

Ústav fyzikální elektroniky PŘF MU

# FYZIKÁLNÍ PRAKTIKUM

Fyzikální praktikum 3

**Zpracoval:** Artem Gorodilov

**Obor:** Astrofyzika

**Skupina:** Po 14:00

**Naměřeno:** 8. dubna 2024

**Testováno:**

## Úloha č. J: Operační zesilovač

### 1. Zadání

1. Určit, jak komparátor reaguje na různá vstupní napětí a jejich rozdíly.
2. Ověřit platnost vzorce (1) pro invertující zesilovač.  
Určit šířku pásma daného zapojení operačního zesilovače.
3. Změřit závislost zesílení na frekvenci a z grafu této závislosti určit šířku pásma dolnofrekvenčního zesilovače.
4. Ověřit platnost vzorce (3) pro neinvertující zesilovač.
5. Ověřit platnost vzorce (4) pro rozdílový zesilovač.
6. Zjistit, který ze zesilovačů znázorněných na obrázku (7) plní funkci derivačního zesilovače.

### 2. Teorie

#### 2.1. Operační zesilovač

Operační zesilovač je běžně používaný elektronický prvek. Jeho hlavní funkcí je zesílení rozdílu napětí mezi vstupy, čímž dokáže vyprodukovat napětí mnohonásobně vyšší než je tento rozdíl. Skutečné operační zesilovače mohou poskytovat zesílení od míň než 1000 až po více než milion. Frekvenční rozsah operačních zesilovačů se pohybuje od několika kHz do stovek MHz. Při vyšších frekvencích dochází ke snížení zesílení a k fázovému posunu mezi vstupem a výstupem, což je důležité pro systémy s vysokou frekvencí a zpětnovazební obvody, kde by zpoždění mohlo vést k nestabilitě systému.

Schéma operačního zesilovače je znázorněno na obrázku (1). Typicky obsahuje dva vstupy (invertující a neinvertující) a jeden výstup. Pokud je napětí na neinvertujícím vstupu vyšší než na invertujícím, je výstupní napětí kladné, a naopak

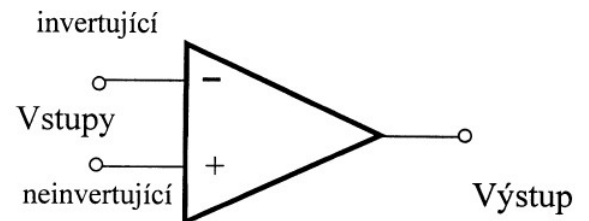


Figure (1) Schematické označení operačního zesilovače.

#### 2.2. Komparátor

Komparátor je speciální typ operačního zesilovače, který porovnává dva vstupy a generuje výstupní signál, který indikuje, který z vstupů je větší. Schema komparátoru je znázorněno na obrázku (2).

Výstup komparátoru je buď v logické 1 nebo logické 0, což závisí na tom, zda je napětí na neinvertujícím vstupu vyšší než na invertujícím.

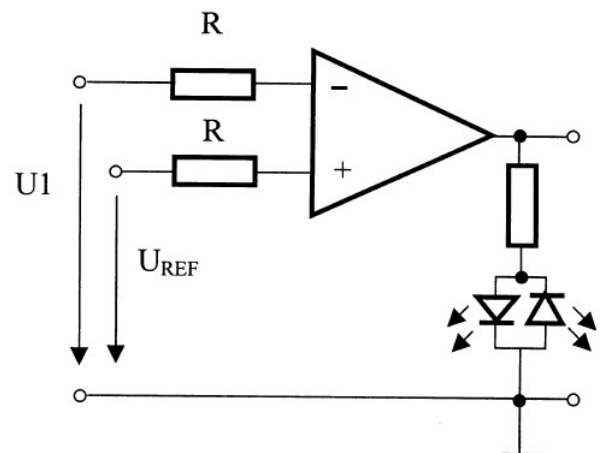


Figure (2) Schematické označení komparátoru.

### 2.3. Zapojení zesilovače s invertujícím vstupem

Zesilovač s invertujícím vstupem je zesilovač, kde je vstupní signál přiveden na invertující vstup operačního zesilovače. Schema daného zapojení je znázorněna na obrázku (3). Výstupní signál je pak zesílený a fázově obrácený oproti vstupnímu signálu.

Vzorec pro zesílení tohoto zapojení je dán vztahem (1):

$$U_0 = -\frac{R_2}{R_1}U_1 \quad (1)$$

kde  $R_1$  a  $R_2$  jsou odpory v obvodu.

Šířka pásma je maximální frekvence, při které je operační zesilovač v daném zapojení pracuje dostatečně dobře.

Tato mez se obvykle udává jako frekvence, při které zesílení klesne o 3 dB ve srovnání se ziskem nízkofrekvenčních signálů  $A_{u_{max}}$  teoreticky popsána rovnicí (1). Pokles o 3 dB odpovídá snížení zesílení na  $A_{u_{max}}/\sqrt{2}$ .

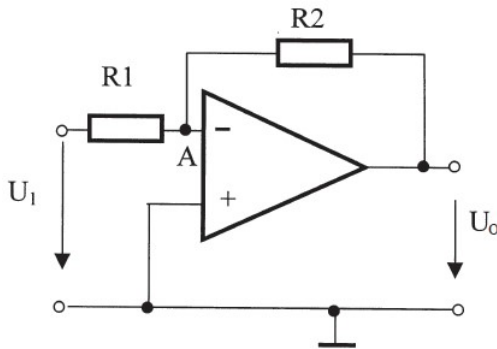


Figure (3) Zapojení zesilovače s invertujícím vstupem.

### 2.4. Dolnofrekvenční propust

Dolnofrekvenční propust je obvod, který propouští signály s frekvencí nižší než je určitá mez. Schema daného zapojení je znázorněna na obrázku (4).

Vzorec pro zesílení tohoto zapojení je dán vztahem (2):

$$A_u = -\frac{R_F}{R_A} \frac{1}{1 + i\omega C_F R_F} \quad (2)$$

kde  $R_F$  a  $R_A$  jsou odpory v obvodu a  $C_F$  je kapacita kondenzátoru.

### 2.5. Zapojení zesilovače s neinvertujícím vstupem

Zesilovač s neinvertujícím vstupem je zesilovač, kde je vstupní signál přiveden na neinvertující vstup operačního zesilovače. Schema daného zapojení je znázorněna na obrázku (5).

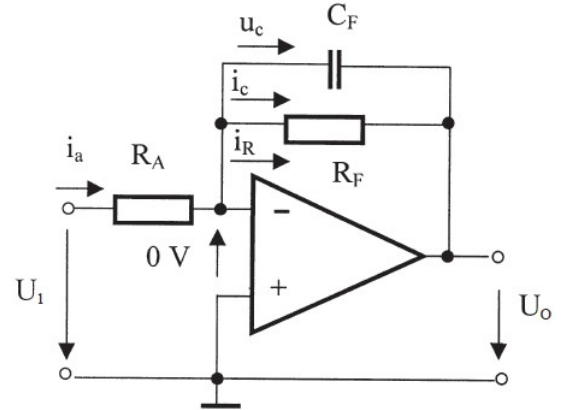


Figure (4) Zapojení dolnofrekvenční propusti.

Vzorec pro zesílení tohoto zapojení je dán vztahem (3):

$$U_0 = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) U_1 \quad (3)$$

kde  $R_1$  a  $R_2$  jsou odpory v obvodu.

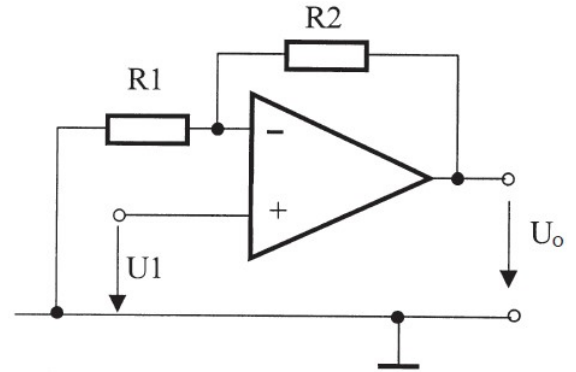


Figure (5) Zapojení zesilovače s neinvertujícím vstupem.

### 2.6. Rozdílový zesilovač

Rozdílový zesilovač je obvod, který zesiluje rozdíl mezi dvěma vstupy. Schema daného zapojení je znázorněna na obrázku (6).

Vzorec pro zesílení tohoto zapojení je dán vztahem (4):

$$U_0 = U_2 \frac{R_4(R_1 + R_2)}{R_1(R_3 + R_4)} - U_1 \frac{R_2}{R_1} = 2(U_2 - U_1) \quad (4)$$

kde  $R_1$  a  $R_2$  jsou odpory v obvodu.  $R_1 = R_3 = 10 \Omega$  a  $R_2 = R_4 = 20 \Omega$ .

### 2.7. Derivátor

Derivátor je obvod, který zpracovává vstupní signál tak, že výstupní signál je derivací vstupního signálu. Varianty derivátoru jsou znázorněny na obrázku (7).

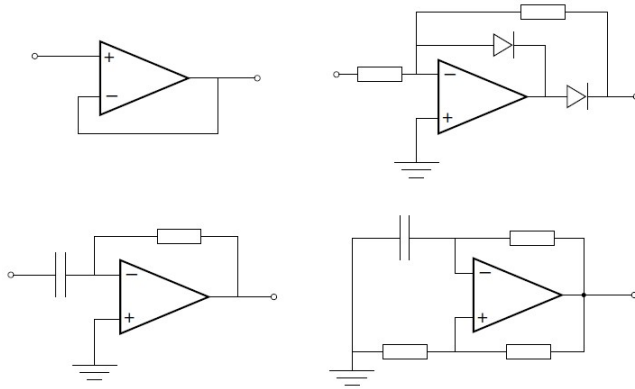


Figure (6) Zapojení derivátoru.

### 3. Měření

#### 3.1. Komparátor

Pokud je napětí na neinvertujícím vstupu vyšší než na invertujícím, jeden z diod je zapojen v opačném směru a neprotéká jím proud. Druhý diod je zapojen ve směru proudu a svítí. Když se napětí změní tak, že na invertujícím vstupu je vyšší, směr proudu v diodách se obrátí a svítí nyní druhý diod.

#### 3.2. Zesilovač s invertujícím vstupem

Pro ověření platnosti vzorce (1) jsme změřili závislost vstupního napětí  $U_0$  na výstupním napětí  $U_1$ . Poté jsme provedli lineární fitování, abychom určili faktor úměrnosti  $\frac{R_2}{R_1}$ . Výsledky jsou znázorněny v grafu (7). Při měření jsme použili odpory  $R_1 = 10 \Omega$  a  $R_2 = 20 \Omega$ . To znamená, že  $\frac{R_2}{R_1} = -2$ . Z fitování byla získána následující hodnota:

$$\frac{R_2}{R_1} = -2.034 \pm 0.003$$

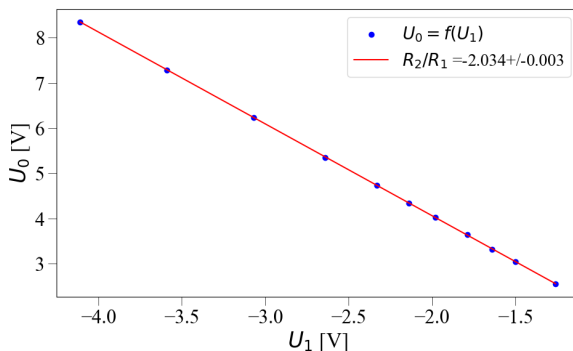


Figure (7) Závislost  $U_0 = f(U_1)$  pro zesilovač s invertujícím vstupem.

Pro určení šířky pásma jsme změřili závislost zesílení na frekvenci. Výsledky jsou znázorněny v grafu (8). Z měření jsme získali maximální hodnotu zesílení  $A_{u_{max}}/\sqrt{2} = 3.04$ . Po vynesení dat do grafu (frekvenci jsme také zlogaritmovali) jsme provedli polynomicickou aproximaci a poté jsme našli průsečík  $A_{u_{max}}/\sqrt{2}$  na ose Y s fitovací křivkou, abychom určili optimální frekvenci  $\omega$  na ose X. Získali jsme následující hodnotu  $\omega$ :

$$\omega = 39609 \text{ Hz}$$

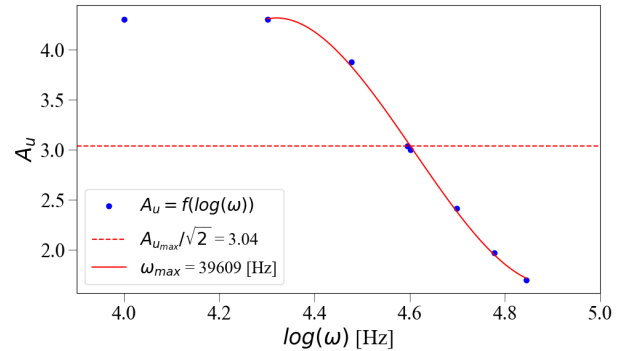


Figure (8) Závislost  $A_u = f(\omega)$  pro zesilovač s invertujícím vstupem.

#### 3.3. Dolnofrekvenční propust

Pro určení šířky pásma dolnofrekvenční propusti jsme změřili závislost zesílení na frekvenci. Výsledky jsou znázorněny v grafu (9). Z měření jsme získali maximální hodnotu zesílení  $A_{u_{max}}/\sqrt{2} = 7.66$ . Po vynesení dat do grafu (frekvenci jsme také zlogaritmovali) jsme provedli polynomicickou aproximaci a poté jsme našli průsečík  $A_{u_{max}}/\sqrt{2}$  na ose Y s fitovací křivkou, abychom určili optimální frekvenci  $\omega$  na ose X. Získali jsme následující hodnotu  $\omega$ :

$$\omega = 158 \text{ Hz}$$

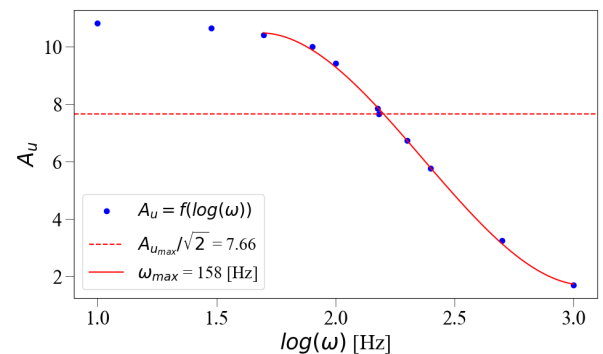


Figure (9) Závislost  $A_u = f(\omega)$  pro dolnofrekvenční propust.

### 3.4. Zesilovač s neinvertujícím vstupem

Pro ověření platnosti vzorce (3) jsme změřili závislost vstupního napětí  $U_0$  na výstupním napětí  $U_1$ . Poté jsme provedli lineární fitování, abychom určili faktor úměrnosti  $\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$ . Výsledky jsou znázorněny v grafu (10). Při měření jsme použili dvě kombinační odpory  $R_{1,1} = 10 \Omega$ ,  $R_{2,1} = 20 \Omega$  a  $R_{1,2} = 20 \Omega$ ,  $R_{2,2} = 10 \Omega$ . To znamená, že  $\left(1 + \frac{R_{2,1}}{R_{1,1}}\right) = 3$  a  $\left(1 + \frac{R_{2,2}}{R_{1,2}}\right) = 1.5$ . Z fitování byly získány následující hodnoty:

$$\left(1 + \frac{R_{2,1}}{R_{1,1}}\right) = 2.98 \pm 0.03$$

$$\left(1 + \frac{R_{2,2}}{R_{1,2}}\right) = 1.500 \pm 0.001$$

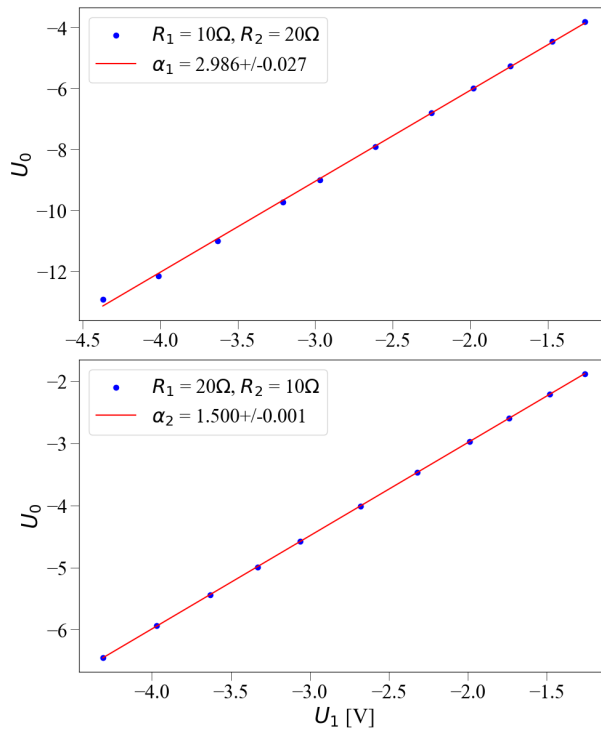


Figure (10) Závislost  $U_0 = f(U_1)$  pro zesilovač s neinvertujícím vstupem pro dvě kombinace odporů.

### 3.5. Rozdílový zesilovač

Pro ověření platnosti vzorce (4) jsme změřili závislost vstupního napětí  $U_0$  na rozdílu vstupních napětí  $(U_2 - U_1)$ .

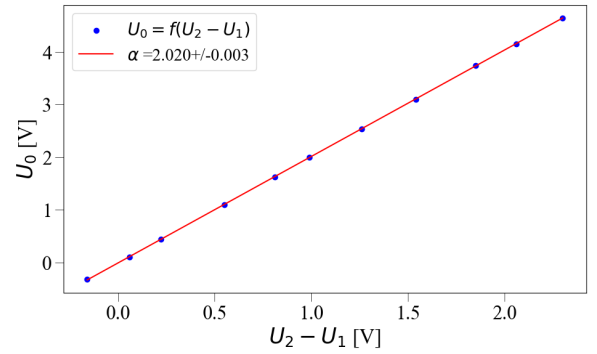


Figure (11) Závislost  $U_0 = f(U_2 - U_1)$  pro rozdílový zesilovač.

Poté jsme provedli lineární fitování, abychom určili faktor úměrnosti 2. Výsledky jsou znázorněny v grafu (11). Z fitování byla získána následující hodnota:

$$\alpha = 2.020 \pm 0.003$$

### 3.6. Derivační zesilovač

Abychom určili, který obvod zesilovače představuje derivátor, provedli jsme pozorování pomocí osciloskopu. Za tímto účelem jsme vyndali vstupní a výstupní signál, překryli je na sebe a zjistili, že když je vstupní signál sinusový, výstupní signál je kosinusový. Tím jsme zjistili, že obvod zesilovače znázorněný na obrázku (12) funguje jako derivátor.

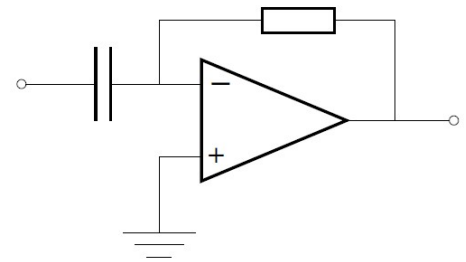


Figure (12) Zapojení derivátoru.

Výsledky měření jsou v tabulce (1), (2), (3) a (4).

K výpočtu veličin a jejich nejistot byla použita knihovna Uncertainties pro Python [1]. Chyby byly rozšířeny o Studentův koeficient (2-Tail Confidence Level) s ohledem na stupně volnosti pro každou hodnotu, pro interval spolehlivosti 68.27%.

## 4. Závěr

Bylo ověřeno, že komparátor reaguje na různá vstupní napětí a jejich rozdíly.

Byla ověřena platnost vzorce (1) pro invertující zesilovač. Ziskový faktor úměrnosti  $\frac{R_2}{R_1} = -2.034 \pm 0.003$  byl v souladu s teoretickou hodnotou  $\frac{R_2}{R_1} = -2$ . Byla určena šířka pásma daného zapojení operačního zesilovače a získána hodnota  $\omega = 39609$  Hz.

Byla změřena závislost zesílení na frekvenci a z grafu této závislosti byla určena šířka pásma dolnofrekvenčního zesilovače a získána hodnota  $\omega = 158$  Hz.

Byla ověřena platnost vzorce (3) pro neinvertující zesilovač a získány faktory úměrnosti  $\left(1 + \frac{R_{2,1}}{R_{1,1}}\right) = 2.98 \pm 0.03$  a  $\left(1 + \frac{R_{2,2}}{R_{1,2}}\right) = 1.500 \pm 0.001$ , které byly v souladu s teoretickými hodnotami  $\left(1 + \frac{R_{2,1}}{R_{1,1}}\right) = 3$  a  $\left(1 + \frac{R_{2,2}}{R_{1,2}}\right) = 1.5$ .

Byla ověřena platnost vzorce (4) pro rozdílový zesilovač a získán faktor úměrnosti  $\alpha = 2.020 \pm 0.003$ , který byl v souladu s teoretickou hodnotou  $\alpha = 2$ .

Bylo zjištěno, že obvod zesilovače znázorněný na obrázku (12) plní funkci derivačního zesilovače.

## Odkazy

[1] Uncertainties, Dostupné online: <https://pypi.org/project/uncertainties>

## 5. Appendix

### 5.1. Tabulka naměřených hodnot pro zesilovač s invertujícím vstupem

$\log(\omega)$	$A_u$	$U_0[V]$	$U_1$
1.0	4.3	2.55	-1.26
2.0	4.3	3.04	-1.5
3.0	4.3	3.32	-1.64
4.0	4.3	3.64	-1.79
4.3	4.3	4.03	-1.98
4.48	3.88	4.34	-2.14
4.6	3.04	4.74	-2.33
4.6	3.0	5.35	-2.64
4.7	2.42	6.24	-3.07
4.78	1.98	7.29	-3.59
4.85	1.7	8.35	-4.11

### 5.2. Tabulka naměřených hodnot pro dolnofrekvenční propust

$\log(\omega)$	$U_0[V]$
1.0	10.83
1.48	10.66
1.7	10.41
1.9	10.0
2.0	9.42
2.18	7.87
2.18	7.66
2.3	6.73
2.4	5.77
2.7	3.25
3.0	1.7

### 5.3. Tabulka naměřených hodnot pro zesilovač s neinvertujícím vstupem

$U_{1,1}[V]$	$U_{0,1}[V]$	$U_{1,2}[V]$	$U_{0,2}[V]$
-1.26	-3.81	-1.26	-1.88
-1.47	-4.46	-1.48	-2.21
-1.74	-5.27	-1.74	-2.6
-1.98	-5.99	-1.99	-2.97
-2.25	-6.81	-2.32	-3.47
-2.61	-7.92	-2.68	-4.01
-2.97	-9.0	-3.06	-4.58
-3.21	-9.74	-3.33	-4.99
-3.63	-11.01	-3.63	-5.44
-4.01	-12.16	-3.97	-5.94
-4.37	-12.93	-4.31	-6.45

### 5.4. Tabulka naměřených hodnot pro rozdílový zesilovač

$U_0[V]$	$U_1[V]$	$U_2[V]$	$(U_2 - U_1)[V]$
4.64	-3.56	-1.26	2.3
4.15	-3.56	-1.5	2.06
3.74	-3.56	-1.71	1.85
3.1	-3.56	-2.02	1.54
2.54	-3.56	-2.3	1.26
2.0	-3.56	-2.57	0.99
1.62	-3.56	-2.75	0.81
1.1	-3.56	-3.01	0.55
0.44	-3.56	-3.34	0.22
0.11	-3.56	-3.5	0.06
-0.32	-3.56	-3.72	-0.16