

Analogové elektronické obvody

Počítačová a laboratorní cvičení
ver. 4

Autoři textu:

prof. Ing. Dalibor Biolek, CSc.
doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.

Obsah

1	ÚVOD	2
2	ZAŘAZENÍ PŘEDMĚTU VE STUDIJNÍM PROGRAMU	2
2.1	ÚVOD DO STUDIA ELEKTRONICKÉHO TEXTU	2
2.2	POŽADAVKY NA PŘÍPRAVU A POSTUP PŘI PRÁCI V LABORATOŘI	3
2.3	STRUKTURA A BODOVÉ HODNOCENÍ LABORÁTU	3
2.4	NEPŘÍTOMNOST VE CVIČENÍCH	4
2.5	VSTUPNÍ TEST	5
3	ÚLOHY	6
3.1	PRACOVNÍ BOD A JEHO POHYB	6
3.1.1	<i>Cíle předběžných rozborů, návrhů a následných experimentů</i>	6
3.1.2	<i>Rozbory a návrhy</i>	7
3.1.3	<i>Návod na cvičení</i>	12
	Počítačové cvičení (PC) a laboratorní cvičení (LC) č. 1	13
3.2	OVĚŘOVÁNÍ ZÁKLADNÍCH VLASTNOSTÍ OZ	16
3.2.1	<i>Cíle předběžných rozborů, návrhů a následných experimentů</i>	16
3.2.2	<i>Rozbory a návrhy</i>	17
3.2.3	<i>Návod na cvičení</i>	19
	Počítačové cvičení (PC) a laboratorní cvičení (LC) č. 2	20
3.3	NÍZKOFREKVENČNÍ ZESILOVAČE S OZ	23
3.3.1	<i>Cíle předběžných rozborů, návrhů a následných experimentů</i>	23
3.3.2	<i>Rozbory a návrhy</i>	24
3.3.3	<i>Návod na cvičení</i>	25
	Počítačové cvičení (PC) a laboratorní cvičení (LC) č. 3	26
3.4	OPERAČNÍ USMĚRŇOVAČE	29
3.4.1	<i>Cíle předběžných rozborů, návrhů a následných experimentů</i>	29
3.4.2	<i>Rozbory a návrhy</i>	29
3.4.3	<i>Návod na cvičení</i>	31
	Počítačové cvičení (PC) a laboratorní cvičení (LC) č. 4	32
3.5	AKO A GENERÁTORY SIGNÁLŮ S OPERAČNÍMI ZESILOVAČI	35
3.5.1	<i>Cíle předběžných rozborů, návrhů a následných experimentů</i>	35
3.5.2	<i>Rozbory a návrhy</i>	36
3.5.3	<i>Návod na cvičení</i>	39
	Počítačové cvičení (PC) a laboratorní cvičení (LC) č. 5	40
3.6	OSCILÁTOR S WIENOVÝM ČLÁNKEM	42
3.6.1	<i>Cíle předběžných rozborů, návrhů a následných experimentů</i>	42
3.6.2	<i>Rozbory a návrhy</i>	42
3.6.3	<i>Návod na cvičení</i>	46
	Počítačové cvičení (PC) a laboratorní cvičení (LC) č. 6	407
4	DODATKY	51
4.1	VÝSLEDKY TESTŮ	51
4.1.1	<i>Vstupní test</i>	51
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	52

1 Úvod

Skriptum „Analogové elektronické obvody – počítačová a laboratorní cvičení“ je studijním textem stejnojmenného povinného předmětu (BPC-AEY) studijního programu BPC-MET „Mikroelektronika a technologie“. Navazuje na skripta „Analogové elektronické obvody – přednášky“. Předmět je dále zabezpečen elektronickými texty „Analogové elektronické obvody – hybridní studijní texty“.

2 Zařazení předmětu ve studijním programu

Předmět „Analogové elektronické obvody“ je vyučován v zimním semestru 2. ročníku v rozsahu 13x2h přednášek, 6x2h cvičení odborného základu, 6x2h cvičení na počítačích, a 6x2h laboratorních 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“, „Elektronické součástky“ a „Elektronické součástky – praktikum“, z povinně volitelných pak „Elektrotechnický seminář“. 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“ 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, kterou si studenti mohou stáhnout z <https://www.spectrum-soft.com/>.

V laboratorních cvičeních si studenti sestavují měřený obvod na speciálním přípravku.

2.2 Požadavky na přípravu a postup při práci v laboratoři

Ve skriptech naleznete zadání všech cvičení „PC+LC“. Těmto zadáním jsou předřazeny rozbory 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 e-learningu VUT (Moodle).

Student/ka přichází do PC s dostatečnými teoretickými znalostmi (přednášky, numerická cvičení), které jsou na začátku ověřeny rychlým ústním přezkoušením. V případě, že nesplní podmínky vstupního přezkoušení, opouští laboratoř a musí si cvičení nahradit v nejbližším možném termínu bez zbytečných odkladů. Taktéž i v tomto náhradním cvičení musí úspěšně projít vstupním přezkoušením.

Na začátku hodiny student/ka předloží ke kontrole písemnou část přípravy na danou úlohu, která zároveň tvoří úvodní část laborátu. Tato příprava je v rozsahu cca 1 strany A4 a obsahuje

- Název úlohy
- Teoretický úvod – stručný popis základních principů analyzovaných obvodů, potřebná schémata (možné okopírovat a vlepít ze skript) a rovnice potřebné pro případné výpočty například vztah pro výpočet zesílení apod.

Pro samotné řešení dílčích zadání úlohy může student/ka samozřejmě použít potřebné studijní materiály – skripta.

Příprava se tedy kontroluje pouze na PC, neboť v následujícím cvičení (LC) se řeší stejná úloha a student tedy již splnil vstupní předpoklady pro práci v laboratoři na dané úloze.

Je tedy zřejmé, že jedna a tatáž úloha se nejdříve řeší na NC. Následně na PC v programu Micro-Cap (SW volně stažitelný z <http://www.spectrum-soft.com/index.shtml>) podle pokynů vyučujícího. Dílčí výsledky student/ka konzultuje s vyučující, aby se zabránilo zbytečným chybám a plagiátorství výsledků. V případě, že výsledky nejsou prezentovány, je úloha považována za nesplněnou. Pro uložení dat využije student/ka některý z oficiálních datových prostorů na fakultě/VUT například VUT disk apod.

Ve třetím kroku následuje LC, kde se na měřicích deskách stejná úloha řeší naposledy. Opět se postupuje podle pokynů vyučujícího. Dílčí výsledky student/ka konzultuje s vyučující, aby se zabránilo zbytečným chybám a plagiátorství výsledků. V případě, že výsledky nejsou prezentovány, je úloha považována za nesplněnou. Pro uložení dat využije student/ka svůj Flash USB disk naformátovaný ve FAT32.

2.3 Struktura a bodové hodnocení laborátu

Jak již bylo uvedeno, písemná příprava tvoří úvodní část laborátu – viz předchozí bod. Laborát dále obsahuje následující náležitosti:

- Výsledky simulací z PC (popisky os v grafech je nutné doplnit), případně výpočty důležitých parametrů a také tabulky hodnot, pokud je požadováno.
- Výsledky měření z LC (popisky os a jednotky v grafech je nutné doplnit), případně výpočty důležitých parametrů a také tabulky hodnot, pokud je požadováno.

- Tabulku důležitých hodnot z NC, PC i LC pro snadné porovnání a závěrečné vyhodnocení úlohy.

- Závěr – objektivní zhodnocení dosažených výsledků (stručně, jasně, výstižně), vysvětlení, proč výsledky jsou, jaké jsou, a to i v případě, že něco nevyšlo podle předpokladů. Porovnání výsledků s numerickými cvičeními a opět objektivní vysvětlení případných rozdílů.

Laboráty je možné vypracovat ručně v sešitě nebo na PC a odevzdat vytisknuté nebo případně kombinovat sešit s vloženými částmi vypracovanými na PC. Vždy je však nutné brát v potaz, aby měl všechny předepsané náležitosti, byl čitelný a kompletní.

Laboráty se tedy odevzdávají ve dvoutýdenním cyklu vždy na PC. Každá úloha je hodnocena maximálně 4 body. Celkem tedy lze získat maximálně 20 bodů za všechny úlohy. Bodové hodnocení laborátu se snižuje

- za nekompletní laborát (chybějící výsledky, závěr, výpočty, příprava apod.),
- za chybné výsledky – hodnotí se samozřejmě důvody těchto výsledků,
- za pozdní odevzdání laborátu a to -0,5 bodu za každý týden zpoždění od oficiálního termínu odevzdání.

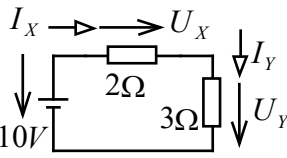
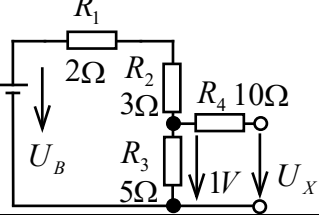
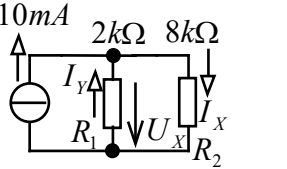
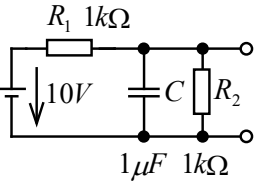
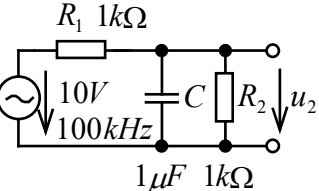
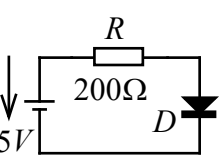
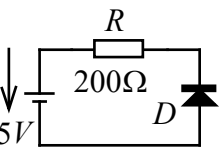
2.4 Nepřítomnost ve cvičeních

Maximální možný počet nepřítomností ve cvičeních, kdy lze úlohy ještě nahradit, je 3. V případě většího množství je nutné řešit individuálně po domluvě s vyučujícím. Jako důvod nepřítomnosti je brána nemoc – nutno doložit potvrzení od lékaře. Další možnosti nepřítomnosti je nutné řešit individuálně po domluvě s vyučujícím. Cvičení, které student zameškal, je nutné neprodleně nahradit v nejbližším možném termínu.

2.5 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_Y 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) 1, d) 0,25
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 zadrž
		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.

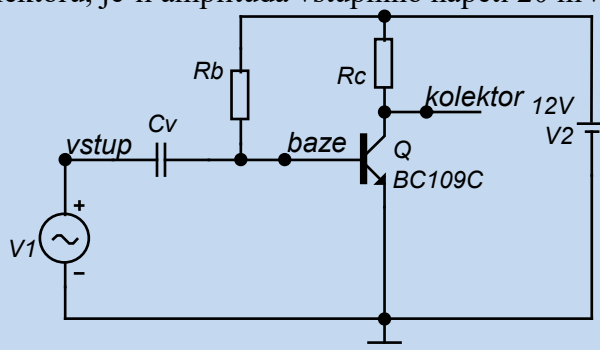
3.1 Pracovní bod a jeho pohyb

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 6 V (poloviční než napětí baterie) při kolektorovém proudu asi 3 mA. 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 20 Hz. Odhadnout dolní mezní kmitočet pro vazební kapacitu 5 μF .
- Odhadnout amplitudy střídavých složek napětí mezi bází a emitorem, napětí kolektor-emitor, proudu báze a proudu kolektoru, je-li amplituda vstupního napětí 20 mV a kmitočet 1 kHz.
- Načrtnout časové průběhy napětí mezi bází a emitorem, napětí kolektor-emitor, proudu báze a proudu kolektoru, je-li amplituda vstupního napětí 20 mV a kmitočet 1 kHz.

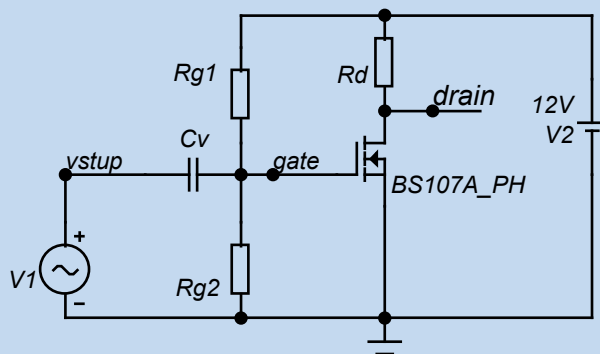


Zdroj V1 je harmonický 1kHz/20mV

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 6 V (poloviční než napětí baterie) při kolektorovém proudu asi 3 mA. 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_{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 20 Hz. Odhadnout dolní mezní kmitočet pro vazební kapacitu 10 nF.
- Odhadnout amplitudy střídavých složek napětí mezi bází a emitorem, napětí kolektor-emitor, proudu báze a proudu kolektoru, je-li amplituda vstupního napětí 200 mV a kmitočet 1 kHz.
- Načrtnout časové průběhy napětí mezi elektrodami *gate* a *source*, napětí *drain-source*, proudu I_g a I_d , je-li amplituda vstupního napětí 200 mV a kmitočet 1 kHz.



Zdroj V1 je harmonický 1kHz/200mV

Obr. 3.2: Zesilovač s unipolárním tranzistorem.

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 návrhy

Zesilovač s bipolárním tranzistorem BC109C

Požadavky na stejnosměrný pracovní bod Q:

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

Přibližné parametry tranzistoru BC109C v daném pracovním bodu jsou následující:

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

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

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

$$S \approx 35I_{CQ} = 35 \times 3 \text{ mA} \approx 0,1 \text{ A/V.}$$

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

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

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

Shrnutí odhadů parametrů tranzistoru BC109C:

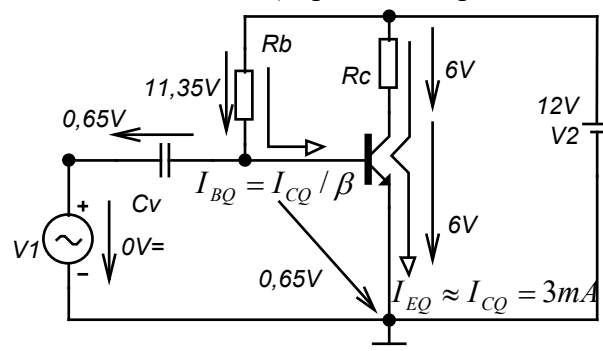
$$h_{21e} = \beta \approx h_{21E} \approx 500, S = 0,1 \frac{\text{A}}{\text{V}}, r_{in} \approx 5 \text{ k}\Omega, r_{out} \approx 100 \text{ k}\Omega.$$

Návrh R_C a R_b k nastavení požadovaného pracovního bodu:

Odhad napětí báze-emitor křemíkového tranzistoru v aktivním režimu:

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

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



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

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

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

$$R_C = 2,2 \text{ k}\Omega.$$

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

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

Pomocí parametru β odhadneme stejnosměrný proud báze:

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

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

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

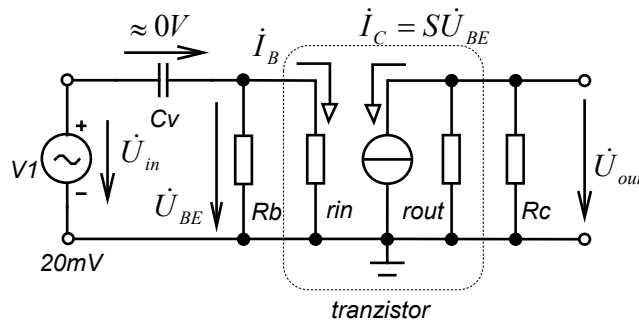
Rekapitulace dosaženého pracovního bodu:

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

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

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

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

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

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

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

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} :

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

Rekapitulace střídavých poměrů v obvodu:

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

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

Návrh vazební kapacity C_V :

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

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

Pro dolní mezní kmitočet zesilovače 20 Hz vychází

$$C_V \doteq 1,6 \text{ }\mu\text{F}.$$

Při použité kapacitě 5 μF bude mezní kmitočet

$$f_0 \doteq 6,4 \text{ Hz}.$$

Zesilovač s unipolárním tranzistorem BS107A

Požadavky na stejnosměrný pracovní bod Q:

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

Přibližné parametry tranzistoru BS107A v daném pracovním bodu jsou následující:

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

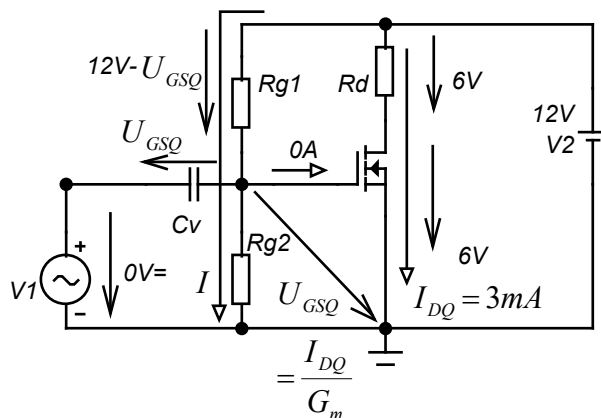
$$g_m = \left. \frac{dI_D}{dU_{GS}} \right|_Q \approx 6 \text{ mA/V} \dots \text{střídavá strmost.}$$

Stejnosemřný 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_d , R_{g1} a R_{g2} k nastavení požadovaného pracovního bodu:

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



Obr. 3.5: Stejnosemřné napěťové a proudové poměry v zesilovači.

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

Zvolíme nejbližší hodnotu z řady E12:

$$R_d = 2,2 \text{ k}\Omega.$$

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

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

Pomocí strmosti G_m určíme napětí U_{GS} :

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

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

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

Pak proud děličem bude

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

Odpor R_{g1} vyjde

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

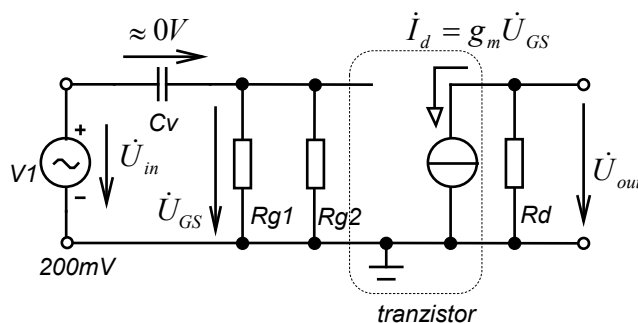
Rekapitulace dosaženého pracovního bodu:

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

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

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



Obr. 3.6: Linearizovaný model zesilovače z **obr. 3.5** pro sledování průchodu střídavého signálu. $I_d = g_m U_{GS}$.

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

$$I_d = g_m U_{GS} = 1,2 \text{ mA}.$$

Tento proud vytvoří na odporu R_d úbytek napětí

$$U_{out} \doteq -2,2 \text{ k}\Omega \times 1,2 \text{ mA} = -2,64 \text{ V}.$$

Střídavé zesílení tedy bude

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

Rekapitulace střídavých poměrů v obvodu:

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

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

Návrh vazební kapacity C_V :

Pro dolní mezní kmitočet zesilovače 20 Hz 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 a pokyny pro počítačové a laboratorní cvičení.

Pracovní bod a jeho pohyb

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

Příprava musí obsahovat:

1. Viz pokyny v kap. 2.2.
2. Nad rámec bodu 1: Vypočtené, resp. předpokládané údaje z numerického cvičení: R_b (schéma a), R_{g1} (schéma b) stejnosměrná uzlová napětí a větvové 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 Micro-Cap)

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 5 M Ω . Spustíme **dynamickou DC analýzu** a zobrazíme uzlová napětí a větvové 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 6 V.

Analýza časových průběhů:

Spustíme **časovou analýzu** („Transient“). V okně „Transient Analysis Limits“ aktivujeme „Run“, příp. horkou klávesu F2. Časové průběhy si uložíme pro následné zpracování v laborátu. Změříme stejnosměrná posunutí signálů a jejich amplitudy. Posunutí porovnáme se s pracovním bodem, z amplitud vypočteme napěťové zesílení.

Podle pokynů učitele proved'te 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 Ω (vliv polohy pracovního bodu na zkreslení signálu). Průběhy opět ukládáme pro následné vyhodnocení.

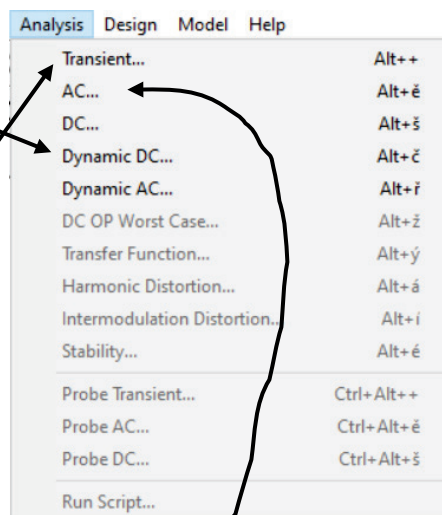
Ukončení analýzy: F3.

Analýza kmitočtové charakteristiky:

Spustíme **kmitočtovou analýzu** („AC“). Zjistíme kmitočtovou závislost zesílení. Změříme dolní a horní mezní kmitočet a zesílení v pásmu středních kmitočtů. Uložíme si kmitočtovou závislost zesílení včetně polohy dolního a horního mezního kmitočtu.

Podle pokynů učitele proved'te krokování vazební kapacity C_v v hodnotách (0,1, 1, 10) μ F (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 $10\text{ M}\Omega$. V režimu dynamické DC analýzy krokujeme R_{g1} . Zjistíme stav při hodnotě R_{g1} z numerického cvičení. Dostáváme R_{g1} tak, aby na kolektoru bylo zhruba 6 V .

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

Laboratorní cvičení (práce s přípravkem)

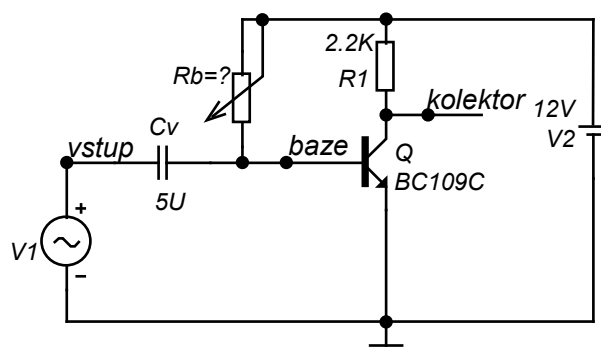
1. Zesilovač s bipolárním tranzistorem NPN, schéma a)

Nejprve sestavte obvod bez vazebního kondenzátoru a zdroje signálu. Změnou odporu R_b nastavte ss napětí na kolektoru tranzistoru 6 V . 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 1 kHz . Zakreslete časové průběhy vstupního napětí, napětí na bázi a na kolektoru, včetně ss posunutí. Změřte amplitudy a vypočítejte z nich střídavá zesílení.

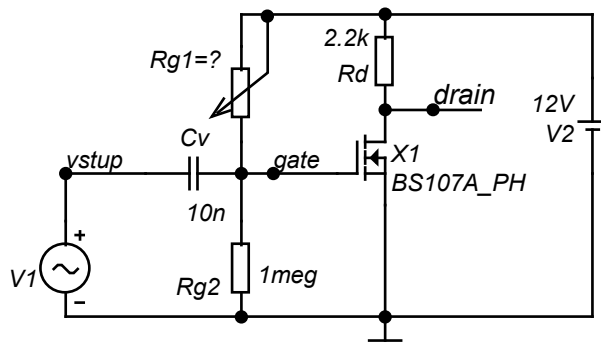
2. Zesilovač s unipolárním tranzistorem MOSFET s kanálem N, schéma b)

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



Zdroj V1 je harmonický 1kHz/20mV

a)



Zdroj V1 je harmonický 1kHz/200mV

b)

Povinné výstupy v laborátu:

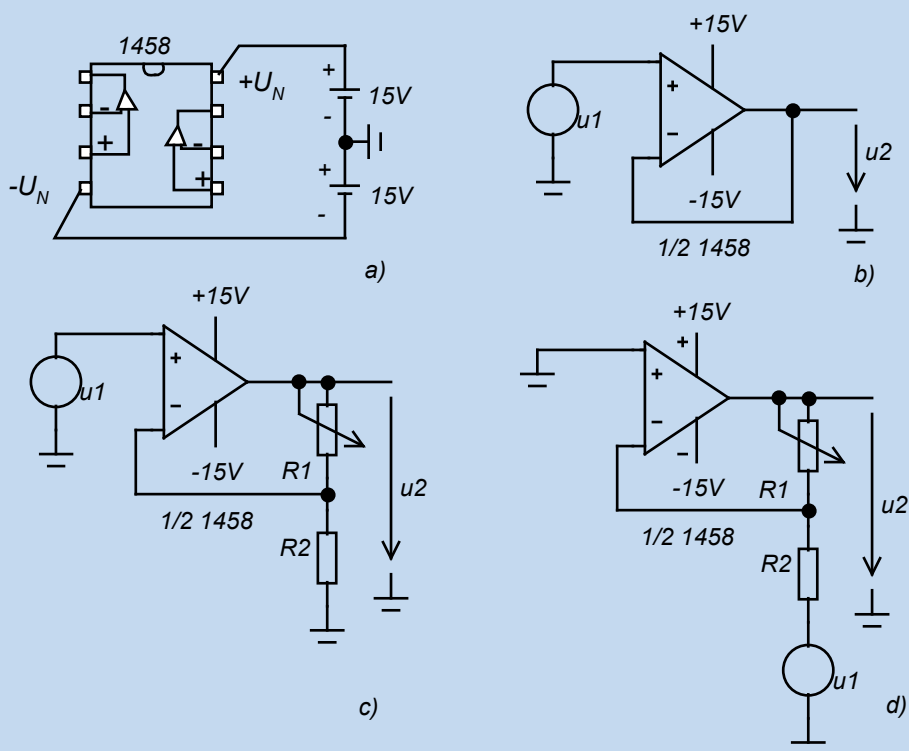
- Počítačová cvičení (platí pro oba typy tranzistorů)
 - schéma se správně nastaveným ss pracovním bodem zesilovače – ze schématu jsou zřejmé hodnoty napětí a proudů v důležitých bodech obvodu,
 - základní sinusové průběhy (pro daný vstupní signál) v důležitých bodech obvodu v závislosti na čase, pomocí kurzorů vyznačené podstatné hodnoty na průbězích,
 - totéž provést pro změnu velikosti amplitudy vstupního signálu a změnu polohy pracovního bodu (rozmítání odporu R_b , R_{g1}) - využití funkce krokování,
 - kmitočtová charakteristika zesilovače – vyznačená maximální hodnota zisku a šířka pásma,
 - kmitočtová charakteristika zesilovače v závislosti na změně hodnoty vazebního kapacitoru C_v
 - využití funkce krokování,
- Laboratorní cvičení (platí pro oba typy tranzistorů, preferovaně bipolární, upřesní vyučující v laboratoři)
 - nastavení pracovního bodu zesilovače, hodnoty napětí v důležitých bodech obvodu v tabulce,
 - základní sinusové průběhy (pro daný vstupní signál) v důležitých bodech obvodu v závislosti na čase,
 - totéž provést pro změnu velikosti amplitudy vstupního signálu a změnu polohy pracovního bodu (rozmítání odporu R_b , R_{g1}) – je tedy nutné vždy přenastavit hodnotu odporu,
 - kmitočtová charakteristika zesilovače – vyznačená maximální hodnota zisku a šířka pásma,
 - kmitočtová charakteristika zesilovače v závislosti na změně hodnoty vazebního kapacitoru C_v
 - je tedy nutné vždy přenastavit hodnotu kapacitoru.

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 vymezit podmínky jejich platnosti s ohledem na reálné vlastnosti operačního zesilovače.
- Osvojit si zásady pro sestavování a ožívování 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 návrhyStejnoseměnné vlastnosti OZ a jeho základních zapojení

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

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

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

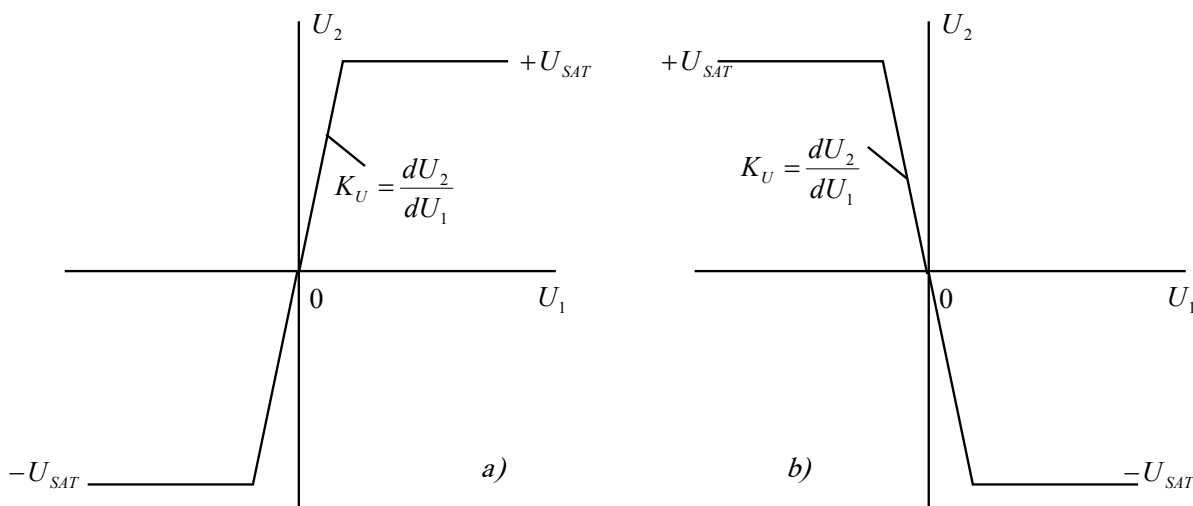
Výstupní odpor: $R_{out} \approx 75 \Omega$ (ideálně 0).

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

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

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

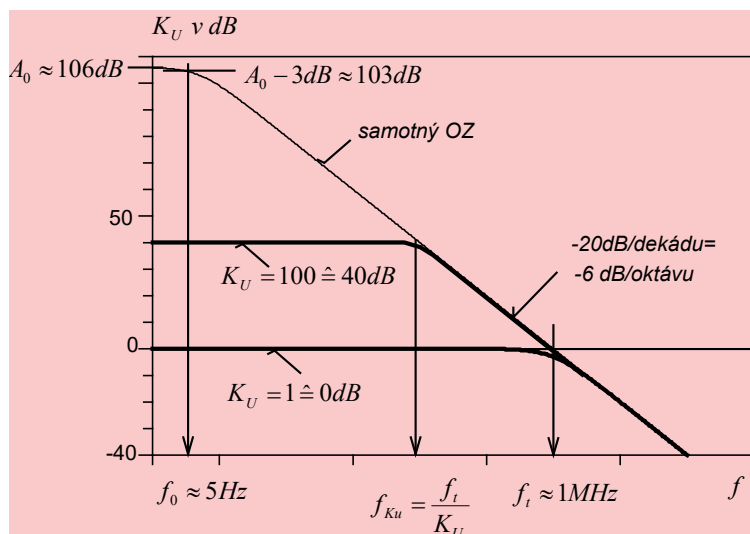
$K_U = -\frac{R_1}{R_2}$... invertující zesilovač na **obr. 3.7 d**).



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).

Stejnoseměrné 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 proměřování 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 třidecibelového 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 1 MHz, ovšem vlivem konečné hodnoty SR jím lze zpracovat signál o maximální amplitudě pouhých 80 mV.

3.2.3 Návod na cvičení

Následuje návod a pokyny pro počítačové a laboratorní cvičení.

Ověřování základních vlastností OZ

Počítačové cvičení (PC) a laboratorní cvičení (LC) č. 2

Příprava musí obsahovat:

1. Viz pokyny v kap. 2.2.
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. Zobrazte 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).

Analýzujte 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 až 5. U bodu 4 ověřte poučku $A_0 f_0 = f_T$.
- ✓ 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 (Micro-Cap):

Obvody jsou modelovány v souborech:

2_1.cir – sledovač (obr 2), **2_2.cir** – neinvertující zesilovač (obr. 3), invertující zesilovač (obr. 4) je třeba upravit ze souboru **2_2.cir**!

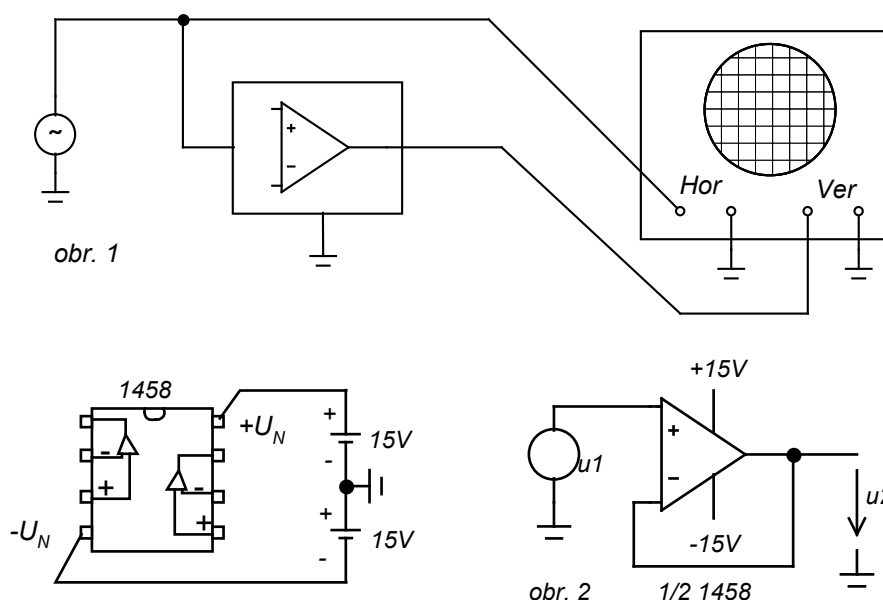
U všech tří obvodů proveďte tyto simulace:

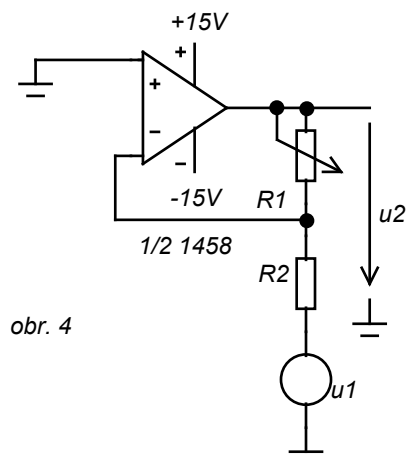
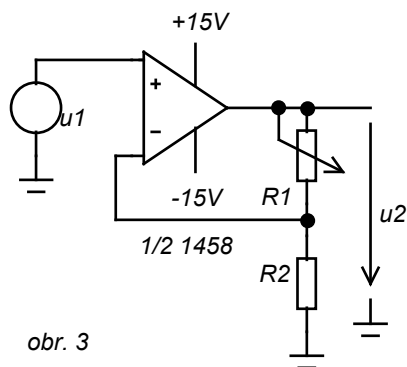
- a) Dynamickou DC analýzu. Zjistěte stejnosměrná napětí a proudy na součástkách, vynesete přímo do schématu. Srovnajte s teoretickými hodnotami.
- b) Analýzu „Transient“. Uložte si časové průběhy a z nich stanovte požadované údaje (mezní rychlosti přeběhu při obdélníkovém buzení, zesílení při harmonickém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

Pokyny k měření na přípravku:

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

- Ad 1. Na kanál A osciloskopu přiveďte výstupní napětí, na kanál B vstupní napětí. Zobrazte pouze stopu kanálu A. Vypněte časovou základnu (řídíte se pokyny učitele!).
- 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 napětíovou nesymetrii.
- Ad 3. Na vstup přiveďte bipolární obdélníkový signál o rozkmitu 1 V. 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 10 kHz. 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. 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 třídécibellového 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 laborátu:

➤ Počítačová i laboratorní cvičení

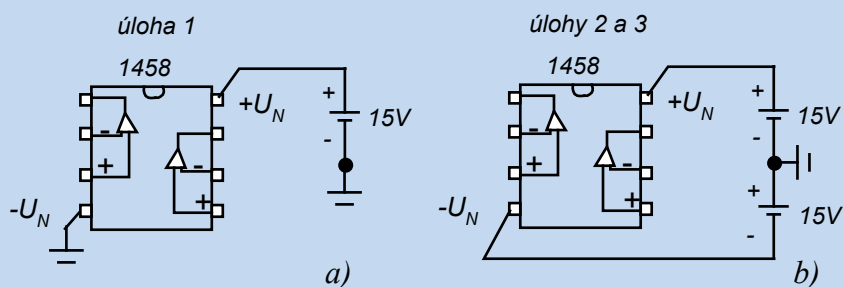
- hodnoty napětí a proudů v důležitých částech obvodů zjištěné při dynamické ss analýze,
- základní časové průběhy se zadaným sinusovým vstupním signálem,
- časové průběhy se zadaným sinusovým vstupním signálem při změně velikosti amplitudy vstupního signálu a změny hodnoty zpětnovazebního rezistoru - využití funkce krokování a vypočtené zesílení při harmonickém buzení,
- časové průběhy se zadaným obdélníkovým vstupním signálem a vyznačené důležité hodnoty pro výpočet rychlosti přeběhu – stačí u sledovače,
- kmitočtová charakteristika zesilovače – vyznačená maximální hodnota zisku a šířka pásma,
- kmitočtová charakteristika zesilovače v závislosti na změně hodnoty zpětnovazebního rezistoru - využití funkce krokování,
- napěťové převodní charakteristiky OZ vč. krokování hodnoty zpětnovazebního rezistoru.

3.3 Nízkofrekvenční zesilovače s OZ

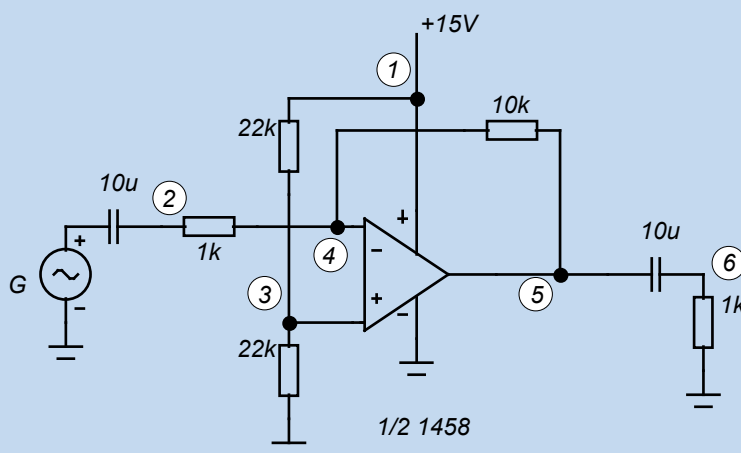
3.3.1 Cíle předběžných rozborů, návrhů a následných experimentů

Cíle předběžných rozborů a návrhů na NC:

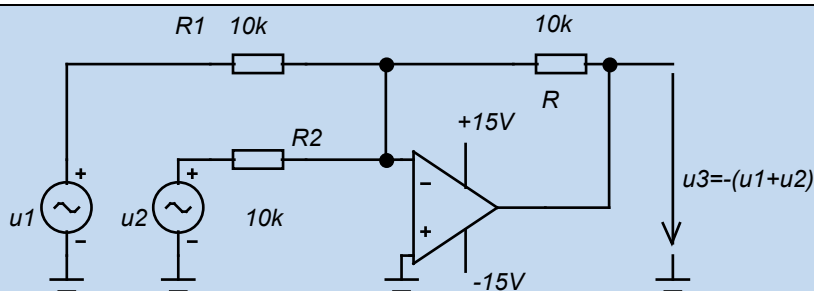
- Zopakovat správný způsob zajištění symetrického napájení operačního zesilovače (**obr. 3.10 b**) a napájení z jediného zdroje (**obr. 3.10 a**).
- Podrobně analyzovat stejnosměrné a střídavé poměry v zapojení invertujícího zesilovače s nesymetrickým napájením podle **obr. 3.11**.
- Načrtnout časové průběhy jednotlivých uzlových napětí v invertujícím zesilovači, je-li vstupní signál harmonický o kmitočtu 1 kHz 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.



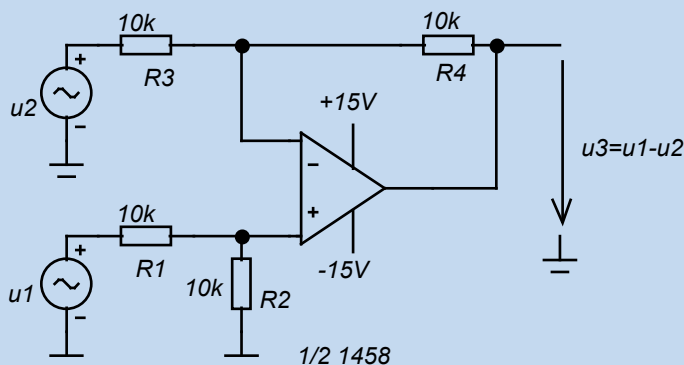
Obr. 3.10: a) nesymetrické, b) symetrické napájení operačního zesilovače.



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



Obr. 3.12: Sumační zesilovač.



Obr. 3.13: Diferenční zesilovač.

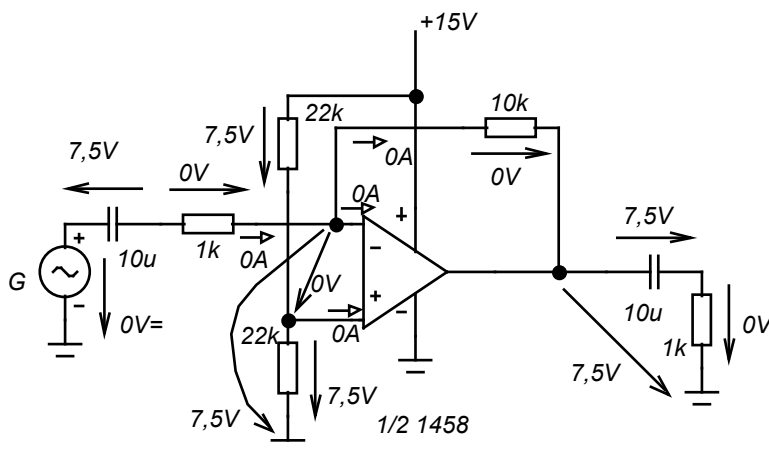
Cíle experimentů:

- 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.

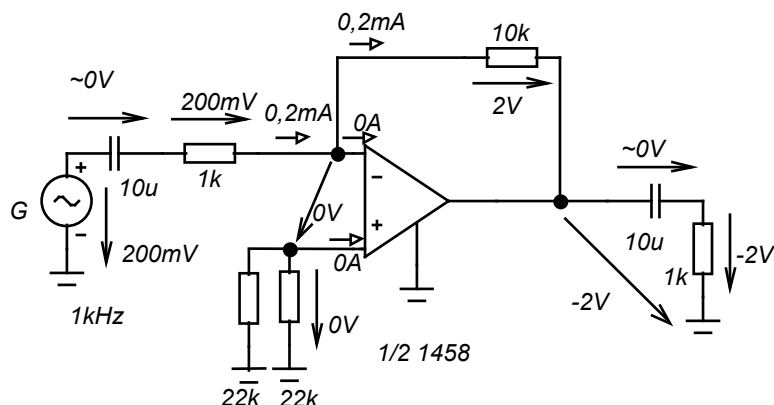


Obr. 3.14: Stejnosměrné poměry v zesilovači s nesymetrickým napájením.

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. 7,5 V. 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 7,5 V. 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 μF odpovídá na kmitočtu 1 kHz reaktance asi 16 Ω . Protože oba kapacitory jsou v sérii s rezistory o odporech 1 k 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 200 mV a teče jím proud 0,2 mA. Tento proud celý teče do rezistoru 10k a vytváří na něm úbytek napětí 2 V. 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 a pokyny pro počítačové a laboratorní cvičení.

Nízkofrekvenční zesilovače s OZ

Počítačové cvičení (PC) a laboratorní cvičení (LC) č. 3

Příprava musí obsahovat:

1. Viz pokyny v kap. 2.2.
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 1 V (úloha č. 1).
4. Vypočtené střídavé zesílení (úloha č. 1).
5. Odvození vztahu pro u_3 u zapojení na obr. 2 a 3.

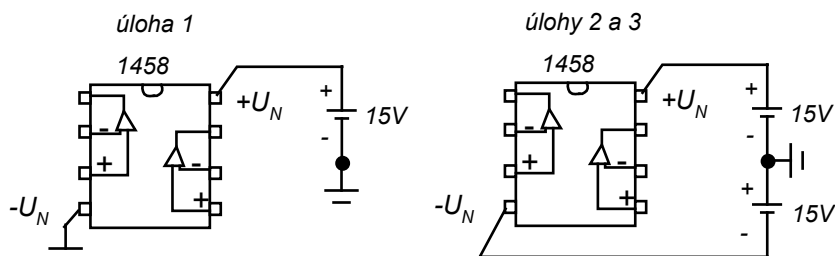
Zadání:

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.

Pokyny k zadání:

PC: Obvody analyzujte simulačním programem.

LC: Zapojení realizujte na přípravku. Ověřte, zda je v pořádku stejnosměrné napájení operačních zesilovačů podle obrázku a teprve pak zapojujte ostatní součástky.



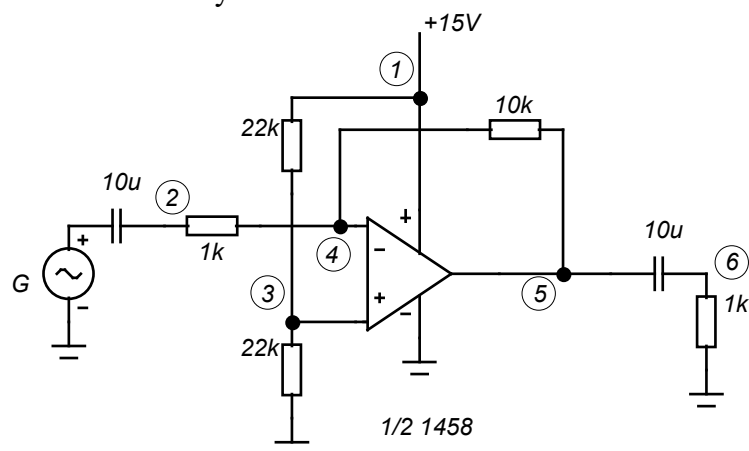
Ad 1. PC: Soubor **3_1.cir**. Zvolte nesymetrické ss napájení OZ (viz obr. 1). Vypočtěte stejnosměrná napětí ve všech uzlech oproti zemi (analýza „Dynamic DC“). V druhé fázi časové průběhy napětí ve všech uzlech, má-li napětí generátoru G amplitudu 1 V a kmitočet 1 kHz (analýza „Transient“). V třetí 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, srovnějte s hodnotami z přípravy a z PC.

Odstraňte zkrat vstupní brány a připojte generátor harmonického napětí o kmitočtu asi 1 kHz. 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. Snažte se o detailní pochopení funkce obvodu.

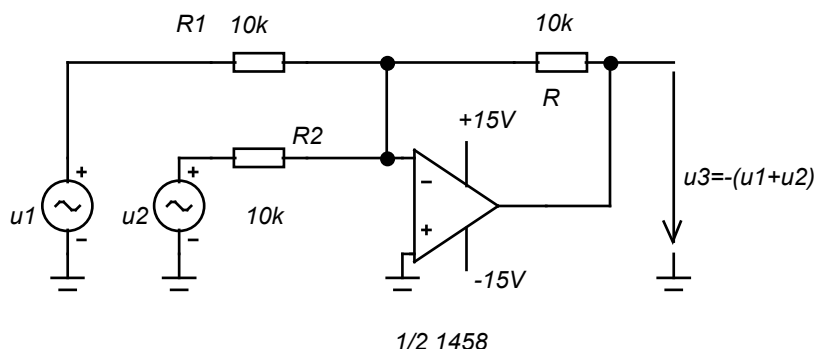
Ad 2. PC (soubor **3_2.cir**), LC: Napájení OZ doplňte na symetrické. Na vstupy připojte dva nezávislé generátory harmonického signálu: na vstup „ u_1 “ 1 kHz/5 V amplituda, na vstup „ u_2 “ 10 kHz/0,5 V amplituda (orientační hodnoty). Přesvědčte se o tom, že na výstupu je invertovaná superpozice obou 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 “ 1 kHz/5 V amplituda, na vstup „ u_2 “ 10 kHz/0,5 V amplituda (orientační hodnoty). Přesvědčte 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).

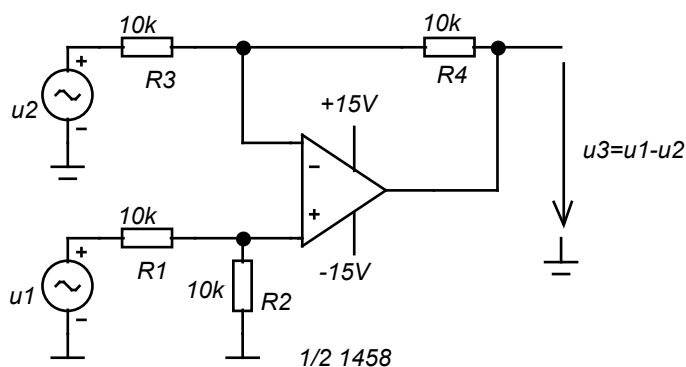
LC: Na závěr proveďte průkaznější ověření, že výstupní napětí je rozdílem vstupních napětí: přiveďte na oba vstupy stejný signál. Nejsnadněji to provedete tak, že jeden z generátorů odpojíte a oba vstupy propojíme. Na výstupu by pak měl být nulový signál. Výsledky měření slovně vyhodnoťte.



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 laborátu:

- Počítačová i laboratorní cvičení - obvod 1) zapojení OZ s nesymetrickým napájením
 - zjištění napětí v důležitých bodech obvodu – schéma u PC, tabulka hodnot u LC,
 - časové průběhy signálů v důležitých bodech obvodu pro zadaný vstupní sinusový signál,
 - kmitočtová charakteristika s vyznačeným zesílením a šířkou pásma,
- Počítačová i laboratorní cvičení - obvody 2) 3) sumační a rozdílový zesilovač
 - výsledný výstupní signál při přivedených dvou různých vstupních sinusových signálech – průběhy vstupních i výsledného výstupního signálu,
 - výsledný výstupní signál při situaci, kdy je přiveden pouze jeden vstupní sinusový signál a druhý je nulový resp. jsou oba vstupní signály stejné.

3.4 Operační usměrňovače

3.4.1 Cíle předběžných rozborů, návrhů a následných experimentů

Cíle předběžných rozborů a návrhů na NC:

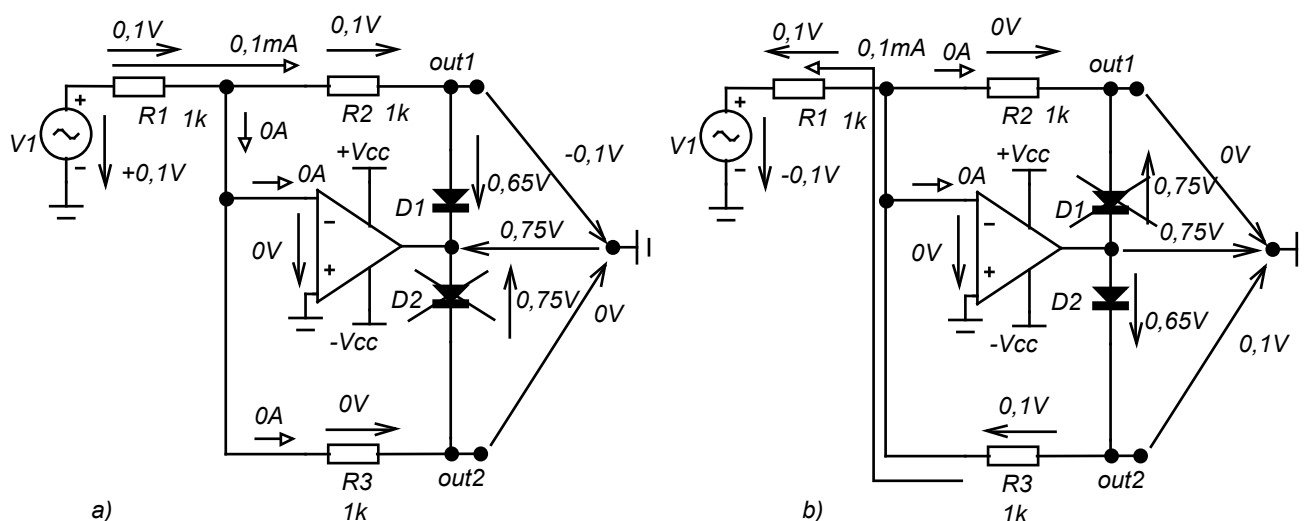
- Porozumět funkci tří zapojení operačních usměrňovačů (viz návod do cvičení).
- Analýzou napěťových poměrů v operačních usměrňovačích pro vstupní napětí $+0,1\text{ V}$ a $-0,1\text{ V}$ porozumět základní myšlence, proč mohou tyto obvody usměrňovat malá napětí, která v klasických usměrňovačích nestačí 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 měřením na reálných obvodech.

3.4.2 Rozbory a návrhy

Rozbor jednocestného usměrňovače z obr. 3.16.



Obr. 3.16: Jednocestný operační usměrňovač.

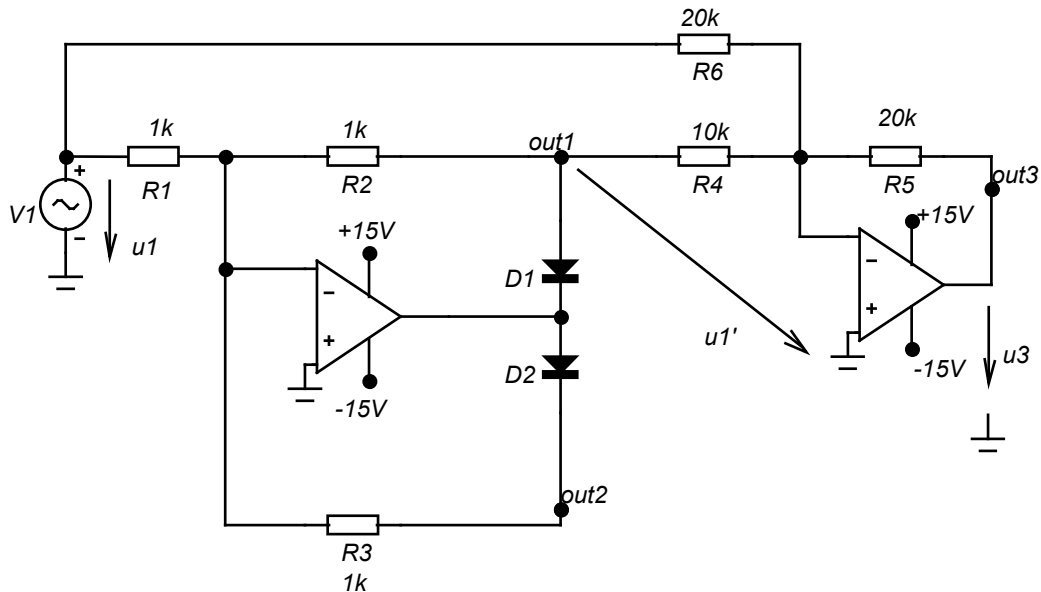
Pokuste se úvahou ověřit platnost vyznačených stejnosměrných poměrů na **obr. 3.16**, je-li vstupní napětí $+0,1\text{ V}$ (obr. a) a $-0,1\text{ V}$ (obr. b).

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 otevírány 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. 3.17.

Obr. 3.17: Dvoucestný usměrňovač využívající zapojení jednocestného usměrňovače z obr. 3.16.

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

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

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

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

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

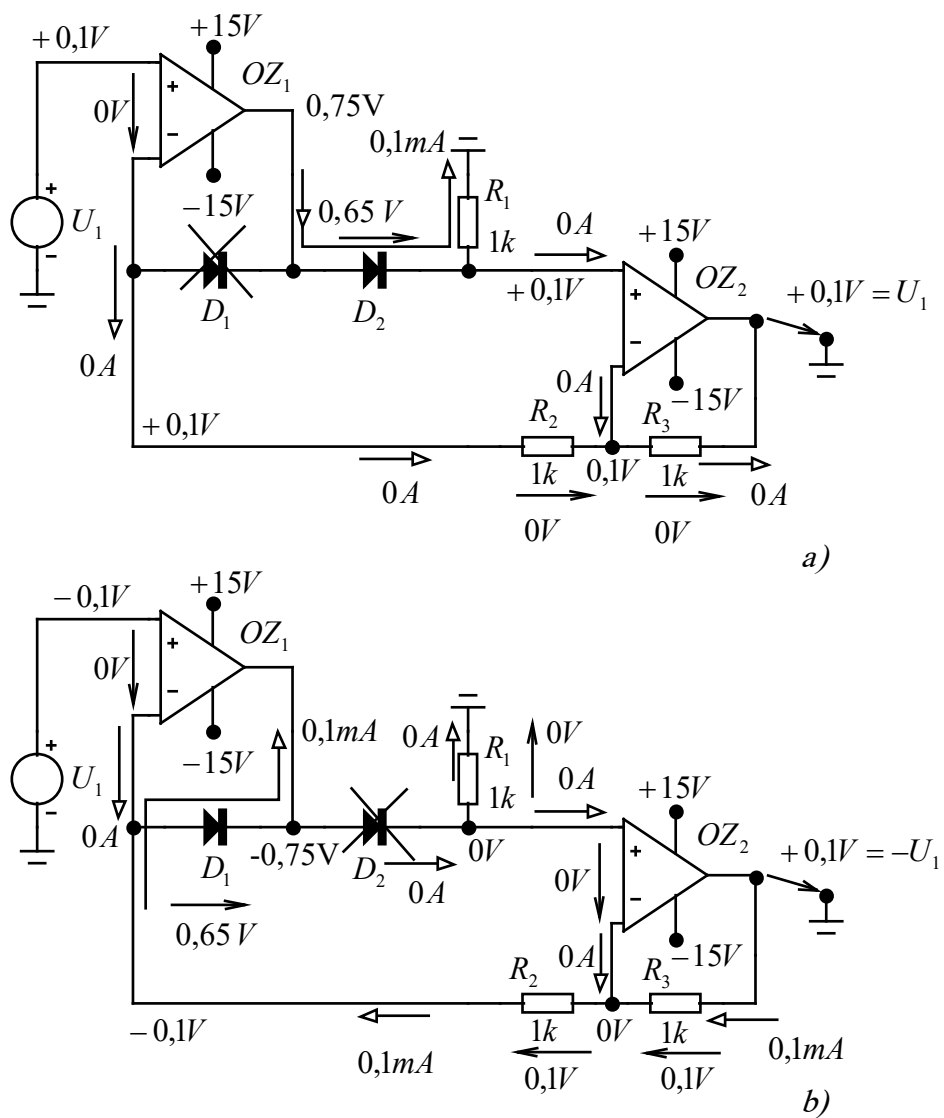
Rozbor dvoucestného usměrňovače z obr. 3.17.

Pokuste se úvahou ověřit platnost vyznačených stejnosměrných poměrů na **obr. 3.18**, je-li vstupní napětí +0,1 V (obr. a) a -0,1 V (obr. b).

Z rozboru vyplynou vzorce pro výstupní napětí OZ2:

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

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



Obr. 3.18: Dvoucestný operační usměrňovač s malým počtem přesných rezistorů.

3.4.3 Návod na cvičení

Následuje návod na počítačové a laboratorní cvičení.

Operační usměrňovače
Počítačové cvičení (PC) a laboratorní cvičení (LC) č. 4

Příprava v musí obsahovat:

1. Viz pokyny v kap. 2.2.
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. Srovnajte výsledky dosažené v NC, PC a LC.

Pokyny k zadání:

PC: Usměrňovače na obr. 1, 2 a 3 jsou modelovány v souborech **4_1.cir**, **4_2.cir** a **4_3.cir**.

V prvním kroku zjistíte u všech usměrňovačů stejnosměrná napětí ve všech uzlech, jestliže vstupní napětí je stejnosměrné o velikosti +0,1 V a -0,1 V. Zjištěná uzlová napětí si pro oba případy vyneste 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:

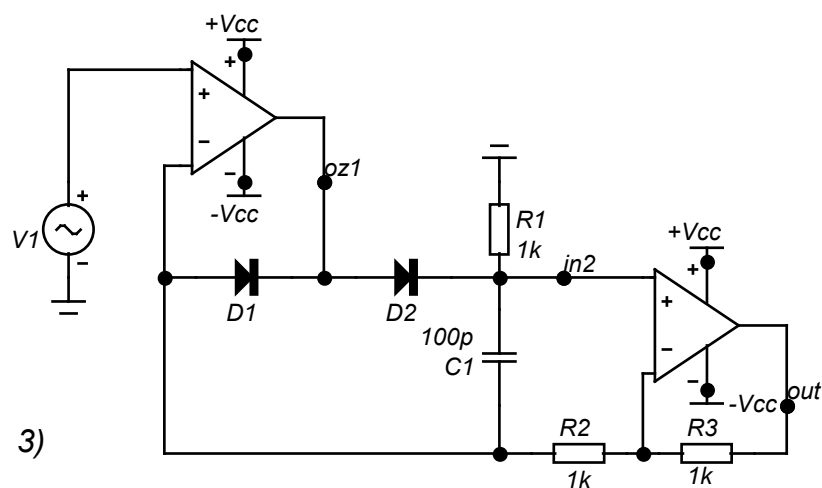
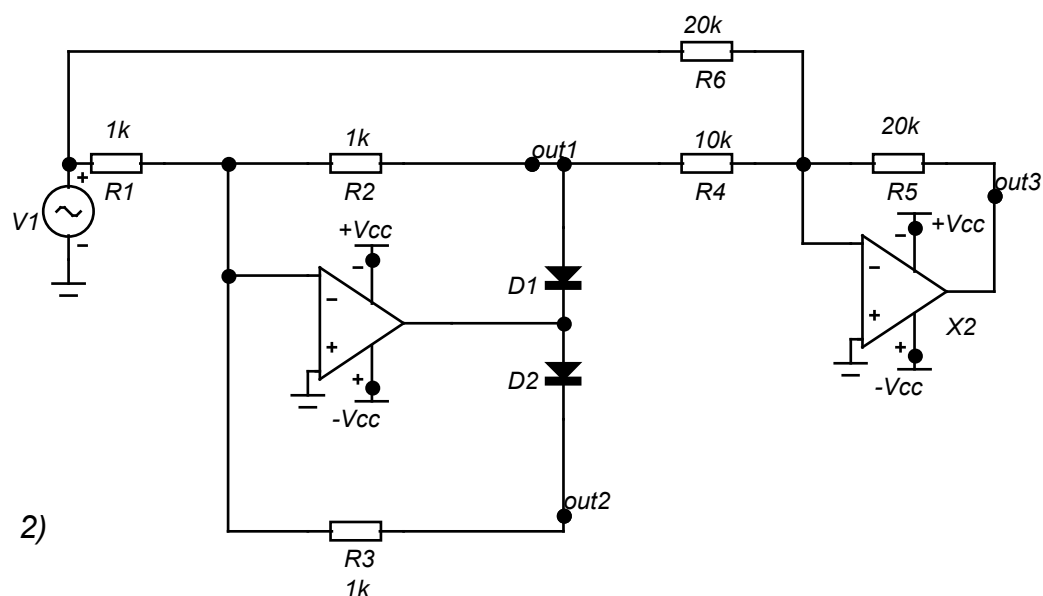
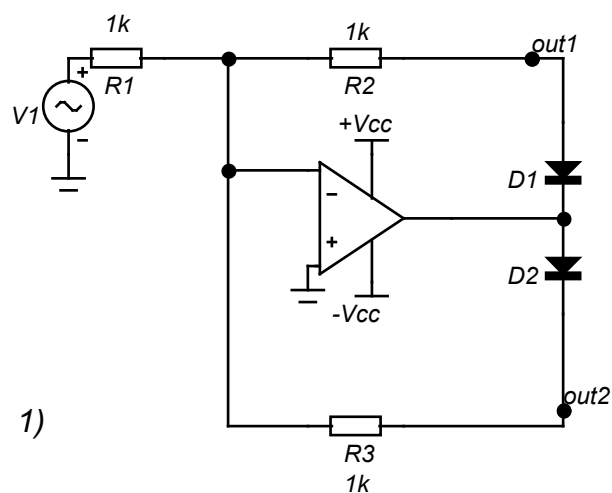
Všechna zapojení realizujte na přípravku. Nejprve zajistíte stejnosměrné napájení operačních zesilovačů a teprve pak zapojujete ostatní součástky.

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 1 kHz. 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 1 kHz, amplitudu nastavte na 1 V. Pak zvyšujte kmitočet a poznamenejte si hodnotu, při níž již výstupní napětí nebude odpovídat požadovanému průběhu.



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.

Povinné výstupy v laborátu:**➤ Počítačová i laboratorní cvičení**

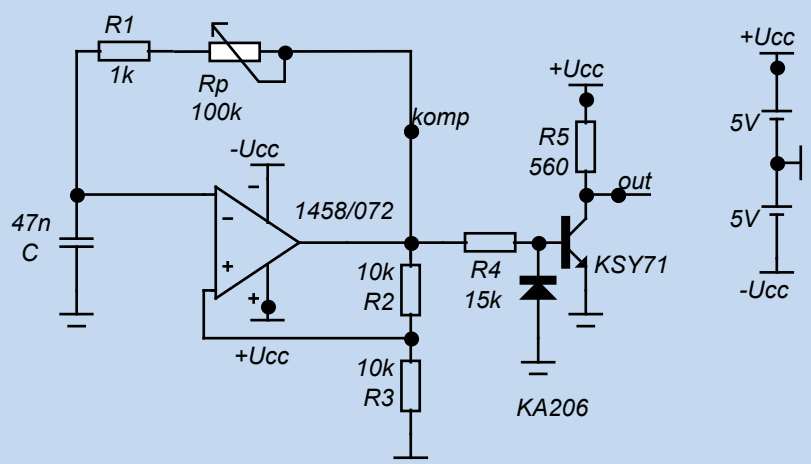
- zjištění napětí v důležitých bodech obvodu – schéma u PC, tabulka hodnot u LC,
- časové průběhy v důležitých bodech obvodu po přivedení zadaného vstupního sinusového signálu,
- časové průběhy v důležitých bodech obvodu po přivedení zadaného vstupního sinusového signálu, kde budete měnit jeho amplitudu, resp. následně kmitočet, tak aby byla patrná minimální amplituda, resp. maximální kmitočet, kdy obvod ještě uspokojivě usměřňuje,
- stejnosměrné převodní charakteristiky.
- proveďte srovnání zapojení z hlediska potřeby přesných rezistorů.

3.5 AKO a generátory signálů s operačními zesilovači

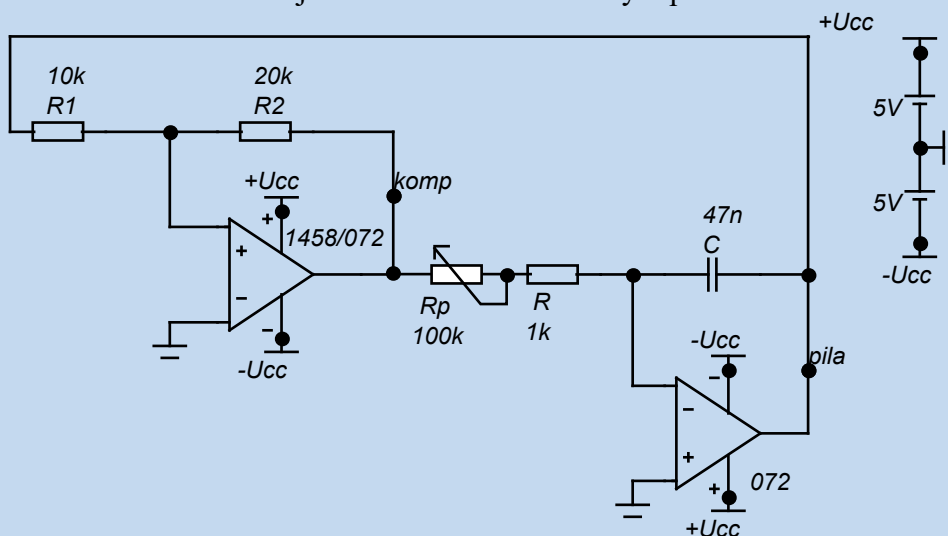
3.5.1 Cíle předběžných rozborů, návrhů a následných experimentů

Cíle předběžných rozborů a návrhů na NC:

- Porozumět funkci astabilního klopného obvodu (AKO) z **obr. 3.19**, 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 0 V a 5 V a s možností plynulé změny kmitočtu od 100 Hz do 10 kHz.
- Porozumět funkci generátoru pilovitých a obdélníkových kmitů z **obr. 3.20**, 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 100 Hz do 10 kHz.
- Ověřit možný vliv mezní rychlosti přeběhu OZ na funkci obou generátorů.



Obr. 3.19: AKO s jedním OZ a tranzistorovým převodníkem úrovně.



Obr. 3.20: Generátor pilovitých kmitů.

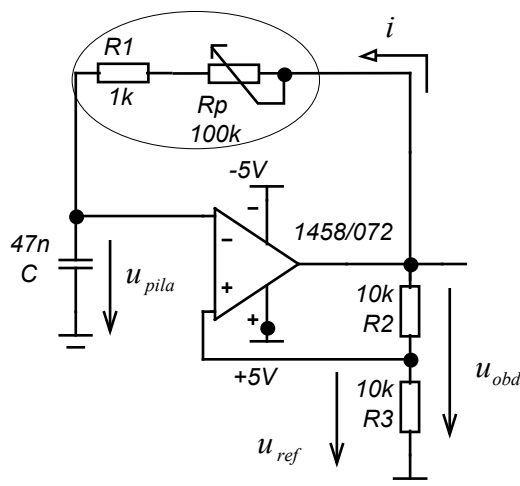
Cíle experimentů:

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

3.5.2 Rozbory a návrhyNávrh AKO z obr. 3.21.

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

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

**Obr. 3.21:** AKO.

Opakovací kmitočet generovaných signálů je

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

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

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

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

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 20 mA (maximální přípustný výstupní proud OZ typu 1458). Proto

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

Volíme s rezervou

$$R_1 = 1 k\Omega.$$

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

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

Zvolíme kapacitu z řady E12

$$C = 47 \text{ nF.}$$

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

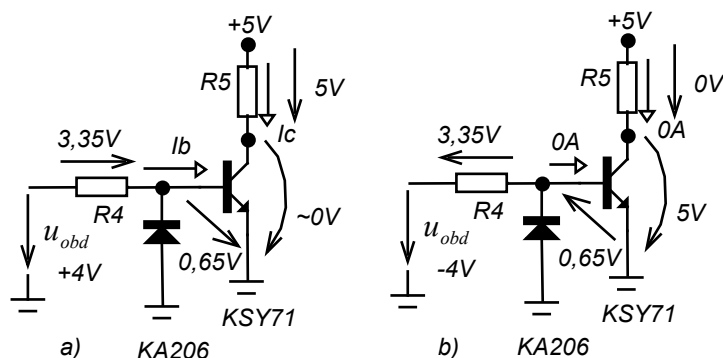
$$R_1 + R_p = 100R_1 = 100 \text{ k}\Omega \Rightarrow R_p = 99 \text{ k}\Omega.$$

Odpor potenciometru volíme z řady

$$R_p = 100 \text{ k}\Omega.$$

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

Návrh tranzistorového převodníku úrovně z obr. 3.22.



Obr. 3.22: Tranzistorový převodník úrovně z $\pm 4 \text{ V}$ na $0/5 \text{ V}$.

Vlastnosti spínacího tranzistoru KSY71:

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

Návrh pro $u_{obd} = +4 \text{ V}$ (tranzistor sepnut, obr. 3.22a):

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

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

Volíme z řady E12 vyšší hodnotu (menší proud)

$$R_5 = 560 \Omega.$$

Přepočtená hodnota kolektorového proudu bude

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

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

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

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

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

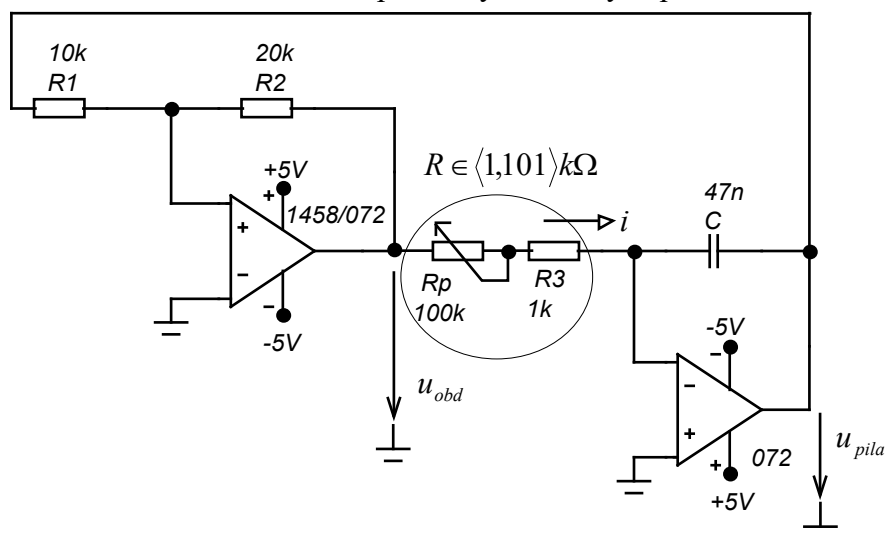
Poznámka: pokud v laboratoři zjistíte, že tranzistor nedostatečně spíná, totiž že jeho kolektorové napětí není nula, znamená to, že tranzistor má proudové zesílení ještě menší než 40. Pak je třeba zkusmo zmenšit odpor R_4 , např. na 12 k Ω .

Návrh pro $u_{obd} = -4\text{ V}$ (tranzistor rozepnut, obr. 3.22b):

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

Návrh generátoru z obr. 3.23.

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



Obr. 3.23: Navržený generátor tvarových kmitů.

Opakovací kmitočet generovaných signálů je

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

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

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

„Překlápěcí“ hladiny komparátoru jsou cca – 2 V a + 2 V a jsou dány saturačním napětím 4 V 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 20 mA, aby mohl být dodáván operačním zesilovačem. Proto

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

Volíme opět s rezervou

$$R_3 = 1 \text{ k}\Omega.$$

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

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

Zvolíme kapacitu z řady E12

$$C = 47 \text{ nF}.$$

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

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

Odpor potenciometru volíme z řady

$$R_p = 100 \text{ k}\Omega.$$

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

3.5.3 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. 5

Příprava v pracovních sešitech musí obsahovat:

1. Viz pokyny v kap. 2.2.
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 **5_1.cir** a **5_2.cir**) analyzujte simulačním programem analýzou „Transient“.

LC: Obě zapojení realizujte na přípravku. Nejprve zajistěte stejnosměrné napájení operačních zesilovačů a teprve pak zapojujte 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 $100\text{ k}\Omega$.

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

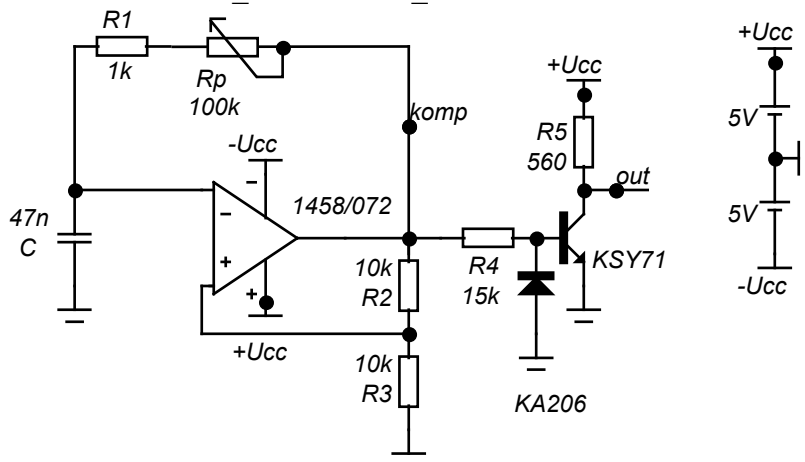
LC: V první fázi sestavte AKO bez tranzistorového převodníku úrovně. Použijte operační zesilovač typu 1458. Dvoukanálovým osciloskopem zobrazte časové průběhy na výstupu komparátoru a na kapacitoru, změřte rozkmit napětí. Změřte rozsah generovaných kmitočtů.

Poté doplňte a odzkoušejte tranzistorový převodník úrovně. V případě, že tranzistor nebude spínat na úroveň napětí 0 V, je třeba zmenšit odpor R_4 (poradte se s učitelem). Ověřte vliv mezní rychlosti přeběhu operačního zesilovače na funkci generátoru: Potenciometrem nastavte nejvyšší kmitočet 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.

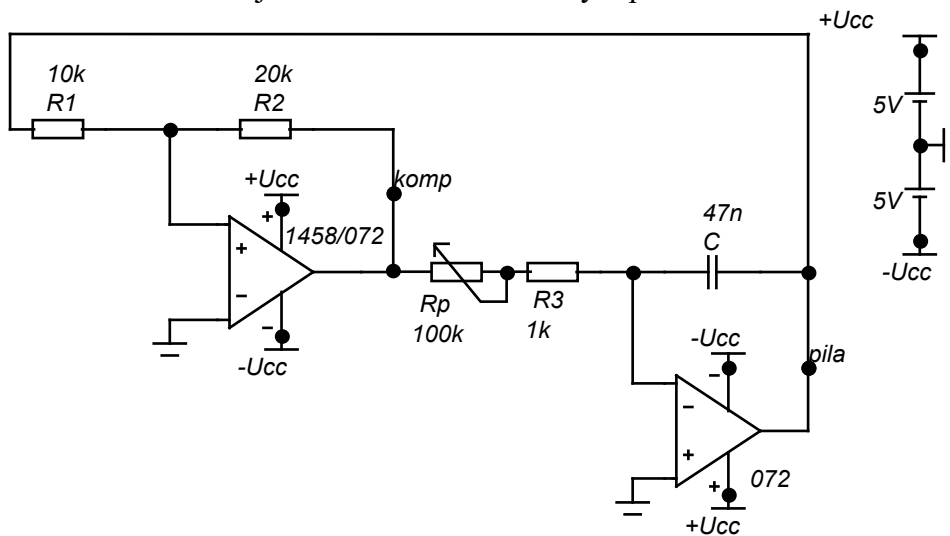
Ad 2. PC, LC: V zapojení generátoru pilovitého a obdélníkového signálu podle obr. 2 použijte v první fázi operační zesilovač typu 1458/741. Zobrazte časové průběhy na výstupu komparátoru a na výstupu integrátoru, určete rozkmit napětí a rozsah generovaných kmitočtů. Pomocí animačního módu se pokuste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

➤ Počítačová i laboratorní cvičení

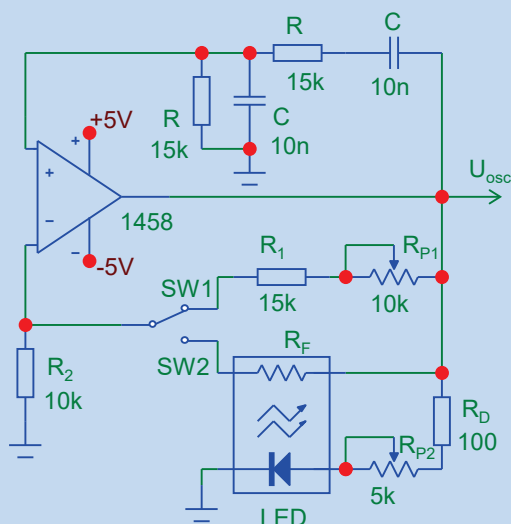
- časové průběhy v důležitých bodech obvodu, u PC využijte mód „Animate“,
- časové průběhy v důležitých bodech obvodu při změně hodnoty proměnného odporu.

3.6 Oscilátor s Wienovým článkem

3.6.1 Cíle předběžných rozborů, návrhů a následných experimentů

Cíle předběžných rozborů a návrhů na NC:

- Porozumět funkci oscilátoru z **obr. 3.24**, tvořeného neinvertujícím zesilovačem a Wienovým článkem, s možností automatického řízení zisku a stabilizací amplitudy generovaných kmitů fotorezistorem R_F a diodou LED.
- Na základě znalosti amplitudové a fázové kmitočtové charakteristiky Wienova článku a obecné podmínky pro udržení oscilací v zpětnovazebním obvodu odvodit vzorec pro kmitočet oscilačního napětí a podmínku, kterou musí splňovat odpory R_1 , R_2 a R_{P1} pro udržení kmitů v obvodu (přepínač v poloze SW1).
- Pochopit užitečnost a princip fungování automatického řízení zesílení pomocí optronu (fotorezistoru s diodou LED, přepínač v poloze SW2).
- Provést předběžný návrh všech součástí v obvodu tak, aby oscilátor generoval harmonický signál o kmitočtu 1 kHz.



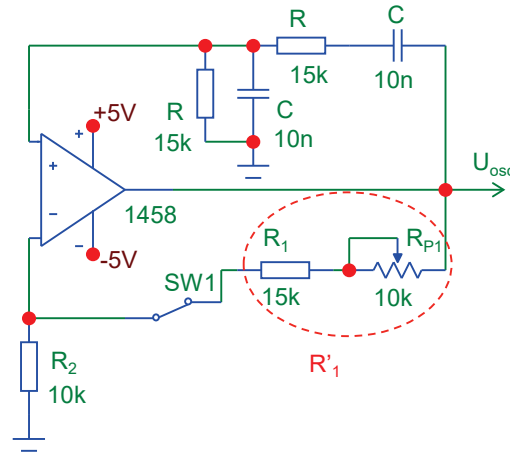
Obr. 3.24: Oscilátor s Wienovým článkem.

Cíl experimentů:

- Použít návrh z NC ke konstrukci, oživení a optimalizaci funkce oscilátoru.

3.6.2 Rozbory a návrhy

*Návrh oscilátoru v režimu bez stabilizace amplitudy (přepínač v poloze SW1, **obr. 3.25**).*



Obr. 3.25: Oscilátor bez stabilizace amplitudy kmitů.

Operační zesilovač spolu s R'_1 a R_2 tvoří neinvertující zesilovač o zesílení

$$A = 1 + \frac{R'_1}{R_2}.$$

Wienův členek, buzený z výstupu operačního zesilovače a dodávající signál zpět na vstup zesilovače se chová jako pásmová propust o maximu přenosu na kmitočtu

$$f_{osc} = \frac{1}{2\pi RC}.$$

Na kmitočtu f_{osc} Wienův členek 3x zeslabuje napětí ze svého vstupu na výstup a zachovává počáteční fázi napětí.

Ze základů teorie zpětné vazby pak vyplývá, že obvod z **obr. 3.25** může fungovat jako oscilátor za současného splnění dvou podmínek: $A = 3$, zesilovač nesmí způsobovat fázový posuv mezi svým vstupem a výstupem. Oscilátor pak generuje na svém výstupu harmonické kmito o frekvenci f_{osc} .

Ze zadání $f_{osc} = 1 \text{ kHz}$ a vzorce pro f_{osc} vypočteme časovou konstantu RC :

$$RC = \frac{1}{2\pi f_{osc}} = \frac{1}{2\pi \times 1000} \doteq 159 \mu\text{s}$$

Zvolíme kapacity C (kapacity obou kondenzátorů ve Wienovém članku) z řady E12, například

$$C = 10 \text{ nF}$$

a dopočteme R (oba odpory ve Wienovém članku)

$$R = \frac{RC}{C} \doteq \frac{159 \mu\text{s}}{10 \text{ nF}} = 15,9 \text{ k}\Omega.$$

Volíme z řady E12

$$R = 15 \text{ k}\Omega.$$

Hodnotám $15 \text{ k}\Omega$ a 10 nF odpovídá pozměněná oscilační frekvence 1061 Hz .

Z podmínky $A = 3$ navrhne rezistory pro nastavení zisku zesilovače:

$$\frac{R'_1}{R_2} = 2$$

Volíme například

$$R_2 = 10 \text{ k}\Omega.$$

Pak

$$R'_1 = 20 \text{ k}\Omega.$$

Při ožiování oscilátoru bude zapotřebí tuto hodnotu přesně dostavit tak, aby celkové zesílení bylo 3 i s ohledem na tolerance součástek. Vhodnou volbou je pevný odpor R_1 a potenciometr R_{P1} (viz **obr. 3.25**), například:

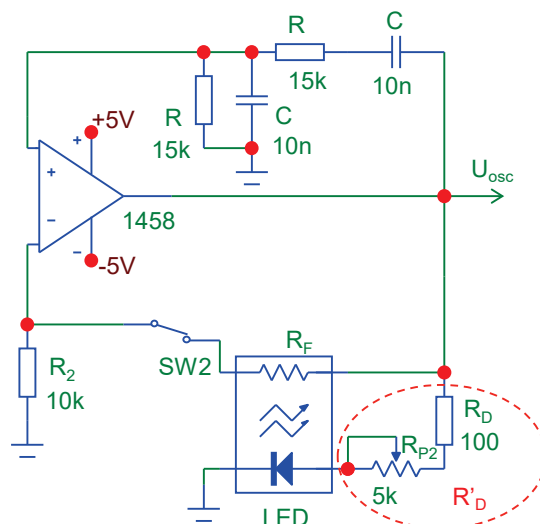
$$R_1 = 15 \text{ k}\Omega, R_{P1} = 10 \text{ k}\Omega.$$

Pokud v přípravku nebude k dispozici potenciometr 10 k Ω , ale například nejbližší vyšší 100 k Ω , pokuste se najít vhodné kompromisní řešení.

V laboratořích si ukážeme nevýhodu fixní hodnoty takto nastaveného zesílení: Přesné hodnoty 3 nikdy nedosáhneme. Menší hodnota znamená zánik kmitů. Větší hodnota znamená postupný růst kmitů až do saturace operačního zesilovače. Při zesílení „nepatrně“ větším než 3 se oscilační napětí ustálí tak, že „vrcholky“ signálu budou omezeny saturačními úrovněmi operačního zesilovače, což znamená zkreslení signálu.

Řešením je elektronicky řídit odpor R'_1 a tím i zesílení podle strategie: rostoucí napětí způsobí pokles R'_1 a naopak. Je tedy zapotřebí navrhnout příslušnou elektroniku stabilizace amplitudy kmitů.

Návrh oscilátoru v režimu se stabilizací amplitudy (přepínač v poloze SW2, **obr. 3.26**).



Obr. 3.26: Oscilátor se stabilizací amplitudy kmitů pomocí optronu.

Roli zpětnovazebního rezistoru přebírá fotorezistor R_F , jehož odpor je nepřímo úměrný světelnému toku, dopadajícímu na jeho fotocitlivou plochu. Fotorezistor je zapouzdřen spolu se svítivou diodou LED. Ta je napájena z oscilačního signálu. Silný signál znamená větší proud

diodou, větší světelný tok, menší odpor R_F a menší zesílení. Zesílení je tak nepřímo úměrné amplitudě signálu.

Poznámka: Proud dioda usměrňuje, dioda tak „svítí“ jen díky kladným úsekům napětí s kmitočtem 1 kHz. V důsledku setrvačnosti procesů reaguje odpor R_F na osvětlení spojitě a rychlé změny signálu jsou tak vyhlazovány.

Optron si sestavíme z běžně dostupného fotorezistoru a diody LED, které opticky svážeme jejich umístěním „proti sobě“ například do tmavé smršťovací bužírky. Postupujte podle pokynů učitele.

Příklad fotorezistoru: PGM 5516-MP firmy Token [7].



Model	V _{max} (VDC)	P _{max} (mW)	Ambient Temp (°C)	Spectral Peak (nm)	Photo Resistance (10Lx) (KΩ)	Dark Resistance (MΩ) _{min}	γ _{min}	Response Time (ms)	
								Rise	Decay
PGM5506-MP	100	90	-30 ~ +70	540	2 ~ 6	0.15	0.6	30	40
PGM5516-MP	100	90	-30 ~ +70	540	5 ~ 10	0.2	0.6	30	40
PGM5526-MP	150	100	-30 ~ +70	540	8 ~ 20	1.0	0.6	20	30
PGM5537-MP	150	100	-30 ~ +70	540	16 ~ 50	2.0	0.7	20	30
PGM5539-MP	150	100	-30 ~ +70	540	30 ~ 90	5.0	0.8	20	30
PGM5549-MP	150	100	-30 ~ +70	540	45 ~ 140	10.0	0.8	20	30

Odpor R_F v zapojení na **obr. 3.26** by se měl v režimu stabilizovaných oscilací “nepatrně” rozmítat kolem klidové hodnoty 20 kΩ v závislosti na síle signálu, resp. osvitu diodou LED.

Podle výše uvedené tabulky z katalogu je R_F kolem (5-10) kΩ při intenzitě osvětlení 10 lx (luxů) a “Dark resistance” je alespoň 200 kΩ. Připomeňme, že typická denní intenzita osvětlení je v rozmezí 100 lx až 10000 lx.

Měření na daném fotorezistoru ukazují tyto orientační hodnoty R_F :

Silný osvit diodou z mobilního telefonu: 25 Ω.

Zapouzdření do neprůhledného obalu: > 100 MΩ.

Běžné denní světlo: (180 -450) Ω.

Běžné denní světlo, na fotorezistor nasazena bužírka o délce 4 cm s volným koncem: 10 kΩ.

Běžné denní světlo, na fotorezistor nasazena bužírka o délce 4 cm s volným koncem, zakrývání dlaní: stovky kΩ.

Tyto údaje budou důležité pro pochopení experimentů prováděných v laboratořích.

Údaj z tabulky “Spectral Peak“ (540 nm) – největší citlivost fotorezistoru je na tuto vlnovou délku, která zhruba odpovídá zelené barvě.

Je proto vhodné (i když ne nutné) použít k experimentům obyčejnou zelenou LED diodu. Po zapouzdření do optronu by dioda měla svítit tak, aby intenzita osvětlení fotoodporu byla o něco nižší než 10 lx (aby odpor byl větší než (5-10) k Ω z tabulky).

Na **obr. 3.26** je v sérii s diodou LED potenciometr s ochranným odporem. Při vytočení potenciometru do polohy „0 Ω “ je proud diodou omezen odporem $R_D = 100 \Omega$. Analyzujte, s uvážením typické hodnoty prahového napětí LED, v jakém rozmezí je možno nastavovat proud diodou potenciometrem R_{P2} . Pokud v přípravku bude k dispozici jiný potenciometr, pokuste se najít vhodné řešení.

Zdůvodněte, proč je možné potenciometrem nastavovat amplitudu kmitů tak, aby nedocházelo k saturačnímu zkreslení signálu.

3.6.3 Návod na cvičení

Následuje návod na počítačové a laboratorní cvičení.

Oscilátor s Wienovým článkem

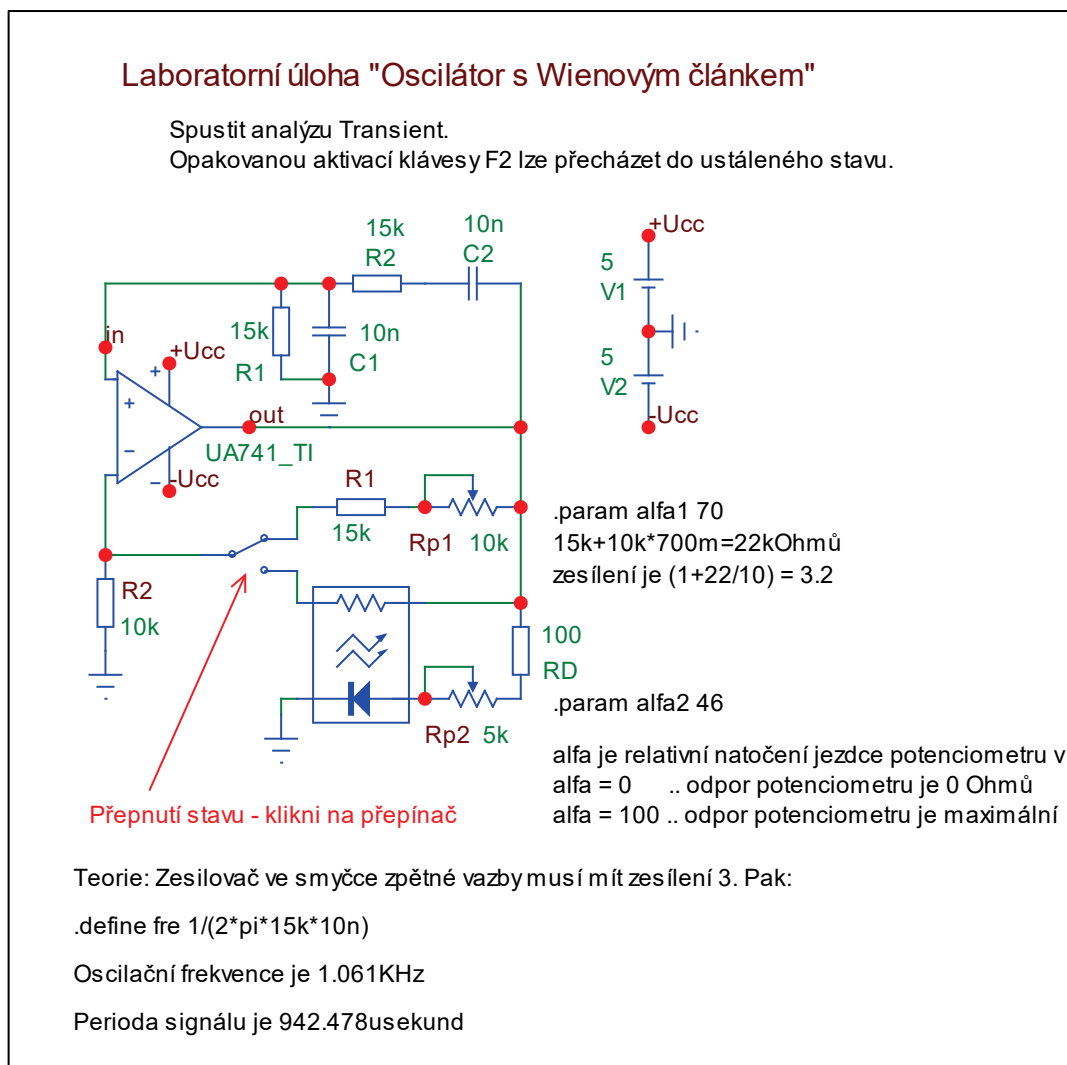
Počítačové cvičení (PC) a laboratorní cvičení (LC) č. 6

Příprava v pracovních sešitech musí obsahovat:

1. Viz pokyny v kap. 2.2.
2. Kompletní návrhové postupy a výsledky z předcházejícího numerického cvičení.

Zadání:

1. U oscilátoru na obr. 1 bez automatického řízení zesílení (přepínač v horní poloze) nastavte hraniční hodnotu R_{p1} tak, aby došlo k nasazení kmitů. Z aktuálních hodnot R_1 , R_2 a R_{p1} určete zesílení a srovnejte je s teoretickou hodnotou. Zdokumentujte časové průběhy výstupního a vstupního napětí zesilovače pro hraniční zesílení a pro zesílení překračující hraniční hodnotu. Odečtěte oscilační kmitočet a srovnejte jej s navrhovanou hodnotou.
2. U oscilátoru na obr. 1 s automatickým řízením zesílení (přepínač v dolní poloze) proveďte experimenty dle pokynů a nakonec proveďte oživení oscilátoru s realizovaným „zapouzdrěným“ optronem. Ověřte funkci nastavování amplitudy kmitů pomocí R_{p2} .
3. Srovnajte výsledky dosažené v NC, PC a LC a vysvětlete případné rozdíly.



Obr. 1. Model oscilátoru ze souboru 6_1.cir.

Pokyny k zadání:

PC: Zapojení na obr. 1 (soubor **6_1.cir**) analyzujte simulačním programem pomocí analýzy „Transient“.

LC: Zapojení realizujte na přípravku. Optron sestavte z fotorezistoru, diody LED a smršťovací bužírky dle pokynů vyučujícího.

Počítačové cvičení (práce s programem Micro-Cap)**Ad 1. Ruční nastavování zesílení pomocí R_{p1} , přepínač v horní poloze.**

Před analýzou Transient nastavte zobrazování napětí $v(in)$ a $v(out)$ podle níže uvedeného obrázku, a to tak, že v sloupci P budou vyplněny jedničky (obrázek č. 1) pouze u řádků s těmito veličinami. Vykreslování dalších veličin (počínaje proudem rezistorem R_D) tak bude potlačeno.

Page	P	X Expression	Y Expression	X Range	Y Range
	1	T	$v(IN)$	TMAX,TSTART	5,-5,1
	1	T	$v(out)$	TMAX,TSTART	5,-5,1
		T	$i(RD)$	TMAX,TSTART	AutoAlways
		T	$V(X2.ERESISTANCE)$	TMAX,TSTART	AutoAlways

Spusťte analýzu. Volbou Windows/Tile Vertical zobrazte vedle sebe okno zadání úlohy a okno s výsledky analýzy.

Pomocí grafického tahového potenciometru „ALFA1“ můžete ovládat polohu jezdce potenciometru R_{p1} (popis je v okně zadání úlohy). Vpravo od schématu se přímo zobrazují aktuální hodnoty odporu R_1 v sérii s R_{p1} a příslušné zesílení. Ověřte, že pro zesílení menší než 3 nedojde k startu oscilací. Analýza je vždy provedena do času 20 ms, ale v analýze můžete pokračovat opakovanou aktivací klávesy F2. Dále nastavte zesílení větší než cca 3,5 a ověřte, že oscilátor po přechodném ději přejde do ustáleného stavu se saturací napětí v úrovních zhruba -3 V a +3 V (zkreslení). Ověřte, že čím větší bude zesílení, tím rychleji sice přejde oscilátor do ustáleného stavu, ale za cenu většího nelineárního zkreslení.

V posledním kroku nastavte zesílení „těsně“ nad 3, např. 3,01, a opakovanou analýzou (F2) se pokuste přejít do ustáleného stavu. V ustáleném stavu pak změřte opakovací kmitočet napětí $v(out)$ a srovnajte jej s teoretickou hodnotou. Dále změřte amplitudy napětí na výstupu a vstupu zesilovače a ověřte, že zesílení je prakticky 3.

Ad 2. Automatické řízení zesílení pomocí optronu, přepínač v dolní poloze.

Před analýzou Transient nastavte zobrazování napětí $v(in)$ a $v(out)$ v obrázku č. 1, proud rezistorem R_D v obrázku č. 2, a odpor fotorezistoru v obrázku č. 3:

Page	P	X Expression	Y Expression	X Range	Y Range
	1	T	$v(IN)$	TMAX,TSTART	5,-5,1
	1	T	$v(out)$	TMAX,TSTART	5,-5,1
	2	T	$i(RD)$	TMAX,TSTART	AutoAlways
	3	T	$V(X2.ERESISTANCE)$	TMAX,TSTART	AutoAlways

Spusťte analýzu. Pomocí klávesy F2 postupně přejdete do ustáleného stavu. Časové průběhy porovnávejte pro různé polohy jezdce potenciometru R_{p2} a pokuste se porozumět souvislostem. Ověřte, že odpor fotorezistoru kolísá kolem průměrné hodnoty 20 k Ω , což znamená „jemné“ rozmitání zesílení kolem rovnovážné hodnoty 3.

Nápověda: Jak souvisí amplituda kmitů, špičková hodnota proudu LED a šířka proudových impulsů s odporem R_{P2} ? Proč?

Laboratorní cvičení (práce s přípravkem)

Ad 1. Ruční nastavování zesílení pomocí R_{p1} .

Osciloskopem sledujte napětí na výstupu operačního zesilovače. Pomocí potenciometru R_{p1} nastavte oscilátor do kmitavého režimu. Ověřte vliv polohy jezdce na činnost obvodu (nasazení/vysazení kmitů, velikost zkreslení signálu). Pečlivě vyhledejte hraniční hodnotu R_{p1} , při níž dojde k nasazení kmitů s minimálním zkreslením. Výsledný časový průběh zdokumentujte včetně změřené hodnoty kmitočtu.

Pak se pokuste pružně měnit odpor R_{p1} při současném sledování osciloskopu tak, abyste dosáhli alespoň po krátkou dobu oscilačního režimu s konstantní amplitudou, aniž by operační zesilovač saturel (tzv. biofeedback – stáváte se součástí regulační smyčky zpětné vazby: při růstu amplitudy musíte snižovat R_{p1} a tím i zesílení, při poklesu zvyšovat R_{p1}). Tuto práci přenecháme v bodu 2 elektronice.

Ad 2. Automatické řízení zesílení pomocí optronu.

V prvním kroku odstraníme z obvodu R_1 a R_{p1} a namísto nich zapojíme fotorezistor. Diodu LED zatím nebudeme potřebovat.

Chování obvodu bude záviset na druhu fotorezistoru a na momentálních světelných podmínkách v laboratoři. Abychom snížili efekt světelných podmínek, nasadíme na fotorezistor konec bužírky délky cca 4 cm nebo více.

Oscilátor by se měl rozkmitat za předpokladu, že fotorezistor je slabě osvětlen a jeho odpor je větší než 20 k Ω . Volný konec bužírky zkuste zastíňovat rukou a sledujte změnu tvaru generovaného signálu. Pokud je světelná intenzita okolí nízká, pak bude oscilátor kmitat i bez stínění. Pak zkuste naopak konec bužírky osvětlovat např. svítilnou z mobilního telefonu. Pokuste se o vysvětlení jevů, které pozorujete.

V dalším kroku doplňte zapojení o diodu LED, R_{P2} a R_D . Připravte si kratší bužírku, do níž bude možné z jedné strany nasunout tělo LED a z druhé fotorezistor. Bužírku je možné zafixovat horkovzdušnou pistolí (opatrně..). V případě potřeby bude k dispozici již vyrobený optron. Ověřte, zda se oscilátor chová podobně jako jeho model v Micro-Capu, tj. že produkuje nezkreslený signál, jehož amplitudu lze řídit pomocí R_{p2} .

Povinné výstupy v laborátu:

- Počítačová i laboratorní cvičení
- časové průběhy v důležitých bodech obvodu,
- změřený oscilační kmitočet a jeho porovnání s navrhovanou hodnotou,
- rozbor dosažených výsledků, praktické poznatky z měření, závěry.

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] Program SNAP v. 2.6. K dispozici v e-learningu.
- [6] Micro-Cap 12 – <https://www.spectrum-soft.com>
- [7] Fotorezistor PGM 5516-MP firmy Token.
<http://www.token.com.tw/pdf/resistor/cds-resistor-pgm.pdf>