přepínací frekvence obvodu LTC1043 se nastavuje připojeným kondenzátorem mezi vývody obvodu 16 a 17. V tomto zapojení má kondenzátor hodnotu  $0.01 \mu F$ , to odpovídá přibližně frekvenci 400 Hz. Zesilovač A3-LTC1150 zesiluje rozdílové napětí na 3.0000V pro 300.00 liber. Toto extrémně přesné rozlišení potřebuje filtr, ten je tvořen dvěma rezistory 680 k $\Omega$  a 39 k $\Omega$  a kondenzátorem 2  $\mu F$ . Časová konstanta filtru se mění podle průběhu tlaku v aortě váženého člověka. Změna časové konstanty je provedena připojením rezistoru 39 k $\Omega$  paralelně k rezistoru 680 k $\Omega$ .



Obrázek 2-11: Zapojení velmi přesné váhy [5]



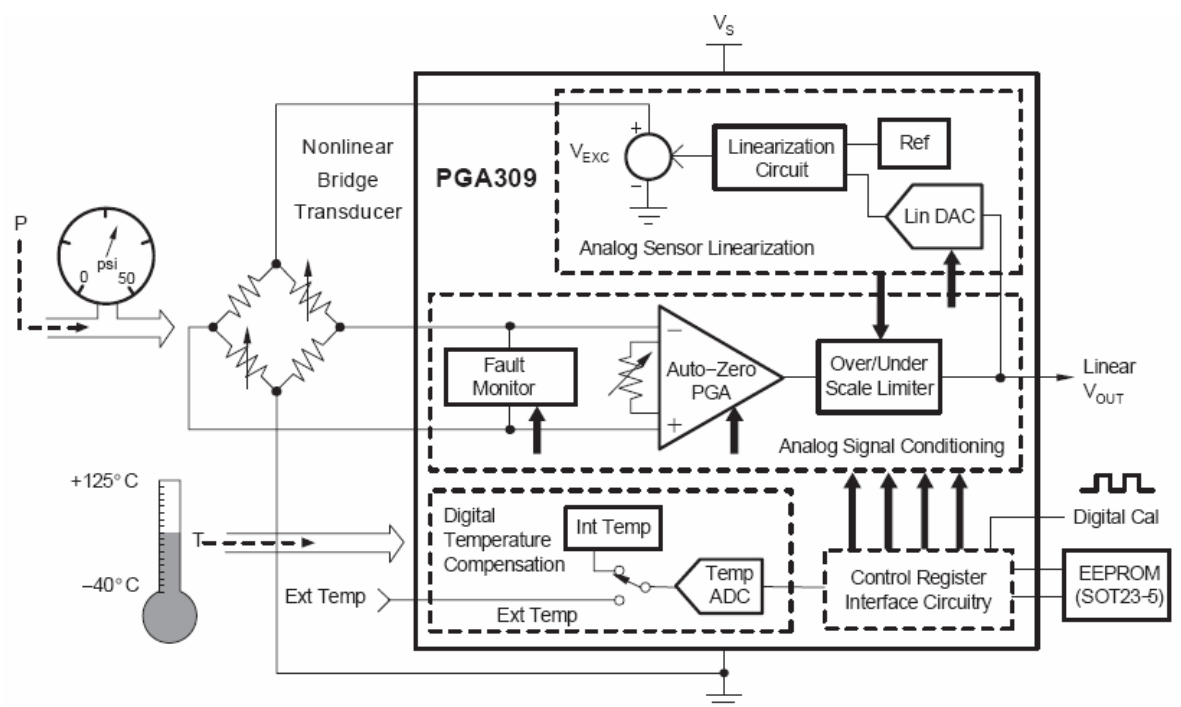
Obrázek 2-12: Průběh A je na výstupu zesilovače A3, průběh B je vyfiltrovaný A na výstupu A4 [5]

### 3. INTEGROVANÉ OBVODY PRO MOSTY

V předchozí kapitole byly popsány klasické analogové řešení pro zesílení signálu z mostu, v této kapitole jsou zmíněny některé nové digitální i analogové obvody, které se využívají pro zesílení signálů z mostů. V závěru této kapitoly je pak uvedeno srovnání těchto obvodů formou tabulky.

#### 3.1 PGA309 [14]

PGA309 je programovatelný analogový obvod od firmy Texas Instruments navržený pro měření signálu ze senzorů, které jsou zapojeny do mostu. Jeho blokové schéma je na Obrázek 3-1. Tento obvod poskytuje digitální kalibraci pro nastavení rozsahu, offsetu a teplotních driftů. Kalibrace je provedena přes jednovodičovou sériovou sběrnici nebo přes dvouvodičové průmyslově standardizované připojení. Kalibrační parametry se ukládají do externí paměti. Výhoda digitálního nastavení parametrů je v lepší přesnosti než v případě manuálního nastavování trimrem dále v zachování dlouhodobé stálosti a teplotní stability nastavených parametrů.



Obrázek 3-1: Katalogové zapojení obvodu PGA309 [14]

Hlavní částí tohoto obvodu je přesný přístrojový zesilovač s programovatelným zesílením – PGA (Programmable Gain Amplifier). Celkové zesílení tohoto obvodu i s výstupním zesilovačem je možné nastavit v rozmezí 2.7x až 1152x. V případě připojení senzoru, u kterého neznáme předem polaritu výstupu, je obvod na vstupu vybaven přepínačem pro změnu polarity.

Dále je tento obvod vybaven analogovou linearizací senzoru. Referenční napětí se sčítá s částí výstupu PGA309, aby se vykompenzovaly kladné nebo záporné obloukovité nelinearity, které se vyskytují u mnoha senzorů. Sensory, které nepotřebují linearizaci se připojí na napájecí napětí  $V_{SA}$  nebo na napětí  $V_{EXC}$  pokud potřebují linearizovat.

Pro kompenzaci teplotních změn má obvod integrován čidlo teploty, ale může být připojeno i externí čidlo. Teplota může být snímána jednou z následujících možností:

- Změnou impedance mostu pro senzory s velkou změnou teplotního odporu ( $TCR > 0.1\%$ )
- Na čipu integrovaným snímačem teploty, v případě, že senzor je umístěn v blízkosti obvodu.
- Diodou, termistorem nebo odporovým snímačem teploty umístěným na membráně snímače. Vnitřní zdroj proudu o hodnotě proudu  $7 \mu A$  může být použit pro napájení těchto typů senzorů.

Teplotní signál je digitalizován A/D převodníkem podle jehož výstupu se pak nastaví zesílení a upraví parametry pro nastavení nulového offsetu.

#### Shrnutí hlavních parametrů PGA309:

- Nízké napájecí napětí:  $2.7 V - 5.5 V$
- Zesílení: 4, 8, 16, 23.27, 32, 42.67, 64, 128
- Chyba zesílení: 0.3 % max.
- Drift zesílení:  $10 ppm/^\circ C$
- Ofset:  $\pm 3 \mu V$
- Drift ofsetu:  $\pm 0.2 \mu V$
- Šířka pásma:  $60 kHz$

- CMR: 100 dB

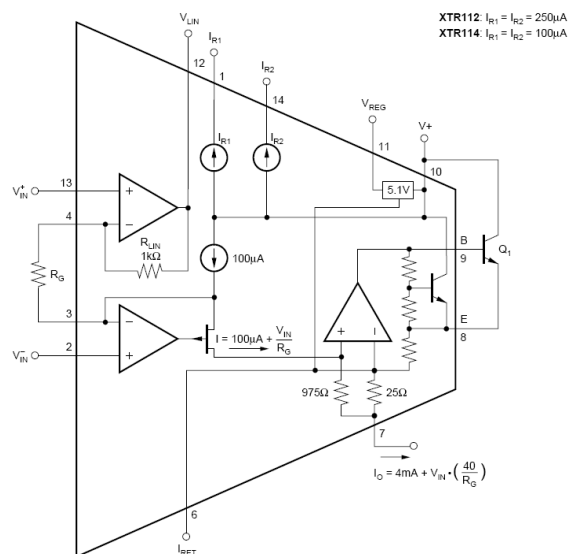
### 3.2 XTR112, XTR114 [18]

Další obvody, které se používají pro měření s mosty jsou XTR112 a XTR114, což jsou monolitické zesilovače pro proudovou smyčku. Vnitřní zapojení obvodu je na Obrázek 3-2. Obvod XTR112 obsahuje dva  $250 \mu A$  zdroje pro napájení mostů a XTR114 má také dva, ale o velikosti výstupního proudu  $100 \mu A$ . Vstupní signál je zesílen přístrojovým zesilovačem a převeden na proudovou smyčku 4-20  $mA$ . Výstupní proud se určí ze vzorce 3.1.

$$I_O = 4mA + V_{IN} \cdot \frac{40}{R_G} \quad [mA] \quad (3.1)$$

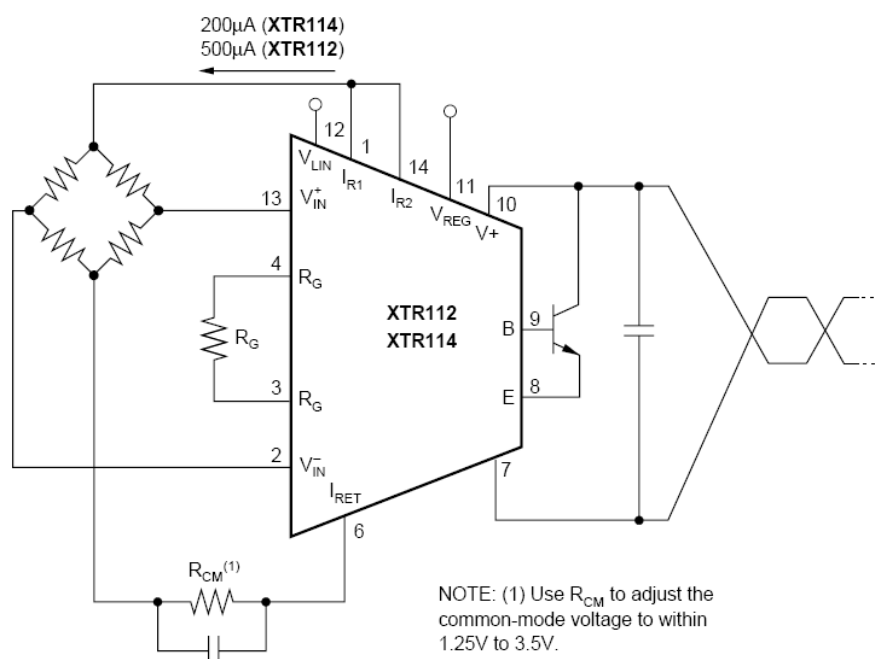
kde  $V_{IN}$  je napětí na vstupech  $+V_{IN}$  a  $-V_{IN}$  a  $R_G$  je resistor pro nastavení zesílení přístrojového zesilovače.

Externí tranzistor odvádí hlavní proud tak aby nedocházelo k ohřívání pouzdra. Musí vyhovovat těmto požadavkům: napětí kolektor - emitor musí být minimálně  $V_{CE0} = 45V$ , zesilovací činitel  $\beta=40$  a ztrátový výkon  $P_D=800mW$ . Pro méně přesné aplikace nemusí být tento tranzistor použit jelikož je již obsažen v pouzdru. Pro přesné měření je výhodnější použít externí tranzistor, který nezpůsobí ohřátí pouzdra obvodu a tím změnu parametrů.



Obrázek 3-2: Vnitřní zapojení XTR112 (XTR114)[18]

Typické připojení tenzometrického mostu k obvodu je na Obrázek 3-3. Napájení celého zapojení je přes proudovou smyčku. Napájecí napětí musí být v rozsahu 7.5 – 35 V. Výhodou tohoto zapojení je, že k napájení i vyhodnocení signálů ze snímače stačí pouze dva vodiče. Zesilovač může být umístěn přímo u tenzometrického mostu a měřicí přístroj může být tak umístěn ve větší vzdálenosti od snímače. Výhoda tohoto připojení je v tom, že zpracováváný signál z tenzometrického senzoru, který je náchylný na rušení, je veden na krátkou vzdálenost.



**Obrázek 3-3: Katalogové zapojení pro mostová měření [18]**

Oba proudové zdroje jsou spojeny takže v případě XTR112 dávají proud pro napájení mostu 500 µA a pro XTR114 200 µA. Pro měření s tenzometry je více výhodný vyšší proud jelikož odporové tenzometry mají malý odpor (120 Ω, 350 Ω, 1000Ω) a citlivost snímače je pak vyšší.

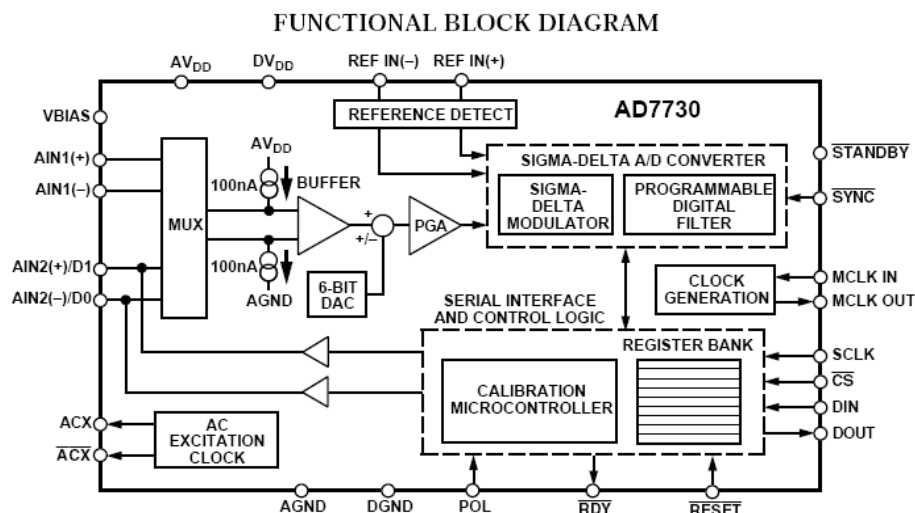
Rezistor  $R_{CM}$  poskytuje přídavný napěťový úbytek pro předpětí vstupů obvodu XTR112 a XTR114 v mezích (1.25V až 3.5V) jejich souhlasného vstupního zesílení. Paralelně připojený kondensátor k tomuto rezistoru je pro odstranění souhlasného šumu.

### Hlavní parametry XTR112, XTR114:

- Precizní proudové zdroje
- Velká linearita
- Offset: 50  $\mu\text{V}$
- Malý drift offsetu: 0.4 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
- Nízký šum na výstupu: 30nA<sub>p-p</sub>
- Vysoké PSR (power supply rejection): 110dB
- CMR (common mode rejection): 86dB

### 3.3 AD7730 [4]

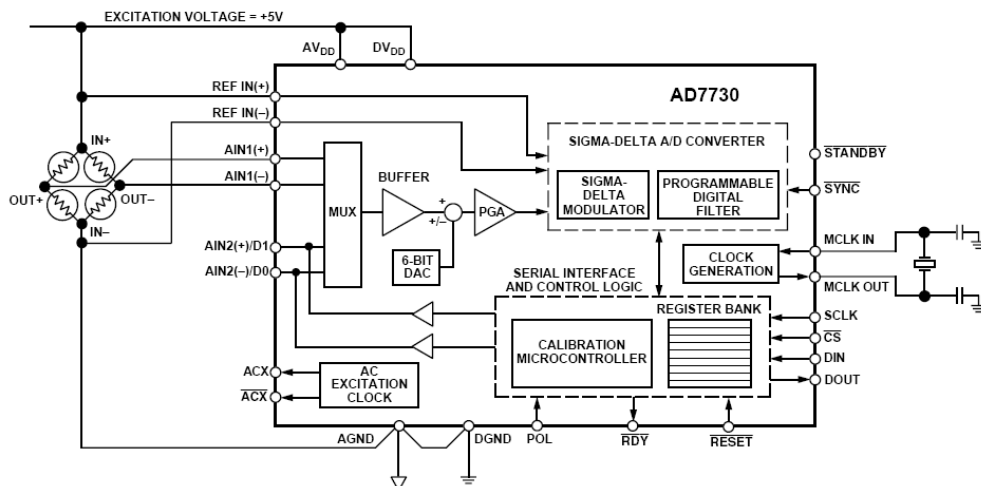
Integrovaný obvod AD7730 je vysoce přesný nízkofrekvenční sigma-delta měřicí A/D převodník navržený pro tlakové senzory. Tento obvod je navržen tak, že dokáže zpracovávat přímo nízkonapěťový signál z mostu a na výstupu má sériovou linku. Ke své funkci potřebuje pouze jednoduchý zdroj napětí 5V. Obsahuje dva diferenční vstupy, které jsou přepínané multiplexorem. Rozsah těchto vstupů může být nastaven na: 0 mV až +10 mV, 0 mV až +20 mV, 0 mV až +40 mV, 0 mV až +80 mV, nebo pro bipolární rozsah:  $\pm 10$  mV,  $\pm 20$  mV,  $\pm 40$  mV,  $\pm 80$  mV. Dosažitelné maximální rozlišení tohoto převodníku, neboli rozlišení bez šumu (noise free resolution) je 18 bitů.



Obrázek 3-4: Vnitřní zapojení AD7730 [4]

Sériová sběrnice může být zapojena v třívodičovém zapojení a je kompatibilní s mikroprocesory a digitálními signálovými procesory. AD7730 obsahuje vnitřní systémovou kalibraci, drift ofsetu je pak menší než  $5 \text{ nV}/^\circ\text{C}$  a změna zesílení s teplotou je menší než  $2 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ .

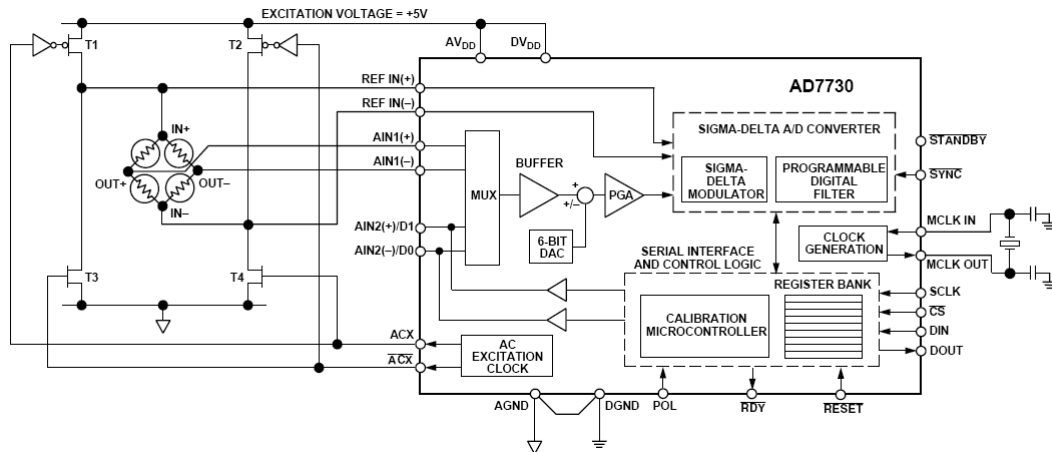
Na Obrázek 3-5 je ukázáno připojení stejnosměrně napájeného mostu. Napájecí napětí pro obvod je  $5 \text{ V}$  a zároveň je použito jako excitační pro most. Most je připojen k obvodu šesti vodičů, toto zapojení je vhodné pokud je most umístěn ve větší vzdálenosti od obvodu, kdy je eliminována chyba, která by vznikla vlivem úbytků napětí na vodičích sloužících pro napájení mostu. Pro případ kdy je most umístěn v blízkosti AD7730 stačí použít čtyřvodičové zapojení, kdy vstupy REF IN(+) a REF IN(-) jsou připojeny na napájecí piny obvodu. Hlavní výhodou tohoto obvodu je, že pro napájení je potřeba pouze jedno napětí  $5 \text{ V}$ .



**Obrázek 3-5: Typické připojení stejnosměrně napájeného mostu [4]**

Následující zapojení ukazuje další možnost jak připojit most k tomuto obvodu. Pro napájení mostu je použito střídavé napětí, to eliminuje stejnosměrné chyby. Pro získání střídavého napětí je použit blok - AC excitation clock, na jehož výstupu je obdélníkový signál. Obdélníkový signál je k dispozici na výstupech ACX a ACX invertovaném. Těmito signály je pak ovládán H-most složený z tranzistorů. Pro kladný puls ACX jsou sepnuty tranzistory T1 a T4 a most je napájen kladným napětím. Pro nulové napětí na výstupu ACX jsou sepnuty tranzistory T2 a T4 tím se

změní polarita napájení mostu. Tranzistory T1 až T4 mohou být bipolární nebo unipolární a musí být dimenzovány na proud protékající mostem.



**Obrázek 3-6: Typické připojení střídavě napájeného mostu[4]**

Hlavní parametry AD7730:

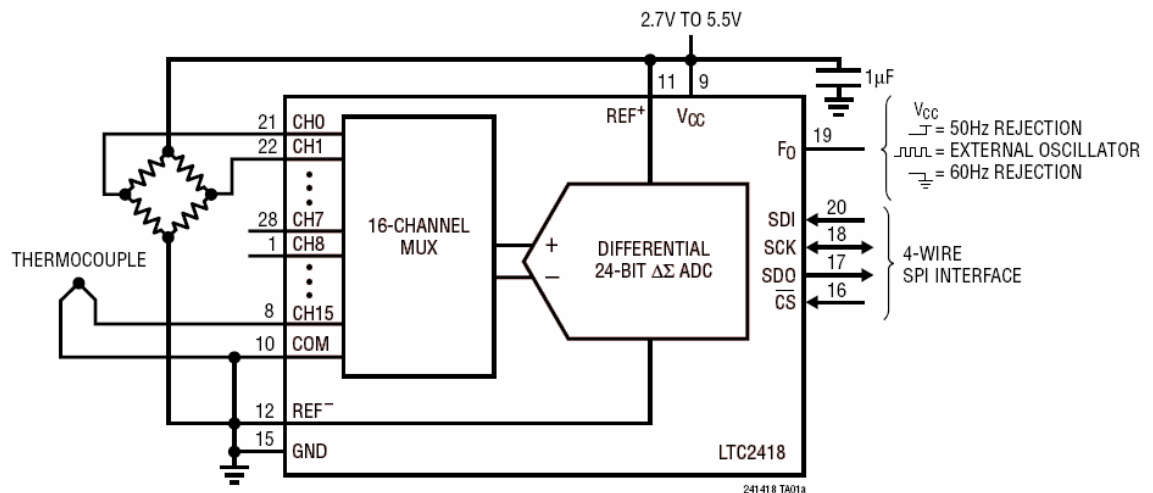
- Napájecí napětí: 4.75 V – 5.25 V
- Potlačení souhlasného napětí: 120 dB
- Zesílení: 31.25 pro rozsah  $\pm 80$  mV až 250 pro rozsah  $\pm 10$  mV
- Rozlišení A/D převodníku: 24 bitů
- Offset: 3  $\mu$ V
- Drift offsetu: 5 nV/°C
- Chyba zesílení: 100 ppm pro rozsah  $\pm 80$  mV, 500 ppm pro rozsah  $\pm 10$  mV
- Drift zesílení: 2 ppm/°C

### 3.4 LTC2418 [10]

LTC2418 je 16-ti kanálový 24-bitový sigma-delta A/D převodník s nízkým odběrem. Tento obvod pracuje od napětí 2.7 V do 5.5 V. K obvodu může být připojeno referenční napětí o velikosti od 0.1 V do 5.5 V. Vstupy mohou být nakonfigurovány jako 8 diferenčních nebo 16 jednoduchých. Vstupní rozsah měřených napětí je od  $-0.5 V_{REF}$  až  $0.5 V_{REF}$ . Potlačení souhlasného napětí pro

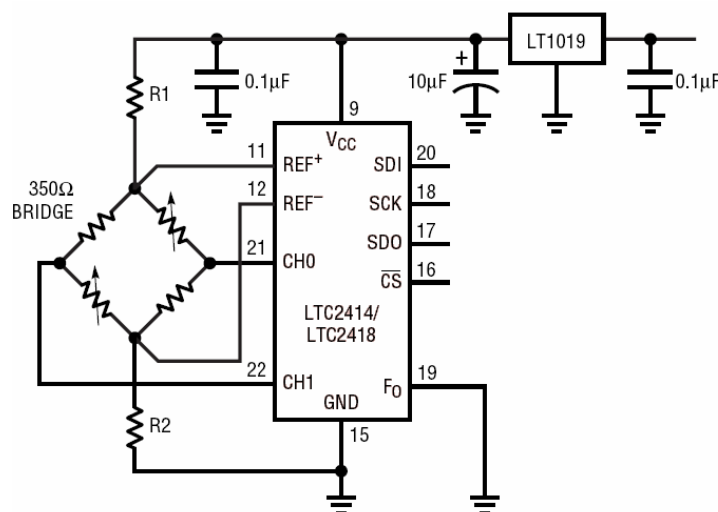
stejnoseměrné signály je větší než 140 dB. Výstup je přes čtyřvodičové sériové rozhraní.

Základní katalogové zapojení demonstrující připojení termočlánku a odporového mostu je na následujícím obrázku.



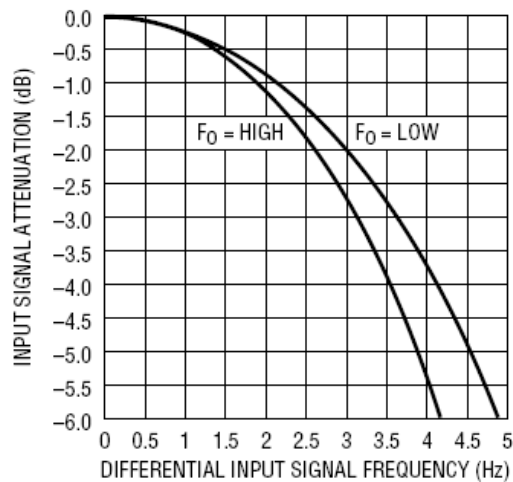
Obrázek 3-7: Katalogové zapojení LTC2418 [10]

Obrázek 3-8 ukazuje příklad zapojení nejjednoduššího připojení tenzometrického mostu. Toto zapojení je vhodné pro všechny mostové aplikace, kde rychlost měření není nejdůležitějším parametrem. Obvod je napájen z přesné napěťové reference LT1019 jejíž napětí je 5V. Rezistory R1 a R2 jsou použity pro přijatelné zvýšení střídavé složky na REF signálech.



Obrázek 3-8: Jednoduché připojení mostu [10]

Připojení pinu  $F_0$  na logickou nulu nebo jedničku určuje výslednou kmitočtovou charakteristiku viz. Obrázek 3-9.



**Obrázek 3-9: Frekvenční charakteristika pro  $F_0 = \text{LOW}$  a  $F_0 = \text{HIGH}$ [10]**

Hlavní parametry LTC2418:

- Napájecí napětí:  $2.7\text{ V} - 5.5\text{ V}$
- Potlačení souhlasného napětí:  $140\text{ dB}$
- Rozlišení A/D převodníku: 24 bitů
- Chyba v kladném rozsahu:  $2.5\text{ ppm}$  z  $V_{\text{REF}}$
- Drift chyby v kladném rozsahu:  $0.03\text{ ppm}$  z  $V_{\text{REF}}/^\circ\text{C}$
- Chyba v záporném rozsahu:  $2.5\text{ ppm}$  z  $V_{\text{REF}}$
- Drift chyby v záporném rozsahu:  $0.03\text{ ppm}$  z  $V_{\text{REF}}/^\circ\text{C}$
- Offset:  $2.5\text{ }\mu\text{V}$
- Drift offsetu:  $20\text{ nV}/^\circ\text{C}$

### 3.5 POROVNÁNÍ UVEDENÝCH OBVODŮ

V tabulce 3-1 je uvedeno srovnání obvodů podle chyby zesílení, změny zesílení s teplotou, vstupního offsetu, změny offsetu s teplotou, šířky pásma, potlačení souhlasného napětí, výstupu a ceny součástky.

**Tabulka 3-1: Srovnání hlavních parametrů uvedených obvodů**

IO:	PGA309	XTR112/114	AD7730	LTC2418
Chyba zesílení	300 ppm	50 ppm	100-500 ppm	-
Drift zesílení:	10 ppm/°C	3 ppm/°C	2 ppm/°C	-
Offset:	3 $\mu$ V	50 $\mu$ V	3 $\mu$ V	2.5 $\mu$ V
Drift offsetu:	0.2 $\mu$ V/°C	0.4 $\mu$ V/°C	5 nV/°C	20 nV/°C
Šířka pásma:	60 kHz	10 kHz	1.2 kSPS	7.5 SPS
CMR:	100 dB	86 dB	120 dB	140 dB
Výstup:	napětí	proudová smyčka 4-20 mA	sériové rozhraní	sériové rozhraní
Cena:	70 Kč	95 Kč	220 Kč	140 Kč

Obvod PGA309 má na výstupu přímo napětí, pro další úpravu signálu je vhodné použít mikroprocesor. Ten by sloužil pro nastavení parametrů obvodu a A/D převodník mikroprocesoru by mohl rovnou výstupní signál digitalizovat.

XTR112/114 má výstup proudovou smyčku pomocí které může být i napájen, takže pro jeho připojení stačí dva vodiče, to je jeho hlavní výhoda. Oproti PGA309 má nižší CMR a nižší šířku pásma.

Obvod AD7730 má na výstupu sériové rozhraní výstupní data mohou být rovnou zpracována v mikroprocesoru. Obsahuje 24-bitový  $\Delta\Sigma$  A/D převodník. Oproti předchozím popisovaným obvodům má 100x menší změnu vstupního offsetu vlivem teploty a dosahuje vysokého potlačení souhlasného napětí 120 dB. Maximální rychlost čtení výstupních dat je pouze 1.2 kSPS (samples per second) to je 1200 vzorků za sekundu. Je tedy vhodný pouze pro zpracování signálů, kde nejsou velké požadavky na rychlost.

LTC2418 má opět výborný drift offsetu, vysoké CMR 140 dB, ale ještě nižší rychlost pouze 7.5 vzorků za sekundu. Obsahuje 16 multiplexovaných vstupů a jeden 24-bitový  $\Delta\Sigma$  A/D převodník. Může tak být s výhodou použit pro měření více signálů z různých senzorů, kde nejsou požadavky na rychlost, například pro zpracování signálu z tenzometrických vah.

## 4. NÁVRH ZESILOVAČŮ PRO TENZOMETRY

V této kapitole je proveden návrh zesilovače podle zadání semestrálního projektu, a výpočet jeho chyby pro teploty  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Dále je zde návrh přístrojového zesilovače složeného z klasických operačních zesilovačů, oddělovacího zesilovače s obvodem AD210JN a přístrojového zesilovače založeného na přepínání kapacity s obvodem LTC1043.

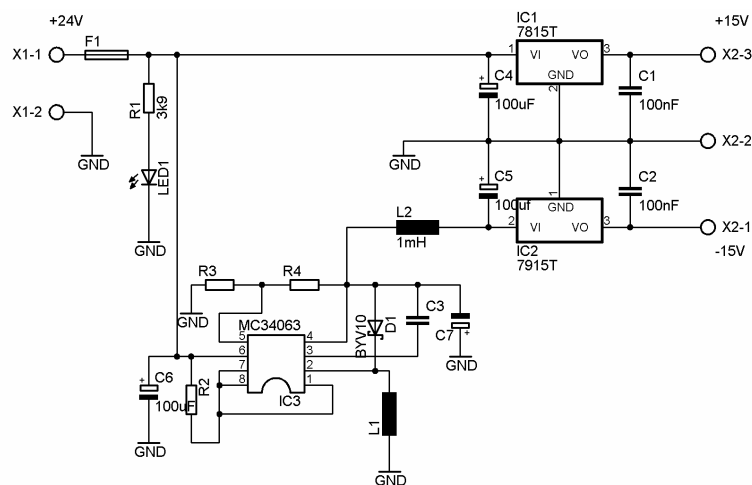
### 4.1 NÁVRH ZESILOVAČE PRO TENZOMETRICKÝ MOST

Tento zesilovač má být napájen  $24\text{V}$ , frekvenční rozsah má být do  $4\text{kHz}$ , zesílení tohoto zesilovače  $1000\times$  ( $100\times$ ), dále má obsahovat zdroj pro napájení tenzometrického mostu volitelně  $2\text{V}$  nebo  $10\text{V}$ .

#### 4.1.1 Zdrojová část zesilovače

Podle zadání je má být zesilovač napájen stejnosměrným napětím  $24\text{V}$ . Toto napětí je dále potřeba upravit na napětí  $\pm 15\text{V}$ , což je napětí, které je nejvíce vyhovující pro napájení PZ a ostatních použitých OZ. Pro tyto potřeby byl navržen následující zdroj uvedený na obrázku 4-1.

Zdroj se skládá z měniče (MC34063) na záporné napětí  $-20\text{V}$  a dvou stabilizátorů na  $+15\text{V}$  a  $-15\text{V}$ . Zapojení měniče je převzato z katalogového listu [11], výstupní napětí měniče je kvůli odstranění rušení vyfiltrováno cívkou L2 a kondensátorem C5.



Obrázek 4-1: Schéma zapojení zdroje

Výpočet hodnot jednotlivých součástí ve měniči je proveden podle následujících vztahů z katalogového listu [11].

$V_{in}$  – vstupní napětí  $V_{in} = 24V$

$V_{out}$  – výstupní napětí z měniče  $V_{out} = -20V$

$V_f$  – úbytek napětí na výstupní diodě  $V_f = 0.5V$

$I_{out}$  – maximální výstupní proud měniče  $I_{out} = 0.2A$

$V_{sat}$  – saturační napětí tranzistoru v měniči  $V_{sat} = 1V$

$$\frac{t_{on}}{t_{off}} = \frac{|V_{out}| + V_f}{V_{in} - V_{sat}} = \frac{20 + 0.5}{24 - 1} = 0.89 \quad (4.1)$$

$$(t_{on} + t_{off})_{\max} = \frac{1}{f_{\min}} = \frac{1}{33000} = 3.03 \cdot 10^{-5} s \quad (4.2)$$

Ze vztahů 4.1 a 4.2 vyjde  $t_{on} = 1.42 \cdot 10^{-5} s$  a  $t_{off} = 1.603 \cdot 10^{-5} s$ .

$$C_3 = 4.5 \cdot 10^{-5} \cdot t_{on} = 639 pF = 680 pF \quad (4.3)$$

$$I_{PK} = 2 \cdot I_{out} \left[ \left( \frac{t_{on}}{t_{off}} \right) + 1 \right] = 0.2 \cdot 1.89 = 0,378 A \quad (4.4)$$

$$R_2 = \frac{0,3}{I_{pk}} = 0.79 \Omega \quad (4.5)$$

$$C_7 = \frac{I_{out} \cdot t_{on}}{V_{ripple}} = 100 \mu F \quad (4.6)$$

$$L_1 = \frac{V_{in(\min)} - V_{sat}}{I_{PK}} \cdot t_{on} = \frac{22 - 1}{0.378} \cdot 1.42 \cdot 10^{-5} = 788 \mu H = 820 \mu H \quad (4.7)$$

$$V_{out} = 1.25 \cdot \left( 1 + \frac{R_3}{R_4} \right) \quad (4.8)$$

Ze vztahu 4.8 se pak určí hodnota rezistorů  $R_4 = 10 k\Omega$ ,  $R_3 = 150 k\Omega$ , aby výstupní napětí měniče bylo  $-20V$ .

#### 4.1.2 Zesilovací část

Schéma zapojení zesilovače je na obrázku 4-2. Výstupní signál z můstku se připojuje na svorky S+ a S- tento signál je pak zesílen přístrojovým zesilovačem AD524 u kterého lze nastavit zisk 1000x nebo 100x pomocí přepínače připojeného k JP1. Trimrem R6 pak lze vynulovat vstupní offset a trimr R7 slouží k vynulování výstupního offsetu. Výstupní zesílené napětí je připojeno na svorku OUT.

Svorky P+ a P- souží k napájení měřicího mostu, napětí na těchto svorkách může být nastaveno na hodnotu 10 V nebo 2 V. Jako zdroj referenčního napětí je použita napěťová reference TL431, její zapojení je převzato z katalogového listu [17]. Výstupní napětí této reference je nastaveno rezistory  $R_{13}$ ,  $R_{14}$ ,  $R_8$  na 10 V, podle vzorce 4.9.

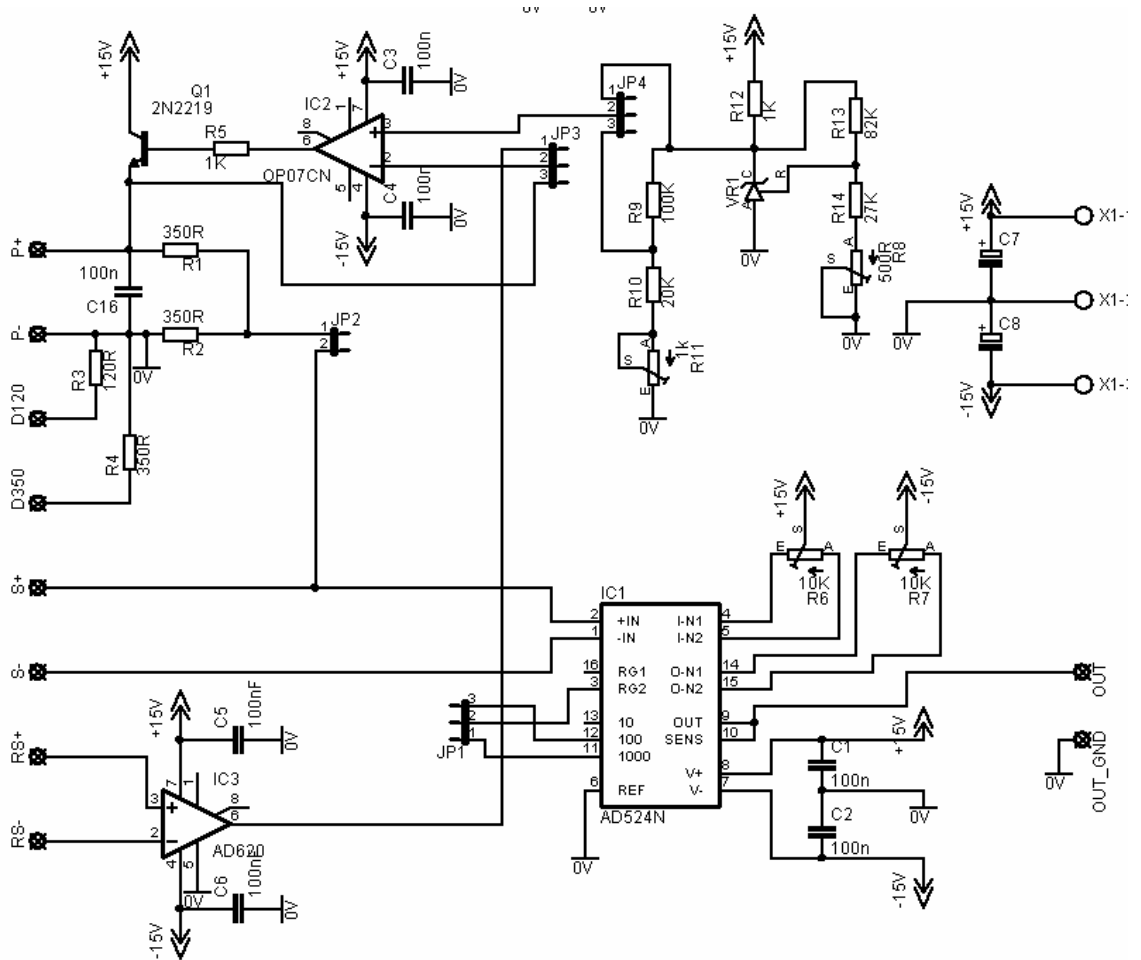
$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_{13}}{R_{14} + R_8}\right) \cdot V_{ref} \quad (4.9)$$

Kde  $V_{out} = 10V$ ,  $V_{ref} = 2.5V$ ,  $R_{13} = 82k\Omega$  (zvoleno)

$$3 = \frac{R_{13}}{R_{14} + R_8} \Rightarrow (R_{14} + R_8) = \frac{R_{13}}{3} \Rightarrow (R_{14} + R_8) = 27.333k\Omega \Rightarrow \\ \Rightarrow R_{14} = 27k\Omega, \Rightarrow R_8 = 500\Omega$$

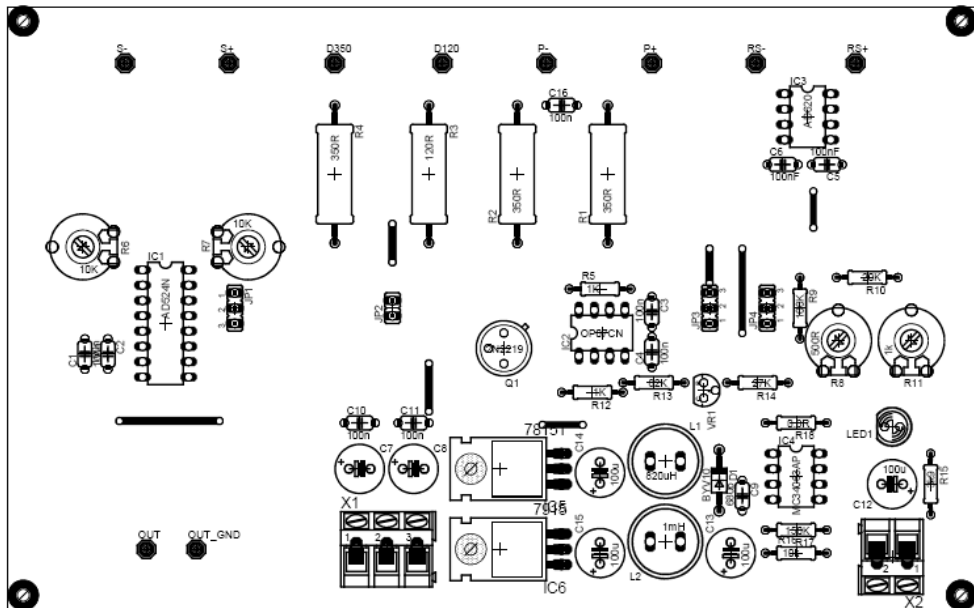
Proud referencí TL431 je nastaven rezistorem  $R_{12}=1k\Omega$  a jeho hodnota je 5 mA. Referenční napětí je připojeno na dělič napětí složený z rezistorů R9, R10, R11, který sníží napětí z 10 V na 2V. Tyto napětí pak mohou být připojeny přes přepínač JP4 na kladný vstup OZ OP07, ten napětí na výstupu zesílí tak, aby napětí na kladném vstupu OZ bylo stejné jako na svorce P+. Výstupní napětí je tedy rovno 10V nebo 2V podle polohy přepínače. K proudovému posílení zdroje pro napájení měřicího mostu slouží tranzistor Q1.

Pro případ 6-ti vodičového připojení mostu je zesilovač vybaven svorkami RS+ a RS-. Napětí z těchto svorek je připojeno k vstupu PZ AD620. Ten má nastaven zisk 1x a pak je připojeno přes přepínač připojený k JP3 na záporný vstup zesilovače OP07. Takto je vytvořena zpětná vazba, která zajistí v případě delších přívodních vodičů zesílení napětí pro napájení mostu tak, aby byl vykompenzován úbytek napětí na přívodních vodičích.

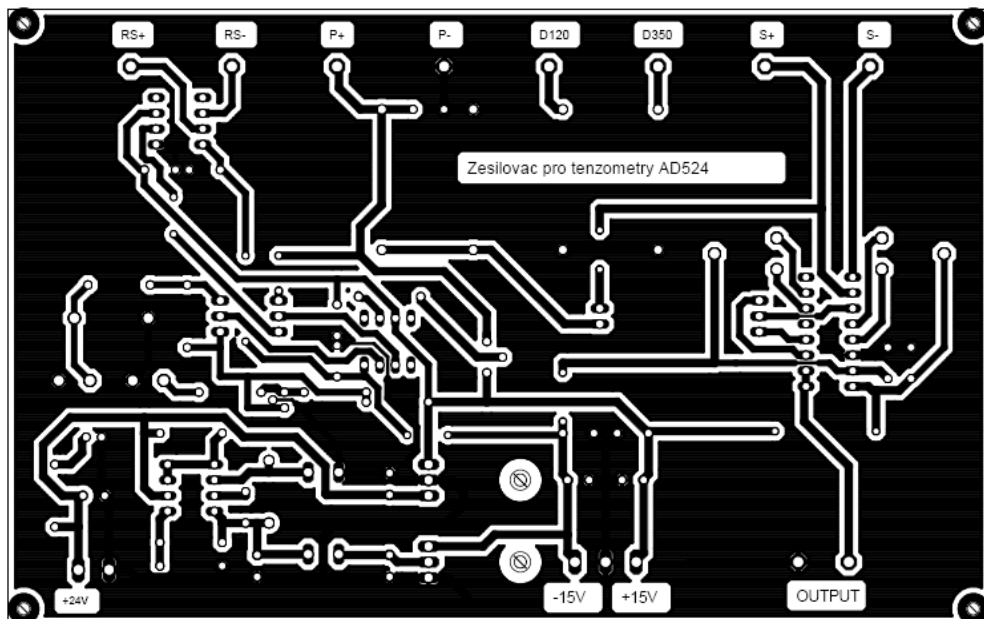


Obrázek 4-2: Schéma zesilovače

Pro připojení ½ můstku je zesilovač vybaven přesnými teplotně stabilními rezistory R1, R2. Při měření musí být sepnut spínač připojený na JP2. Další možností je měření pomocí ¼ můstku, k tomu slouží svorky D120 a D350 a k nim připojené teplotně stabilní rezistory R3, R4. I v tomto případě musí být sepnut spínač JP2. Pouze je-li k zesilovači připojen celý most tak je spínač připojený ke konektoru JP2 rozpojen.



Obrázek 4-3: Osazovací plán zesilovače

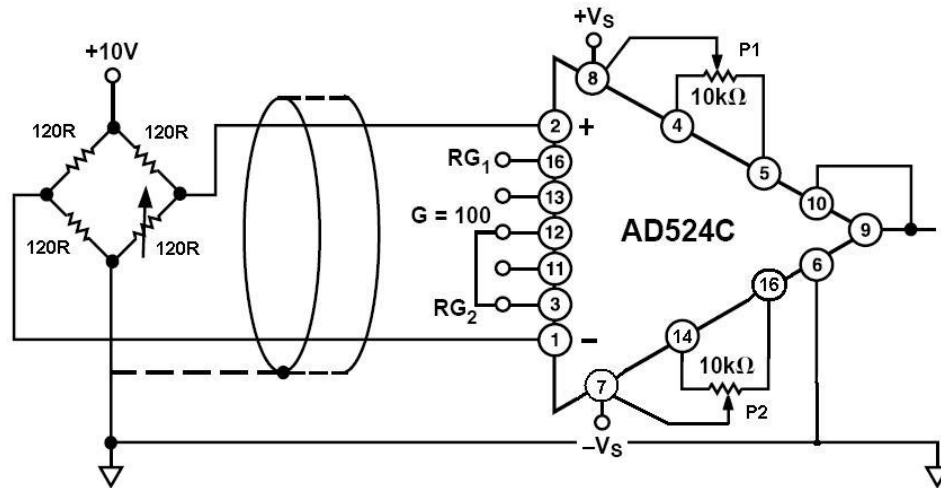


Obrázek 4-4: Deska plošných spojů zesilovače

#### 4.1.3 Výpočet chyby zesilovače AD524[2]

Výpočet je proveden pro zesílení zesilovače 100x, vstupní napětí 20 mV, odpor tenzometrů 120  $\Omega$ , napájení tenzometrického mostu je 10 V a zesilovač je napájen symetrickým napětím  $\pm 15$  V.

Zapojení zesilovače je na obrázku 4-5:



**Obrázek 4-5: Typické připojení mostu k zesilovači [2]**

Hlavní zdroje chyb, které mají vliv na celkovou chybu zesilovače, jsou přesnost zesílení zesilovače, nestabilita zesílení, vstupní offset a výstupní offset. Přesnost nastavení zesílení tohoto zesilovače je  $\pm 0.25\%$ , nestabilita zesílení je  $25\text{ ppm}$  a je způsobena změnou poměru rezistorů určujících zesílení v závislosti na teplotě. Byl zvolen zesilovač AD524, který má rezistory pro nastavení zesílení umístěny přímo na čipu, jsou tedy na stejné teplotě čipu a nedochází k tak výrazným změnám zesílení jako kdyby byl použit zesilovač, u kterého se zesílení nastavuje vnějším rezistorem. Další výhodou tohoto zesilovače je snadné vykompenzování vstupního a výstupního offsetu pomocí trimrů P1 a P2. V tabulce 4-1 jsou proto chyby způsobené vstupním a výstupním offsetem nulové. Výpočet chyby zesilovače AD524 ukazuje tabulka 4-1.

**Tabulka 4-1: Výpočet chyby zesilovače při teplotě  $T_a=25^\circ\text{C}$**

Zdroj chyby	AD524C	Výpočet	Vliv na absolutní chybu při $T_a = 25^\circ\text{C}$
Zesílení (Gain Error)	$\pm 0.25\%$	$\pm 0.25\% = 2500\text{ppm}$	2500ppm
Nestabilita zesílení (Gain Instability)	25ppm	$25\text{ppm} \cdot (T_a - 25)$	-
Nelinearita zesílení (Gain Nonlinearity)	$\pm 0.003\%$	30ppm	30ppm
Vstupní offset napětí (Input Offset Voltage)	0	$0/20\text{mV} = 0\text{ppm}$	-
Změna vstupního offsetu (Input Offset Voltage Drift)	$\pm 0.5 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$	$(\pm 0.5 \mu\text{V}/^\circ\text{C}) \cdot (T_a - 25) = 0$	-
Výstupní offset (Output Offset Voltage)	0	$0\text{mV} / \text{GAIN} \cdot 20\text{mV} = 0\text{ppm}$	-
Změna výstupního offsetu (Output Offset Voltage Drift)	$\pm 25 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$	$(\pm 25 \mu\text{V}/^\circ\text{C}) \cdot (T_a - 25) = 0$	-
Chyba vstupního klidového proudu (Bias Current-Source Imbalance Error)	$\pm 15\text{nA}$	$(\pm 15\text{nA}) \cdot (R_{s+} - R_{s-}) / 20\text{mV}$	-
Změna vstupního klidového proudu (Bias Current-Source Imbalance Drift)	$\pm 100\text{pA}/^\circ\text{C}$	$(\pm 100\text{pA}/^\circ\text{C}) \cdot (T_a - 25) \cdot (R_{s+} - R_{s-}) / 20\text{mV}$	-
Chyba offsetu vstupního klidového proudu (Offset Current-Source Imbalance Error)	$\pm 10\text{nA}$	$(\pm 10\text{nA}) \cdot (60\Omega) = 0.6\mu\text{V}$ $0.6\mu\text{V} / 20\text{mV} = 30\text{ppm}$	30ppm
Změna offsetu vstupního proudu (Offset Current-Source Imbalance Drift)	$\pm 100\text{pA}/^\circ\text{C}$	$(\pm 100\text{pA}/^\circ\text{C}) \cdot (60\Omega) \cdot (T_a - 25) = 0$ $0/20\text{mV} = 0\text{ppm}$	-
Potlačení souhlasného napětí 5V dc (Common Mode Rejection)	115dB	$V_{CM} / (10^{\text{CMRR}/20} \cdot V_{\text{DIFF}}) =$ $= 5 / (10^{115/20} \cdot 20\text{mV}) = 444.5\text{ppm}$	444.5ppm
Šum RTI (0.1 Hz-10Hz) (Noise RTI)	$0.3\mu\text{V}_{\text{p-p}}$	$0.3\mu\text{V}_{\text{p-p}} / 20\text{mV} = 15\text{ppm}$	15ppm
Celková chyba			3019.5ppm

$T_a$  – teplota součástky

$V_N$  - napájecí napětí mostu,  $V_N = 10\text{V}$

$V_{CM}$  - stejnosměrné napětí  $V_{CM} = V_N / 2$

$V_{DIFF}$  – maximální výstupní napětí z můstku – citlivost použitého můstku je  $2\text{mV}/V_N$  takže pro  $V_N = 10$  je  $V_{DIFF} = 20\text{mV}$

$R_{s+}$  - vnitřní odpor zdroje pro vstup PZ +,  $R_{s+} = 60\Omega$

$R_{s-}$  - vnitřní odpor zdroje pro vstup PZ -,  $R_{s-} = 60\Omega$

Výsledná chyba pro teplotu  $25^\circ\text{C}$  by teoreticky měla být  $3019.5\text{ppm}$ , jak se tato chyba změní pro teplotu  $60^\circ\text{C}$  ukazuje tabulka 4-2.

**Tabulka 4-2: Výpočet chyby zesilovače při teplotě  $T_a=60^\circ\text{C}$**

Zdroj chyby	AD524C	Výpočet	Vliv na absolutní chybu při $T_a = 60^\circ\text{C}$
Zesílení (Gain Error)	$\pm 0.25\%$	$\pm 0.25\% = 2500\text{ppm}$	2500ppm
Nestabilita zesílení (Gain Instability)	25ppm	$25\text{ppm} * (T_a - 25)$	875ppm
Nelinearita zesílení (Gain Nonlinearity)	$\pm 0.003\%$	30 ppm	30ppm
Vstupní offset napětí (Input Offset Voltage)	0	$0/20\text{mV} = 0\text{ppm}$	-
Změna vstupního offsetu (Input Offset Voltage Drift)	$\pm 0.5 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$	$(\pm 0.5 \mu\text{V}/^\circ\text{C}) * (T_a - 25) = 17.5 \mu\text{V}$ $17.5 \mu\text{V}/20\text{mV} = 875\text{ppm}$	875ppm
Výstupní offset (Output Offset Voltage)	0	$0\text{mV}/\text{GAIN} * 20\text{mV} = 0\text{ppm}$	-
Změna výstupního offsetu (Output Offset Voltage Drift)	$\pm 100 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$	$(\pm 100 \mu\text{V}/^\circ\text{C}) * (T_a - 25) = 3500 \mu\text{V}$ $3500 \mu\text{V}/(\text{GAIN} * 20\text{mV}) = 1750\text{ppm}$	1750ppm
Chyba vstupního klidového proudu (Bias Current-Source Imbalance Error)	$\pm 15\text{nA}$	$(\pm 15\text{nA}) * (R_{s+} - R_{s-})/20\text{mV}$	-
Změna vstupního klidového proudu (Bias Current-Source Imbalance Drift)	$\pm 100\text{pA}/^\circ\text{C}$	$(\pm 100\text{pA}/^\circ\text{C}) * (T_a - 25) * (R_{s+} - R_{s-}) / 20\text{mV}$	-
Chyba offsetu vstupního klidového proudu (Offset Current-Source Imbalance Error)	$\pm 10\text{nA}$	$(\pm 10\text{nA}) * (60\Omega) = 0.6 \mu\text{V}$ $0.6 \mu\text{V}/20\text{mV} = 30\text{ppm}$	30ppm
Změna offsetu vstupního proudu (Offset Current-Source Imbalance Drift)	$\pm 100\text{pA}/^\circ\text{C}$	$(\pm 100\text{pA}/^\circ\text{C}) * (60 \Omega) * (T_a - 25) = 0$ $0/20\text{mV} = 0\text{ppm}$	-
Potlačení součtového napětí 5V dc (Common Mode Rejection)	115dB	$V_{\text{CM}} / (10^{\text{CMRR}/20} * V_{\text{DIFF}}) =$ $= 5 / (10^{115/20} * 20\text{mV}) = 444.5\text{ppm}$	444.5ppm
Šum RTI (0.1 Hz-10Hz) (Noise RTI)	$0.3 \mu\text{V}_{\text{p-p}}$	$0.3 \mu\text{V}_{\text{p-p}}/20\text{mV} = 15\text{ppm}$	15ppm
Celková chyba			6504ppm

Chyba naroste především kvůli teplotně závislému zesílení PZ a vstupnímu a výstupnímu offsetu. Velikost chyby je pak 6504 ppm .

**Tabulka 4-3: Výpočet chyby která má vliv na rozlišení[2]**

Zdroj chyby	AD524C	Výpočet	Vliv na rozlišení
Nelinearita zesílení (Gain Nonlinearity)	$\pm 0.003\%$	$\pm 0.003\% = 30\text{ppm}$	30ppm
Šum RTI (0.1 Hz-10Hz) (Noise RTI)	$0.3 \mu\text{V}_{\text{p-p}}$	$0.3 \mu\text{V}_{\text{p-p}}/20\text{mV} = 15\text{ppm}$	15ppm
Celková chyba			45ppm

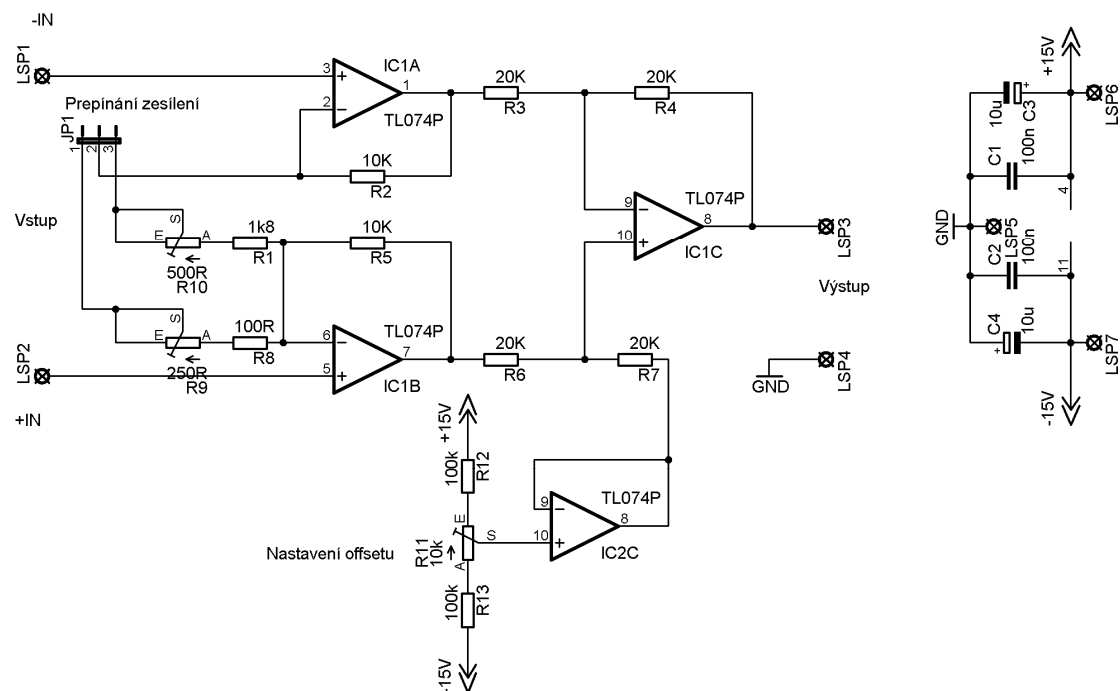
Tato chyba vyšla 45 ppm, je to chyba, která je dána nelinearitou zesílení a šumem zesilovače. Je to chyba, která se nedá dále již vykompenzovat. V zapojení podle obrázku 4-4 by tedy byla minimální chyba byla 0.0045 %, kdyby se podařilo přesně nastavit zesílení externě připojeným trimrem. Toto, ale mnou provedené zapojení zesilovače neumožňuje, proto výsledná chyba tohoto zesilovače by podle provedeného výpočtu měla být pro teplotu 25°C 3019 ppm = 0.302 %.

#### 4.2 KONSTRUKCE JEDNODUCHÉHO PZ[16]

Přístrojový zesilovač je tvořen dvojicí symetricky zapojených vstupních zesilovačů napětí s velkým vstupním odporem a symetrickým rozdílovým zesilovačem s asymetrickým výstupem. Schéma zapojení je na obrázku 4-6. Operační zesilovač použitý v konstrukci je nízkošumový typ s J-FET vstupy TL074.

##### Vlastnost zesilovače TL074

- Nízký šum: 15nV $\sqrt{\text{Hz}}$
- CMR: 80dB
- Šířka pásma: 200kHz



Obrázek 4-6: Zapojení přístrojového zesilovače

Rozdílové zesílení je určeno poměrem jeho výstupního napětí k rozdílovému vstupnímu napětí. Za předpokladu ideálních vlastností operačních zesilovačů je rozdílové zesílení rovno vzorci 4.10. Tento zesilovač umožňuje zesílení rozdílového signálu 100x nebo 1000x podle toho v jaké poloze se nachází přepínač, který je připojen k JP1.

$$G_D = \frac{R_4}{R_3} \left( 1 + 2 \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (4.10)$$

Kde  $R_I$  je součet odporů  $R_1$  a trimru  $R_{10}$ .

Musí platit:  $R_4=R_7$ ,  $R_3=R_6$ ,  $R_2=R_5$

Pro nastavení nulového offsetu slouží trimr  $R_{11}$ , výstupní napětí z trimru je pomocí sledovače impedančně odděleno. Toto zapojení ale není moc vhodné jelikož offset je pak závislý na napájecím napětí, lepším řešením by bylo použít zdroje konstantního proudu pro napájení děliče.

### 4.3 ODDĚLOVACÍ ZESILOVAČ [1][8]

Modul oddělovacího zesilovače je tvořen přístrojovým zesilovačem LT1101 a zesilovačem AD210, který zajišťuje oddělení vstupního signálu od výstupního.

#### Vlastnosti přístrojového zesilovače LT1101 [8]

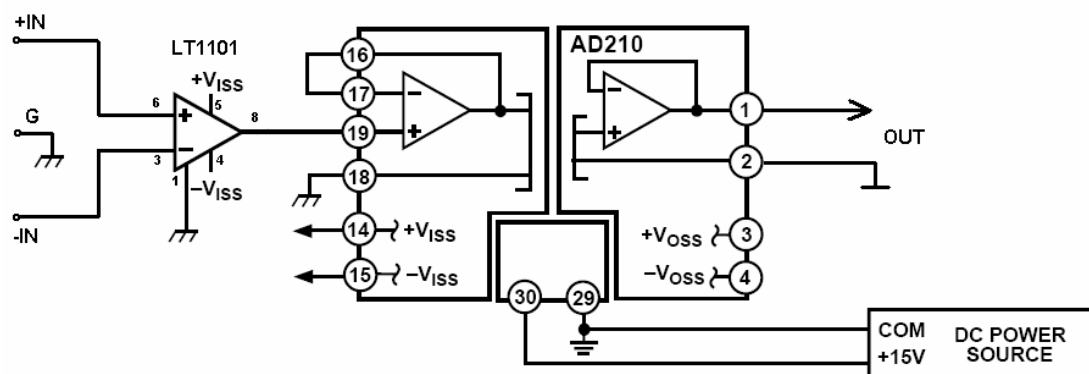
- Chyba zesílení: 0.04 %
- Nelinearita zesílení: 0.0008 %
- Drift zesílení 4 ppm/°C
- CMR: 100 dB
- Šířka pásma pro zesílení 100x: 2.5 kHz

#### Vlastnosti oddělovacího zesilovače AD210 [1]

- Oddělení napětí: 2500 V<sub>rms</sub>
- Chyba zesílení: ±2 %
- Nelinearita zesílení: 0.025 %
- Drift zesílení: 50 ppm/°C

- CMR: 120 dB
- Šířka pásma: 20 kHz

Zesilovač LT1101 je v základním katalogovém zapojení jeho zesílení je 100. Zesilovač AD210 je zapojen pouze jako sledovač, jeho zesílení je rovné 1. Celý modul je napájen z jednoho zdroje napětí 15V. Symetrické napájecí napětí pro přístrojový zesilovač je bráno z měniče, který je součástí obvodu AD210JN. Výstupní napětí z mostu se připojuje na diferenční vstupy +IN a -IN. Poté je zesíleno PZ LT1101 a následně přivedeno na oddělovací zesilovač u kterého musí být vstupní zemní svorka (pin 18) propojena se zemní svorkou mostu. Celkové schéma zapojení je na obrázku 4-8.



Obrázek 4-7: Schéma zapojení oddělovacího zesilovače

#### 4.4 PŘÍSTROJOVÝ ZESILOVAČ ZALOŽENÝ NA PŘEPÍNÁNÍ KAPACITY

Přístrojový zesilovač je tvořen obvodem LTC1043, který střídavě připojuje kondensátor  $C_s$  k můstku a k zesilovači. K zesílení slouží precizní operační zesilovač OP27, který je zapojen v neinvertujícím zapojení z důvodu vysoké hodnoty vstupního odporu.

Vlastnosti obvodu LTC1043 [9]

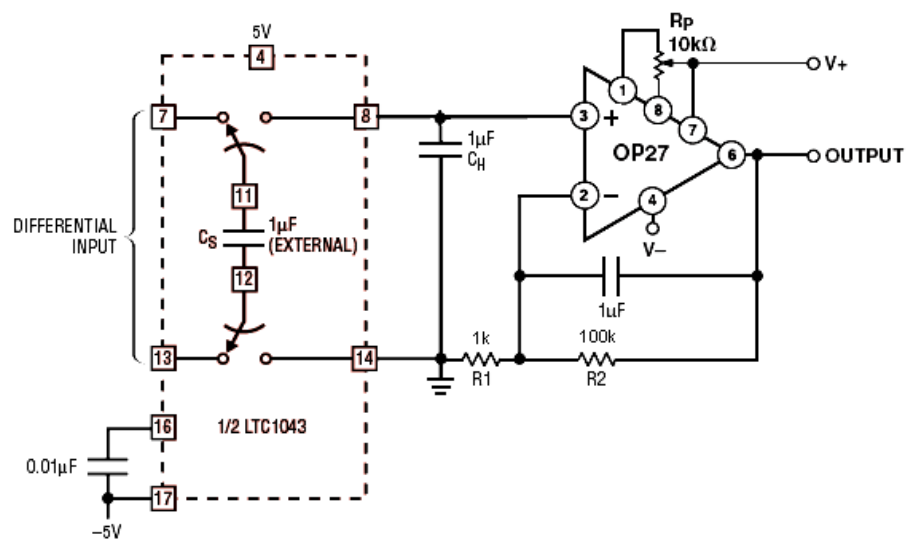
- Napájecí napětí: 18V
- CMR: 120dB
- Přepínací kmitočet: max. 5MHz při použití externího generátoru

- Nízký odběr: 0.25mA

#### Vlastnosti operačního zesilovače OP27 [13]

- Nízký šum:  $3.5\text{nV}\sqrt{\text{Hz}}$
- Nízký drift:  $0.2\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
- CMRR: 126dB
- Šířka pásma: 8MHz

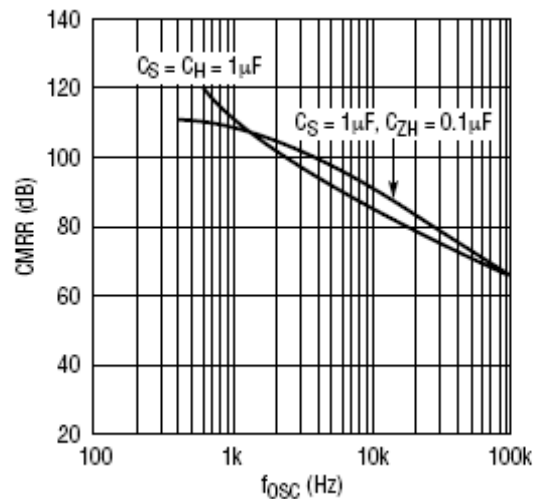
Zapojení obvodu LTC1043 je na obrázku 4-9. Vstupní měřené napětí se připojí na vstupy 7 a 13. Kondenzátor, který je střídavě přepínán mezi vstupem a výstupem obvodu, je svitkový o kapacitě  $1\mu\text{F}$ . Rychlost přepínání je nastavena na kmitočet  $400\text{ Hz}$  kondenzátorem o kapacitě  $10\text{ nF}$  připojeným k pinům 16 a 17 obvodu LTC1043.



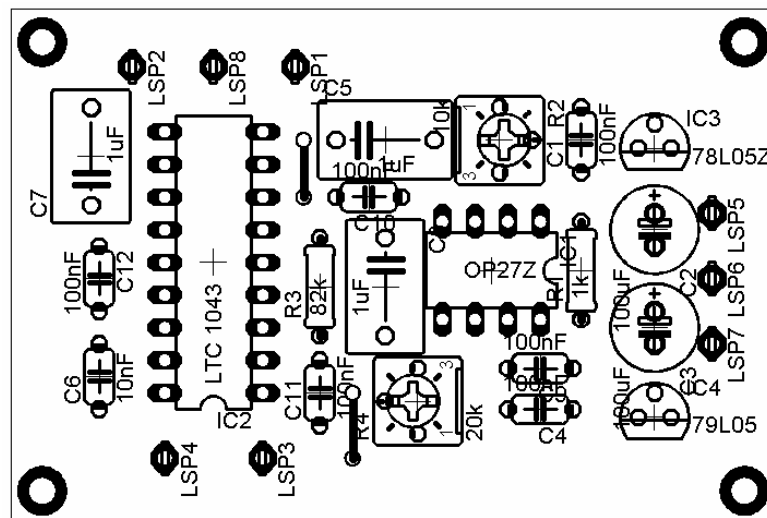
**Obrázek 4-8: Přístrojový zesilovač založený na přepínání kapacity**

Maximální rychlost přepínání kterou je možnou nastavit pro tento obvod s využitím interního oscilátoru je  $185\text{ kHz}$ , to v případě, že mezi piny 16 a 17 není žádný kondenzátor. Při použití externího oscilátoru je možné nastavit přepínací frekvenci až na  $5\text{ MHz}$ . Nevýhodou je, že rychlost přepínání ovlivňuje velikost činitele potlačení souhlasného napětí CMR viz. obrázek 4-10. Vysokého potlačení souhlasného napětí je dosaženo pouze pro nízké frekvence přepínání. Zesilovač

OP27 zesiluje vstupní signál 100x, nulový offset tohoto zesilovače se dá nastavit trimrem Rp. Napájecí napětí zesilovače OP27 a přepínače LTC1043 je  $\pm 5V$ .



Obrázek 4-9: Závislost CMRR na frekvenci oscilátoru [9]



Obrázek 4-10: Přístrojový zesilovač založený na přepínání kapacity

## 5. PROTOKOL O MĚŘENÍ ZESILOVAČŮ

Cílem následujících měření je srovnání navržených zesilovačů s profesionálním přístrojovým zesilovačem P-3500. Dále porovnání naměřených údajů s údaji, které uvádí výrobce a určení pro které aplikace jsou navržené zesilovače vhodné.

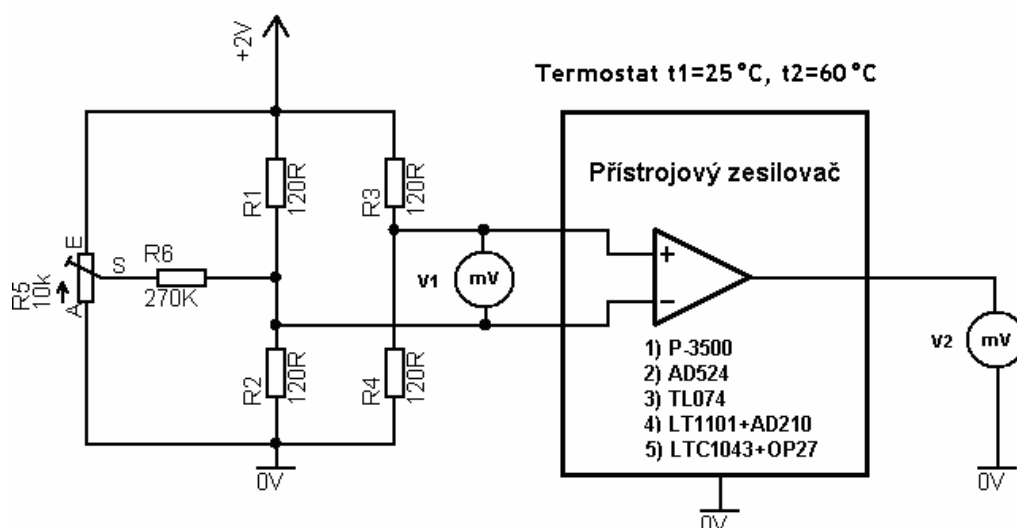
### 5.1 ÚKOL MĚŘENÍ

- 1) Měření převodní charakteristiky zesilovačů při 25 °C a 60 °C a určení tepelné změny zesílení a offsetu
- 2) Měření kmitočtové charakteristiky zesilovačů
- 3) Měření činitele potlačení souhlasného napětí CMRR

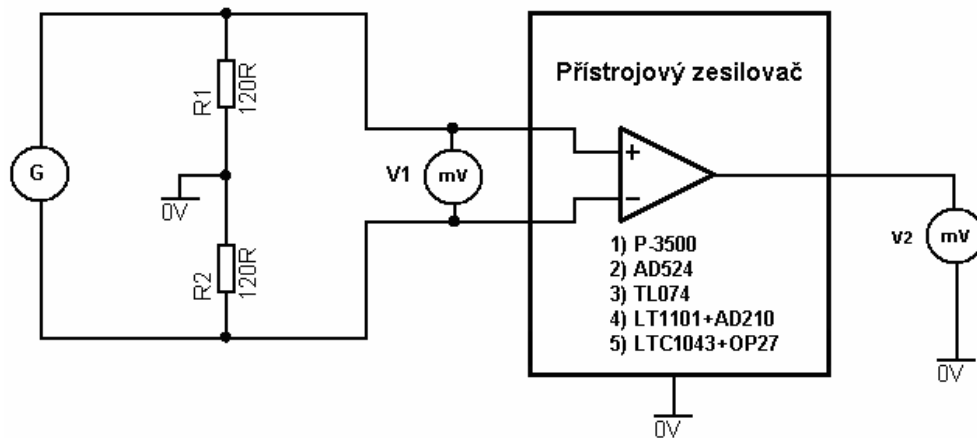
### 5.2 TEORETICKÝ ROZBOR

Potřebný teoretický základ je uveden v kapitole 2.2.1 - přístrojové zesilovače.

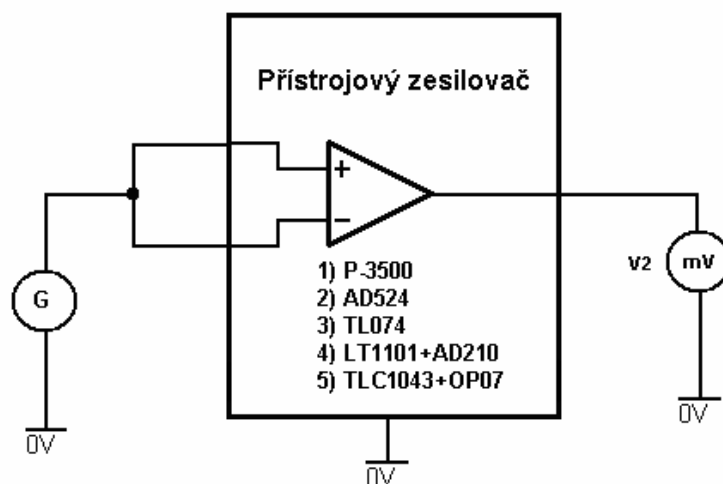
### 5.3 SCHÉMA ZAPOJENÍ



Obrázek 5-1: Schéma zapojení pro měření převodní charakteristiky



Obrázek 5-2: Schéma zapojení pro měření frekvenční charakteristiky zesílení



Obrázek 5-3: Zapojení pro měření činitele potlačení souhlasného napětí (CMR)

## 5.4 POSTUP PŘI MĚŘENÍ

### 5.4.1 Měření převodní charakteristiky zesilovače

Před měřením je nutné nastavit u zesilovačů, které to umožňují, nulový offset. Zkratují se vstupy zesilovače a na výstup se připojí stejnosměrný milivoltmetr, potenciometrem pro nastavení offsetu se pak nastaví co nejnižší napětí na výstupu. Všechny zesilovače se proměřují pro zesílení 100.

Zesilovač se propojí s mostem podle schéma zapojení na obrázku 5-1. Most je napájen ze zdroje stejnosměrného napětí 2 V (Agilent 3631A). Z tohoto zdroje jsou také napájeny měřené zesilovače. Zesilovač AD524 je napájen napětím 24 V, zesilovač s obvodem TL074 a zesilovač s LTC 1043 jsou napájeny symetrickým napětím  $\pm 15$  V, oddělovací zesilovač je napájen napětím 15 V. Zesilovač P-3500 má vlastní zdroj.

Měření se provede pro teploty 25 °C a 60 °C, kdy je zesilovač umístěn v troubě, kde je teplota udržována na nastavené teplotě. Vstupní napětí se nastavuje potenciometrem R5 v rozsahu -10 mV až 10 mV zhruba po 2 mV. Odečítá se vstupní a výstupní napětí zesilovače multimetry Agilent 34410A.

#### 5.4.2 Měření kmitočtové závislosti zesílení

Schéma zapojení je na obrázku 5-2. Pomocí odporového děliče je vytvořena zemní svorka, která je propojena se zemí měřeného zesilovače. Na generátoru (HP 33220) se nastaví sinusové napětí o efektivní hodnotě 20 mV. Poté se nastavuje na generátoru frekvence sinusového signálu od 20 Hz do 100 kHz a odečítá se na výstupu zesilovačů napětí měřené voltmetrem V2 (Agilent 34401A). Pro každý přístrojový zesilovač se provádí měření alespoň do té doby, než zesílení zesilovače klesne o 3 dB, aby se dal určit mezní kmitočet zesilovače.

#### 5.4.3 Měření činitele potlačení souhlasného napětí (CMR)

Zapojení přístrojů pro měření je podle schématu na obrázku 5-3. Na generátoru (HP33220) se nastaví sinusové napětí o efektivní hodnotě 3 V. Poté se nastavuje frekvence vstupního signálu od 10 Hz do 50000 Hz a odečítá se výstupní napětí na voltmetru (Agilent 34401A). Pro všechny měřené frekvence se pak vypočítá potlačení souhlasného napětí - CMR.

### 5.5 POUŽITÉ PŘÍSTROJE

- Generátor HP33220
- Multimetr Agilent 34401A
- Multimetr Agilent 34410A
- Zdroj Agilent 3631A

## 5.6 VYPRACOVÁNÍ

### 5.6.1 Měření převodních charakteristik zesilovačů

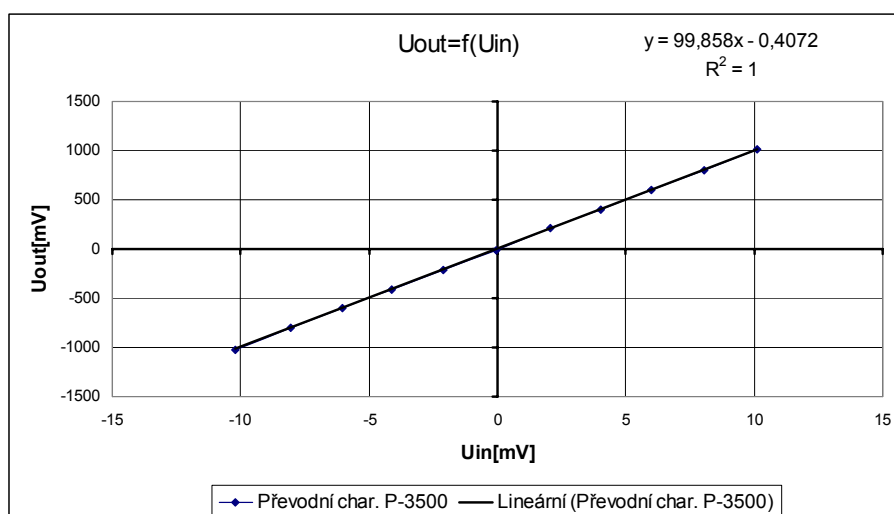
**Tabulka 5-1: Převodní charakteristika zesilovače P-3500 pro  $t=25\text{ }^{\circ}\text{C}$**

$U_{IN}[\text{mV}]$	-10,196	-8,051	-6,046	-4,112	-2,121	-0,071	2,072	4,026	6,006	8,053	10,093
$U_{OUT}[\text{mV}]$	-1019,2	-805,9	-603,2	-410,2	-211,3	-7,03	206,41	401,59	599,2	803,6	1006,9
$G_D$	99,96	100,10	99,77	99,76	99,62	99,01	99,62	99,75	99,77	99,79	99,76

$U_{IN}$  – nastavené napětí na vstupu zesilovače

$U_{OUT}$  – napětí na výstupu zesilovače

$G_D$  – vypočtené rozdílové zesílení zesilovače  $G_D = U_{OUT}/U_{IN}$



**Obrázek 5-4: Převodní charakteristika zesilovače P-3500 pro  $t=25\text{ }^{\circ}\text{C}$**

Pro tento zesilovač nebyla převodní charakteristika měřena při teplotě  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  jelikož výrobce udává teplotní změny zesílení a offsetu.

**Tabulka 5-2: Převodní charakteristika zesilovače AD524 pro  $t=25\text{ }^{\circ}\text{C}$**

$U_{IN}[\text{mV}]$	-9,922	-8,021	-6,073	-4,091	-2,124	0,004	2,145	4,007	6,061	8,115	10,088
$U_{OUT}[\text{mV}]$	-991,3	-803,1	-607,4	-409,6	-212,6	0,34	214,2	400,4	605,9	811,4	1008
$G_D$	99,91	100,12	100,02	100,12	100,09	85,00	99,86	99,93	99,97	99,99	99,92

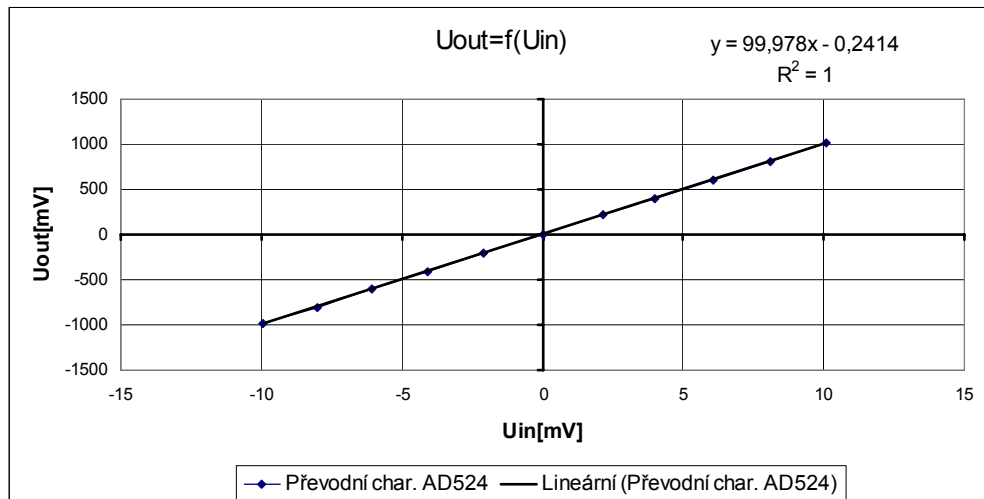
**Tabulka 5-3: Převodní charakteristika zesilovače AD524 pro  $t=60\text{ }^{\circ}\text{C}$**

$U_{IN}[\text{mV}]$	-10,14	-7,945	-6,349	-3,954	-1,972	0,074	2,081	4,042	5,982	8,069	10,284
$U_{OUT}[\text{mV}]$	-1012,2	-792,6	-632,47	-393,3	-194,7	10,17	209,87	407,22	601,39	810,26	1031,7
$G_D$	99,82	99,76	99,62	99,47	98,73	137,43	100,85	100,75	100,53	100,42	100,32

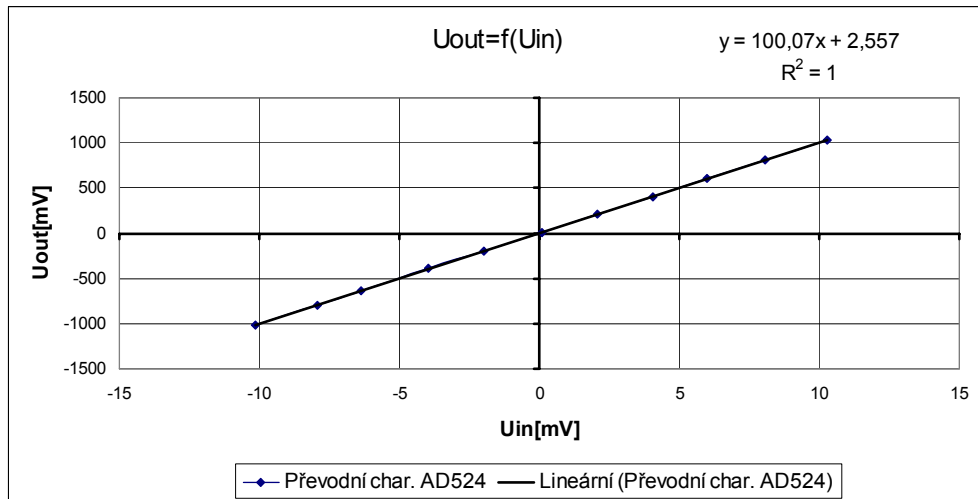
$U_{IN}$  – nastavené napětí na vstupu zesilovače

$U_{OUT}$  – napětí na výstupu zesilovače

$G_D$  – vypočtené rozdílové zesílení zesilovače  $G_D = U_{OUT}/U_{IN}$



Obrázek 5-5: Převodní charakteristika zesilovače AD524 pro  $t=25\text{ °C}$



Obrázek 5-6: Převodní charakteristika zesilovače AD524 pro  $t=60\text{ °C}$

Tabulka 5-4: Převodní charakteristika zesilovače TL074 pro  $t=25\text{ °C}$

$U_{IN}[\text{mV}]$	-10,85	-8,073	-6,059	-4,095	-2,015	-0,063	2,066	4,074	6,01	8,063	10,075
$U_{OUT}[\text{mV}]$	-1085,6	-807,1	-605,3	-408,9	-200,8	-5,6	207,8	409,8	602,4	807,8	1009,4
$G_D$	100,06	99,98	99,90	99,85	99,65	88,89	100,58	100,59	100,23	100,19	100,19

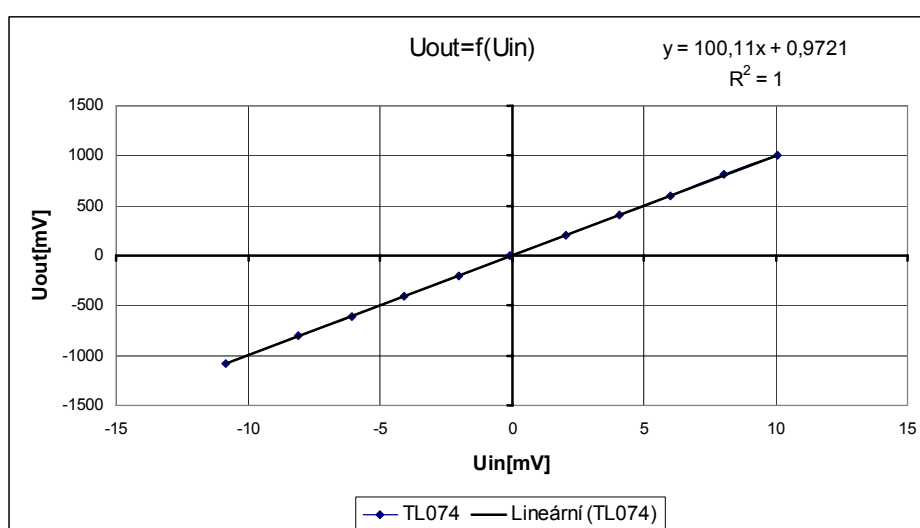
**Tabulka 5-5: Převodní charakteristika zesilovače TL074 pro  $t=60\text{ }^{\circ}\text{C}$**

$U_{IN}[\text{mV}]$	-10,35	-8,075	-6,123	-4,035	-2,045	0,074	2,013	4,042	6,018	8,014	10,152
$U_{OUT}[\text{mV}]$	-1019,2	-791,5	-596,2	-386,5	-187,1	25,1	219,3	422,6	620,4	820,4	1034,8
$G_D$	98,47	98,02	97,37	95,79	91,49	339,19	108,94	104,55	103,09	102,37	101,93

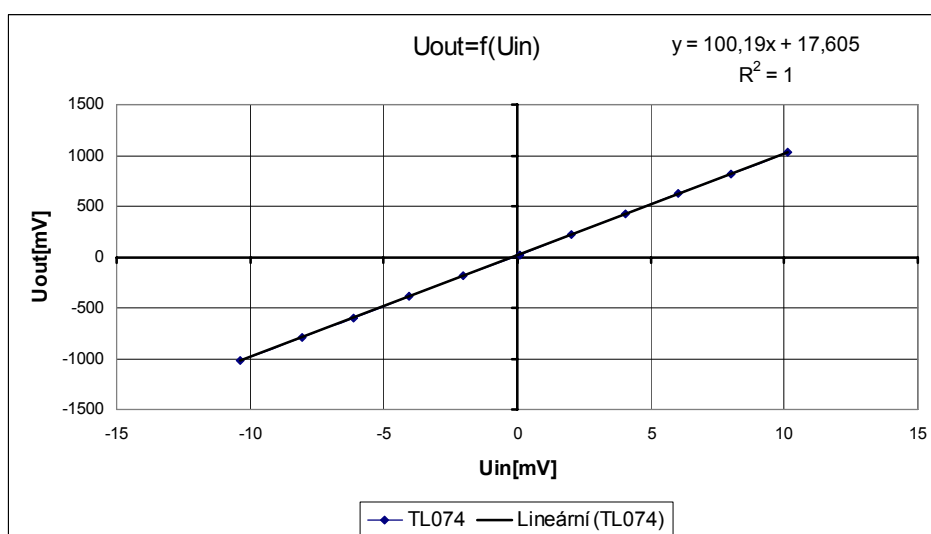
$U_{IN}$  – nastavené napětí na vstupu zesilovače

$U_{OUT}$  – napětí na výstupu zesilovače

$G_D$  – vypočtené rozdílové zesílení zesilovače  $G_D = U_{OUT}/U_{IN}$



**Obrázek 5-7: Převodní charakteristika zesilovače TL074 pro  $t=25\text{ }^{\circ}\text{C}$**



**Obrázek 5-8: Převodní charakteristika zesilovače TL074 pro  $t=60\text{ }^{\circ}\text{C}$**

**Tabulka 5-6: Převodní charakteristika zesilovače AD210+LT1101 pro  $t=25\text{ }^{\circ}\text{C}$**

$U_{IN}[\text{mV}]$	-10,85	-8,073	-6,059	-4,095	-2,015	-0,063	2,066	4,074	6,01	8,063	10,075
$U_{OUT}[\text{mV}]$	-1085,6	-807,1	-605,3	-408,9	-200,8	-5,6	207,8	409,8	602,4	807,8	1009,4
$G_D$	100,06	99,98	99,90	99,85	99,65	88,89	100,58	100,59	100,23	100,19	100,19

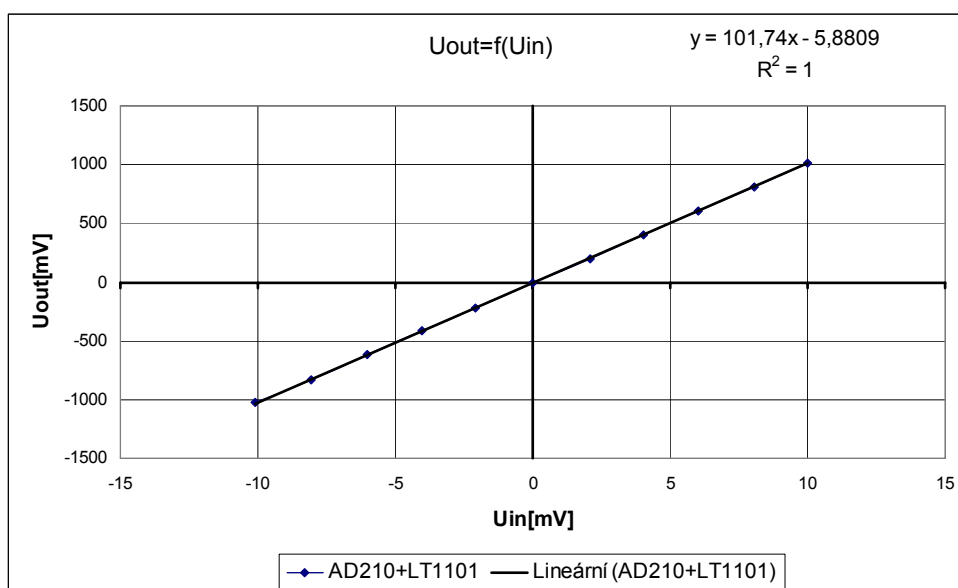
**Tabulka 5-7: Převodní charakteristika zesilovače AD210+LT1101 pro  $t=60\text{ }^{\circ}\text{C}$**

$U_{IN}[\text{mV}]$	-10,057	-8,095	-6,104	-4,017	-2,143	0,025	2,037	4,039	5,998	8,076	10,158
$U_{OUT}[\text{mV}]$	-1026,3	-835,9	-641,6	-435,1	-249,2	-30,75	171,3	375,2	576,1	787,6	997,2
$G_D$	102,05	103,26	105,11	108,31	116,29	-1230,0	84,09	92,89	96,05	97,52	98,17

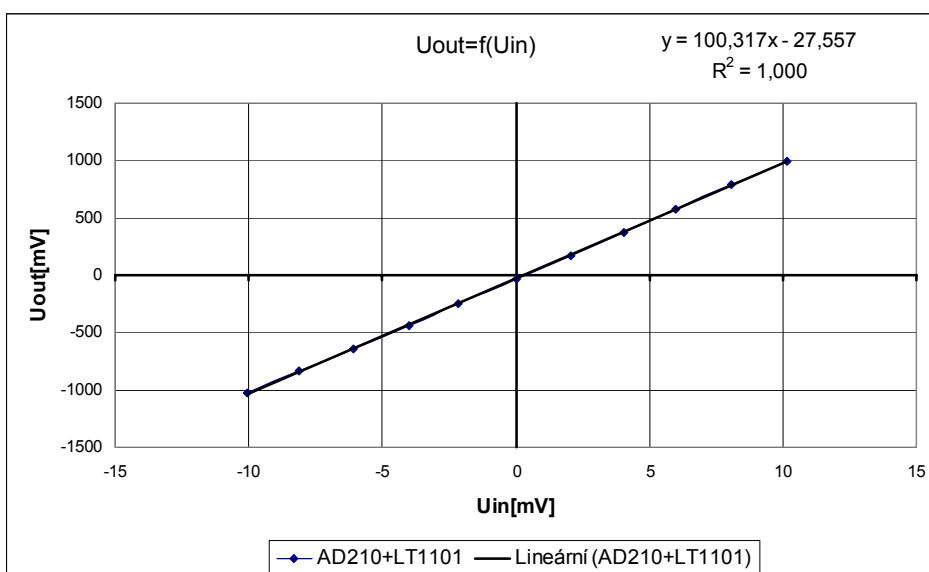
$U_{IN}$  – nastavené napětí na vstupu zesilovače

$U_{OUT}$  – napětí na výstupu zesilovače

$G_D$  – vypočtené rozdílové zesílení zesilovače  $G_D = U_{OUT}/U_{IN}$



**Obrázek 5-9: Převodní charakteristika zesilovače AD210+LT1101 pro  $t=25\text{ }^{\circ}\text{C}$**



Obrázek 5-10: Převodní charakteristika zesilovače AD210+LT1101 pro  $t=60\text{ °C}$

Tabulka 5-8: Převodní charakteristika zesilovače LTC1043+OP27 pro  $t=25\text{ °C}$

$U_{IN}[mV]$	-10,001	-8,053	-6,104	-4,106	-2,078	-0,043	2,04	4,027	6,054	8,027	10,014
$U_{OUT}[mV]$	-1000	-805,2	-609,9	-410,2	-207,6	-4,1	204,2	402,3	605,1	802,2	1000,9
$G_D$	99,99	99,99	99,92	99,90	99,90	95,35	100,10	99,90	99,95	99,94	99,95

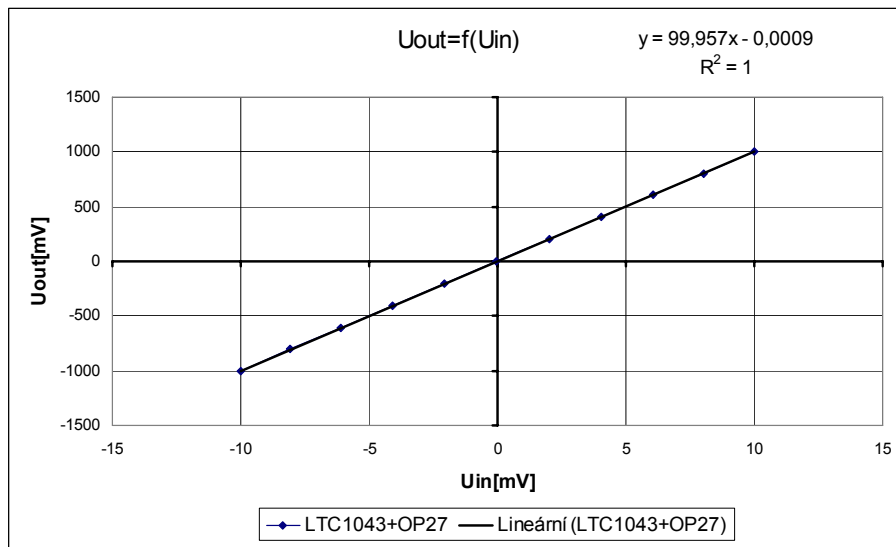
Tabulka 5-9: Převodní charakteristika zesilovače LTC1043+OP27 pro  $t=25\text{ °C}$

$U_{IN}[mV]$	-10,088	-8,039	-6,107	-4,109	-2,041	-0,018	2,075	4,059	6,079	8,043	10,145
$U_{OUT}[mV]$	-1006,4	-801,7	-608,8	-408,7	-202,2	-1,7	209,3	407,52	609,4	805,7	1015,8
$G_D$	99,76	99,73	99,69	99,46	99,07	94,44	100,87	100,40	100,25	100,17	100,13

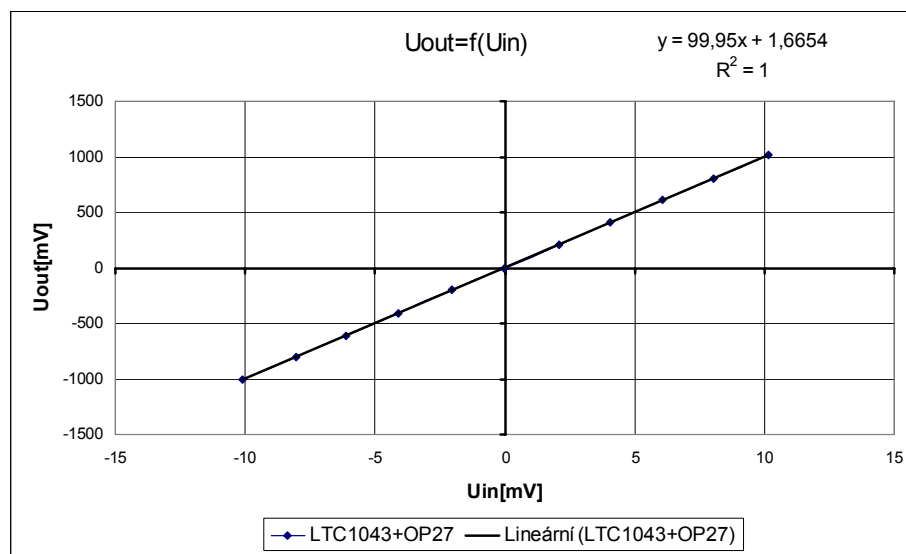
$U_{IN}$  – nastavené napětí na vstupu zesilovače

$U_{OUT}$  – napětí na výstupu zesilovače

$G_D$  – vypočtené rozdílové zesílení zesilovače  $G_D = U_{OUT}/U_{IN}$



**Obrázek 5-11: Převodní charakteristika zesilovače LTC1043+OP27 pro  $t=25\text{ °C}$**



**Obrázek 5-12: Převodní charakteristika zesilovače LTC1043+OP27 pro  $t=60\text{ °C}$**

#### Výpočet chyby zesilovače

Z naměřených převodních charakteristik lze dále určit pro každý zesilovač chybu nuly (offset), zesílení a teplotní změny zesílení a offsetu. Chyba nuly neboli offset je posun převodní charakteristiky ve směru osy y. Chyba zesílení se určí ze směrnice přímky, kterou udává člen u „x“ v rovnici regrese. Jednotlivé chyby jsou uvedeny v následujících tabulkách pro teploty  $25\text{ °C}$  a  $65\text{ °C}$ .

**Tabulka 5-10: Vypočítané chyby offsetu a zesílení pro teplotu  $t=25\text{ }^{\circ}\text{C}$**

Zesilovač:	P-3500	AD524	TL074	AD210+LTC1101	LTC1043+OP27
$V_o$ [mV]	-0,407	-0,2414	0,9721	-5,88	-0,0009
$\delta_o$ [ppm]	-408	-241	971	-5779	-1
$G_D$	99,86	99,98	100,11	101,74	99,96
$\delta_A$ [ppm]	-1422	-220	1099	17102	-430
$\delta_c$ [ppm]	-1830	-462	2070	11323	-431
$\delta_c$ [%]	-0,183	-0,046	0,207	1,132	-0,043
A/D převodník	10 bitů	12 bitů	9 bitů	7 bitů	12 bitů

**Tabulka 5-11: Vypočítané chyby offsetu a zesílení pro teplotu  $t=60\text{ }^{\circ}\text{C}$**

Zesilovač:	P-3500	AD524	TL074	AD210+LTC1101	LTC1043+OP27
$V_o$ [mV]	neměřeno	2,557	17,605	27,355	1,665
$\delta_o$ [ppm]		2555	17572	27269	1666
$G_D$		100,07	100,19	100,32	99,95
$\delta_A$ [ppm]		700	1896	3160	-500
$\delta_c$ [ppm]		3255	19468	30429	1166
$\delta_c$ [%]		0,325	1,947	3,043	0,117
Přesnost		9 bitů	6 bitů	6 bitů	10 bitů

$V_o$  – offset měřený na výstupu zesilovače

$$\delta_o - \text{chyba offsetu } \delta_o = \frac{V_o}{V_{IN} \cdot A} \cdot 10^6 \quad [\text{ppm}] \quad (5.1)$$

$V_{IN}$  – vstupní napětí, počítáno pro  $V_{IN}=10\text{ mV}$

$G_D$  – vypočtené rozdílové zesílení

$$\delta_G - \text{chyba zesílení } \delta_G = \frac{(A-100)}{A} \cdot 10^6 \quad [\text{ppm}] \quad (5.2)$$

$$\delta_c - \text{celková chyba zesilovače } \delta_c = \delta_o + \delta_A \quad [\text{ppm}] \quad (5.3)$$

A/D převodník – vyjadřuje kolikabitový by měl být minimálně použitý A/D převodník při potřebě digitalizovat výstupní signál ze zesilovače

Určí se podle následující rovnice.

$$\delta_c [\text{ppm}] \geq \frac{1}{2^N - 1} \cdot 10^6 \quad (5.4)$$

Kde N je počet bitů A/D převodníku.

**Tabulka 5-12: Srovnání zesilovačů ohledně změny zesílení a offsetu s teplotou**

Zesilovač:	P-3500	AD524	TL074	AD210+LTC1101	LTC1043+OP27
$V_{DO}$ [ $\mu V/^\circ C$ ]	100	80	475	950	48
$V_{DA}$ [ppm/ $^\circ C$ ]	50	26	23	-398	-2

$V_{DO}$  – změna offsetu na výstupu zesilovače se zesílením 100

$$V_{DO} = \frac{V_o(60^\circ C)[mV] - V_o(25^\circ C)[mV]}{\Delta \vartheta [^\circ C]} \cdot 10^3 \quad [\mu V/^\circ C] \quad (5.5)$$

$V_{DG}$  – změna zesílení zesilovače

$$V_{DG} = \frac{\delta_A(60^\circ C) - \delta_B(25^\circ C)}{\Delta \vartheta} \quad [ppm/^\circ C] \quad (5.6)$$

$\Delta \vartheta$  - rozdíl teplot  $\Delta \vartheta = 60^\circ C - 25^\circ C = 35^\circ C$

Pro zesilovač P-3500 nebyl drift výstupního offsetu a zesílení vypočítán byl doplněn do tabulky z údajů, které udává výrobce.

Pro teplotu  $25^\circ C$  vyšla největší celková chyba pro oddělovací zesilovač a to 11323 ppm (1.13 %) a je hlavně dána chybou zesílení oddělovacího zesilovače, pro který výrobce udává maximální chybu zesílení  $\pm 2\%$ . Chyba 2017 ppm (0.2 %) byla naměřena pro zesilovač složený ze tří operačních zesilovačů TL074, na celkové chybě se zhruba stejnou měrou podílí chyba offsetu a zesílení, zde se zesílení zesilovače podařilo nastavit poměrně přesně trimrem, proto nevyšla chyba zesílení tak velká. Pro zesilovač Vishay P-3500 byla zjištěna chyba -1830 ppm (-0.18 %), tato chyba je hlavně dána mnou nepřesně nastaveným zesílením, jelikož u tohoto zesilovače se zesílení nastavovalo potenciometrem ve velkém rozsahu hodnot a tak byl problém ho přesně nastavit. Celková chyba -462 ppm (0.046%) byla zjištěna pro zesilovač AD524, jen o trochu nižší chyba byla zjištěna pro zesilovač založený na přepínání kapacity LTC1043+OP07 a to -431 ppm (-0.043 %). Vypočtené chyby offsetu jsou počítány pro vstupní napětí 10 mV pro nižší vstupní napětí budou tedy offsetové chyby výrazně vyšší a naopak.

Pro teplotu  $60^\circ C$  vyšla opět největší chyba pro oddělovací zesilovač a to 30429 ppm (3.04 %) a je způsobena hlavní měrou offsetovou chybou. Další velká chyba byla zjištěna pro zesilovač s TL074 a to 19468 ppm (1.95 %), tato chyba je opět dána hlavně offsetovou chybou. Pro zesilovač AD524 chyba narostla na 3255

ppm ( 0.33 %) a opět se hlavní měrou na této chybě podílela chyba offsetu. Nejnižší hodnota byla opět naměřena pro zesilovač založený na přepínání kapacity a to 1166 ppm (0.12 %). Z naměřených výsledků je patrné, že chyba všech zesilovačů roste s teplotou a je způsobená hlavně teplotní změnou offsetu. Pro přesné aplikace, kde se dají předpokládat velké změny teploty bude hlavním parametrem pro výběr zesilovače.

Největší drift zesílení byl zjištěn pro oddělovací zesilovač a to - 398  $ppm/^{\circ}C$  také drift offsetu měřený na výstupu byl naměřen poměrně vysoký 950  $\mu V/^{\circ}C$ , naměřené údaje jsou zhruba 10x vyšší, než které vyšly pro ostatní zesilovače, ale výhoda tohoto zesilovače je v galvanickém oddělení vstupu od výstupu. U zesilovače s TL074 vyšel malý drift zesílení jenom 23  $ppm/^{\circ}C$ , ale drift offsetu vyšel poměrně vysoký 475  $\mu V/^{\circ}C$ . Tohoto jednoduchého zesilovače by se dalo využít pro měření střídavých signálů, například z tenzometrických snímačů vibrací kde se neprojeví chyby způsobené offsetem. Výrobce pro zesilovač Vishay P-3500 udává drift výstupního offsetu pro zesílení 100x 100  $\mu V/^{\circ}C$ , pro navržený zesilovač s obvodem AD524, který má stávající zesilovač v laboratořích nahradit byl změřen drift offsetu na výstupu 80  $\mu V/^{\circ}C$ . Drift zesílení pro P-3500 je maximálně 50  $ppm/^{\circ}C$ , pro AD524 byla změřena hodnota 26  $ppm/^{\circ}C$  to odpovídá katalogovému údaji, který se podle typu obvodu AD524 pohybuje v rozmezí 25 až 50  $ppm/^{\circ}C$ . Nejlepších hodnot bylo podle očekávání (viz. kapitola 2) dosaženo pro zesilovač založený na přepínání kapacity s obvodem LTC1043 drift zesílení vyšel -2  $ppm/^{\circ}C$  a drift výstupního offsetu vyšel 48  $\mu V/^{\circ}C$ .

Tyto naměřené údaje jsou ale pouze přibližné, jelikož pro přesnější zjištění driftu zesílení a offsetu by bylo potřeba provést měření vícekrát, to nebylo ale z časových důvodů realizováno.

### 5.6.2 Měření kmitočtové charakteristiky zesílení

**Tabulka 5-13: Kmitočtová charakteristika pro zesilovače P-3500, AD524, TL074 a AD210+LT1101**

f[Hz]	20	50	100	200	500	1000	2000	5000	10000	20000	50000	100000	200000
$U_{IN}$ [mV]	19,92	19,92	19,92	19,92	19,92	19,92	19,92	19,92	19,92	19,92	19,92	19,92	19,92
$U_1$ [V]	1,989	1,989	1,987	1,986	1,973	1,946	1,868	1,052	0,248				
$U_2$ [V]	1,991	1,991	1,991	1,991	1,991	1,991	1,99	1,987	1,983	1,966	1,881	1,510	1,074
$U_3$ [V]	1,993	1,992	1,993	1,993	1,993	1,993	1,989	1,964	1,885	1,643	1,005	0,583	
$U_4$ [V]	1,984	1,977	1,958	1,92	1,823	1,662	1,35	0,869	0,551	0,375			
$A_1$	99,9	99,9	99,7	99,7	99,0	97,7	93,8	52,8	12,5				
$A_2$	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	99,7	99,5	98,7	94,4	75,8	53,9
$A_3$	100,1	100,0	100,1	100,1	100,1	100,1	99,8	98,6	94,6	82,5	50,5	29,3	
$A_4$	99,6	99,2	98,3	96,4	91,5	83,4	67,8	43,6	27,7	18,8	0,0		
$G_1$ [dB]	40,0	40,0	40,0	40,0	39,9	39,8	39,4	34,5	21,9				
$G_2$ [dB]	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	39,9	39,5	37,6	34,6
$G_3$ [dB]	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	39,9	39,5	38,3	34,1	29,3	
$G_4$ [dB]	40,0	39,9	39,9	39,7	39,2	38,4	36,6	32,8	28,8	25,5			

$f$  – frekvence vstupního sinusového signálu

$U_{IN}$  – nastavené napětí na vstupu zesilovače

$U_1$  – naměřené napětí na výstupu zesilovače P-3500

$U_2$  – naměřené napětí na výstupu zesilovače AD524

$U_3$  – naměřené napětí na výstupu zesilovače TL072

$U_4$  – naměřené napětí na výstupu zesilovače LT1101 + AD210

$A_1, A_2, A_3, A_4$  – vypočtené zesílení jednotlivých zesilovačů  $A_I = U_I / U_{IN}$

$G_1, G_2, G_3, G_4$  – zesílení v [dB]  $G_I = 20 \log A_I$

**Tabulka 5-14: Kmitočtová charakteristika pro zesilovač LTC1043+OP27**

f[Hz]	4	6	8	10	12	14	16	18	20	30	40	50	60	70	100
$U_{IN}$ [mV]	20,06	20,06	20,06	20,06	20,06	20,06	20,06	20,06	20,06	20,06	20,06	20,06	20,06	20,06	20,06
$U_{OUT}$ [V]	1,999	1,991	1,979	1,963	1,945	1,923	1,899	1,873	1,846	1,69	1,519	1,389	1,255	1,142	0,8947
$A$	99,66	99,26	98,66	97,86	96,96	95,87	94,67	93,37	92,03	84,25	75,73	69,25	62,57	56,93	44,60
$G$ [dB]	39,97	39,94	39,88	39,81	39,73	39,63	39,52	39,40	39,28	38,51	37,58	36,81	35,93	35,11	32,99

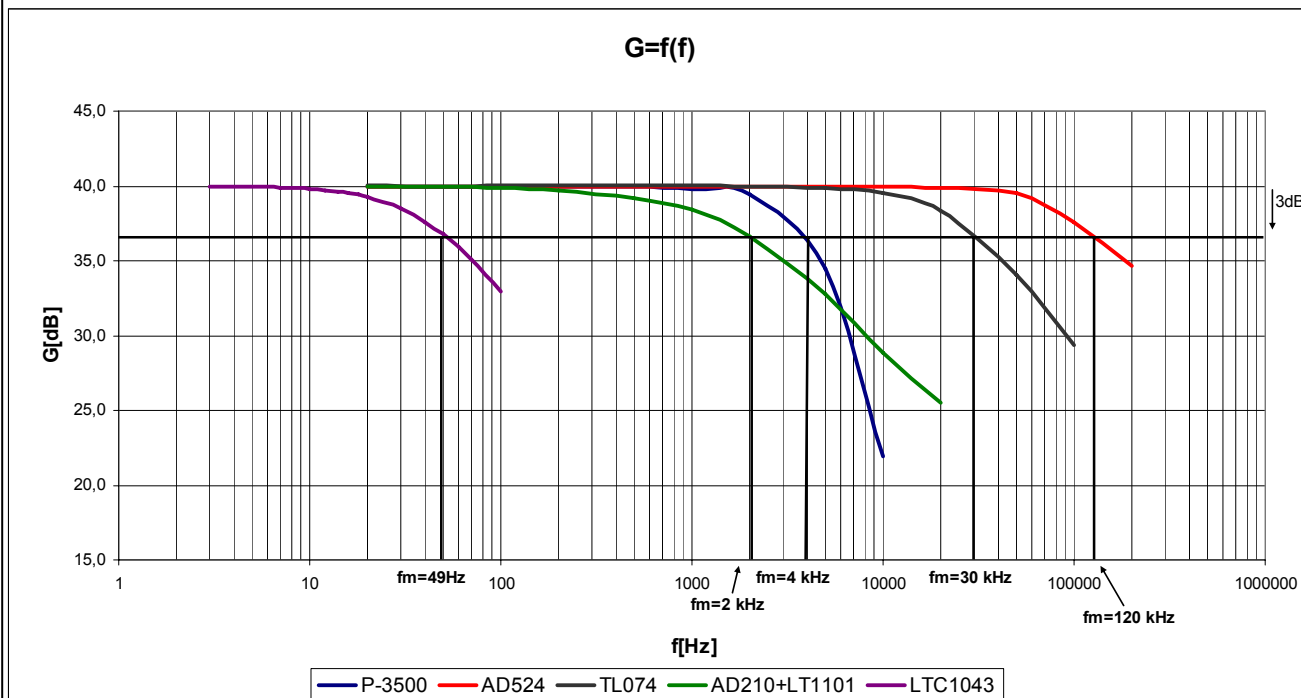
$f$  – frekvence vstupního sinusového signálu

$U_{IN}$  – nastavené napětí na vstupu zesilovače

$U_{OUT}$  – naměřené napětí na výstupu zesilovače LTC1043+OP27

$A$  – zesílení zesilovače  $A = U_{OUT} / U_{IN}$

$G$  – zesílení v [dB]  $G=20\log A$  [dB]



**Obrázek 5-13: Frekvenční charakteristika měřených zesilovačů**

Zhodnocení naměřených výsledků:

Nejmenší mezní kmitočet byl naměřen pro zesilovač založený na přepínání kapacity, k poklesu zesílení o 3 dB dochází na frekvenci 49 Hz. Na mezní kmitočet toho zesilovače má vliv rychlost přepínání kondensátoru  $C_s$  která je 400 Hz a také časová konstanta po kterou trvá nabití tohoto kondenzátou přes vnitřní odpor generátoru (viz. kapitola 4-4).

Pro oddělovací zesilovač, byl zjištěn mezní kmitočet 2 kHz, to odpovídá udávané hodnotě výrobcem pro obvod LT1101 při zesílení 100x.

Přístrojový zesilovač pro tenzometry od firmy Vishay P-3500 má mezní kmitočet 4 kHz, to odpovídá udávané hodnotě výrobcem, dále je z kmitočtové charakteristiky patrné, že klesá s vyšší strmostí než charakteristiky ostatních zesilovačů. Je to dáno tím, že daný zesilovač obsahuje na výstupu aktivní filtr pro utlumení vyšších kmitočtů. Ostatní měřené zesilovače tento filtr neobsahují.

U přístrojového zesilovače složeného ze tří operačních zesilovačů TL074 je mezní kmitočet 30 kHz.

Největší mezní kmitočet byl zjištěn pro zesilovač AD524 a to 120 kHz, ovšem v katalogu výrobce udává pro zesílení 100 hodnotu 150 kHz. Naměřená hodnota je tedy nižší než udává výrobce, ale je více než dostatečná pro měření s tenzometry.

### 5.6.3 Měření činitele potlačení souhlasného napětí (CMR)

Tabulka 5-15: Měření činitele potlačení souhlasného napětí (CMR)

f[Hz]	10	20	50	100	200	500	1000	2000	5000	10000	20000	50000
$U_{IN}[V]$	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
$U_1[mV]$	1,25	1,32	1,45	1,63	2,85	6,38	14,80	25,30	60,42	122,78	245,49	510,28
$U_2[mV]$	1,99	1,99	2,02	2,08	2,33	3,61	6,34	12,23	30,25	60,24	119,38	276,90
$U_3[mV]$	11,65	11,66	11,67	11,68	11,69	11,73	11,85	12,36	15,33	22,36	35,67	57,65
$U_4[mV]$	3,02	4,25	8,72	16,85	33,40	82,36	159,20	285,50	2701,00			
$U_5[mV]$	0,74	0,76	0,78	0,77	0,78	0,75	0,76	0,77	0,78	0,71	0,75	0,74
$G_{C1}$	0,0004	0,0004	0,0005	0,0005	0,0010	0,0021	0,0049	0,0084	0,0201	0,0409	0,0818	0,1701
$G_{C2}$	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007	0,0008	0,0012	0,0021	0,0041	0,0101	0,0201	0,0398	0,0923
$G_{C3}$	0,0039	0,0039	0,0039	0,0039	0,0039	0,0039	0,0040	0,0041	0,0051	0,0075	0,0119	0,0192
$G_{C4}$	0,0010	0,0014	0,0029	0,0056	0,0111	0,0275	0,0531	0,0952	0,9003			
$G_{C5}$	0,0002	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0002	0,0003	0,0002
$CMR_1[dB]$	107,6	107,1	106,3	105,3	100,4	93,4	86,1	81,5	73,9	67,8	61,7	55,4
$CMR_2[dB]$	103,6	103,6	103,4	103,2	102,2	98,4	93,5	87,8	79,9	73,9	68,0	60,7
$CMR_3[dB]$	88,2	88,2	88,2	88,2	88,2	88,2	88,1	87,7	85,8	82,6	78,5	74,3
$CMR_4[dB]$	99,9	97,0	90,7	85,0	79,1	71,2	65,5	60,4	40,9			
$CMR_5[dB]$	112,2	111,9	111,7	111,8	111,7	112,0	111,9	111,8	111,7	112,5	112,0	112,2

$f$  – frekvence vstupního sinusového signálu

$U_{IN}$  - amplituda vstupního napětí pro všechny frekvence 3 V<sub>rms</sub>

$U_1$  – naměřené napětí na výstupu zesilovače P-3500

$U_2$  – naměřené napětí na výstupu zesilovače AD524

$U_3$  – naměřené napětí na výstupu zesilovače TL072

$U_4$  – naměřené napětí na výstupu zesilovače LT1101 + AD210

$U_5$  – naměřené napětí na výstupu zesilovače LTC1043+OP27

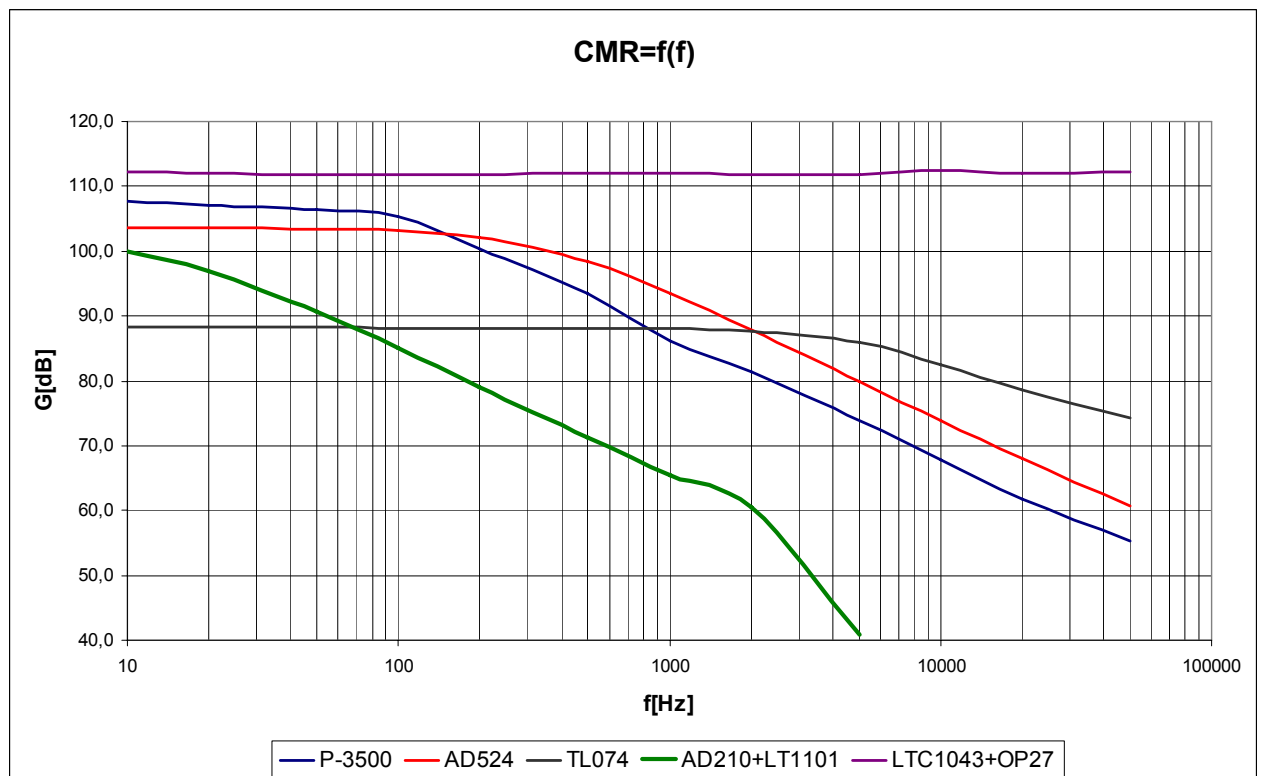
$G_{C1-5}$  – vypočtené souhlasné zesílení jednotlivých zesilovačů  $G_{C1} = U_1/U_{IN}$

$CMR_1, CMR_2, CMR_3, CMR_4, CMR_5$  – činitele potlačení souhlasného napětí

v dB  $CMR_1 = 20 \log G_D / G_{C1}$ , kde  $G_D$  je rozdílové zesílení zesilovače  $G_D = 100$

Příklad výpočtu CMR pro frekvenci 10Hz a zesilovač P-3500:

$$CMR_1 = 20 \log \left( \frac{G_D}{G_{CI}} \right) = 20 \log \left( \frac{100}{0.0004} \right) = 107.6 dB$$



**Obrázek 5-14: CMR v závislosti na kmitočtu**

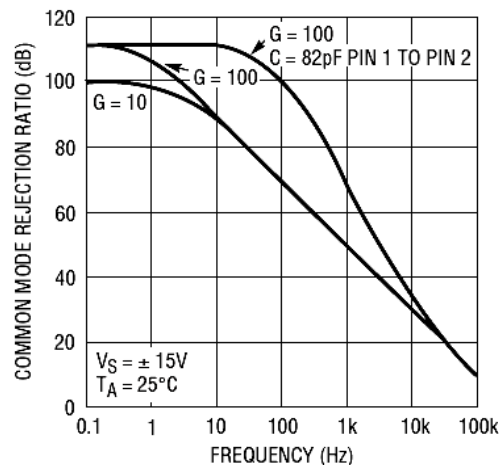
Zhodnocení naměřených výsledků:

Nejvyšší činitel potlačení souhlasného napětí byl naměřen pro přístrojový zesilovač založený na přepínání kapacity jeho hodnota se pohybuje pro všechny měřené frekvence souhlasného napětí kolem 113 dB. Vysokých hodnot CMR se ale pro vyšší frekvence se nedá využít, jelikož zesilovač má velmi malou šířku pásma 49 Hz.

Pro zesilovač P-3500 byla změřena hodnota CMR 106 dB při 60 Hz. Výrobce udává minimální hodnotu 90 dB. Od 70 Hz dochází pak ke klesání činitele potlačení souhlasného napětí viz. obrázek 5-14.

Hodnota CMR 103 dB při 60 Hz byla zjištěna pro přístrojový zesilovač AD524, tato hodnota vyhovuje hodnotě v katalogu, kde se udává minimálně 100 dB. K výraznějšímu poklesu dochází až pro vstupní frekvence signálů nad 200 Hz.

Pro oddělovací zesilovač složený z obvodů LT1101 a AD210 vychází činitel potlačení souhlasného napětí při 60 Hz 90 dB. V katalogu se uvádí minimální hodnota 96 dB, ale pro stejnosměrné signály. Tento obvod byl měřen až od 10 Hz, kde byla naměřena hodnota 100 dB, takže se dá předpokládat, že obvod v katalogu udávané parametry splňuje. CMR klesá už od frekvence 10 Hz což odpovídá charakteristice udávané v katalogu, jak je vidět na obrázku 6-15.



**Obrázek 5-15: Závislost CMRR na frekvenci pro LT1101 [8]**

Nejhorší hodnoty potlačení souhlasného napětí bylo dosaženo zesilovačem s TL074 pro 60 Hz byla změřena hodnota pouze 88 dB. Ovšem k poklesu dochází až na kmitočtu 4 kHz, na této frekvenci mají již ostatní zesilovače horší činitel potlačení souhlasného napětí. Tohoto zesilovače by se dalo využít při zpracování signálů o vyšších frekvencích např. měření vibrační tenzometry.

## 5.7 SROVNÁNÍ MĚŘENÝCH ZESILOVAČŮ

V následující tabulce jsou zesilovače porovnány podle činitele potlačení souhlasného napětí (CMR), dále podle celkové chyby zesilovače, změny zesílení s teplotou, změny offsetu s teplotou, A/D převodníku, mezního kmitočtu a ceny

součástek, které jsou potřeba na výrobu přístrojového zesilovače včetně plošného spoje. Pro zesilovač Vishay P-3500 je brána průměrná cena toho zesilovače na trhu.

**Tabulka 5-16: Srovnání zesilovačů**

Zesilovač:	Vishay P-3500	AD524	AD210+LT1101	LTC1043+OP27	TL074
CMR:	106 dB	103 dB	90 dB	113 dB	88 dB
Celková chyba:	-1830 ppm	-462 ppm	11323 ppm	431 ppm	2070 ppm
A/D převodník:	10 bitů	12 bitů	7 bitů	12 bitů	9 bitů
Drift zesílení:	50 ppm/°C	26 ppm/°C	-398 ppm/°C	-2 ppm/°C	23 ppm/°C
Drift offsetu:	100 μV/°C	80 μV/°C	950 μV/°C	48 μV/°C	475 μV/°C
Mezní kmitočet:	4 kHz	120 kHz	2 kHz	49 Hz	30 kHz
Cena:	20000 Kč	300 Kč	1000 Kč	280 Kč	60 Kč

Parametr CMR byl měřen pro 60 Hz, celková chyba zesilovače je uvedena pro 25 °C, změna zesílení a offsetu s teplotou viz. tabulka 5-12, bitová přesnost udává kolik bitů by měl mít minimálně použitý A/D převodník pro digitalizaci výstupního napětí ze zesilovače. Změřený mezní kmitočet je pro pokles zesílení o 3 dB.

Podle srovnání v tabulce 5-16 vycházejí nejlépe dva zesilovače AD524 a LTC1043+OP27, mají přibližně stejný poměr cena výkon. Výhodou zesilovače s obvodem AD524 je, že je schopen měřit do výrazně vyšších frekvencí, naopak zesilovač LTC1043+OP27 má vyšší CMR a nižší změny zesílení a offsetu s teplotou. Pokud nebude potřeba měřit signály o frekvencích vyšších než 50 Hz tak je nejlepší volbou tento zesilovač.

Nelevněji vyšel zesilovač složený ze tří operačních zesilovačů, nevýhodou tohoto zesilovače je ale poměrně nízké CMR 88 dB a velká změna offsetu s teplotou. V důsledku nízkého CMR pak chyba tohoto zesilovače bude narůstat pro mosty napájené vyšším napětím. Uplatnění tohoto zesilovače by mohlo být například při měření střídavých signálů (měření vibrací pomocí tenzometrů) kde se tolik neprojeví chyby offsetu, nebo pokud by byl most napájen střídavým napětím. Ale vzhledem k dnešní ceně přesných přístrojových zesilovačů nemá jeho konstrukce moc smysl.

Pro oddělovací zesilovač (AD210+LT1101) vyšel nejhorší poměr cena výkon, ale výhodou tohoto zesilovače je galvanické oddělení vstupního a výstupního signálu.

## 6. ZÁVĚR

V této práci jsem se zabýval popisem, návrhem a měřením zesilovačů pro tenzometrický most. V první části byly popsány požadavky na zesilovač pro tenzometry, kdy hlavním požadavkem je přesně zesílit rozdílové napětí a souhlasné napětí co nejvíce potlačit. V této části byly podrobně popsány přístrojové zesilovače, které tyto požadavky splňují. Jsou zde porovnány parametry vybraných přístrojových zesilovačů od firem Linear Technology a Analog Devices. Dále jsou v této části popsány způsoby zapojení zesilovačů pro mosty.

Druhá část této práce se zabývá průzkumem trhu, kdy byli hledány nové integrované obvody, které se používají pro zesílení signálů z tenzometrického mostu. Byly vybrány obvody od firem Linear Technology Analog Devices a Texas Instruments. Obvod LTC2418 od Linear Technology je 24-bitový  $\Delta\Sigma$  A/D převodník který má 8 diferenčních vstupů. Hlavní výhodou tohoto obvodu oproti klasickým přístrojovým zesilovačům je, že má velmi malou změnu ofsetu s teplotou - zhruba 100x menší. To platí i pro obvod od Analog Devices AD7730. Další výhodou těchto obvodů je, že mají více vstupů a jeden obvod tak může sloužit pro měření signálů z více senzorů. Oproti přístrojovým zesilovačům mají ale jednu nevýhodu a to, že nejsou vhodné pro měření signálů o vyšších frekvencích. Vzorkovací frekvence AD7730 je maximálně 1200 vzorků za sekundu a pro LTC1418 je to pouze 7.5 vzorků za sekundu. Dále byl popisován obvod XTR112, to je zesilovač, který má výstupu proudovou smyčku 4 - 20 mA přes kterou může být i napájen, pro připojení senzoru a zesilovače stačí tedy pouze dva dráty. Poslední zmíněný obvod v této kapitole je PGA309, což je zesilovač od Texas Instruments s programovatelným zesílením a digitální kalibrací rozsahu, offsetu a teplotních driftů. Tento zesilovač dosahuje podobných parametrů jako přesné přístrojové zesilovače, jeho výhoda oproti PZ je v dlouhodobé stálosti nastavených parametrů a v teplotní kompenzaci nastavovaných parametrů. Naopak nevýhoda tohoto obvodu spočívá ve větší složitosti nastavování parametrů přes sériovou linku.

V další části této práce jsem se zabýval návrhem zesilovače pro tenzometrický most, tak aby vyhovoval parametrům uvedených v zadání této práce.

Byl navržen zesilovač s obvodem od firmy Analog Devices AD524. Pro tento zesilovač byla výpočtem zjištěna chyba pro teploty 25 °C a 60 °C. Pro teplotu 25 °C chyba zesilovače vyšla 3020 ppm (0.3 %) a pro 60 °C 6504 ppm (0.65 %) na těchto chybách se výraznou měrou podílí chyba zesílení, která je maximálně 2500 ppm. Při výpočtech chyby zesilovače byla uvažována maximální hodnota chyby zesílení, měřením pak byla zjištěna daleko nižší chyba. Jako druhý zesilovač byl navržen přístrojový zesilovač složený ze tří operačních zesilovačů TL074. Dále byl zkonstruován oddělovací přístrojový zesilovač a poslední navrženou variantou zesilovače byl přístrojový zesilovač založený na přepínání kapacity.

Poslední část mé diplomové práce se zabývá měřením parametrů navržených zesilovačů a zesilovače Vishay P-3500. Pro tyto zesilovače je měřena převodní charakteristika pro teploty 25 °C a 60 °C. Z rovnice převodních charakteristik jsou pak vypočítány chyby zesílení, offsetu a celková chyba. Pro zesilovač AD524 byla naměřena celková chyba -462 ppm pro teplotu 25 °C a pro 60 °C vyšla 3255 ppm, naměřené chyby jsou nižší než jsem teoreticky spočítal v kapitole 4.1.3, jelikož v teoretických výpočtech byla uvažována maximální chyba zesílení, to je největší chyba, která se u vyrobeného zesilovače může vyskytnout. Ve skutečnosti je ale tato chyba nižší. Měřením byla zjištěna chyba zesílení pouze -220 ppm. Ze změn chyb zesílení a offsetu při různých teplotách pak byla spočítána teplotní změna offsetu a zesílení. Dalším měřením jsem měřil mezní frekvenci navržených zesilovačů a posledním měřeným parametrem bylo měření činitele potlačení souhlasného napětí.

Jak ji bylo řečeno cílem této práce bylo navrhnout zesilovač pro tenzometry do školních laboratoří podobných parametrů jako má stávající zesilovač Vishay P-3500. Pro zesilovač Vishay P-3500 výrobce udává změnu zesílení s teplotou 50 ppm/°C pro navržený zesilovač AD524 byla změřena změna zesílení 26 ppm/°C, změna výstupního offsetu s teplotou pro P-3500 je 100  $\mu V/^\circ C$  a pro navržený zesilovač 80  $\mu V/^\circ C$ . Mezní kmitočet zesilovače P-3500 pro zesílení 100 byl změřen 4 kHz, pro navržený zesilovač 120 kHz. CMR pro zesilovač Vishay a kmitočet 60 Hz vyšel 106 dB a pro navržený zesilovač 103 dB. Navržený zesilovač má tedy zhruba stejné parametry jako zesilovač P-3500. Má pouze nižší činitel potlačení souhlasného napětí o 3 dB.

## 7. LITERATURA

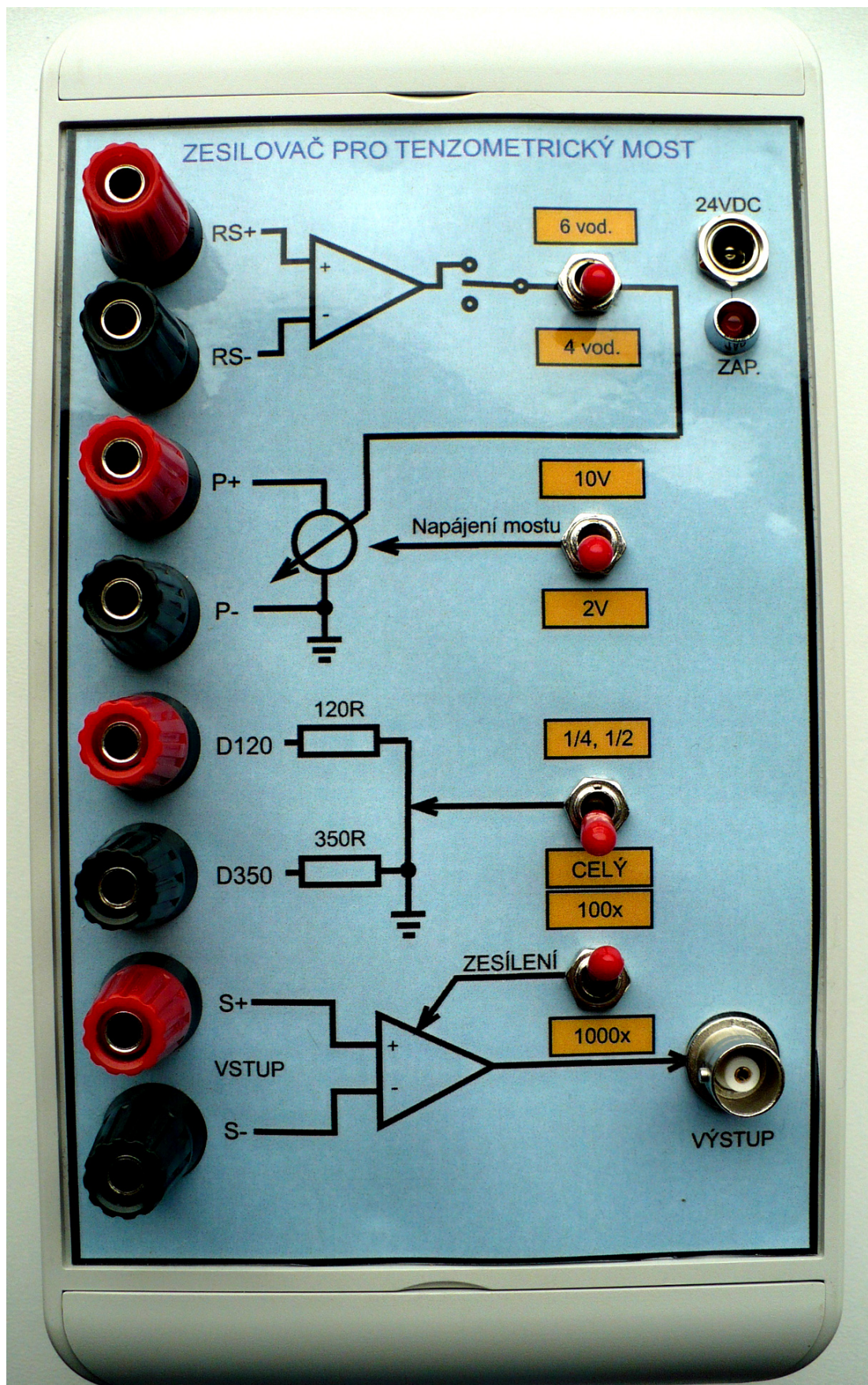
- [1] *AD210JN datasheet*, [online], [citováno 12-9-2007]. Dostupné z: URL<  
[www.datasheetcatalog.com](http://www.datasheetcatalog.com) >
- [2] *AD524 datasheet*, [online], [citováno 12-3-2007]. Dostupné z: URL<  
[www.datasheetcatalog.com](http://www.datasheetcatalog.com) >
- [3] *AD620 datasheet*, [online], [citováno 12-3-2007]. Dostupné z: URL<  
[www.datasheetcatalog.com](http://www.datasheetcatalog.com) >
- [4] *AD7730 datasheet*, [online], [citováno 25-4-2008]. Dostupné z: URL<  
[www.datasheetcatalog.com](http://www.datasheetcatalog.com)>
- [5] *Application Note 43*, [online], [citováno 22-12-2007]. Dostupné z: URL<  
[www.linear.com/pc/downloadDocument.do?id=4134](http://www.linear.com/pc/downloadDocument.do?id=4134) >
- [6] *Bridge circuits*, [online], [citováno 29-12-2007]. Dostupné z: URL<  
[www.analog.com](http://www.analog.com) >
- [7] *Designer's guide to instrumentation amplifiers*, [online], [citováno 18-4-2007].  
Dostupné z: URL< [www.analog.com](http://www.analog.com)>
- [8] *LT1101 datasheet*, [online], [citováno 12-9-2007]. Dostupné z: URL<  
[www.datasheetcatalog.com](http://www.datasheetcatalog.com)>
- [9] *LTC1043 datasheet*, [online], [citováno 1-3-2008]. Dostupné z: URL<  
[www.datasheetcatalog.com](http://www.datasheetcatalog.com)>
- [10] *LTC2418 datasheet*, [online], [citováno 25-4-2008]. Dostupné z: URL<  
[www.datasheetcatalog.com](http://www.datasheetcatalog.com)>
- [11] *MC34063 datasheet*, [online], [citováno 12-3-2007]. Dostupné z: URL<  
[www.datasheetcatalog.com](http://www.datasheetcatalog.com) >
- [12] *OP07 datasheet*, [online], [citováno 12-3-2007]. Dostupné z: URL<  
[www.datasheetcatalog.com](http://www.datasheetcatalog.com) >
- [13] *OP27 datasheet*, [online], [citováno 1-3-2007]. Dostupné z: URL<  
[www.datasheetcatalog.com](http://www.datasheetcatalog.com) >
- [14] *PGA309 datasheet*, [online], [citováno 25-4-2008]. Dostupné z: URL<  
[www.datasheetcatalog.com](http://www.datasheetcatalog.com)>

- [15] *Practical design techniques for sensor signal conditioning*, [online], [citováno 13-4-2007]. Dostupné z: URL< [www.analog.com](http://www.analog.com)>
- [16] *Přístrojový zesilovač*, [online], [citováno 3-1-2008]. Dostupné z: URL< [http://measure.feld.cvut.cz/groups/edu/cmm/PRISTR\\_ZES.pdf](http://measure.feld.cvut.cz/groups/edu/cmm/PRISTR_ZES.pdf) >
- [17] *TL431 datasheet*, [online], [citováno 12-3-2007]. Dostupné z: URL< [www.datasheetcatalog.com](http://www.datasheetcatalog.com) >
- [18] *XTR112 XTR114 datasheet*, [online], [citováno 25-4-2008]. Dostupné z: URL< [www.datasheetcatalog.com](http://www.datasheetcatalog.com)>

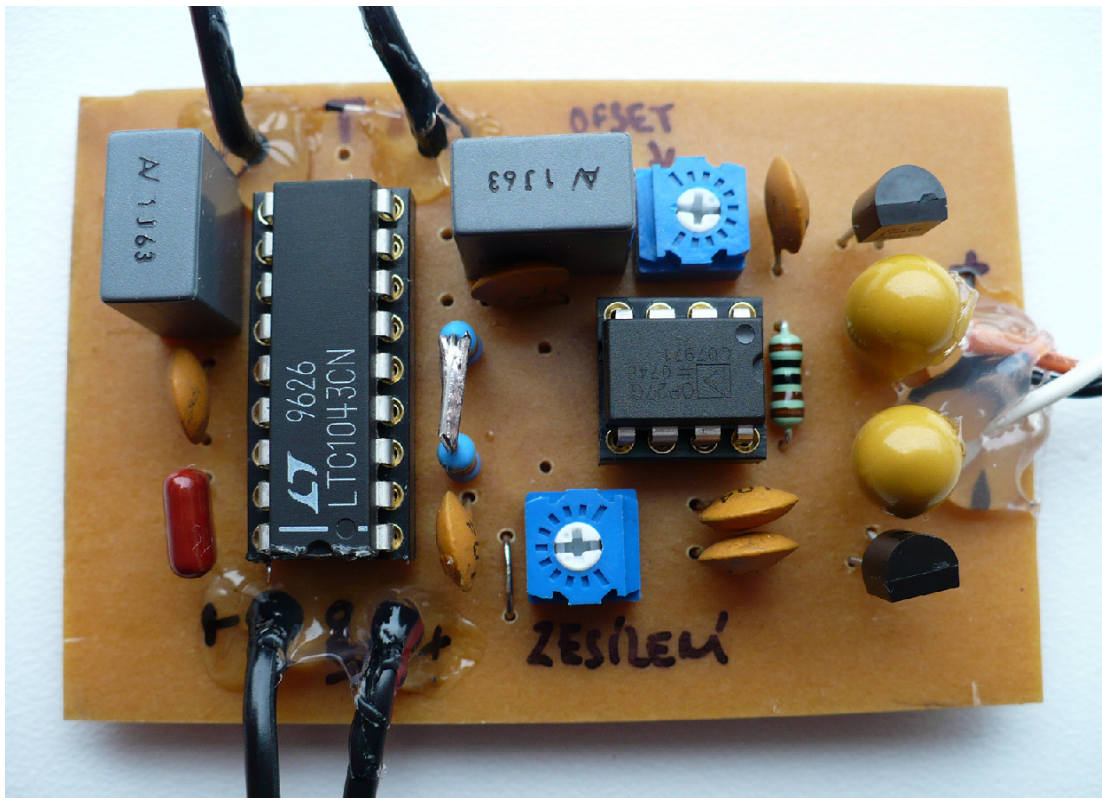
## **SEZNAM PŘÍLOH**

- Příloha 1      Fotografie zesilovače pro tenzometry AD524
- Příloha 2      Fotografie přístrojového zesilovače založeného na přepínání  
kapacity
- Příloha 3      Fotografie oddělovacího přístrojového zesilovače

# Příloha 1



## Příloha 2



## Příloha 3

