

Analogové elektronické obvody

Laboratorní cvičení

Autor textu:

Prof. Ing. Dalibor Bielek, CSc.

Obsah

1	ÚVOD	3
2	ZAŘAZENÍ PŘEDMĚTU VE STUDIJNÍM PROGRAMU	3
2.1	ÚVOD DO STUDIA ELEKTRONICKÉHO TEXTU	3
2.2	VSTUPNÍ TEST	4
3	ÚLOHY	5
3.1	PRACOVNÍ BOD A JEHO POHYB	5
3.1.1	Cíle předběžných rozborů, návrhů a následných experimentů.....	5
3.1.2	<i>Rozbory a návrhy.....</i>	<i>7</i>
3.1.3	<i>Návod na cvičení.....</i>	<i>12</i>
3.2	OVĚŘOVÁNÍ ZÁKLADNÍCH VLASTNOSTÍ OZ.....	16
3.2.1	Cíle předběžných rozborů, návrhů a následných experimentů.....	16
3.2.2	<i>Rozbory a návrhy.....</i>	<i>17</i>
3.2.3	<i>Návod na cvičení.....</i>	<i>19</i>
	POČÍTAČOVÉ CVIČENÍ (PC) A LABORATORNÍ CVIČENÍ (LC) Č. 2	20
3.3	NÍZKOFREKVENČNÍ ZESILOVAČE S OZ.....	23
3.3.1	Cíle předběžných rozborů, návrhů a následných experimentů.....	23
3.3.2	<i>Rozbory a návrhy.....</i>	<i>24</i>
3.3.3	<i>Návod na cvičení.....</i>	<i>25</i>
	POČÍTAČOVÉ CVIČENÍ (PC) A LABORATORNÍ CVIČENÍ (LC) Č. 3	26
3.4	AKO A GENERÁTORY SIGNÁLŮ S OPERAČNÍMI ZESILOVAČI.....	28
3.4.1	Cíle předběžných rozborů, návrhů a následných experimentů.....	28
3.4.2	<i>Rozbory a návrhy.....</i>	<i>29</i>
3.4.3	<i>Návod na cvičení.....</i>	<i>32</i>
	POČÍTAČOVÉ CVIČENÍ (PC) A LABORATORNÍ CVIČENÍ (LC) Č. 4	33
3.5	OPERAČNÍ USMĚRŇOVAČE	35
3.5.1	Cíle předběžných rozborů, návrhů a následných experimentů.....	35
3.5.2	<i>Rozbory a návrhy.....</i>	<i>35</i>
3.5.3	<i>Návod na cvičení.....</i>	<i>37</i>
	POČÍTAČOVÉ CVIČENÍ (PC) A LABORATORNÍ CVIČENÍ (LC) Č. 5	38
4	DODATKY.....	40
4.1	VÝSLEDKY TESTŮ	40
4.1.1	Vstupní test.....	40
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	41

SEZNAM OBRÁZKŮ

OBR. 3.1:	ZESILOVAČ S BIPOLÁRNÍM TRANZISTOREM.	6
OBR. 3.2:	ZESILOVAČ S UNIPOLÁRNÍM TRANZISTOREM.	7
OBR. 3.3:	STEJNOSMĚRNÉ NAPĚŤOVÉ A PROUDOVÉ POMĚRY V ZESILOVAČI.	8
OBR. 3.4:	LINEARIZOVANÝ MODEL ZESILOVAČE Z OBR. 3.3 PRO SLEDOVÁNÍ PRŮCHODU STŘÍDAVÉHO SIGNÁLU.	9
OBR. 3.5:	STEJNOSMĚRNÉ NAPĚŤOVÉ A PROUDOVÉ POMĚRY V ZESILOVAČI.	10
OBR. 3.6:	LINEARIZOVANÝ MODEL ZESILOVAČE Z OBR. 3.5 PRO SLEDOVÁNÍ PRŮCHODU STŘÍDAVÉHO SIGNÁLU. $\dot{I}_d = g_m \dot{U}_{GS}$	11
OBR. 3.7:	A) ZAJIŠTĚNÍ SYMETRICKÉHO NAPÁJENÍ OPERAČNÍCH ZESILOVAČŮ TYPU 1458, B) OZ JAKO JEDNOTKOVÝ ZESILOVAČ, C) NEINVERTUJÍCÍ ZAPOJENÍ OZ, D) INVERTUJÍCÍ ZAPOJENÍ OZ.	16
OBR. 3.8:	STATICKE PŘEVODNÍ CHARAKTERISTIKY A) NEINVERTUJÍCÍHO, B) INVERTUJÍCÍHO ZAPOJENÍ S OZ.	17
OBR. 3.9:	AMPLITUDOVÁ KMITOČTOVÁ CHARAKTERISTIKA OZ 1458 (SLABĚ) A NEINVERTUJÍCÍHO ZAPOJENÍ SE ZESÍLENÍM K_U (SILNĚ).	18
OBR. 3.10:	A) NESYMETRICKÉ, B) SYMETRICKÉ NAPÁJENÍ OPERAČNÍHO ZESILOVAČE.	23
OBR. 3.11:	STŘÍDAVÝ ZESILOVAČ S NESYMETRICKÝM NAPÁJENÍM OPERAČNÍHO ZESILOVAČE.	23
OBR. 3.12:	SUMAČNÍ ZESILOVAČ.	24
OBR. 3.13:	DIFERENČNÍ ZESILOVAČ.	24
OBR. 3.14:	STEJNOSMĚRNÉ POMĚRY V ZESILOVAČI S NESYMETRICKÝM NAPÁJENÍM.	24
OBR. 3.15:	STŘÍDAVÉ POMĚRY V ZESILOVAČI S NESYMETRICKÝM NAPÁJENÍM.	25
OBR. 3.16:	AKO S JEDNÍM OZ A TRANZISTOROVÝM PŘEVODNÍKEM ÚROVNĚ.	28
OBR. 3.17:	GENERÁTOR PILOVITÝCH KMITŮ.	28
OBR. 3.18:	AKO.	29
OBR. 3.19:	TRANZISTOROVÝ PŘEVODNÍK ÚROVNÍ Z $\pm 4V$ NA $0/5V$	30
OBR. 3.20:	NÁVRH GENERÁTORU TVAROVÝCH KMITŮ.	31
OBR. 3.21:	JEDNOCESTNÝ OPERAČNÍ USMĚRŇOVAČ.	35
OBR. 3.22:	DVOUCESTNÝ USMĚRŇOVAČ VYUŽÍVAJÍCÍ ZAPOJENÍ JEDNOCESTNÉHO USMĚRŇOVAČE Z OBR. 3.21	36
OBR. 3.23:	DVOUCESTNÝ OPERAČNÍ USMĚRŇOVAČ S MALÝM POČTEM PŘESNÝCH REZISTORŮ.	37

1 Úvod

Skriptum „Analogové elektronické obvody – laboratorní cvičení“ je studijním textem stejnojmenného povinného předmětu studijního oboru „Mikroelektronika a technologie“ tříletého bakalářského studijního programu „Elektrotechnika, elektronika, komunikační a řídicí technika“. Navazuje na skripta „Analogové elektronické obvody – přednášky“. Předmět je dále zabezpečen elektronickými texty „Analogové elektronické obvody – počítačová cvičení“.

2 Zařazení předmětu ve studijním programu

Předmět „Analogové elektronické obvody“ je vyučován v zimním semestru 2. ročníku v rozsahu 39 hodin přednášek a 39 hodin cvičení, čemuž odpovídá jeho ohodnocení sedmi kredity. Předmět je zakončen zápočtem a zkouškou.

Nejdůležitější předměty 1. ročníku, na které tento předmět obsahově navazuje, jsou „Elektrotechnika 1“, „Elektrotechnika 2“ a „Elektronické součástky“, z volitelných oborových předmětů pak „Mikroelektronické praktikum“. Předpokládá se aktivní znalost základních zákonů a principů teoretické elektrotechniky, metod analýzy lineárních a nelineárních obvodů, jakož i znalost vlastností a funkce základních elektrotechnických součástek.

Pokud jde o navazování na předměty Matematika 1-2“, v předmětu „Analogové elektronické obvody“ je používán matematický aparát pro popis a analýzu lineárních a nelineárních elektrických obvodů. To představuje práci se soustavami lineárních a nelineárních algebraických rovnic při analýze odporových obvodů a práci s diferenciálními rovnicemi při řešení obvodů setrvačných. Lineární diferenciální rovnice budou formálně převáděny na algebraické prostřednictvím názorového, resp. operátorového počtu. Nelineární rovnice budou řešeny numerickými iteračními metodami. O těchto metodách je třeba mít alespoň uživatelský přehled ve smyslu globálního porozumění mechanismů jejich fungování.

2.1 Úvod do studia elektronického textu

Praktická výuka v předmětu „Analogové elektronické obvody“ (AEO) sestává z numerických, počítačových a laboratorních cvičení (NC, PC a LC). Trojice NC+PC+LC je rozvrhově plánována pro všechny studijní skupiny v uvedeném pořadí s cílem nejprve teoreticky rozebrat a navrhnout elektronický obvod, pak simulovat různé jeho vlastnosti v počítačové laboratoři, a nakonec realizovat jeho funkční vzorek a na něm ověřit, zda obvod funguje tak jak má. Pro studenty je povinné absolvování všech PC a LC, nicméně pro jejich úspěšné absolvování jsou potřebné znalosti a konkrétní data, získaná v předchozích numerických cvičeních.

Simulace obvodů v počítačových cvičeních probíhá na evaluační verzi programu MicroCap 7, kterou si studenti mohou stáhnout z www.spectrum-soft.com. V některých úlohách je využíván i program SNAP 2.6, jehož plná verze je dostupná na <http://snap.webpark.cz/index.html>. V laboratorních cvičeních si studenti sestavují měřený obvod na kontaktním propojovacím poli.

Pro účely zápisu a vyhodnocování výsledků z „NC+PC+LC“ musí mít každý student založen samostatný pracovní sešit. Každá z úloh se v něm objeví „natřikrát“ v uvedeném pořadí: nejprve poznámky z numerického cvičení (návrhové postupy a výsledky), pak vlepené zadání „PC+LC“, příprava na „PC+LC“ a nakonec vypracování se závěry. Obsah přípravy, jakož i vyhodnocení simulací a měření jsou přesně vymezeny v zadání úlohy v rámečcích s nadpisy „Požadovaná příprava v pracovních sešitech před zahájením cvičení“ a „Povinné výstupy v pracovních sešitech“. Student je z každého cvičení hodnocen za splnění/nesplnění přípravy na hodinu („Požadovaná příprava...“), za svoji aktivitu a šikovnost během cvičení a za splnění bodů „Povinné výstupy...“. Přejde-li např. student nepřipraven (příp. zapomene sešit apod.), pracuje ve dvojici a pouze na kus papíru zapisuje výsledky, které změří jeho kolega, pak moc bodů na hodině nezíská.

V skriptech naleznete zadání všech cvičení „PC+LC“. Těmto zadáním jsou předřazeny rozbor měřených obvodů a návrhy součástek, které jsou nezbytnými vstupními daty pro následnou práci v počítačových a laboratorních cvičeních.

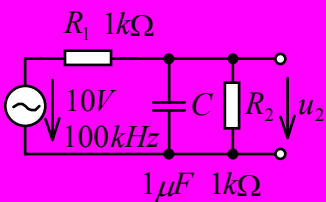
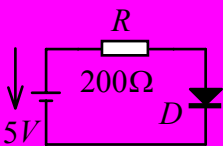
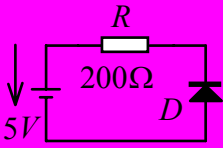
Další informace o předmětu, jakož i návody na cvičení v elektronické formě, jsou k dispozici na <http://user.unob.cz/biolek>.

2.2 Vstupní test

Průchod následujícím „autotestem“ vám ukáže, nakolik vaše současné znalosti odpovídají vstupním požadavkům k studiu předmětu. Výsledky jsou uvedeny v dodatku 4.1.1.

Vyznačte správnou odpověď (ke každé otázce existuje právě jedna):





č.	obvod	otázka	varianty odpovědí
1		Napětí U_X je	a) 2V, b) 3V, c) 4V, d) -6V
		Napětí U_Y je	a) -2V, b) -3V, c) -4V, d) 6V
		Proud I_X je	a) $I_X > I_Y$, b) $I_X < I_Y$, c) $I_X = I_Y$, d) $I_X = -I_Y$
		Proud I_X je	a) 1A, b) -1A, c) 2A, d) -2A
2		Napětí na svorkách R_1 je	a) 200mV, b) 300mV, c) 400mV, d) 0 mV
		Napětí baterie U_B je	a) 1V, b) 2V, c) 3V, d) 5V
		Napětí U_X je	a) 1V, b) 2V, c) -1V, d) 0V
		Výkon dodávaný baterií je	a) 200mW, b) 300mW, c) 400mW, d) 0 mW
3		Proud I_X je	a) -8mA, b) 1mA, c) 2mA, d) 8mA
		Proud I_Y je	a) -8mA, b) -1mA, c) 2mA, d) 8mA
		Napětí U_X je	a) 2V, b) 8V, c) 16V, d) -2V
		Poměr výkonů na R_1 a na R_2 je	a) 0,5, b) 2, c) 0,25, d) 4
4		Po připojení baterie se obvod dostane do ustáleného stavu řádově za několik	a) sekund, b) milisekund, c) mikrosekund, d) nanosekund
		V ustáleném stavu bude kapacitor nabit na napětí	a) 0V, b) 5V, c) 10V, d) -10V

5		Amplituda proudu kapacitorem v ustáleném stavu bude asi	a) 0A, b) 5mA, c) 10mA, d) 100mA
		Obvod se chová jako filtr typu	a) dolní propust, b) horní propust, c) pásmová propust, d) pásmová zádrž
		Mezní kmitočet filtru je zhruba	a) 100Hz, b) 300Hz, c) 1000Hz, d) 100kHz
6		Napětí na R je zhruba	a) 0V, b) 0,7V, c) 4,35V, d) 5V
		Proud diodou je zhruba	a) 0A, b) 10mA, c) 22mA, d) 25mA
		Při změně R na 150Ω se napětí na R	a) nezmění, b) klesne o několik procent, c) vzroste o několik procent, d) klesne o desítky procent
7		Napětí na R je zhruba	a) 0V, b) 0,7V, c) 4,35V, d) 5V
		Proud diodou je zhruba	a) 0A, b) 10mA, c) 22mA, d) 25mA
		Při změně R na 150Ω se napětí na R	a) nezmění, b) klesne o několik procent, c) vzroste o několik procent, d) klesne o desítky procent

3 Úlohy

Cíle kapitoly:

U každé úlohy

-  definovat cíle přípravného numerického cvičení a následných experimentů,
-  shrnout potřebné teoretické poznatky,
-  provést příslušné návrhy a výpočty,
-  připojit úplný návod na experimentální cvičení.

3.1 Pracovní bod a jeho pohyb

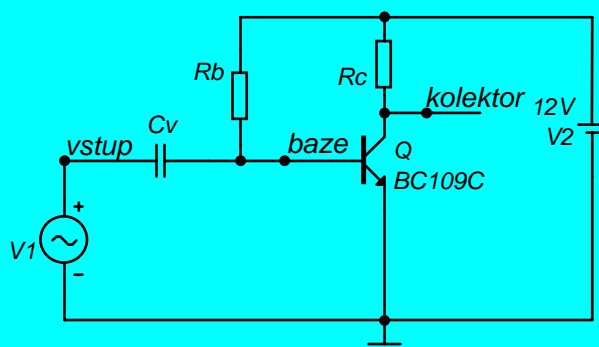
3.1.1 Cíle předběžných rozborů, návrhů a následných experimentů

Cíle předběžných rozborů a návrhů na NC:

U zesilovače s bipolárním tranzistorem na obr. 3.1

- Navrhnout R_C a R_b tak, aby stejnosměrné napětí mezi kolektorem a emitorem bylo asi 6V (poloviční než napětí baterie) při kolektorovém proudu asi 3mA. Vycházet z odhadnutých parametrů použitého tranzistoru.

- Ukázat, že v důsledku rozptylu skutečných parametrů tranzistoru mohou být výsledky návrhu považovány jen za orientační, neboť v obvodu nepůsobí stabilizační záporná zpětná vazba.
- Ověřit, jak souvisí stejnosměrný pracovní bod a stav tranzistoru (zavřeno, saturace, aktivní režim) na odporu R_B .
- Z linearizovaného modelu obvodu pro průchod střídavého signálu odhadnout zesílení a vstupní odpor na středních kmitočtech. Navrhnout vazební kondenzátor tak, aby dolní mezní kmitočet zesilovače byl 20Hz. Odhadnout dolní mezní kmitočet pro vazební kapacitu $5\mu\text{F}$.
- Odhadnout amplitudy střídavých složek napětí mezi bází a emitorem, napětí kolektor-emitor, proudu báze a proudu kolektoru, je-li amplituda vstupního napětí 20mV a kmitočet 1kHz.
- Načrtnout časové průběhy napětí mezi bází a emitorem, napětí kolektor-emitor, proudu báze a proudu kolektoru, je-li amplituda vstupního napětí 20mV a kmitočet 1kHz.

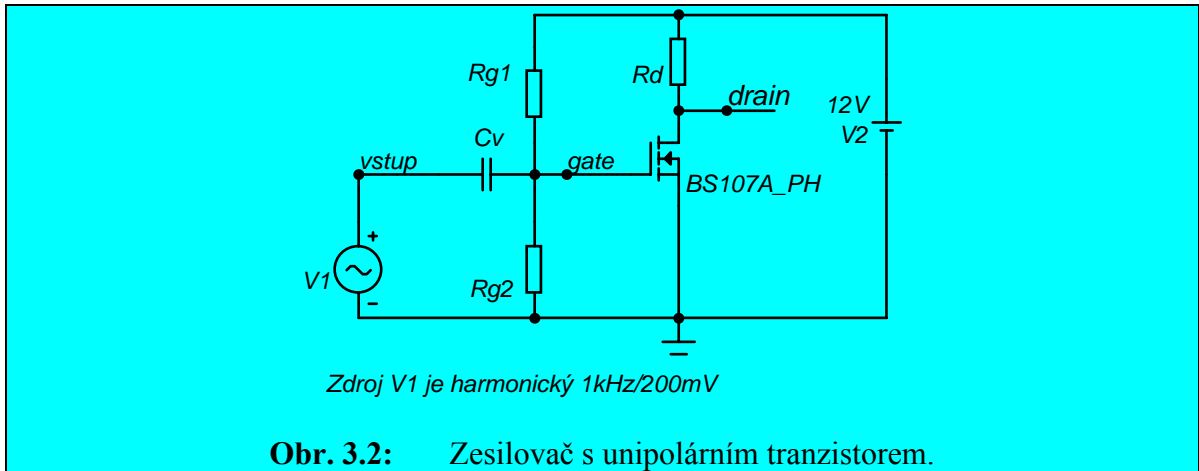


Zdroj V1 je harmonický 1kHz/20mV

Obr. 3.1: Zesilovač s bipolárním tranzistorem.

U zesilovače s unipolárním tranzistorem na obr. 3.2

- Navrhnout R_d , R_{g1} a R_{g2} tak, aby stejnosměrné napětí mezi elektrodami *drain* a *source* bylo asi 6V (poloviční než napětí baterie) při kolektorovém proudu asi 3mA. Vycházej z odhadnutých parametrů použitého tranzistoru.
- Ukázat, že v důsledku rozptylu skutečných parametrů tranzistoru mohou být výsledky návrhu považovány jen za orientační, neboť v obvodu nepůsobí stabilizační záporná zpětná vazba.
- Ověřit, jak souvisí stejnosměrný pracovní bod a stav tranzistoru (zavřeno, saturace, aktivní režim) na odporu R_{g1} .
- Z linearizovaného modelu obvodu pro průchod střídavého signálu odhadnout zesílení a vstupní odpor na středních kmitočtech. Navrhnout vazební kondenzátor tak, aby dolní mezní kmitočet zesilovače byl 20Hz. Odhadnout dolní mezní kmitočet pro vazební kapacitu 10nF.
- Odhadnout amplitudy střídavých složek napětí mezi bází a emitorem, napětí kolektor-emitor, proudu báze a proudu kolektoru, je-li amplituda vstupního napětí 200mV a kmitočet 1kHz.
- Načrtnout časové průběhy napětí mezi elektrodami *gate* a *source*, napětí *drain-source*, proudu I_g a I_d , je-li amplituda vstupního napětí 200mV a kmitočet 1kHz.

**Cíle experimentů:**

- Ověřit správnost výsledků z NC a vymežit podmínky jejich platnosti.
- Posoudit vliv rozptylů parametrů tranzistorů na stejnosměrný pracovní bod a střídavé parametry zesilovačů.
- Prozkoumat vliv přebuzení zesilovačů, případně nevhodně nastaveného stejnosměrného pracovního bodu, na nelineární zkreslení signálu.
- Ověřit, že dosažitelné zesílení obvodů s unipolárními tranzistory je obecně menší než s bipolárními tranzistory.

3.1.2 Rozbory a návrhyZesilovač s bipolárním tranzistorem BC109C

Požadavky na stejnosměrný pracovní bod Q:

$$[U_{CE} I_C]_Q \approx [6V \ 3mA].$$

Přibližné parametry tranzistoru BC109C v daném pracovním bodu jsou následující:

$$h_{21E} = \frac{I_{CQ}}{I_{BQ}} \approx 500 \dots \text{stejnosemné proudové zesílení.}$$

Střídavé proudové zesílení $h_{21e} = \beta = \left. \frac{dI_c}{dI_B} \right|_Q \approx 500 \dots$ odhadneme stejně velké jako h_{21E} .

Strmost tranzistoru $S = \left. \frac{dI_C}{dU_{BE}} \right|_Q$ odhadneme z přibližného vzorce

$$S \approx 35 I_{CQ} = 35.3mA \approx 0,1A/V.$$

Střídavý vstupní odpor tranzistoru $r_{in} = \left. \frac{dU_{BE}}{dI_B} \right|_Q$ se určí z parametrů β a S (viz teorie

dvojbranů): $r_{in} = \frac{\beta}{S} \approx 5k\Omega$.

Střídavý výstupní odpor $r_{out} = \left. \frac{dU_{CE}}{dI_C} \right|_Q$ tranzistoru BC109C je přibližně $100k\Omega$ (typická hodnota pro bipolární tranzistor).

Shrnutí odhadů parametrů tranzistoru BC109C:

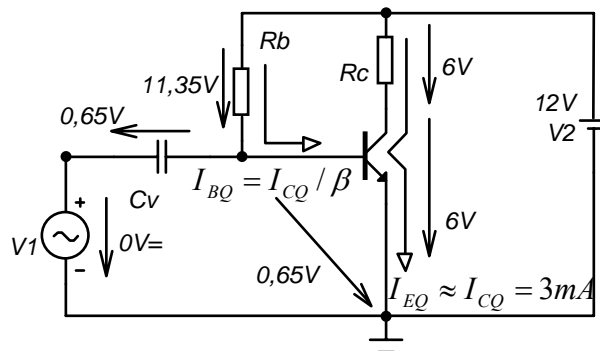
$$h_{21e} = \beta \approx h_{21E} \approx 500, S = 0,1A/V, r_{in} \approx 5k\Omega, r_{out} \approx 100k\Omega.$$

Návrh R_C a R_b k nastavení požadovaného pracovního bodu:

Odhad napětí báze-emitor křemíkového tranzistoru v aktivním režimu:

$$U_{BEQ} \approx 0,65V.$$

Do schématu na **obr. 3.3** vyneseme zadané napětí $U_{CEQ} = 6V$ a proud kolektoru $I_{CQ} = 3mA$. Doplňme napětí 6V na rezistoru R_C (doplňek do napětí baterie 12V). Odpor R_C vychází



Obr. 3.3: Stejnoseměrné napěťové a proudové poměry v zesilovači.

$$R_C = \frac{6V}{3mA} = 2k\Omega.$$

V laboratoři budeme mít k dispozici odpory z řady E12, takže zvolíme

$$R_C = 2,2k\Omega.$$

Budeme-li trvat na napětí $U_{CEQ} = 6V$, pak se změní proud kolektoru na

$$I_{CQ} = \frac{6V}{2200\Omega} \doteq 2,73mA.$$

Pomocí parametru β odhadneme stejnosměrný proud báze:

$$I_{BQ} = \frac{I_{CQ}}{\beta} \doteq 5,46\mu A.$$

Tento proud přitéká do báze přes rezistor R_b , na kterém je napětí $12V - 0,65V = 11,35V$. Proto odpor vychází

$$R_b \doteq \frac{11,35V}{5,46\mu A} \doteq 2M\Omega.$$

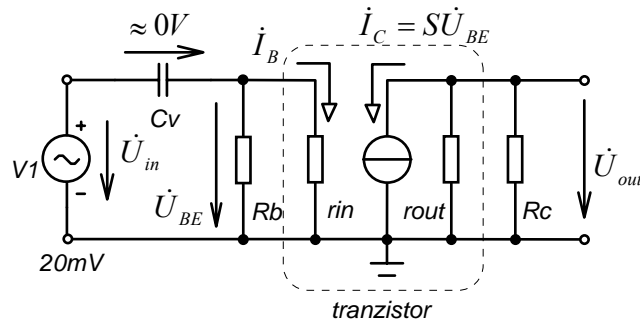
Rekapitulace dosaženého pracovního bodu:

$$[U_{CE} I_C U_{BE} I_B] \approx [6V \ 2,73mA \ 0,65V \ 5,46\mu A].$$

Z **obr. 3.3** vyplývá, že pokud by kapacitor C_V bylo nutné polarizovat (elektrolytický kondenzátor apod.), musíme elektrodu + připojit na bázi tranzistoru.

Výpočet střídavých poměrů v zesilovači:

Náhradní schéma pro průchod střídavého signálu na **obr. 3.4** vzniklo z **obr. 3.3** po zkratování stejnosměrného napájecího zdroje a po náhradě tranzistoru jeho linearizovaným modelem.



Obr. 3.4: Linearizovaný model zesilovače z **obr. 3.3** pro sledování průchodu střídavého signálu.

Kapacitu C_V je třeba navrhnout tak, aby na ní v pásmu pracovních kmitočtů vznikal zanedbatelný úbytek napětí. Pak se celé vstupní napětí $\dot{U}_{in} = 20mV$ „dostává“ mezi bázi a emitor tranzistoru a vyvolává střídavý proud bázi

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_{in}}{r_{in}} = 4\mu A.$$

Střídavý proud kolektoru můžeme určit přes parametr β nebo ze strmosti S a napětí $\dot{U}_{BE} = \dot{U}_{in}$:

$$\dot{I}_C = \beta \dot{I}_B = S \dot{U}_{BE} = 2mA.$$

Tento proud teče do paralelní kombinace $r_{out} \parallel R_C \doteq R_C = 2,2k\Omega$ a vytváří úbytek napětí

$$\dot{U}_{out} \doteq -2,2k\Omega \cdot 2mA = -4,4V.$$

Střídavé zesílení tedy bude

$$\dot{K}_U = \frac{\dot{U}_{out}}{\dot{U}_{in}} \doteq -220.$$

Na kmitočtech, při nichž kapacitor C_V představuje zkrat, bude mít vstupní impedance celého zesilovače jen činnou složku o hodnotě, rovné paralelní kombinaci R_b a r_{in} , což je prakticky r_{in} :

$$\dot{Z}_{in} = R_{in} \doteq r_{in} = 5k\Omega.$$

Rekapitulace střídavých poměrů v obvodu:

$$[\dot{U}_{BE} \quad \dot{I}_B \quad \dot{U}_{out} \quad \dot{I}_C] = [20mV \quad 4\mu A \quad -4,4V \quad 2mA].$$

Porovnáním stejnosměrných a střídavých poměrů ověřte, že nedojde k ořezání střídavých složek!!!

Návrh vazební kapacity C_V :

Kapacitor C_V spolu s paralelní kombinací $R_b \parallel r_{in} = R_{in} \approx r_{in} = 5k\Omega$ (viz obr. 3.4) tvoří CR článek s mezním kmitočtem

$$f_0 = \frac{1}{2\pi R_{in} C_V} .$$

Pro dolní mezní kmitočtet zesilovače 20Hz vychází

$$C_V \doteq 1,6\mu F .$$

Při použité kapacitě $5\mu F$ bude mezní kmitočtet

$$f_0 \doteq 6,4 Hz .$$

Zesilovač s unipolárním tranzistorem BS107A

Požadavky na stejnosměrný pracovní bod Q:

$$[U_{DS} I_D]_Q \approx [6V\ 3mA] .$$

Přibližné parametry tranzistoru BS107A v daném pracovním bodu jsou následující:

$$G_m = \frac{I_{DQ}}{U_{GSQ}} \approx 2mA/V \quad \dots \text{ stejnosměrná strmost.}$$

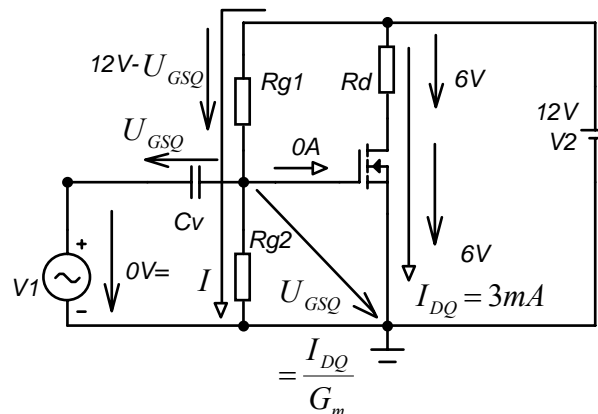
$$g_m = \left. \frac{dI_D}{dU_{GS}} \right|_Q \approx 6mA/V \quad \dots \text{ střídavá strmost.}$$

Stejnou měrou vstupní odpor mezi G a S a střídavý výstupní odpor mezi D a S lze považovat pro návrhové účely prakticky za nekonečné.

Jedná se o tranzistor s indukovaným kanálem typu N .

Návrh R_{d1} , R_{g1} a R_{g2} k nastavení požadovaného pracovního bodu:

Do schématu na obr. 3.5 vyneseme zadané napětí $U_{DSQ} = 6V$ a proud $I_{DQ} = 3mA$. Doplňme napětí $6V$ na rezistoru R_d (doplněk do napětí baterie 12V). Odpor R_d vychází



Obr. 3.5: Stejnou měrou napětěvé a proudové poměry v zesilovači.

$$R_d = \frac{6V}{3mA} = 2k\Omega.$$

Zvolíme nejbližší hodnotu z řady E12:

$$R_d = 2,2k\Omega.$$

Při napětí $U_{DSQ} = 6V$ přepočteme proud I_d :

$$I_{DQ} = \frac{6V}{2200\Omega} \doteq 2,73mA.$$

Pomocí strmosti G_m určíme napětí U_{GS} :

$$U_{GSQ} = \frac{I_{DQ}}{G_m} \doteq 1,365V.$$

Toto napětí vzniká vydělením napětí baterie nezatíženým odporovým děličem R_{g1} - R_{g2} . Vzhledem k nízkým hodnotám proudu elektrodou G (typicky zlomky nA) si můžeme dovolit volit relativně malý proud I děličem (mikroampéry). Volíme například

$$R_{g2} = 1M\Omega.$$

Pak proud děličem bude

$$I = \frac{U_{GSQ}}{R_{g2}} \doteq 1,365\mu A.$$

Odpor R_{g1} vyjde

$$R_{g1} \doteq \frac{12V - 1,365V}{1,365\mu A} \doteq 7,8M\Omega.$$

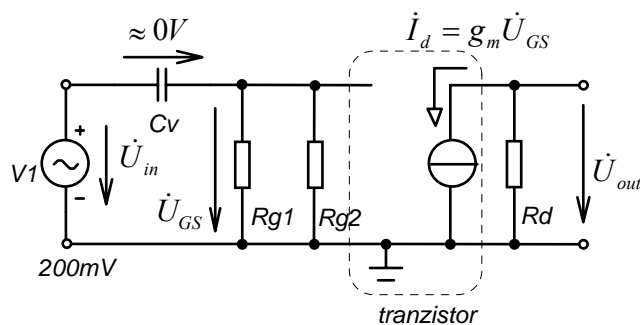
Rekapitulace dosaženého pracovního bodu:

$$[U_{DS} \ I_D \ U_{GS} \ I_G] \approx [6V \ 2,73mA \ 1,365V \ 0A].$$

Výpočet střídavých poměrů v zesilovači:

V náhradním schématu na **obr. 3.6** nejsou uvažovány vstupní a výstupní odpor tranzistoru. Při správně navržené kapacitě C_V na ní nevzniká úbytek napětí a vstupní odpor celého zesilovače pak bude

$$R_m = \frac{R_{g1}R_{g2}}{R_{g1} + R_{g2}} \doteq 886k\Omega.$$



Obr. 3.6: Linearizovaný model zesilovače z **obr. 3.5** pro sledování průchodu střídavého signálu. $\dot{I}_d = g_m \dot{U}_{GS}$

Při vstupním napětí 200mV bude střídavý proud elektrodou *drain*

$$\dot{I}_d = g_m \dot{U}_{GS} = 1,2 \text{ mA}.$$

Tento proud vytvoří na odporu R_d úbytek napětí

$$\dot{U}_{out} \doteq -2,2k\Omega \cdot 1,2mA = -2,64 \text{ V}.$$

Střídavé zesílení tedy bude

$$\dot{K}_U = \frac{\dot{U}_{out}}{\dot{U}_{in}} \doteq -13,2.$$

Rekapitulace střídavých poměrů v obvodu:

$$[\dot{U}_{GS} \dot{I}_G \dot{U}_{out} \dot{I}_D] = [200mV \ 0A \ -2,64V \ 1,2mA].$$

Porovnáním stejnosměrných a střídavých poměrů ověřte, že nedojde k ořezání střídavých složek!!!

Návrh vazební kapacity C_V :

Pro dolní mezní kmitočet zesilovače 20Hz vychází

$$C_V = \frac{1}{2\pi f_0 R_{in}} \doteq 9 \text{ nF}.$$

Při použité kapacitě 10 nF bude mezní kmitočet

$$f_0 \doteq 18 \text{ Hz}.$$

3.1.3 Návod na cvičení

Následuje návod na počítačové a laboratorní cvičení.

Pracovní bod a jeho pohyb

Počítačové cvičení (PC) a laboratorní cvičení (LC) č.1

Požadovaná příprava v pracovních sešitech před zahájením cvičení:

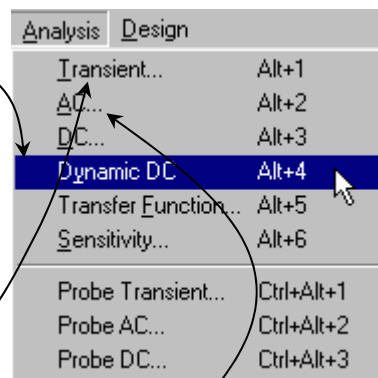
1. Toto zadání vlepene v sešitě, vedle názvu cvičení zapište data jejich konání.
2. Vypočtené, resp. předpokládané údaje z numerického cvičení: R_b (schéma a), R_{g1} (schéma b) stejnosměrná uzlová napětí a větвовé proudy (obě schémata), h_{21E} tranzistoru BC109C, G_m tranzistoru BS107A, nepovinně: h_{21e} , h_{11e} a strmost tranzistoru BC109A, g_m tranzistoru BS107A, střídavý vstupní odpor, střídavé napěťové zesílení, dolní mezní kmitočet obou zesilovačů.

Počítačové cvičení (práce s programem MicroCap)

1. Zesilovač s bipolárním tranzistorem NPN, soubor **1_1.CIR**, schéma a)

Výpočet stejnosměrného pracovního bodu:

Otevřeme soubor **1_1.CIR** (obvod na obr. a). Odpor R_b nastavíme na $5M\Omega$. Spustíme **dynamickou DC analýzu** a zobrazíme uzlová napětí a větвовé proudy přímo ve schématu.



Krokujeme odpor R_b směrem „dolů“ a sledujeme změny napětí a proudů. Zjistíme stav při hodnotě R_b z numerického cvičení. Dostavíme R_b tak, aby na kolektoru bylo zhruba 6V. Tyto konečné hodnoty napětí a proudů si poznamenejme přímo do obr. a).

Analýza časových průběhů:

Spustíme **časovou analýzu** („Transient“). V okně „Transient Analysis Limits“ aktivujeme „Run“, příp. horkou klávesu F2. Do sešitů načrtneme časové průběhy. Změříme stejnosměrná posunutí signálů a jejich amplitudy. Posunutí porovnáme se s pracovním bodem, z amplitud vypočteme napěťové zesílení.

Podle pokynů učitele provedte krokování amplitudy vstupního napětí v hodnotách (10 20 30)mV (sledování vlivu amplitudy na zkreslení signálu) a krokování odporu R_b v hodnotách (0,5 2 5) $M\Omega$ (vliv polohy pracovního bodu na zkreslení signálu). Slovně vyhodnoťte.

Ukončení analýzy: F3.

Analýza kmitočtové charakteristiky (nepovinné, dle uvážení učitele):

Spustíme **kmitočtovou analýzu** („AC“). Do sešitů načrtneme kmitočtovou závislost zesílení. Změříme dolní a horní mezní kmitočet a zesílení v pásmu středních kmitočtů.

Podle pokynů učitele provedte krokování vazební kapacity C_v v hodnotách (0,1 1 10) μF (vliv kapacity na dolní mezní kmitočet). Vyhodnoťte v jednoduché tabulce (C_v , f_d).

Ukončení analýzy: F3.

2. Zesilovač s unipolárním tranzistorem MOSFET s kanálem N, soubor **1_2.CIR**, schéma b)

Výpočet stejnosměrného pracovního bodu:

Otevřeme soubor **1_2.CIR** (obvod na obr. b). Odpor R_{g1} nastavíme na $10M\Omega$. V režimu dynamické DC analýzy krokujeme R_{g2} . Zjistíme stav při hodnotě R_{g2} z numerického

cvičení. Dostavíme R_{g2} tak, aby na kolektoru bylo zhruba 6V. Tyto konečné hodnoty napětí a proudů si poznamenejme přímo do obr. b).

Analýza časových průběhů a kmitočtové charakteristiky: viz zesilovač s bipolárním tranzistorem. Krokování amplitudy, R_{g1} a C_v podle pokynů učitele.

Počítačové cvičení (práce s programem SNAP)

1. Zesilovač s bipolárním tranzistorem, soubor **BJT.CIR**, lineární model pro střední kmitočty

Výpočet střídavého zesílení:

Otevřeme soubor **BJT.CIR** (lineární model obvodu na obr. a) pro střední kmitočty). Schéma okreslíme do sešitu. Zjistíme a zapíšeme parametry součástek včetně tranzistoru. Spustíme analýzu („Analysis/Snap“). V okně SNAPu aktivujeme K_v (přenos napětí). Zapíšeme výsledky podle pokynů učitele. Srovnáme s výsledky získané MicroCapem.

2. Zesilovač s tranzistorem MOSFET, soubor **MOS.CIR**, lineární model pro střední kmitočty

Viz zesilovač s bipolárním tranzistorem.

Laboratorní cvičení (práce s nepájivým polem)

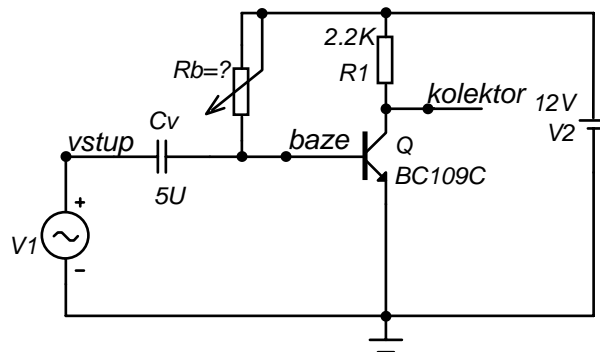
1. Zesilovač s bipolárním tranzistorem NPN, schéma a)

Nejprve sestavte obvod bez vazebního kondenzátoru a zdroje signálu. Změnou odporu R_b nastavte ss napětí na kolektoru tranzistoru 6V. Změřte všechna uzlová napětí a z nich dopočítejte větvové proudy. Porovnejte s výsledky z NC a PC.

Doplňte obvod o C_v a generátor signálu. Proveďte „oživení“ zesilovače pomocí osciloskopu. Zesilovač nesmíte přebudit – výstupní napětí nesmí vykazovat zkreslení. Měřte při kmitočtu 1kHz. Zakreslete časové průběhy vstupního napětí, napětí na bázi a na kolektoru, včetně ss posunutí. Změřte amplitudy a vypočítejte z nich střídavá zesílení.

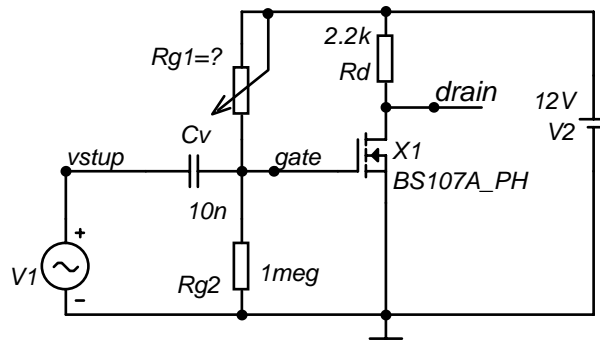
2. Zesilovač s unipolárním tranzistorem MOSFET s kanálem N, schéma b)

Viz zesilovač s bipolárním tranzistorem. Napětí 6V na kolektoru nastavte změnou odporu R_{g1} .



Zdroj V1 je harmonický 1kHz/20mV

a)



Zdroj V1 je harmonický 1kHz/200mV

b)

Povinné výstupy v pracovních sešitech:

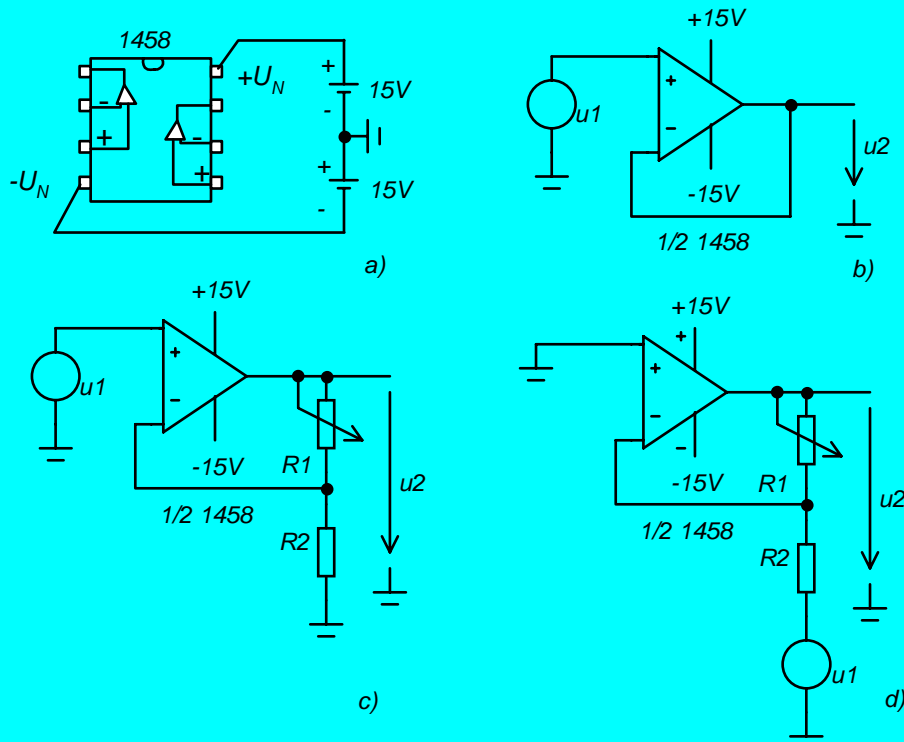
- PC:**
1. Hodnoty R_b a R_{g1} pro napětí na kolektoru 6V. Srovnání s výsledky z NC.
 2. Stejnoseměrná napětí a proudy v daném prac. bodu pro oba zesilovače.
 3. Náčrty časových průběhů pro oba zesilovače, s měřítky na osách, kóty atd.
 4. Poznámky k experimentům s krokováním parametrů součástek.
 5. Přehledné srovnání výsledků získaných v NC a PC, objasnění rozdílů, zhodnocení.
- LC:**
1. Hodnoty R_b a R_{g1} pro napětí na kolektoru 6V. Srovnání s výsledky z NC a PC.
 2. Změřená stejnosměrná napětí a vypočtené proudy v daném prac. bodu pro oba zesilovače.
 3. Náčrty časových průběhů pro oba zesilovače, s měřítky na osách, kóty atd.
 4. Přehledné srovnání výsledků získaných v PC a LC, objasnění rozdílů, zhodnocení.

3.2 Ověřování základních vlastností OZ

3.2.1 Cíle předběžných rozborů, návrhů a následných experimentů

Cíle předběžných rozborů a návrhů na NC:

- Zopakovat správný způsob zajištění symetrického napájení operačního zesilovače (obr. 3.7 a).
- Zopakovat základní zapojení OZ jako jednotkového zesilovače (obr.3.7 b), neinvertujícího zesilovače (obr.3.7 c) a invertujícího zesilovače (obr.3.7 d), včetně vzorců pro stejnosměrné zesílení.
- U zapojení z obr. b), c) a d) odvodit teoretické statické převodní charakteristiky $U_2=f(U_1)$ pro odpory $R_1=(1, 10, 100)\text{k}\Omega$, $R_2=1\text{k}\Omega$, s přihlédnutím k saturačním napětím OZ.
- Zopakovat význam parametru SR (*Slew Rate*, mezní rychlost přeběhu) operačního zesilovače a vliv tohoto faktoru na zkreslení signálu. Určit vztah mezi amplitudou a kmitočtem výstupního napětí OZ 1458, který by toto zkreslení vylučoval.
- Zopakovat standardní průběh amplitudové kmitočtové charakteristiky OZ 1458.
- Odvodit amplitudové kmitočtové charakteristiky neinvertujícího zesilovače z obr.3.7 c) pro různé hodnoty stejnosměrného zesílení.
- Upozornit na různý charakter lineárního zkreslení (vliv kmitočtové charakteristiky) a nelineárního zkreslení (vliv SR) a nutnost respektování skutečnosti, že tato zkreslení mohou působit současně.



Obr. 3.7: a) Zajištění symetrického napájení operačních zesilovačů typu 1458, b) OZ jako jednotkový zesilovač, c) neinvertující zapojení OZ, d) invertující zapojení OZ.

Cíle experimentů:

- Ověřit správnost výsledků z NC a vymežit podmínky jejich platnosti s ohledem na reálné vlastnosti operačního zesilovače.
- Osvojit si zásady pro sestavování a ožiování jednoduchých lineárních aplikací operačních zesilovačů.
- Uvědomit si, že OZ je nízkofrekvenční zesilovač a že i v oblasti relativně nízkých kmitočtů může být limitujícím faktorem nejen kmitočtová charakteristika, ale zejména mezní rychlost přeběhu OZ.
- Uvědomit si nepřímou úměru mezi zesílením zesilovače a dosažitelnou šířkou pásma.
- Uvědomit si nepřímou úměru mezi amplitudou a kmitočtem výstupního napětí operačního zesilovače z hlediska zamezení zkreslení způsobovaného mezní rychlostí přeběhu OZ.

3.2.2 Rozbory a návrhy*Stejnoseměrné vlastnosti OZ a jeho základních zapojení*

Typ OZ používaný k experimentům: 1458 (v podstatě dvojitý OZ typu 741).

Stejnoseměrné zesílení: $A_0 \approx 200000$ (ideálně ∞).

Vstupní odpor: $R_{in} \approx 1M\Omega$ (ideálně ∞).

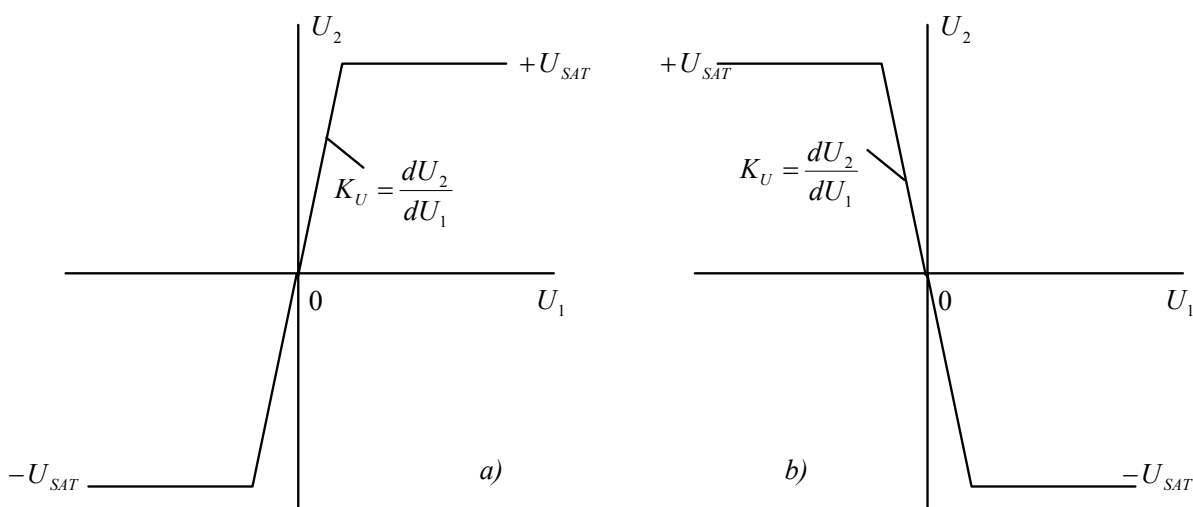
Výstupní odpor: $R_{out} \approx 75\Omega$ (ideálně 0).

Rozsah výstupního napětí: od $-U_{SAT}$ do $+U_{SAT}$, $U_{SAT} \approx U_{napájecí} - (1 \text{ až } 2)$ volty.

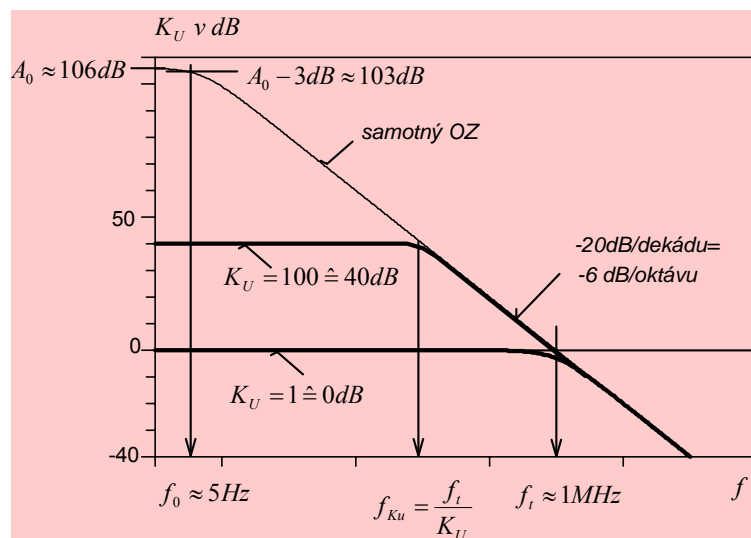
Vzorce pro ss zesílení (platí pro ideální OZ, pro reálný OZ platí při $|K_u| \ll A_0$):

$$K_U = 1 + \frac{R_1}{R_2} \dots \text{neinvertující zesilovač na obr. 3.7 c),}$$

$$K_U = -\frac{R_1}{R_2} \dots \text{invertující zesilovač na obr. 3.7 d).}$$



Obr. 3.8: Statické převodní charakteristiky a) neinvertujícího, b) invertujícího zapojení s OZ.

Dynamické vlastnosti OZ a jeho základních zapojení**Kmitočtová charakteristika** (číselné údaje platí pro typ 1458).

Obr. 3.9: Amplitudová kmitočtová charakteristika OZ 1458 (slabě) a neinvertujících zapojení se zesílením K_U (silně).

Stejněsměrné zesílení OZ 1458 $A_0 \approx 200000$ odpovídá údaji asi 106 dB. K poklesu zesílení o 3 dB dochází už na kmitočtu kolem 5 Hz. Na tranzitním kmitočtu f_t kolem 1 MHz již zesílení klesne na hodnotu 1 (tj. 0 dB). Při dalším zvyšování kmitočtu dojde na kmitočtové charakteristice k tzv. druhému lomu, který již v **obr. 3.9** není vyznačen.

Po snížení zesílení pomocí rezistorů R_1 a R_2 v neinvertujícím zapojení z obr. 3.7 c) na hodnotu K_U dojde k rozšíření šířky pásma zesilovače podle **obr. 3.9** do hraničního kmitočtu

$$f_{Ku} = \frac{f_t}{K_U}$$

Například pro odpory $R_1 = (0, 1, 10, 100) \text{ k}\Omega$ a $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$ to znamená nastavené zesílení 1, 2, 11 a 101 a hraniční kmitočty přibližně (1000, 500, 91, 9.9) kHz. S typem OZ 1458 tedy zkonstruujeme sledovač napětí pracující zhruba až do 1 MHz, avšak zesilovač se zesílením cca 100 bude využitelný jen cca do 10 kHz.

Mezní rychlost přeběhu (SR – Slew rate)

Je maximální možná rychlost změny výstupního napětí OZ, limitovaná interními mechanismy zesilovače. U typu 1458 činí

$$SR \approx 0,5 \text{ V} / \mu\text{s}.$$

Mění-li se zpracovávaný signál rychleji, nestačí OZ tyto změny sledovat a příslušný segment signálu „ořízne“. Vznikne typické zkreslení. U harmonického signálu, sloužícího např. k proměření kmitočtové charakteristiky, dochází k jeho nejrychlejším změnám v okamžicích průchodu nulou. Zde je derivace signálu rovna součinu jeho amplitudy a kruhového kmitočtu. Aby nedošlo k zkreslení, musí být tento součin menší než je parametr SR operačního zesilovače:

$$2\pi f U_2 < SR$$

Například při kmitočtech zesilovaného signálu (1000, 500, 91, 9.9) kHz (jsou to hraniční kmitočty třídecibelového poklesu zesílení o hodnotách 1, 2, 11 a 101, viz výše) vycházejí maximální amplitudy výstupního napětí OZ (80, 159, 875, 8037) mV. Z pohledu kmitočtové charakteristiky tedy můžeme realizovat jednotkový zesilovač pracující až do 1MHz, ovšem vlivem konečné hodnoty SR jím lze zpracovat signál o maximální amplitudě pouhých 80mV.

3.2.3 Návod na cvičení

Následuje návod na počítačové a laboratorní cvičení.

Ověřování základních vlastností OZ
Počítačové cvičení (PC) a laboratorní cvičení (LC) č. 2

Příprava v pracovních sešitech musí obsahovat:

1. Toto zadání s daty konání cvičení.
2. Vypsání hodnoty SR , A_0 , f_0 , f_i u operačního zesilovače typu 741, resp. 1458.
3. Vzorce pro zesílení neinvertujícího a invertujícího zapojení s ideálním OZ.

Zadání:

1. Zobraďte statickou převodní charakteristiku $U_2=f(U_1)$ pomocí simulačního programu i pomocí osciloskopu (obr. 1).
2. Změřte charakteristiku metodou „bod po bodu“.
3. Zjistěte pozitivní a negativní rychlost přeběhu SR (simulací i měřením).
4. Studujte vliv SR na zkreslení harmonického signálu (simulací i měřením).
5. Zjistěte amplitudovou kmitočtovou charakteristiku zesilovače (simulací, měření je nepovinné).

Analyzujte tato zapojení:

- ✓ OZ zapojený jako sledovač napětí (obr. 2). Realizujte všechny body zadání 1 až 5.
- ✓ OZ jako neinvertující zesilovač (obr. 3), $R_1=(1, 10, 100)\text{k}\Omega$, $R_2=1\text{k}\Omega$. Realizujte body 1, 5. U bodu 5 ověřte poučku $A_0f_0=f_T$.
- ✓ OZ jako invertující zesilovač (obr. 4), $R_1=(1, 10, 100)\text{k}\Omega$, $R_2=1\text{k}\Omega$. Na vstup přiveďte nf harmonický signál a ověřte zesilovací schopnosti obvodu (simulací i měřením).

Pokyny k počítačové simulaci (MicroCap):

Obvody jsou modelovány v souborech:

2_1.cir – sledovač (obr 2), **2_2.cir** – neinvertující zesilovač (obr. 3), **2_3.cir** – invertující zesilovač (obr. 4).

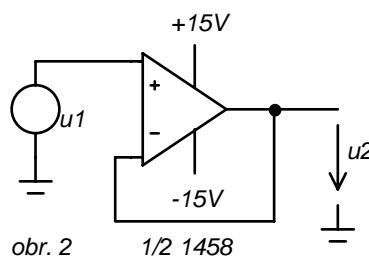
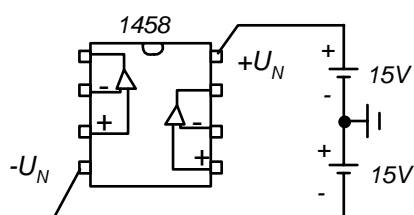
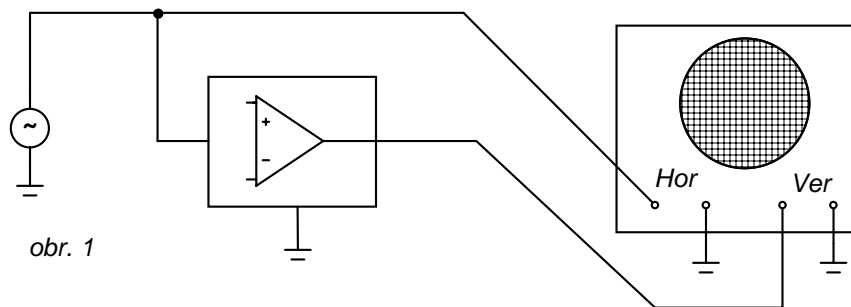
U všech tří obvodů proveďte tyto simulace:

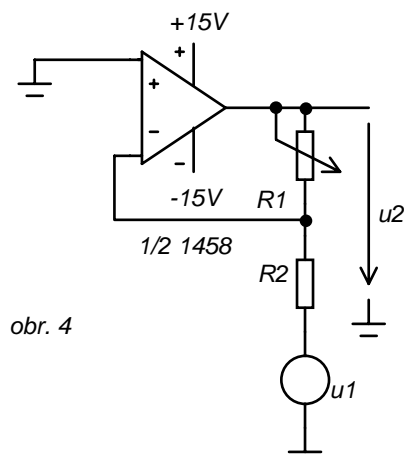
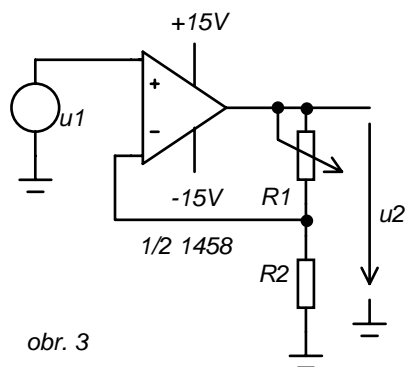
- a) Dynamickou DC analýzu. Zjistěte stejnosměrná napětí a proudy na součástkách, vynesete přímo do schématu. Srovnajte s teoretickými hodnotami.
- b) Analýzu „Transient“. Okreslete si do sešitu časové průběhy a z nich stanovte požadované údaje (mezí rychlosti přeběhu při obdélíkovém buzení, zesílení při harmonickém buzení).
- c) Analýzu „AC“. Okreslete kmitočtové charakteristiky. Srovnajte odečtené zesílení na nízkých kmitočtech s výsledky z bodu b), mezí a tranzitní kmitočty s teoretickými hodnotami.
- d) Analýzu „DC“. Okreslete napěťové převodní charakteristiky. Z nich odečtete saturační napětí a stejnosměrné zesílení, srovnajte s výsledky z bodů b) a c).

Pokyny k měření na kontaktním poli:

Nejprve zajistěte stejnosměrné napájení operačních zesilovačů a teprve pak zapojte ostatní součástky.

- Ad 1. Na kanál A osciloskopu přiveďte výstupní napětí, na kanál B vstupní napětí. Zobrazte pouze stopu kanálu A. Vyněte časovou základnu (přepínač základny na levý doraz).
- Ad 2. Změřte pouze souřadnice tří bodů: počátek kladné a počátek záporné saturace, výstupní napětí pro nulové vstupní napětí. Těmito body proložte převodní charakteristiku. Odečtěte střídavé zesílení a výstupní napětěřovou nesymetrii.
- Ad 3. Na vstup přiveďte bipolární obdélníkový signál o rozkmitu 1V. Pomocí osciloskopu s vhodně nastavenou časovou základnou odečtěte pozitivní (negativní) SR jako strmost nástupné (sestupné) hrany výstupního napětí ve $V/\mu s$.
- Ad 4. Na vstup přiveďte harmonický signál o kmitočtu 10kHz. Vstupní a výstupní napětí pozorujte na osciloskopu. Zvětšujte amplitudu buzení, až se objeví zkreslení vlivem SR . Měřením na dalších kmitočtech ověřte, že k zamezení zkreslení stačí dodržet podmínku $\omega \cdot U < SR$.
- Ad 5. (nepovinné). Na vstup přiveďte harmonický signál takové amplitudy, aby nedocházelo k zkreslení výstupu jak saturací, tak vlivem SR . Měření proveďte pouze ve 2 bodech. Odečtěte zesílení na nízkých kmitočtech A_0 (1. bod) a kmitočet třídíbelového poklesu f_0 (2. bod). Kromě toho u zapojení se zesílením větším než 1 změřte tranzitní kmitočet f_T (kmitočet poklesu zesílení na hodnotu 1). Pomocí těchto údajů načrtněte do jednoho grafu charakteristiky všech měřených zapojení (použijte semilogaritmický papír).





Povinné výstupy v pracovních sešitech:

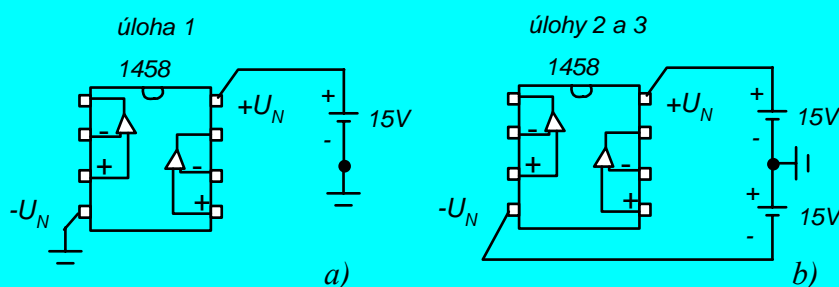
1. Použité přístroje, záznam o průběhu simulací a měření, náčrty, poznámky, dedukce a závěry.
2. Statické převodní charakteristiky pro obvody na obr. 2 a 3.
3. Zjištěné hodnoty SR a jejich srovnání s katalogovým údajem.
4. Kmitočtové charakteristiky obvodů na obr. 2 a 3.
5. Zhodnocení výsledků podle zadání.

3.3 Nízkofrekvenční zesilovače s OZ

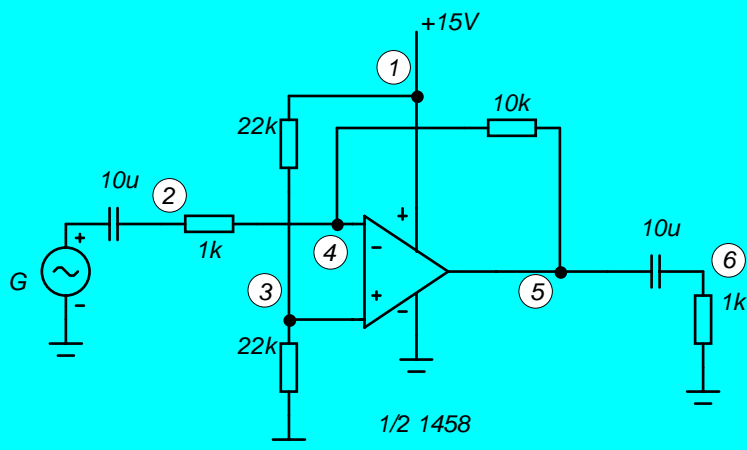
3.3.1 Cíle předběžných rozborů, návrhů a následných experimentů

Cíle předběžných rozborů a návrhů na NC:

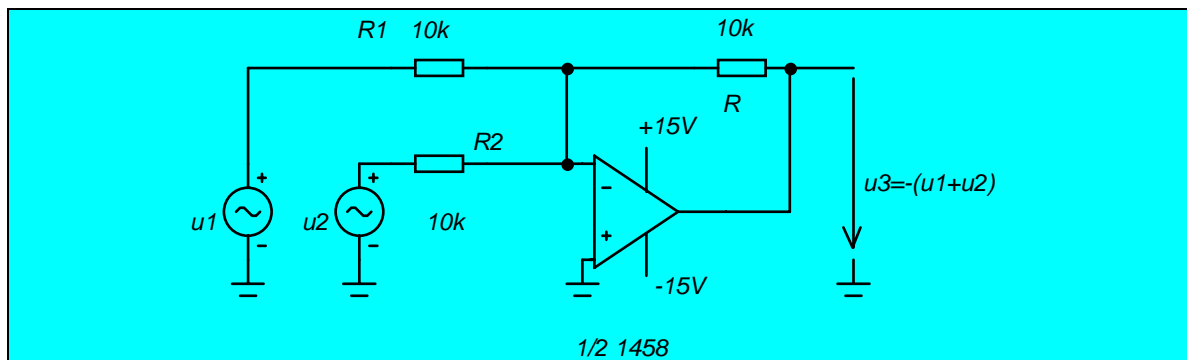
- Zopakovat správný způsob zajištění symetrického napájení operačního zesilovače (**obr. 3.10 b**) a napájení z jediného zdroje (**obr. 3.10 a**).
- Podrobně analyzovat stejnosměrné a střídavé poměry v zapojení invertujícího zesilovače s nesymetrickým napájením podle **obr. 3.11**.
- Načrtnout časové průběhy jednotlivých uzlových napětí v invertujícím zesilovači, je-li vstupní signál harmonický o kmitočtu 1kHz a amplitudě 200mV. Snažit se o detailní pochopení funkce obvodu.
- Odhadnout maximální amplitudu vstupního signálu z hlediska zamezení saturace operačního zesilovače.
- Analýzou zapojení na **obr. 3.12** a **obr. 3.13** dokázat, že se jedná o sumační a diferenční zesilovače.



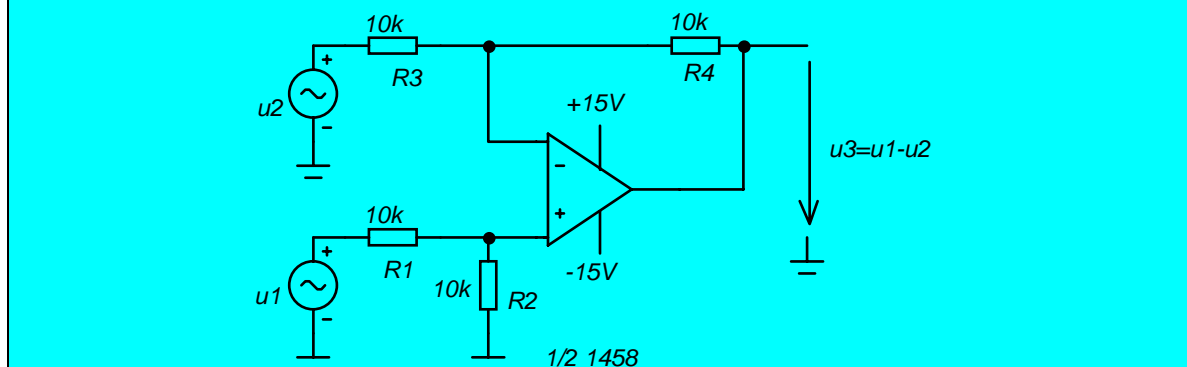
Obr. 3.10: a) nesymetrické, b) symetrické napájení operačního zesilovače.



Obr. 3.11: Střídavý zesilovač s nesymetrickým napájením operačního zesilovače.



Obr. 3.12: Sumační zesilovač.



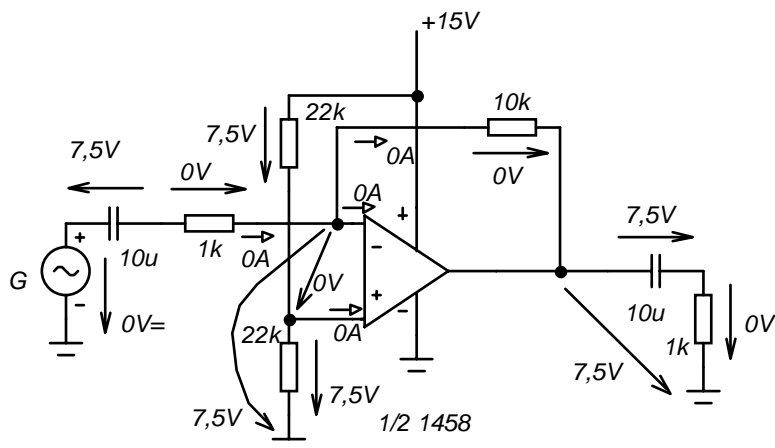
Obr. 3.13: Diferenční zesilovač.

Cíle experimentů:

- Ověřit správnost výsledků z NC a vymežit podmínky jejich platnosti s ohledem na reálné vlastnosti operačního zesilovače a tolerance odporů.

3.3.2 Rozbory a návrhy*Střídavý zesilovač s nesymetrickým napájením*

a) Analýza stejnosměrných poměrů – obr. 3.14.

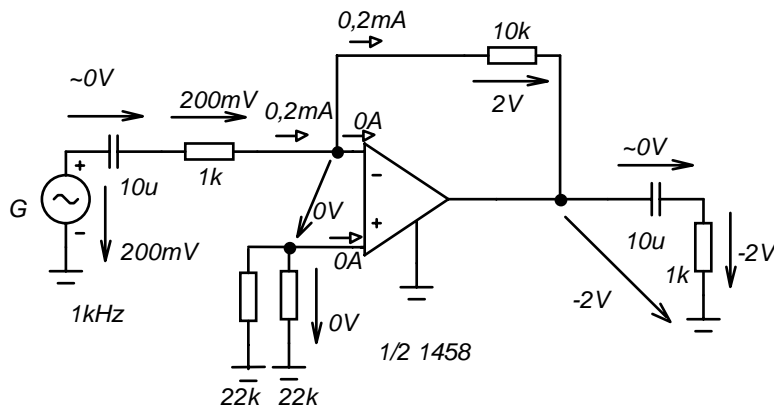


Obr. 3.14: Stejnosměrné poměry v zesilovači s nesymetrickým napájením.

V obvodu působí záporná zpětná vazba (odpor 10k z výstupu na invertující vstup OZ). Proto je možné pokládat diferenční napětí mezi vstupy OZ za nulové. Na každém z rezistorů 22k, které tvoří nezátížený dělič napětí, je polovina napájecího napětí, tj. 7,5V. V důsledku nulového diferenčního napětí je toto napětí i mezi invertujícím vstupem OZ a zemí.

Rezistorem 1k připojeným k invertujícímu vstupu neteče proud (je v sérii s kapacitou), proto je na něm nulové napětí. Proud neteče ani rezistorem 10k. Výstupní napětí OZ je tedy 7,5V. Celé toto napětí je na „výstupním“ kapacitou, na zátěži 1k není úbytek napětí, protože zde neteče stejnosměrný proud.

b) Analýza střídavých poměrů – **obr. 3.15**.



Obr. 3.15: Střídavé poměry v zesilovači s nesymetrickým napájením.

Po vyřazení napájecího zdroje zkratováním dostaneme zjednodušený model na **obr. 3.15**.

Kapacitě 10 μ F odpovídá na kmitočtu 1kHz reaktance asi 16 Ω . Protože oba kapacitory jsou v sérii s rezistory o odporech 1k Ω , můžeme úbytky napětí na kapacitorech zanedbat. Na paralelních rezistorech 22k není žádné napětí, protože jimi netečou proudy. Napětí na rezistoru 1k, připojenému k invertujícímu vstupu OZ, je tedy 200mV a teče jím proud 0,2mA. Tento proud celý teče do rezistoru 10k a vytváří na něm úbytek napětí 2V. Toto napětí se invertované objeví na výstupu OZ a následně i na zátěži 1k.

Střídavé zesílení stupně je tedy -10.

Načrtněte si časové průběhy napětí v jednotlivých uzlech oproti zemi a rozhodněte o maximální možné velikosti vstupního napětí, které ještě nevyvolá ořezání signálu vlivem saturace OZ.

Sumační zesilovač z obr. 3.12

Analýzou obvodu dokažte, že pro výstupní napětí platí

$$u_2 = -\left(\frac{R}{R_1}u_1 + \frac{R}{R_2}u_2\right) = -(u_1 + u_2).$$

Diferenční zesilovač z obr. 3.13

Analýzou obvodu dokažte, že pro výstupní napětí platí

$$u_3 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) u_1 - \frac{R_4}{R_3} u_2 = u_1 - u_2.$$

3.3.3 Návod na cvičení

Následuje návod na počítačové a laboratorní cvičení.

Nízkofrekvenční zesilovače s OZ
Počítačové cvičení (PC) a laboratorní cvičení (LC) č. 3

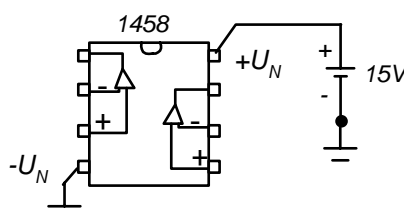
Příprava v pracovních sešitech musí obsahovat:

1. Toto zadání, vedle názvu cvičení doplňte data jejich absolvování.
2. Vypočtená stejnosměrná napětí v uzlech 1, 2, 3, 4, 5 a 6 oproti zemi (úloha č. 1).
3. Vypočtená střídavá napětí v uzlech 1, 2, 3, 4, 5 a 6 oproti zemi, je-li střídavé napětí generátoru 1V (úloha č. 1).
4. Vypočtené střídavé zesílení (úloha č. 1).
5. Odvození vztahu pro u_3 u zapojení na obr. 2 a 3.

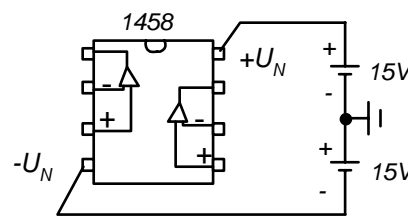
Zadání:

1. U zesilovače z obr. 1 zjistěte stejnosměrná a střídavá napětí ve všech uzlech oproti zemi.
2. U sumačního zesilovače podle obr. 2 ověřte, že výstupní napětí představuje invertovaný součet vstupních napětí.
3. U diferenčního zesilovače podle obr. 3 ověřte, že výstupní napětí představuje rozdíl vstupních napětí.

úloha 1



úlohy 2 a 3



Pokyny k zadání:

PC: Obvody analyzujte simulačním programem.

LC: Zapojení realizujte na kontaktním nepájivém poli.

Nejprve zajistěte stejnosměrné napájení operačních zesilovačů podle obrázku a teprve pak zapojte ostatní součástky.

Ad 1. PC: Soubor **3_1.cir**. Zvolte nesymetrické ss napájení OZ (viz obr. 1). Vypočtete stejnosměrná napětí ve všech uzlech oproti zemi (analýza „Dynamic DC“). V druhé fázi časové průběhy napětí ve všech uzlech, má-li napětí generátoru G amplitudu 1V a kmitočet 1kHz (analýza „Transient“). V třetí fázi zobrazte kmitočtové charakteristiky (analýza „AC“) přenosů napětí do jednotlivých uzlů. Vyhodnoťte podle pokynů učitele.

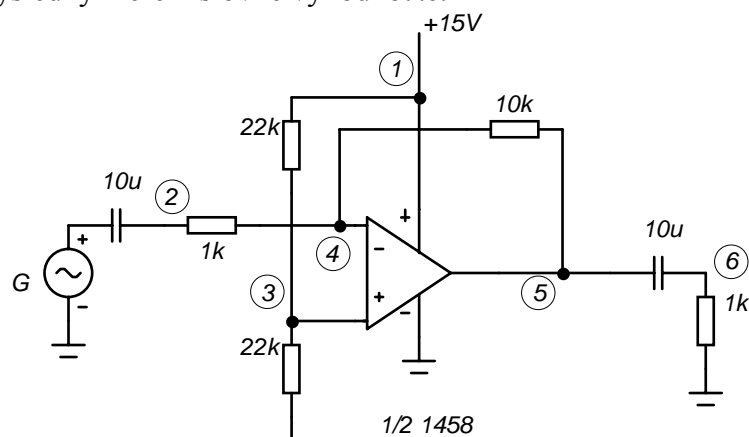
LC: Zapojte nesymetrické ss napájení OZ. Odpojte generátor signálu G a vstupní bránu zkratujte. Multimetrem změřte stejnosměrná napětí uzlů 1 až 6 oproti zemi, srovnajte s hodnotami z přípravy a z PC.

Odstraňte zkrat vstupní brány a připojte generátor harmonického napětí o kmitočtu asi 1kHz. Na první kanál osciloskopu přiveďte napětí z generátoru, na druhý kanál napětí na uzlu 5. Zapněte zobrazení ss složky. Napětí generátoru nastavte tak, aby výstupní napětí nevykazovalo ořezávání v důsledku saturace OZ. Změřte velikost vstupního a výstupního napětí a určete střídavé zesílení. Postupně zobrazujte napětí na uzlech 1 až 6 a proveďte jejich náčrt pro srovnání do jediného grafu. Dbejte na dodržování měřítek, zakreslete správně stejnosměrná posunutí jednotlivých signálů. Snažte se o detailní pochopení funkce obvodu.

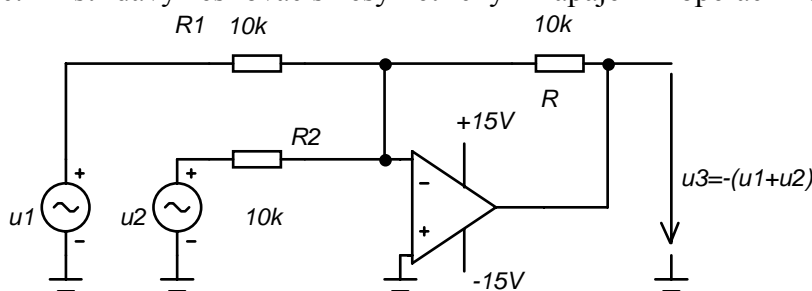
Ad 2. PC (soubor **3_2.cir**), LC: Napájení OZ doplňte na symetrické. Na vstupy připojte dva nezávislé generátory harmonického signálu: na vstup „ u_1 “ 1kHz/5V amplituda, na vstup „ u_2 “ 10kHz/0,5V amplituda (orientační hodnoty). Přesvědčete se o tom, že na výstupu je invertovaná superpozice obou signálů (LC: nejprve nastavte napětí u_1 a u_2 utlumte, pak nastavte u_2 s utlumeným u_1 , nakonec nastavte oba vstupní signály).

Ad 3. PC (soubor **3_3.cir**), LC: Na vstupy připojte dva nezávislé generátory harmonického signálu: na vstup „ u_1 “ 1kHz/5V amplituda, na vstup „ u_2 “ 10kHz/0,5V amplituda (orientační hodnoty). Přesvědčete se o tom, že na výstupu je rozdíl obou signálů (LC: nejprve nastavte napětí u_1 a u_2 utlumte, pak nastavte u_2 s utlumeným u_1 , nakonec nastavte oba vstupní signály).

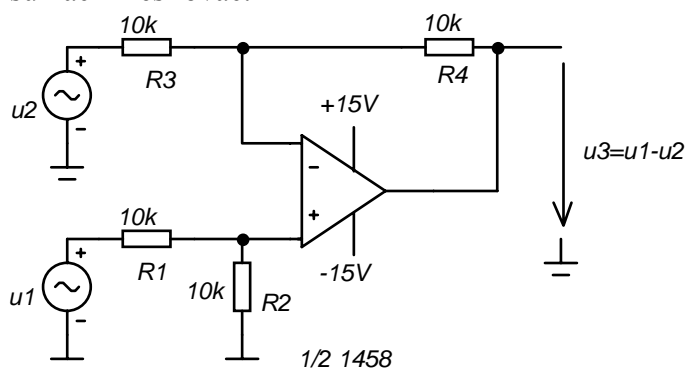
LC: Na závěr proveďte průkaznější ověření, že výstupní napětí je rozdílem vstupních napětí: přiveďte na oba vstupy stejný signál. Nejsnadněji to provedete tak, že jeden z generátorů odpojíte a oba vstupy propojíme. Na výstupu by pak měl být nulový signál. Výsledky měření slovně vyhodnoťte.



Obr. 1. Úloha č. 1 - střídavý zesilovač s nesymetrickým napájením operačního zesilovače.



Obr. 2. Úloha č. 2 - sumační zesilovač.



Obr. 3. Úloha č. 3 - diferenční zesilovač.

Povinné výstupy v pracovních sešitech:

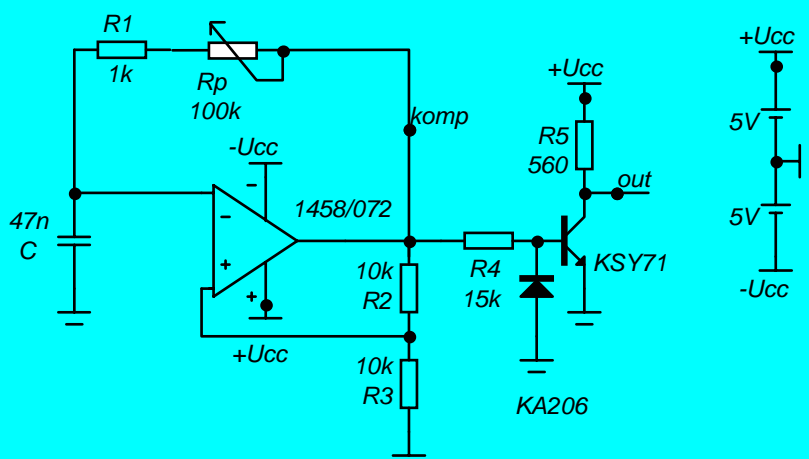
1. Použité přístroje, záznam o průběhu simulací a měření, náčrty, poznámky, dedukce a závěry.
2. Zjištěné (pomocí simulátoru a měření) hodnoty stejnosměrného a střídavého napětí v uzlech 1 až 6 oproti zemi, časové průběhy (úloha č. 1).
3. Pomocí simulátoru zjištěná ss napětí a proudy u zapojení na obr. 2 a 3.

3.4 AKO a generátory signálů s operačními zesilovači

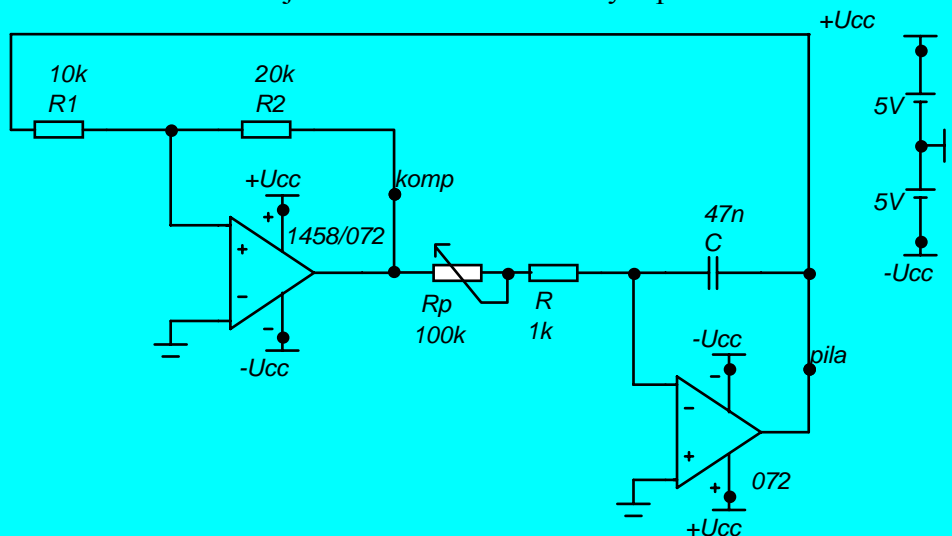
3.4.1 Cíle předběžných rozborů, návrhů a následných experimentů

Cíle předběžných rozborů a návrhů na NC:

- Porozumět funkci astabilního klopného obvodu (AKO) z obr. 3.16, tvořeného invertujícím komparátorem s hysterezí, RC článkem a tranzistorovým převodníkem úrovně.
- Odvodit vzorec pro kmitočet generovaných signálů a navrhnout součástky tak, abychom získali generátor obdélníkových kmitů se střídou (poměr šířky impulsu a šířky mezery) 1:1, úrovněmi 0V a 5V a s možností plynulé změny kmitočtu od 100Hz do 10kHz.
- Porozumět funkci generátoru pilovitých a obdélníkových kmitů z obr. 3.17, tvořeného neinvertujícím komparátorem s hysterezí a invertujícím integrátorem.
- Odvodit vzorec pro kmitočet generovaných signálů a navrhnout součástky tak, abychom získali generátor obdélníkových kmitů se střídou 1:1 a odpovídajících pilovitých kmitů, s možností plynulé změny kmitočtu od 100Hz do 10kHz.
- Ověřit možný vliv mezní rychlosti přeběhu OZ na funkci obou generátorů.



Obr. 3.16: AKO s jedním OZ a tranzistorovým převodníkem úrovně.



Obr. 3.17: Generátor pilovitých kmitů.

Cíle experimentů:

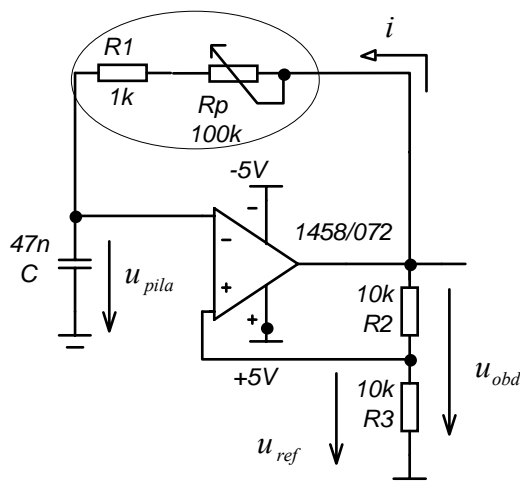
- Ověřit správnost výsledků z NC a vymežit podmínky jejich platnosti s ohledem na reálné vlastnosti operačního zesilovače a tolerance odporů.

3.4.2 Rozbory a návrhy

Návrh AKO z obr. 3.18.

Na základě rozboru funkce obvodu a příslušných časových průběhů dokažte následující:

$$R \in \langle 1,101 \rangle k\Omega$$



Obr. 3.18: AKO.

Opakovací kmitočet generovaných signálů je

$$F \doteq \frac{0,455}{RC}$$

Obdélníkové napětí u_{obd} má úroveň cca $-4V$ a $+4V$.

„Pilovité“ napětí u_{pila} má rozkmit cca od $-2V$ do $+2V$.

„Překlápěcí“ hladiny komparátoru jsou cca $u_{ref} = -2V$ a $+2V$.

Maximální proud i pro nabíjení kapacitoru bude

$$i_{\max} = \frac{u_{obd,\max} - u_{pila,\min}}{R_{\min}} = \frac{4 - (-2)}{R_1} = \frac{6V}{R_1}.$$

Tento proud musí být menší než $20mA$ (maximální přípustný výstupní proud OZ typu 1458). Proto

$$R_1 > \frac{6V}{20mA} = 300\Omega.$$

Volíme s rezervou

$$R_1 = 1k\Omega.$$

Odpor R_1 udává maximální generovaný kmitočet $10kHz$. Z toho vychází kapacita C

$$C \doteq \frac{0,455}{R_1 F_{\max}} = \frac{0,455}{1000 \cdot 10000} = 45,5nF .$$

Zvolíme kapacitu z řady E12

$$C = 47nF .$$

Minimální kmitočet 100Hz, který je 100x menší než kmitočet F_{\max} , odpovídá maximálnímu nabíjecímu odporu R , tj. $R_1 + R_p$. Proto

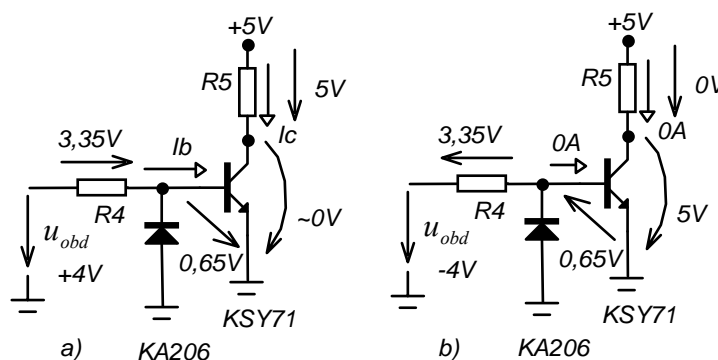
$$R_1 + R_p = 100R_1 = 100k\Omega \Rightarrow R_p = 99k\Omega .$$

Odpor potenciometru volíme z řady

$$R_p = 100k\Omega .$$

Přepočítejte, jak se dodatečné změny C a R_p projeví na posunech kmitočtů F_{\min} a F_{\max} .

Návrh tranzistorového převodníku úrovně z obr. 3.19.



Obr. 3.19: Tranzistorový převodník úrovně z $\pm 4V$ na $0/5V$.

Vlastnosti spínacího tranzistoru KSY71:

- Mezní hodnota závěrného napětí editor-báze: 5V.
- Doporučený kolektorový proud sepnutého tranzistoru cca 10mA.
- Stejnoseměrné proudové zesílení h_{21E} : 40-120.
- Doba sepnutí/rozepnutí tranzistoru max. 12ns/18ns.

Návrh pro $u_{obd} = +4V$ (tranzistor sepnut, obr. 3.19a):

Mezi kolektorem a emitorem je zanedbatelné saturační napětí. Proto na R_5 je celé napětí zdroje 5V. Při doporučeném proudu kolektoru 10mA vychází

$$R_5 = \frac{5V}{10mA} = 500\Omega .$$

Volíme z řady E12 vyšší hodnotu (menší proud)

$$R_5 = 560\Omega .$$

Přepočtená hodnota kolektorového proudu bude

$$I_C = \frac{5V}{560\Omega} \doteq 8,93mA .$$

Proud báze vypočteme pomocí parametru h_{21E} . Aby tranzistor spolehlivě sepnul, je třeba použít k výpočtu minimální garantovanou hodnotu 40:

$$I_b = \frac{I_C}{h_{21E}} \doteq \frac{8,93mA}{40} \doteq 223\mu A.$$

Při odhadovaném napětí báze-emitor 0,65V vychází napětí na R_4 3,35V a R_4

$$R_4 \doteq \frac{3,35V}{223\mu A} \doteq 15k\Omega.$$

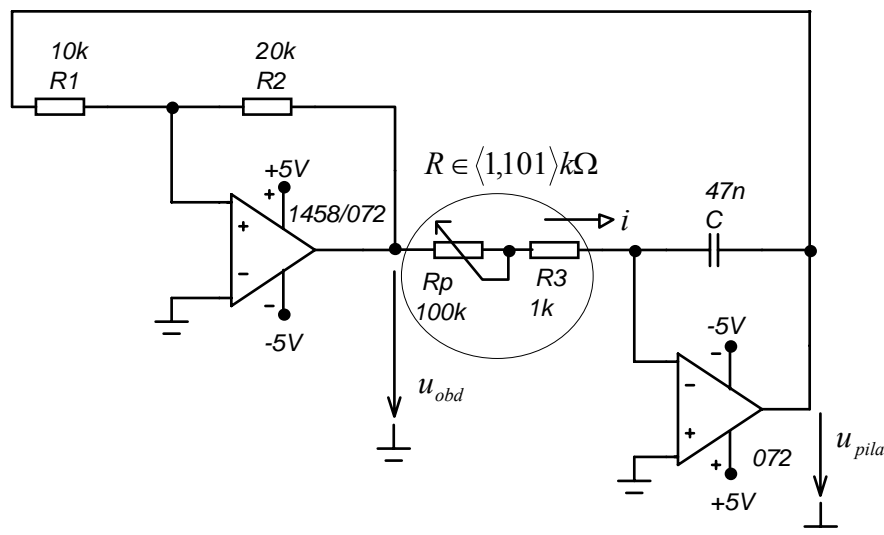
Poznámka: pokud v laboratoři zjistíte, že tranzistor nedostatečně spíná, totiž že jeho kolektorové napětí není nula, znamená to, že tranzistor má proudové zesílení ještě menší než 40. Pak je třeba zkusmo zmenšit odpor R_4 , např. na 12k Ω .

Návrh pro $u_{obd} = -4V$ (tranzistor rozepnut, obr. 3.19b):

Pokud bychom nezařadili ochrannou diodu, působilo by celé vstupní napětí -4V na uzavřeném přechodu báze-emitor. To by se pravděpodobně promítlo do snížení životnosti tranzistoru (mezní nepřekročitelná hodnota tohoto napětí je 5V). Zařazením diody se toto napětí sníží asi na 0,65V. Tranzistor je uzavřen a jeho kolektorové napětí je velmi přesně rovno 5V.

Návrh generátoru z obr. 3.20.

Na základě rozboru funkce obvodu a příslušných časových průběhů dokažte následující:



Obr. 3.20: Návrh generátoru tvarových kmitů.

Opakovací kmitočet generovaných signálů je

$$F = \frac{0,5}{RC}$$

Obdélníkové napětí u_{obd} má úroveň cca -4V a +4V.

„Pilovité“ (trojúhelníkovité) napětí u_{pila} má rozkmit cca od -2V do +2V.

„Překlápěcí“ hladiny komparátoru jsou cca -2V a +2V a jsou dány saturačním napětím 4V a poměrem odporů R_1 a R_2 .

Maximální proud i pro nabíjení kapacitoru bude

$$i_{\max} = \frac{u_{obd,\max}}{R_{\min}} = \frac{4V}{R_3}.$$

Tento proud musí být opět menší než 20mA, aby mohl být dodáván operačním zesilovačem. Proto

$$R_3 > \frac{4V}{20mA} = 200\Omega.$$

Volíme opět s rezervou

$$R_3 = 1k\Omega.$$

Odpor R_1 udává maximální generovaný kmitočet 10kHz. Z toho vychází kapacita C

$$C \doteq \frac{0,5}{R_3 F_{\max}} = \frac{0,5}{1000 \cdot 10000} = 50nF.$$

Zvolíme kapacitu z řady E12

$$C = 47nF.$$

Minimální kmitočet 100Hz, který je 100x menší než kmitočet F_{\max} , odpovídá maximálnímu nabíjecímu odporu R , tj. $R_1 + R_p$. Proto

$$R_1 + R_p = 100R_1 = 100k\Omega \Rightarrow R_p = 99k\Omega.$$

Odpor potenciometru volíme z řady

$$R_p = 100k\Omega.$$

Přepočítejte, jak se dodatečné změny C a R_p projeví na posunech kmitočtů F_{\min} a F_{\max} .

Kontrola vlivu mezní rychlosti přeběhu OZ:

Obě zapojení: napětí u_{obd} má úroveň -4V a +4V. Parametr $SR=0,5V/\mu s$ pro OZ1458 znamená, že k změně výstupního napětí OZ o 8V dojde v průběhu $8/SR=16\mu s$. Nejvyššímu generovanému kmitočtu 10kHz odpovídá opakovací perioda $100\mu s$ a šířka impulsu/mezery $50\mu s$. Při délkách hran impulsu $16\mu s$ to představuje již výrazné zkreslení, které se bude zpětně promítat do způsobu nabíjení akumulací kondenzátoru. V experimentální laboratoři proto vyzkoušejte náhradu OZ 1458 za rychlejší typ 072 s parametrem $SR = 13V/\mu s$.

3.4.3 Návod na cvičení

Následuje návod na počítačové a laboratorní cvičení.

AKO a generátory signálů s operačními zesilovači
Počítačové cvičení (PC) a laboratorní cvičení (LC) č. 4

Příprava v pracovních sešitech musí obsahovat:

1. Toto zadání, vedle názvu cvičení doplňte data jejich absolvování.
2. Kompletní návrhové postupy a výsledky z předcházejícího numerického cvičení.

Zadání:


1. U zapojení astabilního klopného obvodu podle obr. 1 zobrazte časové průběhy na výstupu komparátoru, na kapacitoru a na kolektoru tranzistoru, zjistěte rozkmity napětí. Určete rozsah generovaných kmitočtů. Prostudujte vliv rychlosti přeběhu operačního zesilovače na funkci obvodu.
2. U generátoru pilovitého signálu z obr. 2 zobrazte časové průběhy napětí v důležitých uzlech. Ověřte rozsah generovaných kmitočtů při přeladování potenciometrem R_p .
3. Srovnajte výsledky dosažené v NC, PC a LC a vysvětlete případné rozdíly.

Pokyny k zadání:

PC: Zapojení na obr. 1 a 2 (soubory **4_1.cir** a **4_2.cir**) analyzujte simulačním programem analýzou „Transient“.

LC: Obě zapojení realizujte na kontaktním nepájivém poli. Nejprve zajistěte stejnosměrné napájení operačních zesilovačů a teprve pak zapojte ostatní součástky.

Ad 1. PC: Použijte operační zesilovač 1458 (resp. 741). V analýze „Transient“ zobrazte časové průběhy na výstupu komparátoru, na kapacitoru a na kolektoru tranzistoru.

V první fázi proveďte analýzu v animačním módu („Animate“, , „Wait for time delay“). Snažte se porozumět funkci obvodu. Pak vypněte animaci („Don't wait“) a určete rozkmity napětí a rozsah generovaných kmitočtů pro $R_p = 0$ a $100k\Omega$.

Ověřte vliv mezní rychlosti přeběhu operačního zesilovače na funkci generátoru: Nastavte R_p na 100% (tj. kmitočť na maximum) a sledujte strmost hran na výstupu OZ. Pak nahraďte OZ za rychlejší typ 071 a simulaci zopakujte.

LC: V první fázi sestavte AKO bez tranzistorového převodníku úrovně. Použijte operační zesilovač typu 1458. Dvoukanálovým osciloskopem zobrazte časové průběhy na výstupu komparátoru a na kapacitoru, změřte rozkmit napětí. Změřte rozsah generovaných kmitočtů.

Poté doplňte a odzkoušejte tranzistorový převodník úrovně. V případě, že tranzistor nebude spínat na úroveň napětí 0V, je třeba zmenšit odpor R_4 (poradte se s učitelem).

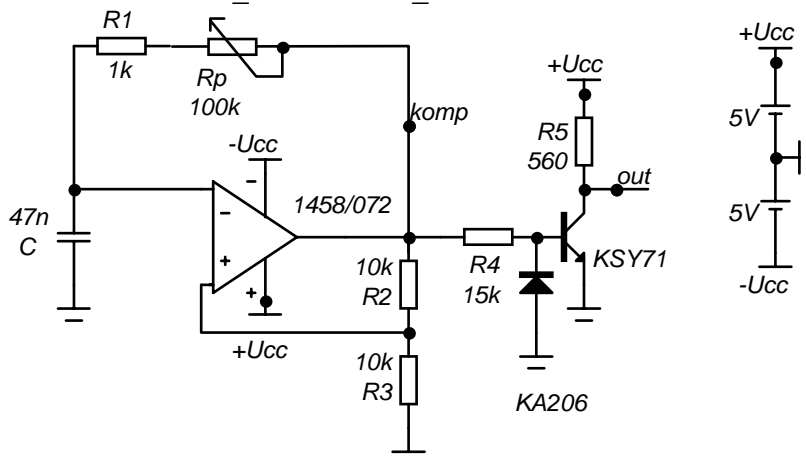
Ověřte vliv mezní rychlosti přeběhu operačního zesilovače na funkci generátoru: Potenciometrem nastavte nejvyšší kmitočť a sledujte strmost hran na výstupu OZ. Pak nahraďte OZ za rychlejší typ 071 a pozorování zopakujte. Sledované jevy proberte s učitelem a uveďte ve vyhodnocení měření.

Ad 2. PC, LC: V zapojení generátoru pilovitého a obdélníkového signálu podle obr. 2 použijte v první fázi operační zesilovač typu 1458/741. Zobrazte časové průběhy na výstupu komparátoru a na výstupu integrátoru, určete rozkmit napětí a rozsah generovaných kmitočtů. Pomocí animačního módu se pokuste o detailní porozumění funkce obvodu.

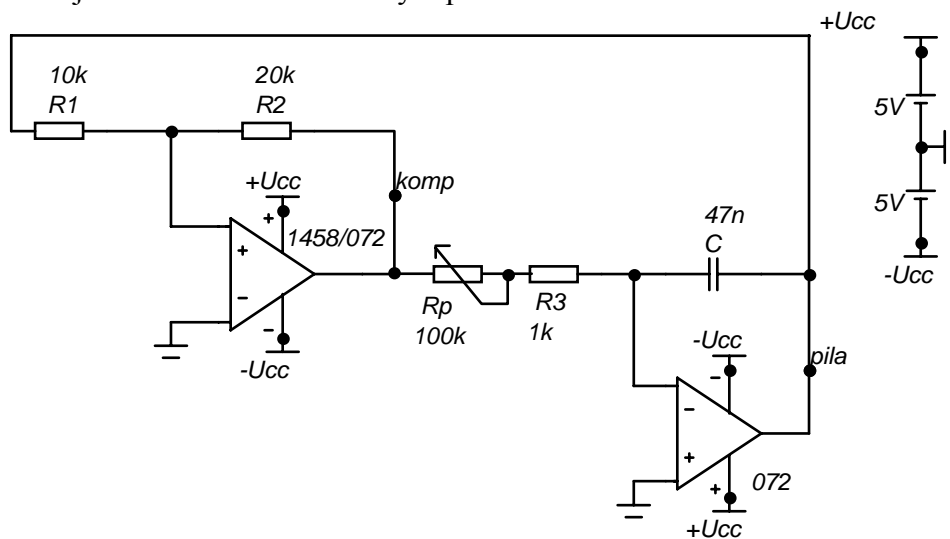
Prozkoumejte vliv rychlosti přeběhu operačního zesilovače na funkci zapojení podle pokynů z bodu 1.

Poznámky k PC:

- V animačním módu je výhodné, umístíte-li si okna analýzy a schématického editoru tak, aby se nepřekrývala. Pak můžete sledovat současně měnící se hodnoty obvodových veličin přímo ve schématu a vývoj časových průběhů při analýze.
- Záměnu typu OZ UA741_TI za TL071_MC provedeme takto: poklepeme na značku OZ a otevřeme tak jeho editační okno. Klikneme do položky „Name“ a nahoře v řádku „Value“ změníme UA741_TI na TL071_MC. Potvrdíme OK.



Obr. 1. AKO s jedním OZ a tranzistorovým převodníkem úrovně.



Obr. 2. Generátor pilovitých kmitů.

Povinné výstupy z PC a LC v pracovních sešitech:

1. Použité programy a přístroje, záznam o průběhu simulací a měření, náčrty, poznámky, dedukce a závěry.
2. U obou zapojení náčrty časových průběhů napětí podle výše uvedené specifikace. Vyznačení souřadnic důležitých bodů (odečtená maxima a minima,..)
3. U obou zapojení rozsah kmitočtů při přeladění. Srovnání s výpočty.
4. U obou zapojení závěry o vlivu mezní rychlosti přeběhu OZ na funkci generátoru.

3.5 Operační usměrňovače

3.5.1 Cíle předběžných rozborů, návrhů a následných experimentů

Cíle předběžných rozborů a návrhů na NC:

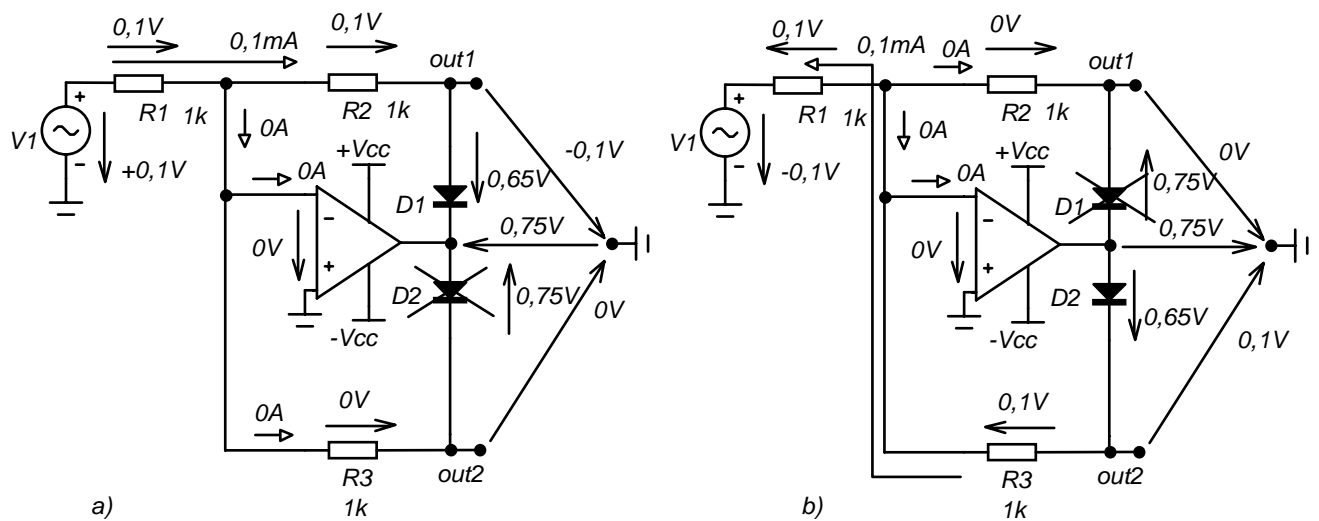
- Porozumět funkci tří zapojení operačních usměrňovačů (viz návod do cvičení).
- Analýzou napěťových poměrů v operačních usměrňovačích pro vstupní napětí $+0,1V$ a $-0,1V$ porozumět základní myšlence, proč mohou tyto obvody usměrňovat malá napětí, která v klasických usměrňovačích nestačí k otevření křemíkové diody.
- Analyzovat vliv reálných vlastností operačních zesilovačů, diod a tolerancí odporů na funkci usměrňovačů.

Cíle experimentů:

- Experimentálně ověřit platnost předpokladů a rozborů počítačovou simulací a měření na reálných obvodech.

3.5.2 Rozbory a návrhy

Rozbor jednocestného usměrňovače z obr. 3.21.



Obr. 3.21: Jednocestný operační usměrňovač.

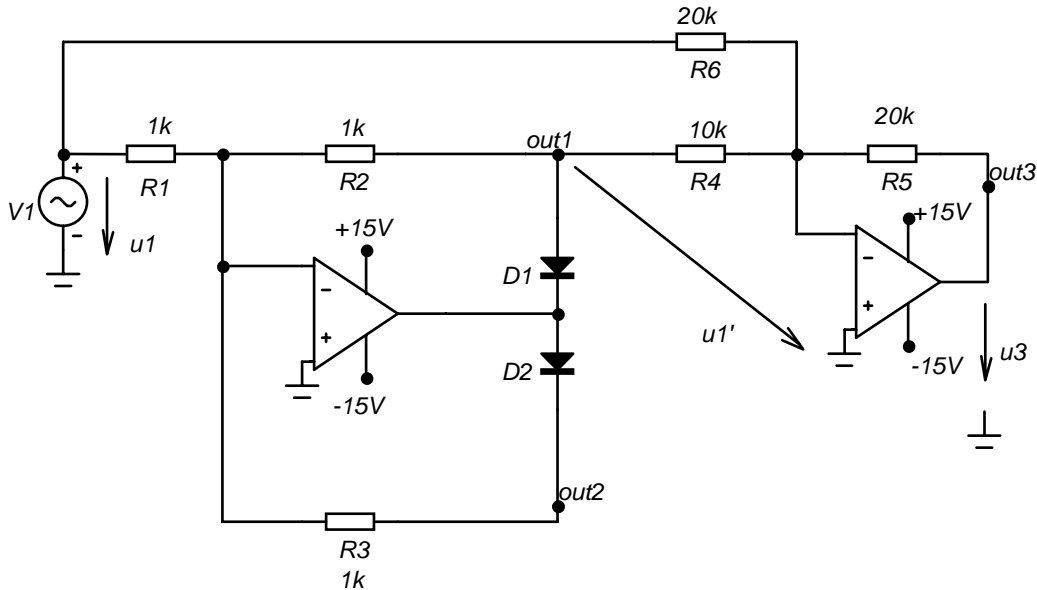
Pokuste se úvahou ověřit platnost vyznačených stejnosměrných poměrů na **obr. 3.21**, je-li vstupní napětí $+0,1V$ (obr. a) a $-0,1V$ (obr. b).

Z hlediska výstupu *out1* se obvod chová jako přesný invertující usměrňovač, propouštějící na výstup pouze kladnou půlvlnu vstupního napětí (kterou invertuje).

Z hlediska výstupu *out2* se obvod chová jako přesný invertující usměrňovač, propouštějící na výstup pouze zápornou půlvlnu vstupního napětí (kterou invertuje).

Diody jsou otvírány proudem, který je dán pouze vstupním napětím a odporem $R1$. Tento proud teče i při vstupních napětích daleko menších než je otevírací napětí diod.

Poměr napětí na výstupu *out1* (*out2*) a na vstupu je roven poměru $R2/R1$ ($R3/R1$).

Rozbor dvoucestného usměrňovače z obr. 3.22.

Obr. 3.22: Dvoucestný usměrňovač využívající zapojení jednocestného usměrňovače z obr. 3.21.

Napětí u_1' je výstupním napětím jednocestného usměrňovače. Je proto dáno vztahem

$$u_1' = \begin{cases} -\frac{R_2}{R_1} u_1 = -u_1, & \dots, u_1 \geq 0 \\ 0, & \dots, u_1 < 0 \end{cases}.$$

Napětí u_3 je výstupem sumačního zesilovače, který je buzen ze dvou vstupů u_1 a u_1' :

$$u_3 = -\frac{R_5}{R_6} u_1 - \frac{R_5}{R_4} u_1' = -u_1 - 2u_1' = \begin{cases} -u_1 - 2(-u_1) = +u_1, & \dots, u_1 \geq 0 \\ -u_1 - 2 \cdot 0 = -u_1, & \dots, u_1 < 0 \end{cases}.$$

Kladná půlplna u_1 je tedy přenesena na výstup u_3 beze změny a záporná půlplna je otočena na kladnou. Jedná se o dvoucestný usměrňovač. Přesnost usměrňování ovšem závisí na přesnosti poměrů řady odporů.

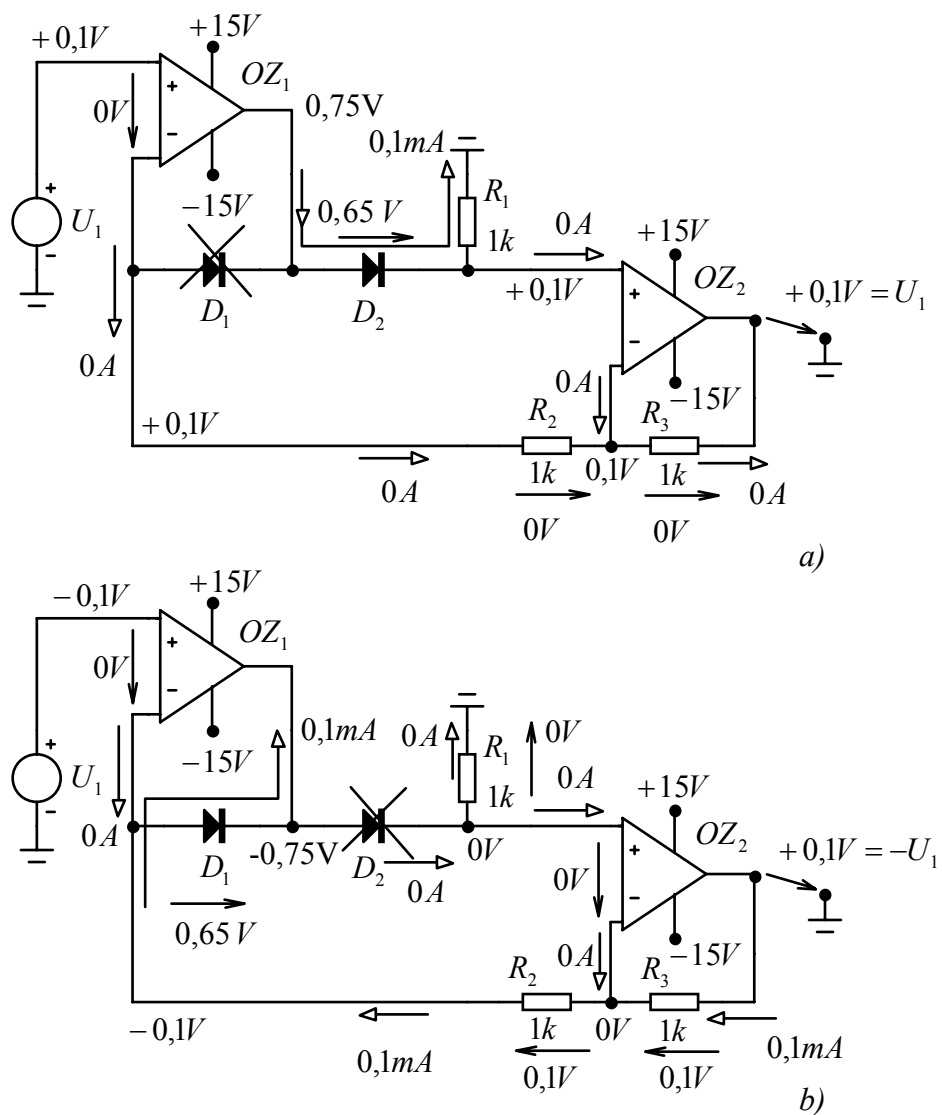
Rozbor dvoucestného usměrňovače z obr. 3.22.

Pokuste se úvahou ověřit platnost vyznačených stejnosměrných poměrů na obr. 3.23, je-li vstupní napětí $+0,1\text{V}$ (obr. a) a $-0,1\text{V}$ (obr. b).

Z rozboru vyplynou vzorce pro výstupní napětí OZ2:

$$u_{oz2} = \begin{cases} 1, & \dots, u_1 \geq 0 \\ -\frac{R_3}{R_2} u_1 = -u_1, & \dots, u_1 < 0 \end{cases}.$$

Přesnost dvoucestného usměrňování tedy závisí na poměru jediné dvojice odporů. Velikost R_1 není pro funkci obvodu kritická.



Obr. 3.23: Dvoucestný operační usměrňovač s malým počtem přesných rezistorů.

3.5.3 Návod na cvičení

Následuje návod na počítačové a laboratorní cvičení.

Operační usměrňovače
Počítačové cvičení (PC) a laboratorní cvičení (LC) č. 5

Příprava v pracovních sešitech musí obsahovat:

1. Toto zadání, vedle názvu cvičení doplňte data jejich absolvování.
2. Podklady a výsledky z předcházejícího cvičení.

Zadání:

1. Ověřte funkci jednocestného operačního usměrňovače podle obr. 1 z hlediska výstupů *Out1* a *Out2* pro různé velikosti napětí a kmitočtu usměrňovaného signálu.
2. Doplňte zapojení z bodu 1 na dvoucestný usměrňovač podle obr. 2. Zopakujte předchozí měření na výstupu *Out3*.
3. Sestavte zapojení dvoucestného operačního usměrňovače podle obr. 3. Zopakujte předchozí měření na výstupu *Out*.
4. Srovnejte výsledky dosažené v NC, PC a LC.

Pokyny k zadání:

PC: Usměrňovače na obr. 1, 2 a 3 jsou modelovány v souborech **5_1.cir**, **5_2.cir** a **5_3.cir**.

V prvním kroku zjistíte u všech usměrňovačů stejnosměrná napětí ve všech uzlech, jestliže vstupní napětí je stejnosměrné o velikosti +0,1V a -0,1V. Zjištěná uzlová napětí si pro oba případy vynesete do schémat a snažte se porozumět funkci.

V druhém kroku proveďte analýzu stejnosměrných převodních charakteristik $U_{výst} = f(U_{vst})$ v režimu „DC“

V třetím kroku proveďte analýzu operačních usměrňovačů v režimu „Transient“ –viz dále bod „PC+LC“.

LC:

Všechna zapojení realizujte na kontaktním nepájivém poli. Nejprve zajistíte stejnosměrné napájení operačních zesilovačů a teprve pak zapojujete ostatní součástky.

PC+LC:

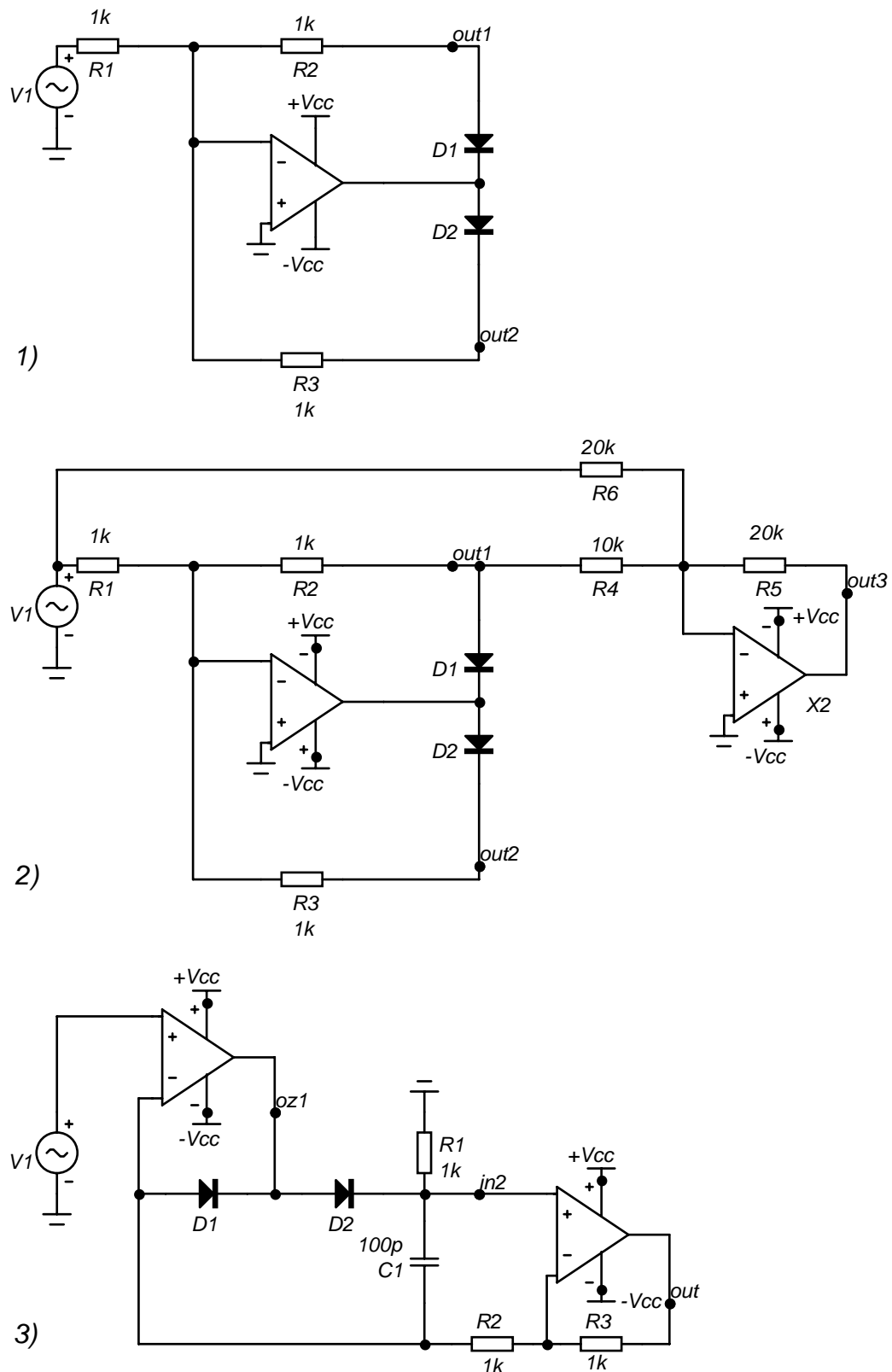
Měření provádějte při buzení usměrňovačů z generátoru harmonického signálu.

V první fázi zjistíte minimální amplitudu vstupního napětí, při níž je obvod ještě schopen usměrňovat. Nastavte kmitočet na 1kHz. Amplitudu nastavte co největší, ale takovou, aby se na výstupním signálu neobjevily efekty spojené se saturací *OZ* a s mezní rychlostí přeběhu. Pak amplitudu postupně snižujte a poznačte si úroveň, kdy již obvod přestane „uspokojivě“ usměrňovat.

V druhé fázi určete maximální kmitočet, při němž je obvod ještě schopen usměrňovat. Vyjděte opět z kmitočtu 1kHz, amplitudu nastavte na 1V. Pak zvyšujte kmitočet a poznamenejte si hodnotu, při níž již výstupní napětí nebude odpovídat požadovanému průběhu.

Povinné výstupy z PC a LC v pracovních sešitech:

1. Použité přístroje, záznam o průběhu simulací a měření, náčrty, poznámky, dedukce a závěry.
2. U všech zapojení uveďte zjištěné hodnoty uzlových napětí a větvových proudů při vstupním napětí +0,1V a -0,1V a stejnosměrné převodní charakteristiky $U_{výst} = f(U_{vst})$.
3. U všech zapojení uveďte zjištěné hodnoty minimálního napětí a maximální frekvence, při nichž ještě dochází k uspokojivému usměrňování. Z tohoto hlediska daná zapojení srovnejte.



Obr. 1. Jednocestný operační usměrňovač.

Obr. 2. Dvoucestný operační usměrňovač, vzniklý rozšířením obvodu z obr. 1.

Obr. 3. Zapojení dvoucestného operačního usměrňovače s minimem přesných rezistorů.

4 Dodatky

4.1 Výsledky testů

4.1.1 Vstupní test

1 c, d, c, c

2 c, b, a, c

3 c, a, c, d

4 b, b

5 c, a, b

6 c, c, b

7 d, a, a

Seznam použité literatury

- [1] DOSTÁL, J.: Operační zesilovače. SNTL Praha, 1981.
- [2] PUNČOCHÁŘ, J.: Operační zesilovače v elektronice (páté vydání). BEN, Praha 2002.
- [3] SEIDELMANN, L.: Nové zapojení operačního usměrňovače. Sdělovací technika, 12/98, s. 12-13.
- [4] LÁNÍČEK, R.: Simulační programy pro elektrotechniku. BEN, Praha 2000.
- [5] BIOLEK, D.: Program SNAP v. 2.6: Nové možnosti pro výuku i výzkum. STO-7, VA Brno, 1999, s. 66-69. ISBN 80-214-1392-1.
K dispozici na http://user.unob.cz/biolek/veda/articles/STO7_3.pdf
- [6] MicroCap – <http://www.spectrum-soft.com>
- [7] SNAP – <http://snap.webpark.cz/index.html>
- [8] BIOLEK, D.: Řešíme elektronické obvody. BEN technická literatura, 2004.