

FYZIKÁLNÍ PRAKTIKUM

Fyzikální praktikum 3

Zpracoval: Teodor Duraković

Naměřeno: 22. dubna 2025

Obor: F

Skupina: Út 14:00

Testováno:

Úloha č. 11: Operační zesilovač

1. Zadání

- Sledujte počet zaznamenaných α -částic pro dostatečný počet různých poloh zlaté fólie. Ověřte vztah pro Rutherfordův rozptyl.
- Ověřte, zda počty zaznamenaných α -částic mají Poissonovo rozdělení.

2. Teorie

Operační zesilovač je základní stavební prvek analogové elektroniky, který se vyskytuje v celé řadě zapojení – od jednoduchých zesilovačů až po aktivní filtry nebo matematické operátory (např. derivátory, integrátory). Základem je diferenční zesilovač, který zesiluje rozdíl napětí mezi dvěma vstupy – invertujícím (–) a neinvertujícím (+).

Ideální operační zesilovač se vyznačuje následujícími vlastnostmi:

- nekonečné napěťové zesílení $A \rightarrow \infty$,
- nekonečný vstupní odpor $R_{in} \rightarrow \infty$ (zanedbatelný vstupní proud),
- nulový výstupní odpor $R_{out} = 0$,
- nekonečná šířka pásma – zesiluje všechny frekvence stejně.

Ve skutečnosti jsou tyto parametry konečné, nicméně dostatečně velké na to, aby v jistých případech umožnily idealizovaný přístup.

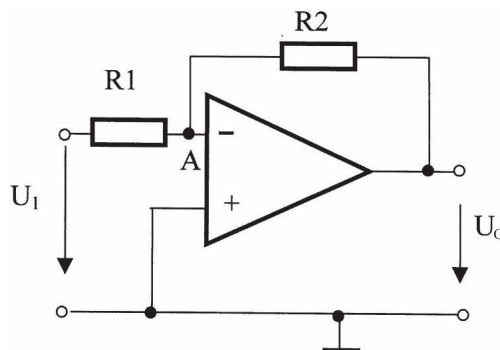
2.1. Invertující zesilovač

V základním zapojení s invertujícím vstupem (obr. 1) je vstupní napětí přivedeno přes odpor R_1 na invertující vstup, zatímco neinvertující vstup je

uzemněn. Výstup je připojen zpětnovazebním odporem R_2 zpět na invertující vstup. Výstupní napětí je pak dáno vztahem:

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

Výstupní napětí je inverzní vůči vstupnímu, což je způsobeno právě zapojením na invertující vstup.



Obrázek 1: Zapojení invertujícího zesilovače

2.2. Neinvertující zesilovač

U neinvertujícího zesilovače (obr. 2) je vstupní napětí přivedeno na neinvertující vstup. Invertující vstup je připojen ke zpětnovazební děličové síti tvořené rezistory R_1 a R_2 (viz obr. 6 v zadání). Díky vysokému zesílení a záporné zpětné vazbě platí:

$$U_- = U_+ = U_1. \quad (2)$$

Důsledkem děliče napětí platí:

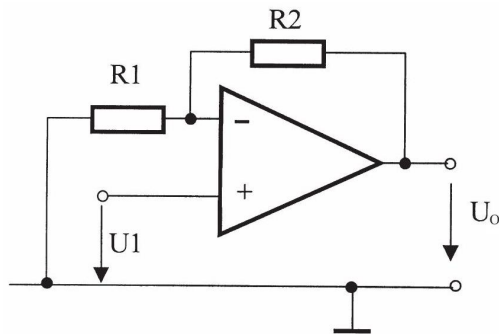
$$U_- = \frac{R_1}{R_1 + R_2}U_O. \quad (3)$$

Po dosazení a úpravě dostáváme:

$$U_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_O, \quad (4)$$

$$U_O = U_1 \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right). \quad (5)$$

Zesílení neinvertujícího zapojení tedy musí být vždy větší než jedna.



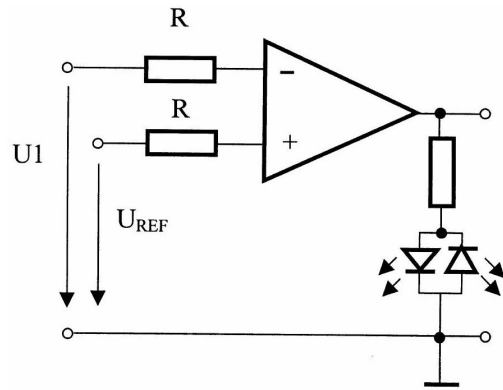
Obrázek 2: Zapojení neinvertujícího zesilovače

2.3. Komparátor

Jedním z nejjednodušších využití operačního zesilovače je tzv. komparátor – zapojení bez zpětné vazby (obr. 3), které srovnává (komparuje) dvě napětí. Výstupní napětí pak nabývá hodnoty blízké napájecímu napětí (kladnému nebo zápornému), v závislosti na tom, které ze vstupních napětí je větší.

$$U_O \approx \begin{cases} +U_{\text{sat}}, & \text{pokud } U_+ > U_-, \\ -U_{\text{sat}}, & \text{pokud } U_+ < U_-, \end{cases} \quad (6)$$

kde U_{sat} je mezní (saturační) hodnota výstupního napětí, obvykle blízká napájecímu napětí OŽ. Vzhledem k absenci zpětné vazby se operační zesilovač nechová lineárně, ale jako nelineární prvek, který rozhoduje pouze o znaménku rozdílu vstupních napětí.



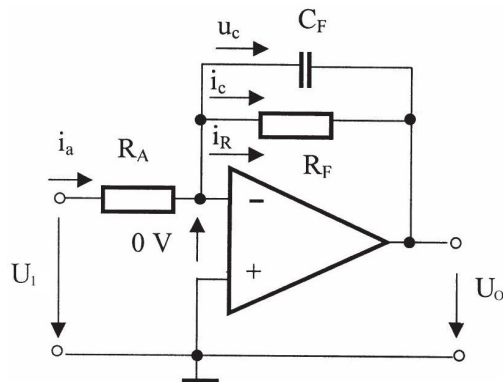
Obrázek 3: Zapojení komparátoru

2.4. Dolnofrekvenční propust

Přidáním kondenzátoru do zpětnovazební větve invertujícího zesilovače vznikne dolnofrekvenční filtr (obr. 4). Komplexní zesílení tohoto zapojení je dáno vztahem:

$$A_u(\omega) = -\frac{R_F}{R_A} \cdot \frac{1}{1 + i\omega C_F R_F}, \quad (7)$$

kde C_F je zpětnovazební kondenzátor. Tento filtr propouští signály s nízkou frekvencí a potlačuje vysokofrekvenční složky.



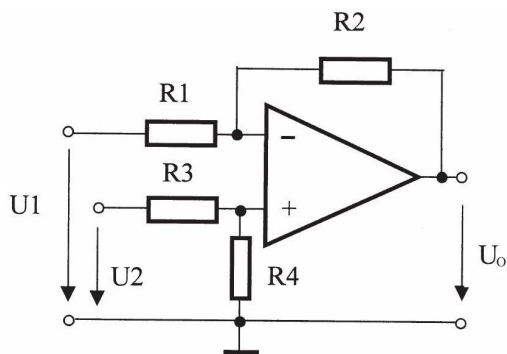
Obrázek 4: Zapojení operačního zesilovače pro získání dolnofrekvenční propusti

2.5. Rozdílový zesilovač

Rozdílový zesilovač (obr. 5) zesiluje rozdíl obou vstupních napětí. Formule

$$U_O = 2(U_2 - U_1), \quad (8)$$

platí při zvolených odporech: $R_1 = R_3 = 10 \text{ k}\Omega$ a $R_2 = R_4 = 20 \text{ k}\Omega$.



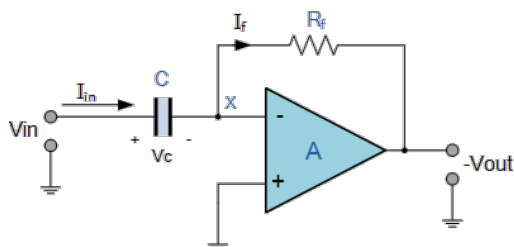
Obrázek 5: Zapojení rozdílového zesilovače

2.6. Derivátor

Pokud je vstupní signál přiveden na kondenzátor a zpětná vazba je tvořena rezistorem, výstupní napětí odpovídá derivaci vstupního signálu:

$$U_O(t) = -RC \frac{dU_{in}(t)}{dt}. \quad (9)$$

Zesilovač v tomto zapojení (obr.) plní funkci derivátoru.



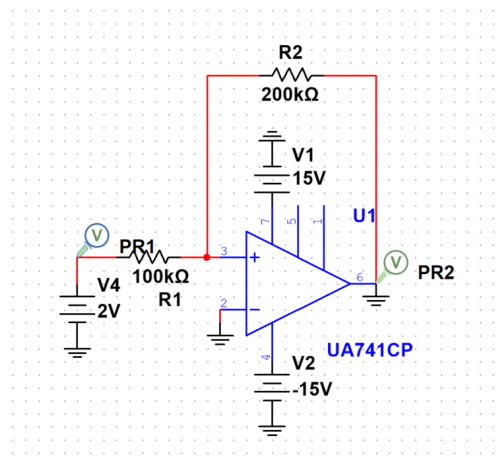
Obrázek 6: Zapojení derivátoru

3. Měření

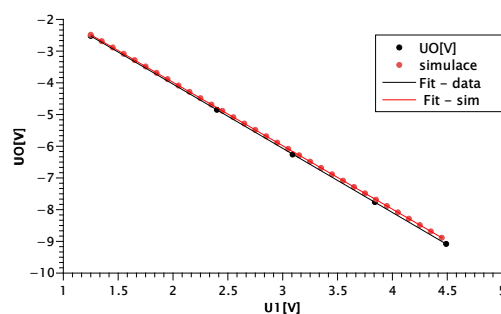
3.1. Měření se stejnosměrným proudem

3.1.1. Invertující zesilovač

Zapojujeme odpory $R1 = 10\text{ k}\Omega$, $R2 = 20\text{ k}\Omega$, dle formule (1) očekáváme tedy zesílení o velikosti $A = -2$. Kromě experimentálně získaných dat simulujeme i zapojení v programu NI Multisim (obr.7), kde zapojujeme stejný typ operačního zesilovače (TI UA741CP) a očekáváme tedy velmi podobné výsledky. Skutečně pro závislosti vstupního a výstupního napětí získáváme velmi malou odchylku, jak lze pozorovat na obr. 8.



Obrázek 7: Zapojení pro simulaci v programu Multisim



Obrázek 8: Experimentální a teoretická závislost vstupního a výstupního napětí

Pro obě metody lineárním fitem získáváme zesílení:

$$A_{exp} = -2.0221 \pm 0.0012 \quad (10)$$

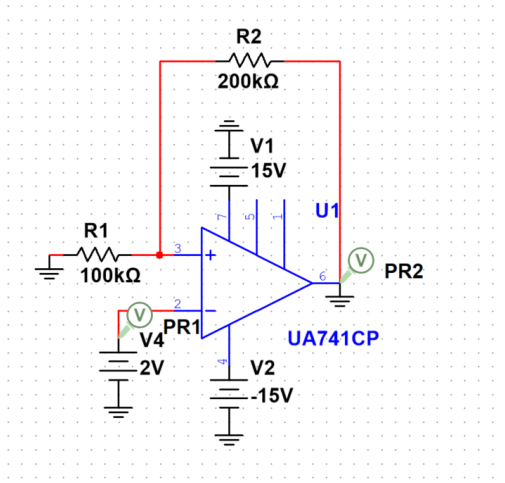
$$A_{sim} = -1.9950 \pm 0.0003 \quad (11)$$

Hodnoty se od předpokládané odchylojí o méně než procento. U simulované hodnoty lze tuto odchylku vysvětlit ofsetovým napětím (datasheet [1] udává max. 7.5 mV). Naopak u experimentální hodnoty může být odchylka kromě ofsetového napětí způsobena odchylkou skutečného odporu od udávaného. Toleranci rezistorů jsme nestudovali, nicméně je velmi pravděpodobné, že se jednalo o rezistory s tolerancí 5 nebo 10 procent. V takovém případě je odchylka v očekávaných mezích - stejný výsledek bychom získali i při jednocentní toleranci odporu.

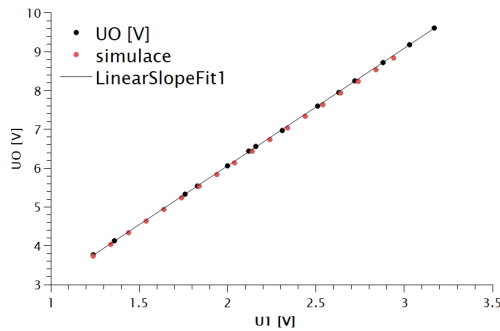
3.1.2. Neinvertující zesilovač

Při zapojení podle obr.2 za hodnoty odporů volíme $R1 = 100\text{ k}\Omega$, $R2 = 200\text{ k}\Omega$. Dle formule (5) tedy předpokládáme hodnotu zesílení $A = 3$. Tento předpoklad je ověřen simulovanými daty (obr. 9) i

praktickým měřením - získáváme v podstatě identické hodnoty, což lze pozorovat na obr. 10.



Obrázek 9: Zapojení pro simulaci v programu Multisim



Obrázek 10: Experimentální a teoretická závislost vstupního a výstupního napětí

Z lineárního fitu získáváme hodnotu směrnice, a tím i zesílení:

$$A = 3.0296 \pm 0.0015 \quad (12)$$

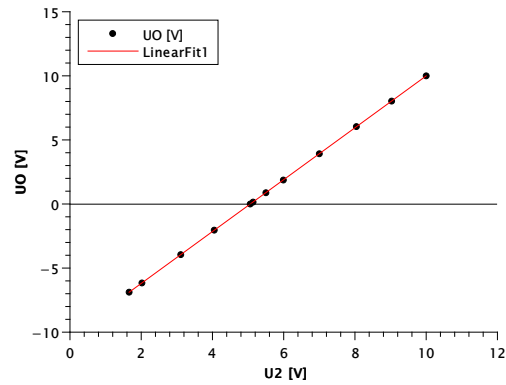
Což se od předpokládaných $A = 3$ odchyluje o méně než procento, Odchylku lze znovu vysvětlit vlastnostmi komponent v obvodu.

3.1.3. Komparátor

V zapojení dle obr. 3 získáváme funkci komparátoru - výstup srovnává invertující a neinvertující vstup. Při větším invertujícím vstupu měříme na výstupu záporné napětí (-11.4 V), při větším neinvertujícím vstupu měříme napětí kladné (12.76 V). Při našem zapojení se v prvním případě rozsvítí červená dioda, v případě druhém dioda zelená - při opačném zapojení komponentu s diodami bychom samozřejmě získali obrácený výsledek.

3.1.4. Rozdílový zesilovač

Zesilovač zapojujeme dle návodu, předpokládáme tedy chování dle formule (8). Napětí U_1 držíme na hodnotě $U_1 = 5.06$ V závislost U_2/U_0 lze sledovat na obr. 11.



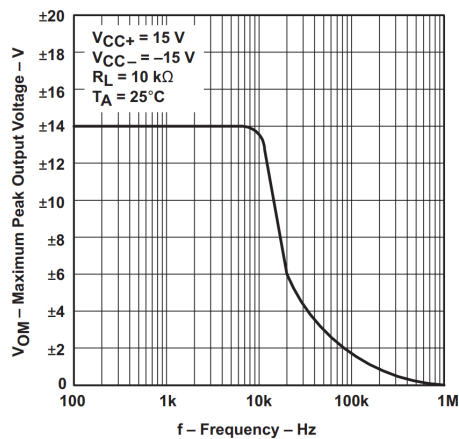
Obrázek 11: Závislost výstupního napětí na na napětí U_2

Z lineárního fitu lze získat hodnotu U_1 a zesílení: $U_1 = 5.123 \pm 0.002$ V, $A = 2.0242 \pm 0.0008$. Jelikož používáme stejné rezistory jako v úloze 3.1.1 a získáváme velmi podobné zesílení, je velmi pravděpodobné, že tato odchylka skutečně pramení z tolerancí rezistorů.

3.2. Měření se střídavým proudem

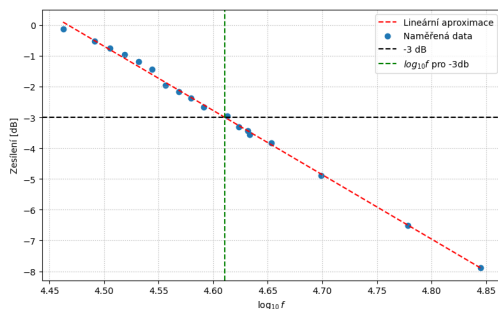
3.2.1. Invertující zesilovač

Při zapojení zesilovače jako invertujícího generujeme sinusoidální signál na U_1 a pozorujeme výstup - U_O . Snažíme se určit šířku pásma - hraničním výstupem je výstup s poklesem o 3dB oproti zesílení nízkofrekvenčních signálů. Pro zesílení toto odpovídá poklesu $A_{u,max}\sqrt{2}$. Odpory volíme tak, aby $A = -2$ (tj 10, 20 kΩ), amplitudu signálu nastavujeme na konstantní $U_1 = 2$ V. Pro prahové zesílení tedy platí $A_{min} = 2/\sqrt{2} = \sqrt{2}$, pro amplitudu výstupu $U_{0,min} = 2\sqrt{2} \approx 2.828$. Pro určení přibližné mezní frekvence lze využít závislost maximálního výstupního napětí na frekvenci z datasheetu (obr. 12) - pozorujeme, že tato hodnota odpovídá frekvenci cca. 52 kHz.



Obrázek 12: Závislost maximálního výstupního napětí na frekvenci podle datasheetu

Jako mez získáváme hodnotu
 $f = 40\,792 \pm 7191 \text{ Hz}$ (obr.13)



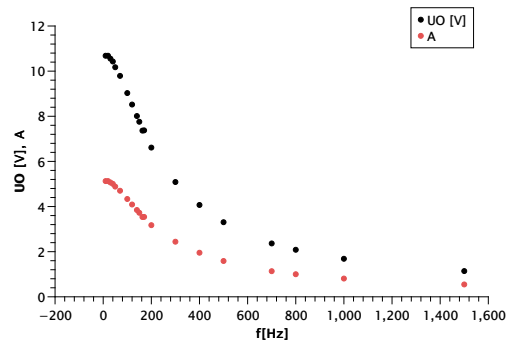
Obrázek 13: Závislost zesílení na $\log_{10} f$

3.2.2. Dolnofrekvenční propust

Po zapojení při hodnotě kondenzátoru $C = 10 \text{ nF}$ a hodnotě odporu $RA = 20 \text{ k}\Omega$ očekáváme pětinašobné zesílení, proto je hraniční napětí pro určení šířky pásma $UO = 7.3645 \text{ V}$. Přesně tuto hodnotu získáváme pro frekvenci $f = 163 \text{ Hz}$. Vývoj napětí a zesílení lze sledovat na obr. 14.

Odkazy

- [1] Texas Instruments. *$\mu A741$ General-Purpose Operational Amplifiers Datasheet*. Rev. G. Document No. SLOS094G. Led. 2018. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ua741.pdf>.



Obrázek 14: Závislost zesílení a výstupního napětí na frekvenci

Zároveň dle očekávání při vyšších frekvencích pozorujeme znatelný fázový rozdíl mezi vstupním a výstupním signálem - pro vyšší frekvence se totiž začínají projevovat vlastnosti kondenzátoru. Při hraničních frekvencí je tento fázový rozdíl zhruba desetistupňový.

3.2.3. Derivátor

Obvod znovu zapojujeme dle instrukcí, generujeme signál o amplitudě $U_{max} = 1 \text{ V}$. Kromě samotné inverze (již musíme očekávat kvůli napětí na invertující větvi) pozorujeme aditivní fázový posuv $\varphi = 90^\circ$ - derivátor totiž ze vstupní funkce - sinu tvoří její derivaci - kosinus. Celkově tedy sledujeme fázový rozdíl $\varphi = -90^\circ$

4. Závěr

Podařilo se nám využít všech uvedených funkcí operačního zesilovače, při všech jsme pozorovali očekávané chování, odchylky od teorie se nám též podařilo vysvětlit.