

# Operační zesilovač

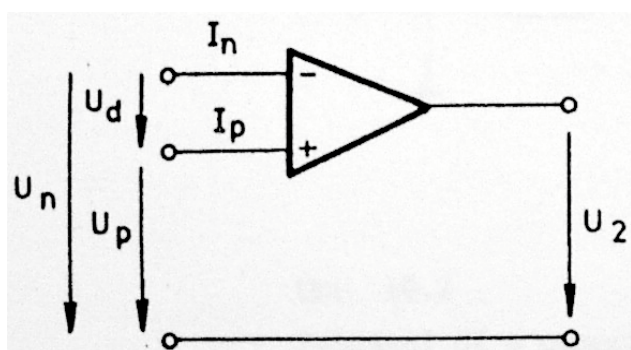
Klíčovou součástí v analogových obvodech je operační zesilovač (dále jen OZ). Pod tímto názvem rozumíme elektronický zesilovač s velkým zesílením, velkým vstupním a malým výstupním odporem a dvěma souměrnými vstupy. Jeden ze vstupů je invertující (= obrací fázi střídavého signálu, nebo obrací znaménko vstupního napětí, druhý vstup je neinvertující. Většina vyráběných OZ má stejnosměrnou vazbu mezi vnitřními zesilovacími stupni. OZ slouží primárně k zesilování stejnosměrných signálů, s určitými omezeními lze jimi zesilovat i signály střídavé. Pro vyšší kmitočty klesá zesílení OZ.

OZ patří mezi součástky nazývané monolitické integrované obvody a vyrábějí se převážně planárně epitaxní technologií. Na čipu (destička vyříznutá z monokrystalu křemíku o rozměrech cca 2 x 2 mm) v OZ je integrováno asi 15 až 30 tranzistorů a cca 20 odporů. OZ vyrábí řada výrobců v různém provedení a jednotlivé typy se liší provedením pouzdra, zapojením vývodů i elektrickými parametry (napájecí napětí, mezní frekvence, zesílení...).

## 1 Teoretická část

V laboratorní úloze se používá OZ z řady MAA 741. Ve schématech kreslíme OZ jako trojúhelník se třemi vývody, viz obr. 1. Pokud se nejedná o zvláštní případ, bývá OZ napájený symetrickým napětím a střed napájení je uzemněn. Vstupní a výstupní signály jsou pak uvažovány proti této zemi. Jednotlivé vývody OZ jsou označovány čísly, totožnými s číslováním vývodů pouzdra. Pro jednoznačnost se ve schématu označuje invertující vstup znaménkem (-) a neinvertující vstup znaménkem (+).

Ve výpočtových vzorcích vystačíme zpravidla s parametry ideálního OZ, jedná se o zavedení zjednodušujících předpokladů. Srovnání některých parametrů ideálního a reálného OZ je v tabulce 1.



- $I_n$  – vstupní proud invertujícího vstupu
- $I_p$  – vstupní proud neinvertujícího vstupu
- $U_n$  – vstupní napětí invertujícího vstupu
- $U_p$  – vstupní napětí neinvertujícího vstupu
- $U_d$  – diferenciální vstupní napětí
- $U_2$  – výstupní napětí

Obr. 1 schématická značka a ustálená symbolika veličin u OZ

Pro OZ platí základní vztah:

$$U_2 = A_u \cdot U_d = A_u \cdot (U_p - U_n).$$

	Symbol	Ideální OZ	reálný OZ (MAA 741)	Jednotka
Napět'ové zesílení	$A_U$	$\infty$	5 až $15 \cdot 10^4$	1
Vstupní odpor	$R_{ISE}$	$\infty$	0,3 až 3	$M\Omega$
Výstupní odpor	$R_O$	0	60	$\Omega$
Vstupní klidový proud	$I_{IB}$	0	80	nA
Napět'ová nesymetrie vstupů	$U_{I0}$	0	1,5	mV
Teplotní součinitel napět'ové nesymetrie vstupů	$\alpha_{UI0}$	0	10	$\mu V/K$
Potlačení součtového signálu	CMR	$\infty$	90	dB

Tab. 1. porovnání ideálního a reálného OZ

### 1.1 Definice některých základních pojmů

**Napět'ové zesílení**  $A_U$  při otevřené smyčce zpětné vazby je zesílení definované pro předepsanou zátěž, napájecí napětí a maximálně přípustný (nezkreslený) vstupní signál, při kompenzované napět'ové nesymetrii vstupů. (je to vlastně zesílení samotného OZ, pro praktické použití velké. V konkrétních aplikacích se zesílení pomocí záporné zpětné vazby, viz dále, nastavuje na požadovanou hodnotu.)

**Napět'ová nesymetrie vstupů**  $U_{I0}$  (napět'ový ofset, vstupní zbytkové napětí) je napětí, které se musí přivést mezi vstupy, aby výstupní napětí bylo nulové. (Některé OZ mají na kompenzaci  $U_{I0}$  zvláštní vstupy.)

**Proudová nesymetrie vstupů**  $I_{I0}$  (proudový ofset, vstupní zbytkový proud) je rozdíl proudů mezi oběma vstupy, aby výstupní napětí bylo nulové.

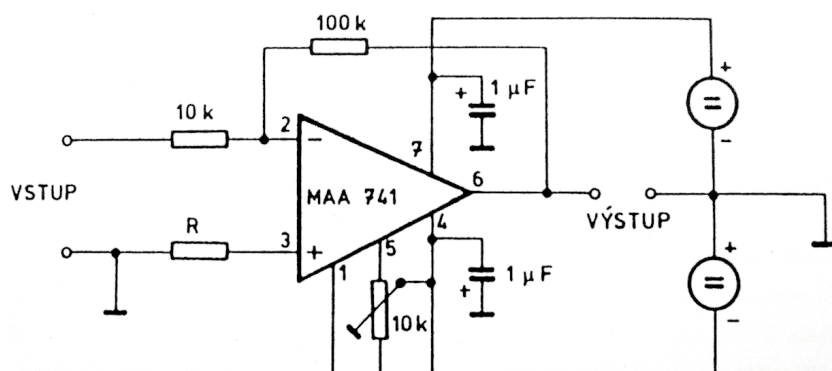
**Průměrný teplotní součinitel napět'ové (proudové) nesymetrie vstupů**  $\alpha_{UI0}$  je poměr změny napět'ové (proudové) nesymetrie vstupů k teplotnímu intervalu, v němž změna nastala. Označuje se také jako teplotní drift napětí (proudu).

**Potlačení součtového (někdy souhlasného) signálu** CMR je definováno jako poměr vstupního napět'ového rozsahu k maximální změně napět'ové nesymetrie, v tomto rozsahu vyjádřené v dB.

### 1.2 Zásady používání OZ typu MAA 741

1. Napájecí napětí  $U_{CC}$  je symetrické, obvykle  $\pm 15$  V (od  $\pm 3$  V do  $\pm 22$  V). Zemnicí svorka je totožná se středem napájecího zdroje, viz obr. 2. V méně náročných aplikacích lze použít i nestabilizované napětí, protože vliv kolísání napájecího napětí je u diferenčních typů zesilovačů potlačen. Vliv kolísání napájecího napětí na napětí výstupní se též nazývá

napájecí drift. Prívody napájecího napětí jsou prostřednictvím kondenzátorů blokovány proti zemi aby se odstranil vliv poruchových jevů v napájení OZ.



Obr. 2 Zapojení OZ s pomocnými obvody v invertujícím zapojení se zesílením 10.

2. Kompenzace vstupní napěťové nesymetrie se provádí potenciometrem 10 k, zapojeným na vstupy k tomu určené, viz obr. 2.
3. Kompenzace vstupní napěťové nesymetrie se potlačuje odporem R, jehož hodnota je dána paralelní kombinací odporů přímé cesty a zpětné vazby. Teplota má nejmenší vliv, jsou-li oba vstupní proudy do OZ stejné, tedy jsou-li vnější odpory mezi vstupy a zemí stejné.
4. Dovolovaný ztrátový výkon tohoto OZ je 500 mW a tím je omezen dovolovaný proud, odebíraný z výstupu OZ. Problému se vyhneme, bude-li výstupní proud menší než 10 mA.
5. OZ má kmitočtovou kompenzaci, která stabilizuje jeho činnost a chrání jej před kmitáním. OZ má taky ochranu vstupu proti napěťovému přetížení do hodnoty napájecího napětí a ochranu proti zkratu na výstupu.
6. Napájecí a pomocné obvody OZ jsou jeho nutnou součástí, ale většinou se do schémat nezakreslují.

### 1.3 Základní zapojení OZ

Operační zesilovač se nazývá podle matematických operací, které může provádět s analogovým signálem. Analogový napěťový signál se pohybuje v rozmezí  $\pm 10$  V, z toho důvodu bývá napájecí napětí  $\pm 15$  V. Násobení signálu konstantou může provádět invertující a neinvertující zesilovač. Sečítání a rozdíl signálů provádějí sumační zesilovač a rozdílový (diferenční) zesilovač. Komparátor řeší matematickou relaci typu podmínka ( $=$ ,  $\neq$ ,  $<$ ,  $>$ ). Integrační a derivační zesilovač může provádět integraci, nebo derivaci analogového signálu. Nelineární členy (exponenciální, logaritmické) mohou provádět násobení, dělení, umocňování signálů tím, že je pomocí logaritmů převádí na jednodušší operace.

Kromě matematických operací může OZ provádět i úpravy a převody elektrických signálů, jako jsou napěťový sledovač (transformátor impedance), převodník proud  $\rightarrow$  napětí, omezení signálu a podobně.

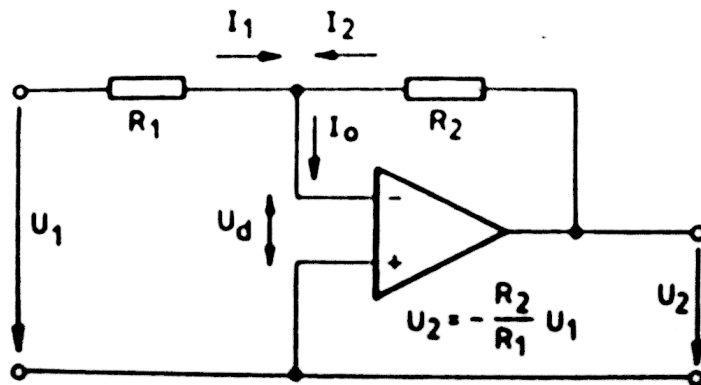
OZ pracuje v zapojení s dalšími elektrickými součástkami, které tvoří tzv. **operační síť**. V ní je možné rozlišit **přímou cestu** a **zpětnou vazbu**. Napájecí a kompenzační obvody nejsou součástí operační sítě a do schémat se obvykle nezakreslují.

Ve většině zapojení s OZ se využívá **záporná zpětná vazba**. Jen v některých aplikacích (komparátor s hysterezí, generátory signálů) se používá kladná zpětná vazba.

Při návrhu nebo odvození vlastností daného zapojení se využívá zjednodušení = OZ s ideálními vlastnostmi (nekonečné zesílení, nekonečný vstupní odpor, nulový vstupní proud, nulové napětí mezi invertujícím a neinvertujícím vstupem). Výstupní napětí OZ samozřejmě nemůže vybočit z mezí daných napájecím napětím. Z výše uvedených podmínek lze odvodit matematický vztah, popisující chování konkrétního zapojení = **operační rovnici**.

Invertující zesilovač (násobení konstantou)

Při odvození vztahů mezi výstupním napětím  $U_2$  a vstupním napětím  $U_1$  se vychází z obr.3.



Obr. 3. zapojení OZ jako invertující zesilovač.

Z prvního Kirhoffova zákona platí pro součtový uzel:

$$I_1 + I_2 - I_0 = 0 \quad (2)$$

Za předpokladu, že OZ má ideální chování platí:

$$A_u \rightarrow \infty, \quad I_0 \rightarrow 0, \quad U_d \rightarrow 0$$

Vyjádří-li se proudy pomocí Ohmova zákona (do vzorců dostávám vstupní a výstupní napětí)

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1} \quad I_2 = \frac{U_2}{R_2} \quad (3)$$

pak dosazením a úpravami dostaneme

$$\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} = 0 \quad U_2 = -\frac{R_2}{R_1} \cdot U_1 \quad (4, 5)$$

Tento vztah je operační rovnicí invertujícího zesilovače. Poměr odporů se znaménkem vyjadřuje násobící konstantu, nazýváme jí zesílení. Jak je vidět ze vztahu (5) je zesílení dáno pouze poměrem pasivních prvků z operační sítě a nezávisí tedy na vlastnostech OZ. Velikost

odporů nelze volit libovolně, na jedné straně je třeba nepřekročit maximální výstupní proud OZ, na druhé straně čím větší odpor, tím větší šum a další rušivé vlivy.

Protože invertující i neinvertující vstupy jsou na nulovém potenciálu, je vstupní odpor obvodu roven  $R_1$ . Jedná se o typický obvod se zápornou zpětnou vazbou, protože výstupní signál je přes odpor  $R_2$  veden na invertující vstup OZ (invertující vstup obrací znaménko).

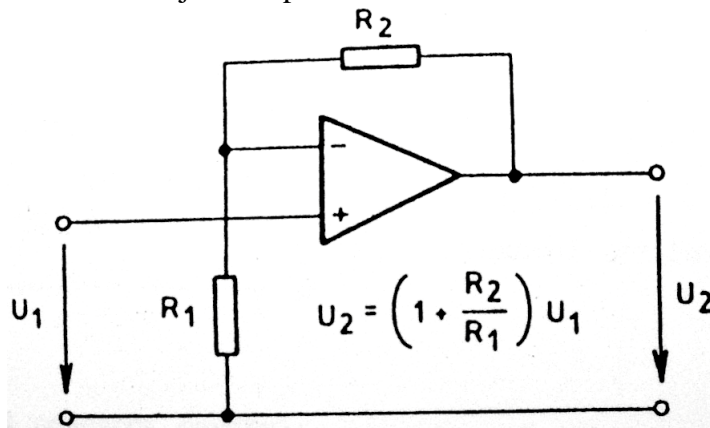
#### Neinvertující zesilovač (násobení konstantou)

Základní zapojení je na obr. 4. Vstupní napětí  $U_1$  se přivádí přímo na neinvertující vstup. Výstupní napětí  $U_2$  se přivádí pomocí děliče  $R_1$  a  $R_2$  na invertující vstup.

Operační rovnici lze odvodit obdobně, jako v případě invertujícího zesilovače a je uvedena jako vztah (6).

$$U_2 = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot U_1 \quad (6)$$

Výraz v závorce určuje zesílení (= násobící konstantu), jeho hodnota je větší než 1 a s kladným znaménkem. Jedná se opět o obvod se zápornou zpětnou vazbou, výstupní signál je přiveden na invertující vstup.



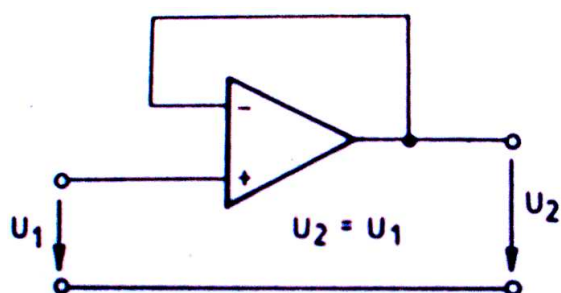
Obr. 4. zapojení OZ jako neinvertující zesilovač.

Podstatnou výhodou tohoto zapojení proti invertujícímu je, že lze dosáhnout vysokého vstupního odporu, řádově až  $M\Omega$ , podle typu OZ. Protože je vstupní signál veden přímo do neinvertujícího vstupu OZ, je vstupní odpor tohoto obvodu dán vnitřním odporem OZ. Oba vstupy OZ jsou na potenciálu  $U_1$ .

#### Napět'ový sledovač (násobení jedničkou)

Slouží k úpravě signálu. Vzniká z neinvertujícího zesilovače jestliže  $R_2 \rightarrow 0$  a  $R_1 \rightarrow \infty$ , pak se vztah (6) mění na

$$U_2 = U_1 \quad (7)$$

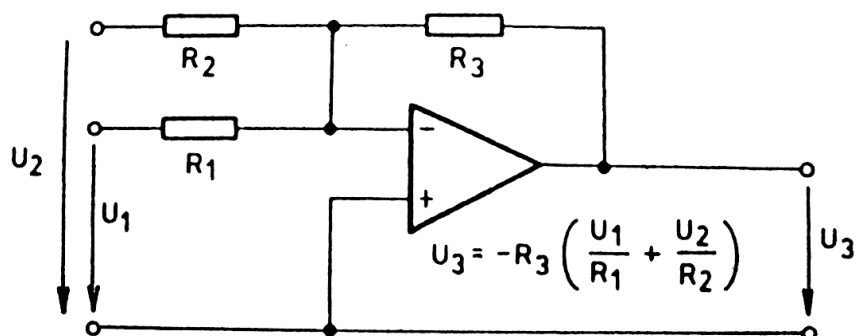


Obr. 5. zapojení OZ jako napěťový sledovač.

Napětí na vstupu sleduje napětí na výstupu, odtud název napěťový sledovač. Zapojení je na obr. 5. Protože toto zapojení má vysoký vstupní odpor a malý výstupní odpor, nazývá se někdy impedanční převodník. Používá se na převod napětí ze zdroje s vysokým vnitřním odporem až desítek  $M\Omega$  (například pH elektroda) na malou výstupní impedanci, typicky desítky  $\Omega$  (například pro magnetoelektrický měřicí přístroj).

#### Sumační zesilovač (sčítání signálů)

Základní zapojení je na obr. 6. Princip je založen na Kirhoffově zákoně o sečítání proudů v uzlu. Proudů se prostřednictvím Ohmova zákona vyjádří jako vstupní napětí a váhové odpory.



Obr. 6. zapojení OZ jako sumační zesilovač.

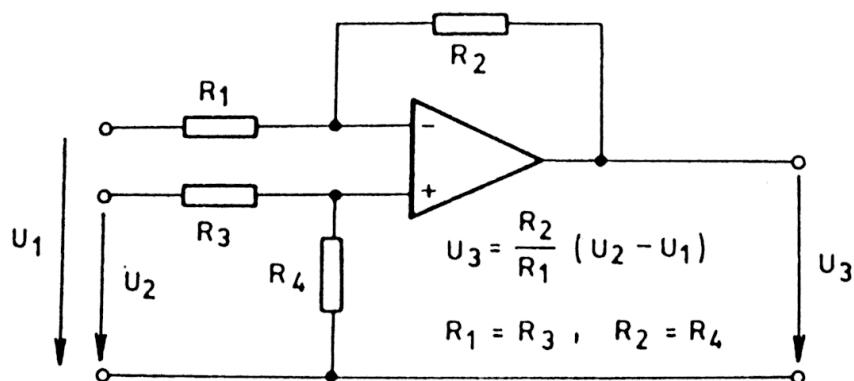
Za předpokladu ideálního chování OZ, lze odvodit operační rovnici:

$$U_3 = R_3 \cdot \left( \frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} \right) \quad (8)$$

Uvedené zapojení umožňuje součet signálů, za předpokladu  $R_1 = R_2 = R_3$ . Součet a zároveň násobení konstantou ať už u sčítanců, nebo součtu lze docílit hodnotami odporů  $R_1, R_2, R_3$ , viz operační rovnice (8). Opět se jedná o obvod se zápornou zpětnou vazbou. Protože výstupní signál nemůže vybočit z rozsahu  $\pm 10$  V, vznikají jistá omezení pro rozsahy vstupních signálů.

#### Diferenční zesilovač (rozdíl signálů)

Pro operaci rozdílu dvou signálů se často používá vlastností neinvertujícího a invertujícího vstupu, jak plyne z obr. 7.



Obr. 7. zapojení OZ jako diferenční zesilovač.

Pro dané zapojení lze odvodit vztah:

$$U_3 = \frac{1}{R_1} \cdot \left( \frac{R_1 + R_2}{R_3 + R_4} \cdot R_4 U_2 - R_2 U_1 \right) \quad (9)$$

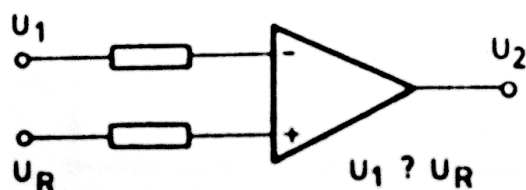
který lze za podmínky  $R_1 R_4 = R_2 R_3$  zjednodušit, častěji se používá přísnější, v praxi snadno realizovatelné podmínky, která umožňuje potlačení teplotního driftu  $R_1 = R_3$  a  $R_2 = R_4$ . Zjednodušený tvar je:

$$U_3 = \frac{R_2}{R_1} \cdot (U_2 - U_1) \quad (10)$$

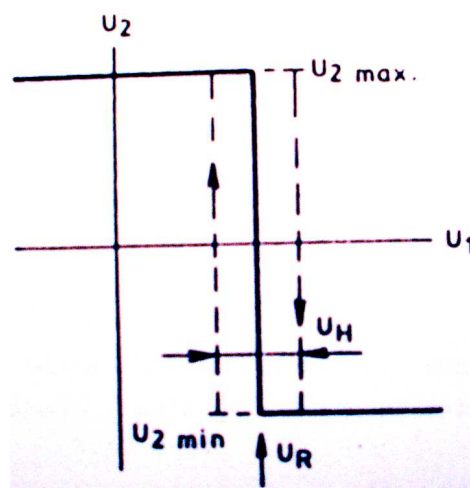
Rozdílové napětí ( $U_2 - U_1$ ) může být plovoucí, může se potenciálově měnit vůči zemní síci sorce, nemůže ale vybočit z mezí daných napájecím napětím. Poměr odporů  $R_2 / R_1$  umožňuje násobení rozdílu konstantou a proto se daného zapojení používá k zesilování rozdílového napětí, typicky z měřicí diagonály můstku. Vstupní odpor zesilovače je relativně malý a nelze jej zanedbat. V případě požadavku na velký vstupní odpor se vstupy doplňují o napěťové sledovače viz obr. 5.

#### Komparátor (vyhodnocení podmínky $>$ , $<$ )

Obvod na obr. 8 porovnává napětí  $U_1$  s napětím  $U_R$ . Je-li  $U_1 > U_R$  pak  $U_2$  je v záporné saturaci (= nejnižší možné napětí na výstupu,  $U_{2MIN} = \text{cca } U_{NAP-} + 2 \text{ V}$ ). Je-li  $U_1 = U_R$  pak  $U_2 = 0$  – to je pouze teoretický případ a v grafu na obr. 9. je vyznačen plnou čarou. Druhá varianta je, že  $U_1 < U_R$  pak  $U_2$  je v kladné saturaci =  $U_{2MAX}$  opět cca o 2 V nižší než  $U_{NAP+}$ . Výstupem je vlastně digitální signál s informací 1 bit. Aby se komparátor dal připojit k digitálním IO, je potřeba  $U_2$  upravit na odpovídající napěťové úrovni. Tento obvod je bez zpětné vazby. Průběh výstupního napětí je zakreslen plnou čarou do grafu na obr. 9, za předpokladu kompenzace napěťové nesymetrie vstupů, jinak by se bod zlomu lišil od  $U_R$  právě o tuto nesymetrii.



Obr. 8. zapojení OZ jako komparátoru.

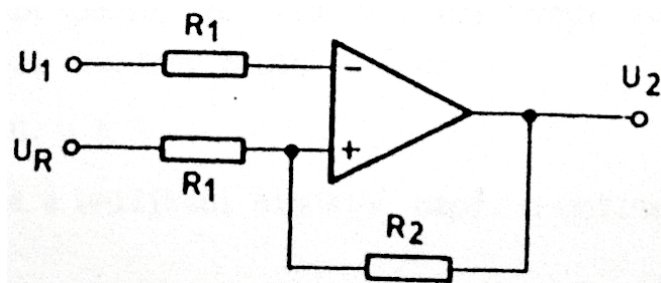


Obr. 9 statická charakteristika komparátoru

V některých případech (spínání spotřebičů, dvupolohová regulace) se požaduje komparátor s hysterezí, která se zavádí **kladnou zpětnou vazbou**, jak je vidět na obr. 10. Velikost hystereze je dána poměrem odporů  $R_1/R_2$  a rozdílem výstupních saturačních napětí podle vztahu:

$$U_H = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot (U_{2MAX} - U_{2MIN}) \quad (13)$$

Statická charakteristika je také na obr. 9, znázorněna čárkovanými čarami.



Obr. 10 Komparátor s hysterezí

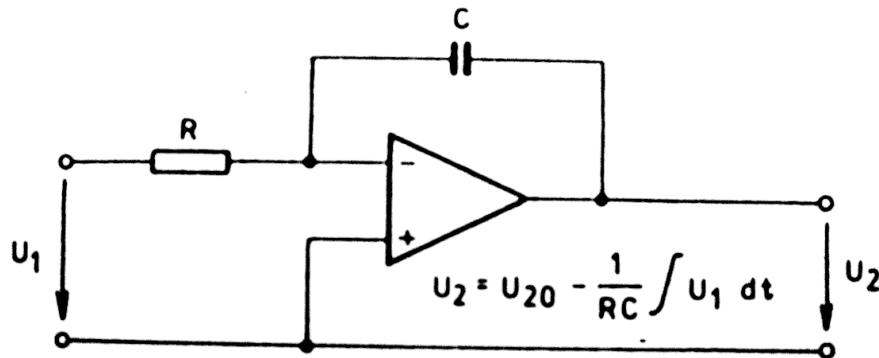
### Integrátor (integrace signálu)

Schéma integrátoru je na obr. 11. Proudem přicházejícím ze zdroje signálu  $U_1$  se přes odpor  $R$  nabíjí kondenzátor  $C$ . Opačný náboj se dostává na druhou desku kondenzátoru z výstupu OZ. Výstupní napětí  $U_2$  je integrálem vstupního signálu  $U_1$  podle času a lze jej popsat následujícím vztahem:

$$U_2 = U_{20} \frac{1}{R \cdot C} \cdot \int U_1 \cdot dt \quad (14)$$



Symbol  $U_{20}$  značí napětí na výstupu OZ a i na kondenzátoru C na počátku integrace. Z matematického hlediska je to integrační konstanta. Má-li integrace probíhat od nuly, musí být kondenzátor před začátkem integrace vybit, to je např. zkratován.



Obr. 11 OZ zapojený jako integrátor

Integrace končí odpojením odporu R od zdroje signálu  $U_1$ . V tom případě na kondenzátoru a výstupu OZ zůstává naintegrované napětí. Tento obvod má tedy schopnost si zapamatovat napětí a má tedy i funkci analogové paměti. I v tomto případě vstupní signál nesmí vybočit z rozsahu napájení OZ. Pokud výstup dojde do saturace, integrace samozřejmě nemůže dále pokračovat. Při integraci je potřeba mít dobře kompenzovanou vstupní napěťovou nesymetrii, jinak by se přičítala k integrovanému signálu. I integrační zesilovač je obvod se zápornou zpětnou vazbou. Tento obvod nemá statickou charakteristiku.

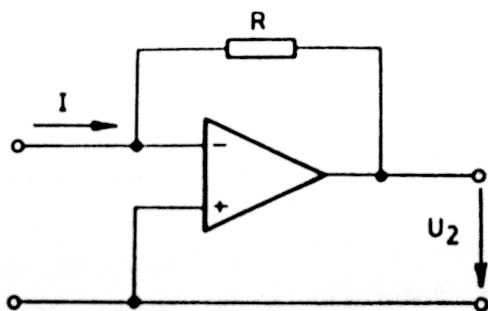
Zaměníme-li součástky, tedy kondenzátor dáme do přímé cesty a odpor do zpětné vazby, vytvoří se obvod provádějící inverzní funkci, tedy derivaci. Takovéto obvody se používají například při konstrukci PID regulátorů.

#### Převodník proud - napětí

Obvod na obrázku 12 převádí proudový signál  $I$  na signál napěťový  $U_2$ , chování se dá popsat následujícím vztahem.

$$U_2 = R \cdot I \quad (15)$$

Vzhledem k tomu, že rozdíl napětí na vstupech OZ se pohybuje v desítkách až stovkách mikrovoltů, chová se tento obvod jako ampérmetr, na kterém je úbytek napětí v desítkách až stovkách  $\mu\text{V}$ , tedy ampérmetr téměř ideálních vlastností. Vstupní proud  $I$  samozřejmě nemůže být větší, než může dodat výstup OZ.

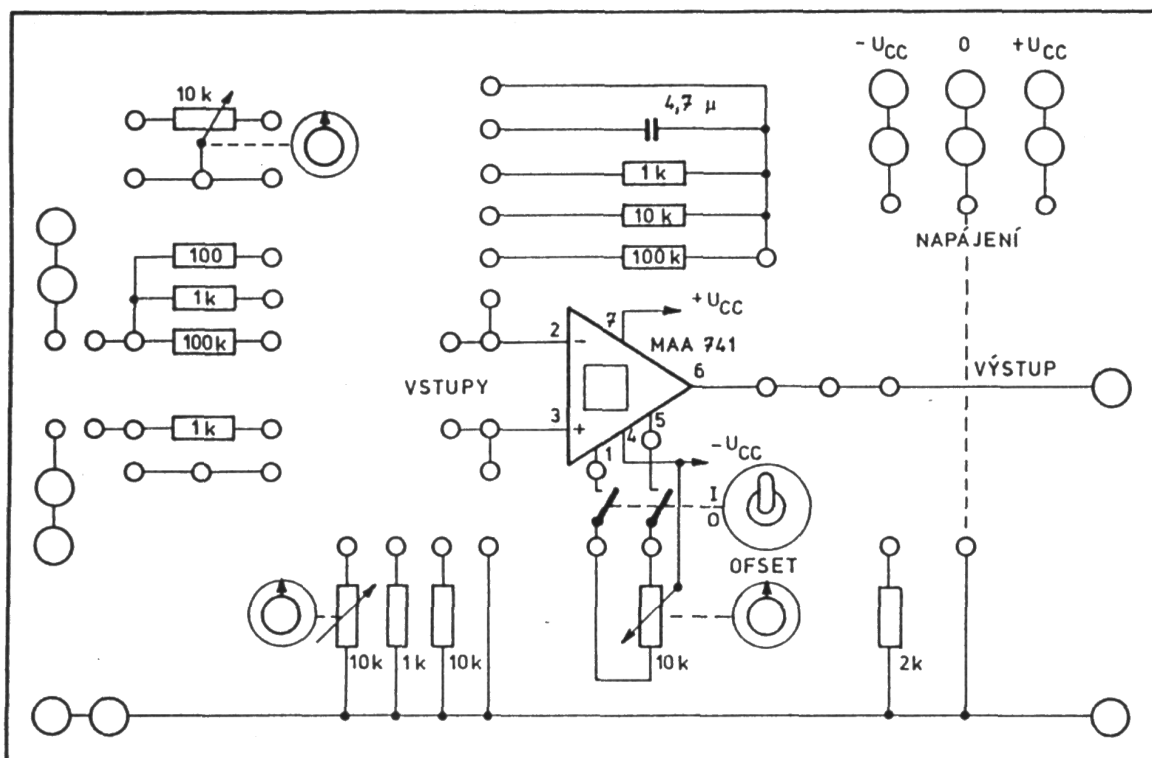


Obr. 12 Převodník proud-napětí

## 2 Laboratorní práce

### 2.1 Laboratorní zařízení

Ověření základních zapojení OZ se provádí na panelech, které jsou společné pro všechny úkoly. Základní panel s OZ a dalšími potřebnými součástkami je zachycen na obr. 19. OZ je již zapojen s některými pomocnými obvody. Na panelu jsou uvedeny u pasivních součástek pouze orientační hodnoty, přesné hodnoty jsou uvedeny v dokumentaci, která je v laboratoři k dispozici. Do výpočtů je potřeba dosazovat skutečné hodnoty.



Obr. 19 Hlavní panel pro experimentování s vlastnostmi OZ

Napájení  $\pm 15$  V se na panel přivede ze zdroje BK 125 do příslušně označených svorek, připojuje se i zem, tedy 3 vodiče. Je potřeba propojit zem napájení se základní zemí panelu. Vstupní signál se přivádí ze zdroje BK 127, je-li to potřeba, pak přes vstupní dělič (zvláštní panel). Vstupní signál musí mít potenciál mezi napájecím napětím. Vstupní signál se připojuje proti zemi, není-li uvedeno jinak. Vstupní i výstupní napětí se měří číslicovým voltmetrem MIT 242, který se připojuje přes přepínač měřicích míst (zvláštní panel). Měřicí rozsahy si MIT 242 přepíná sám automaticky.

## 2.2 Zadání práce G1

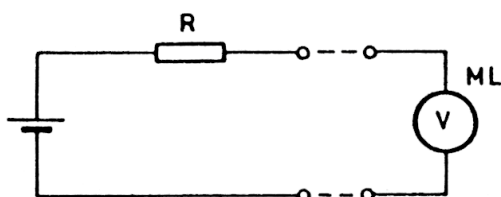
- 1) Zapojte OZ jako invertující zesilovač se zesílením 10x a 100x. Proměřte statické charakteristiky bez kompenzace vstupní napěťové nesymetrie pro zesílení 10x a s kompenzací vstupní napěťové nesymetrie pro zesílení 100x. Statické charakteristiky znázorněte graficky.
- 2) Zapojte OZ jako neinvertující zesilovač se zesílením 100. Proveďte kompenzaci vstupní napěťové nesymetrie a jejího teplotního driftu. Naměřte a graficky znázorněte statickou charakteristiku.
- 3) Zapojte OZ jako napěťový sledovač a změřte jeho statickou charakteristiku. Změřte závislost údaje magnetoelektrického měřicího přístroje na vnitřním odporu zdroje elektrického signálu. Totéž proveďte s vloženým napěťovým sledovačem. Oba údaje vyjádřete graficky v závislosti na odporu.
- 4) Zapojte OZ jako sumační zesilovač. Ověřte funkci obvodu ve 4 x 4 bodech. Porovnejte teoretickou a experimentálně zjištěnou hodnotu součtu.
- 5) Zapojte OZ jako převodník vstupního proudu (0 až 10 mA) na napětí 0 až 10 V. Ověřte funkci v deseti bodech a sestrojte statickou charakteristiku.
- 6) Protokol obsahuje:
  - schémata použitých zapojení pro jednotlivá zadání
  - použité výpočtové vztahy a příklady výpočtu
  - tabulky a grafy statických charakteristik

## 2.3 Pracovní postup:

- 1) Invertující zesilovač zapojte podle schématu na obr. 3. Proměnné vstupní napětí přiveďte ze zdroje BK 127, pro větší zesílení OZ pochopitelně použijete vstupní dělič. Pro měření vstupního a výstupního signálu použijte multimetr M1T 242. Při zapínání se nejprve zapíná napájení OZ (BK 125) a až potom vstupní signál (BK 127). Měření při zesílení 10 provádějte bez kompenzace vstupní napěťové nesymetrie, tzn. přepínač ofset je v poloze 0. Měření provádějte pro obě polarities vstupního napětí tak, aby výstupní signál byl v rozmezí  $\pm 10V$ . Při měření v krajních bodech lze vstupní napětí krátkodobě zvýšit (snížit) o 50% a na výstupu se objeví saturační napětí. Pro zesílení 100 změřte přibližnou hodnotu vstupní napěťové nesymetrie. Po odpojení zdroje vstupního signálu zkratujte vstupní zdířku proti zemi a z odečteného napětí na výstupu spočítejte vstupní napěťovou nesymetrii. Statickou charakteristiku při zesílení 100 proměřte s kompenzací vstupní napěťové nesymetrie. Při zkratované vstupní svorce přepněte přepínač ofset do polohy 1 a potenciometrem ofset nastavte nulové výstupní napětí. Poté odstraňte zkrat na vstupu, připojte zdroj vstupního signálu (BK 127 + dělič). Měření statické charakteristiky provádějte pro obě polarities do maximálního výstupního napětí  $\pm 10V$ . Ze statických charakteristik vypočítejte zesílení a porovnejte je s teoretickými hodnotami, vypočtenými ze skutečných hodnot prvků operační sítě.
- 2) Neinvertující zesilovač zapojte podle schématu na obr.4. Kompenzaci teplotního driftu potlačte podle bodu 3, kapitola 1.2. Změřte a nakreslete statickou charakteristiku pro obě

polarity. Ze směrnice charakteristiky vypočítejte zesílení a porovnejte jej s teoretickou hodnotou.

- 3) Napěťový sledovač zapojte podle obr. 5. Proved'te kompenzaci vstupní napěťové nesymetrie a v 2 x 3 bodech ověřte funkci. Sestavte měřicí obvod podle obr. 20. Zdroj signálu realizujte zdrojem BK 127 se sériově zapojeným odporem (dekáda nebo odpory na pomocném panelu). Zvětšujte postupně hodnotu odporu od  $100\ \Omega$  po desetinasobcích, dokud nezaznamenáte výrazný pokles napětí na voltmetru. Výsledky měření vynesete do grafu, odpor vynášejte v logaritmické stupnici. Ze získaných závislostí zhodnoťte význam napěťového sledovače.



Obr. 20 Obvod pro simulaci zdroje napěťového signálu s velkým vnitřním odporem

- 4) Sumační zesilovač zapojte podle schématu na obr.6. Proměnné vstupní napětí (1. sčítanec) přiveďte ze zdroje BK 127, druhý vstupní signál (2. sčítanec) berte z jezdcy potenciometru (na panelu vlevo nahoře), jehož krajní vývody připojíte na napájení OZ. Ověřte funkci v obou polaritách. Výsledky zaznamenejte do tabulky, kde porovnáte teoretické a vypočtené (vztah 8) hodnoty.
- 5) Převodník proud – napětí zapojte podle schématu na obr. 12. Vstupní proud odebírejte ze zdroje BK 127 opatřeného sériovým odporem (1 k) z panelu.

## 2.4 Zadání práce G2

- 1) Zapojte OZ jako rozdílový zesilovač se zesílením 10. Ověřte funkci zapojení v deseti bodech, sestrojte statickou charakteristiku a porovnejte experimentální a teoretické hodnoty.
- 2) Zapojte OZ jako integrační zesilovač. Provádějte integraci od nulové hodnoty. Nakreslete časový průběh integrace (= přechodovou charakteristiku).
- 3) Zapojte OZ jako komparátor dvou signálů. Referenční napětí zvolte 5 V. Sestrojte statickou charakteristiku komparátoru.
- 4) Zapojte OZ jako komparátor s hysterezí, vytvořenou kladnou zpětnou vazbou (rezistorem 100 k) a referenční napětí přivádějte přes odpor 1 k. Sestrojte statickou charakteristiku komparátoru.

## 2.5 Pracovní postup

- 1) Rozdílový zesilovač zapojte podle schématu na obr.7. Požadované zesílení nastavte vhodnou volbou rezistorů operační sítě. Proměnné vstupní napětí přiveďte jednak ze zdroje BK 127, jednak z jezdecké potenciometru (na panelu vlevo nahoře), jehož krajní vývody jsou připojeny na napájecí napětí OZ. Měření vstupních i výstupních napěťových signálů provádějte multimetrem MIT 242 za pomoci přepínače měřicích míst (pomocný panel). Potenciometrem ofset proveďte kompenzaci vstupní napěťové nesymetrie. Vstupní signály volte tak, aby výstupní napětí bylo v rozmezí  $\pm 10V$ . Rozdílový zesilovač ověřte v obou polaritách. Výsledky měření zpracujte do tabulky, kde porovnáte naměřené a teoretické (ze skutečných hodnot prvků operační sítě) hodnoty.
- 2) Integrační zesilovač zapojte podle schématu na obr.11. Aby průběh integrace byl dobře sledovatelný (dostatečně pomalý), je třeba zvolit dostatečně velkou hodnotu odporu R. Nulové počáteční podmínky dosáhnete zkratováním kondenzátoru před započítím integrace. Vstupní napětí dodává zdroj BK 127 a vstupní napěťový dělič. Pro experimenty je potřeba precizně kompenzovat vstupní napěťovou nesymetrii. Vstupní napětí nastavte na cca 100 mV. Při měření přechodové charakteristiky odečítejte výstupní napětí v pravidelných časových intervalech tak, abyste získali alespoň 10 bodů na přechodovou charakteristiku. Průběh integrace sledujte v rozsahu výstupního signálu  $\pm 10V$ .
- 3) Komparátor dvou signálů zapojte podle schématu na obr.8. Vstupní odpory volte 1 k $\Omega$ . Vstupní signál berte ze zdroje BK 127, referenční napětí nastavte 5 V. Změřte a znázorněte graficky statickou charakteristiku komparátoru.
- 4) Zapojení z předchozího bodu doplňte o kladnou zpětnou vazbu (odpor 100 k zapojte mezi výstup a neinvertující vstup). Změřte a zakreslete statickou charakteristiku při zvyšování a snižování vstupního napětí. Do statické charakteristiky zakreslete i hodnotu referenčního napětí. Ze statické charakteristiky odečtěte hodnotu hystereze a porovnejte ji s teoretickým výpočtem (vztah 13).